Gesellschaft für Informatik e.V. (GI)

publishes this series in order to make available to a broad public recent findings in informatics (i.e. computer science and information systems), to document conferences that are organized in cooperation with GI and to publish the annual GI Award dissertation.

Broken down into
- seminars
- proceedings
- dissertations
- thematics

current topics are dealt with from the vantage point of research and development, teaching and further training in theory and practice. The Editorial Committee uses an intensive review process in order to ensure high quality contributions.

The volumes are published in German or English.

Information: http://www.gi.de/service/publikationen/lni/

ISBN 978-3-88579-976-4

This book presents outstanding dissertations in informatics of the year 2016. Every year, the German Gesellschaft für Informatik (GI), the Swiss Informatics Society (SI), the Austrian Computer Society (OCG) and the German Chapter of the ACM (GchACM) jointly give an award for an excellent dissertation that represents an important advance in informatics. The award winner is chosen in a careful selection procedure from candidates proposed by Austrian, Swiss and German universities, where each university may suggest at most one dissertation per year. The series "Ausgezeichnete Informatikdissertationen" presents these outstanding dissertations to the informatics community, as well as to the public in order to support knowledge transfer from universities to industry and society.
This volume is in German.

GI-Dissertationspreis 2016

17

GI-Edition

Lecture Notes in Informatics

Steffen Hölldobler et al. (Hrsg.)

Ausgezeichnete Informatikdissertationen 2016

Dissertations



Steffen Hölldobler et al. (Hrsg.)

Ausgezeichnete Informatikdissertationen 2016

Gesellschaft für Informatik e.V. (GI)

Lecture Notes in Informatics (LNI) - Proceedings
Series of the Gesellschaft für Informatik (GI)

Volume D-17

ISBN 978-3-88579-976-4

Volume Editors
Prof. Dr. Steffen Hölldobler
Technische Universität Dresden
01062 Dresden, Deutschland
sh@iccl.tu-dresden.de

Series Editorial Board
Heinrich C. Mayr, Alpen-Adria-Universität Klagenfurt, Austria
(Chairman, mayr@ifit.uni-klu.ac.at)
Torsten Brinda, Universität Duisburg-Essen, Germany
Dieter Fellner, Technische Universität Darmstadt, Germany
Ulrich Flegel, Infineon, Germany
Ulrich Frank, Universität Duisburg-Essen, Germany
Michael Goedicke, Universität Duisburg-Essen, Germany
Ralf Hofestädt, Universität Bielefeld, Germany
Wolfgang Karl, KIT Karlsruhe, Germany
Michael Koch, Universität der Bundeswehr München, Germany
Thomas Roth-Berghofer, University of West London, Great Britain
Peter Sanders, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Germany
Andreas Thor, HFT Leipzig, Germany
Ingo Timm, Universität Trier, Germany
Karin Vosseberg, Hochschule Bremerhaven, Germany
Maria Wimmer, Universität Koblenz-Landau, Germany

Dissertations
Steffen Hölldobler, Technische Universität Dresden, Germany
Thematics
Andreas Oberweis, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Germany

© Gesellschaft für Informatik, Bonn 2018
printed by Köllen Druck+Verlag GmbH, Bonn



This book is licensed under a Creative Commons BY-SA 4.0 licence.

Vorwort

Die Gesellschaft für Informatik e.V. (GI) vergibt gemeinsam mit der Schweizer Informatik Gesellschaft (SI) und der österreichischen Computergesellschaft (OCG) jährlich einen Preis für eine hervorragende Dissertation im Bereich der Informatik. Hierzu zählen nicht nur Arbeiten, die einen Fortschritt in der Informatik bedeuten, sondern auch Arbeiten aus dem Bereich der Anwendungen in anderen Disziplinen und Arbeiten, die die Wechselwirkungen zwischen Informatik und Gesellschaft untersuchen. Die Auswahl dieser Dissertationen stützt sich auf die von den Universitäten und Hochschulen für diesen Preis vorgeschlagenen Dissertationen. Jede dieser Hochschulen kann jedes Jahr nur eine Dissertation vorschlagen. Somit sind die im Auswahlverfahren vorgeschlagenen Kandidatinnen und Kandidaten bereits „Preisträger" ihrer Hochschule.

Die 32 Einreichungen zum Dissertationspreis 2016 belegen die Bedeutung und auch die Bekanntheit des Dissertationspreises. Wie jedes Jahr wurden die vorgeschlagenen Arbeiten im Rahmen eines Kolloquiums im Leibniz-Zentrum für Informatik Schloss Dagstuhl von den Nominierten vorgestellt. Für die Mitglieder des Nominierungsausschusses war das persönliche Zusammentreffen mit den Nominierten der Höhepunkt der Auswahlarbeit, und für die Nominierten hat das Kolloquium sicher eine Reihe neuer Erfahrungen und wissenschaftlicher Kontakte geboten. Das wissenschaftlich sehr hohe Niveau der Vorträge, die regen Diskussionen und die angenehme Atmosphäre in Schloss Dagstuhl wurde von allen Teilnehmerinnen und Teilnehmern des Kolloquiums sehr begrüßt.

Wie in jedem Jahr fiel es dem Nominierungsausschuss sehr schwer, eine Dissertation auszuwählen, die durch den Preis besonders gewürdigt wird. Mit der Präsentation aller vorgeschlagenen Dissertationen in diesem Band wird die Ungerechtigkeit, eine aus mehreren ebenbürtigen Dissertationen hervorzuheben, etwas ausgeglichen. Dieser Band soll zudem einen Beitrag zum Wissenstransfer innerhalb der Informatik und von den Universitäten und Hochschulen in die Bereiche Technik, Wirtschaft und Gesellschaft leisten.

Die beteiligten Gesellschaften zeichnen Frau Dr. rer. nat. Stefanie Mueller für ihre hervorragende Dissertation „Interacting with Personal Fabrication Devices" und Herrn Dr. rer. nat. Sebastian Wild für seine hervorragende Dissertation „DualPivot Quicksort and Beyond: Analysis of Multiway Partitioning and Its Practical Potential" mit dem Dissertationspreis 2016 aus.

Frau Mueller hat eine ingenieur-wissenschaftliche Arbeit im Bereich Mensch-Maschine-Kommunikation mit neuen und sehr kreativen Ideen verfasst. Die Arbeit verknüpft verschiedene Teilgebiete der Informatik, betritt Neuland und hat ein hohes Forschungspotential.

Herr Wild hat eine analytische Arbeit auf höchstem Niveau vorgelegt, die exzellent geschrieben und grafisch aufbereitet ist. Er schafft es, reale Phänomene bei der Ausführung diverser Varianten von Quicksort geeignet zu modellieren und mit komplexen Techniken theoretisch exakt zu analysieren, wobei insbesondere der Einfluss moderner Hardware präzise beschrieben wird.

Mit dieser Preisverleihung würdigen die beteiligten Gesellschaften – die Gesellschaft für Informatik e.V. (GI), die Schweizer Informatik Gesellschaft (SI) und die österreichische

Computergesellschaft (OCG) - zwei herausragende wissenschaftliche Arbeiten, die auf dem Gebiet der Informatik nennenswerten Fortschritt erzielen.

Ein besonderer Dank gilt dem Nominierungsausschuss, der sehr effizient und konstruktiv zusammengearbeitet hat. Bei Frau Emmanuelle-Anna Dietz Saldanha möchte ich mich für die Unterstützung bei der Entgegennahme der vorgeschlagenen Dissertationen, für die Organisation des Kolloquiums sowie für die Zusammenstellung und Anpassung der Beiträge an das Format der GI-Edition Lecture Notes in Informatik (LNI) bedanken. Für die finanzielle Unterstützung des Nominierungskolloquiums sei den beteiligten Gesellschaften gedankt. Die Gastfreundlichkeit und die hervorragende Bewirtung in Dagstuhl trugen zum Erfolg des Kolloquiums bei, wofür ich mich an dieser Stelle ebenfalls herzlich bedanke.

Steffen Hölldobler
Dresden im Dezember 2017



Kandidaten für den GI-Dissertationspreis 2016

Dr. Arzt, Steven	Technische Universität Darmstadt
Dr.-Ing. Boruszewski, Olga	Leibniz Universität Hannover
Dr.techn. MSc De Haan, Ronald	Technische Universität Wien
Dr. rer. nat. Degen, Christoph	Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn
Dr. Eckhoff, David	Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
Dr.-tech. Dipl.-Ing. Egarter, Dominik Daniel	Alpen-Adria-Universität Klagenfurt
Dr. Forster, Christian	Universität Zürich
Dr. Gageik, Nils	Julius-Maximilians-Universität Würzburg
Dr.-Ing. Günther, Tobias	Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
Dr. Häne, Christian	ETH Zürich
Dr. Jubran, Oday	Carl von Ossietzky Universitaet Oldenburg
Dr. Kellnhofer, Petr	Universität des Saarlandes
Dr. rer. nat. Kenter, Tobias	Universität Paderborn
Dr. Klarl, Annabelle	Ludwig-Maximilians-Universität München
Dr. Kling, Christoph Carl	Universität Koblenz-Landau
Dr. Köhler, Stefan	Eberhard Karls Universität Tübingen
Dr. rer. nat. Kulik, Alexander	Bauhaus-Universität Weimar
Dr. rer. nat. Landhäußer, Mathias	Karlsruher Institut für Technologie
Dr.-Ing. Lenhardt, Jörg	FernUniversität in Hagen
Dr. Lerche, Lukas	TU Dortmund
Prof. Dr. Mueller, Stefanie	Universität Potsdam
Dr.-Ing. Neumann, Thomas	Technische Univerität Braunschweig
Dr. rer. nat. Roos, Stefanie	Technische Universität Dresden
Dr. Runge, Torsten	Universität Hamburg
Dr.-Ing. Smeddinck, Jan	Universität Bremen
Dr. Steigmiller, Andreas	Universität Ulm
Dipl.-Ing. Dr.techn., BSc Stettinger, Martin	Technische Universität Graz
Dr. rer. nat. Terboven, Christian	RWTH Aachen University
Dr. von Rhein, Alexander	Universität Passau
Prof. Dr. Wählisch, Matthias	Freie Universität Berlin
Dr. Weiler, Andreas	Universität Konstanz
Dr. rer. nat. Wild, Sebastian	Technische Universität Kaiserslautern

Mitglieder des Nominierungsausschusses für den GI-Dissertationspreis 2016



Von links nach rechts:

Prof. Dr.-Ing. Felix Freiling	Universität Erlangen-Nürnberg
Prof. Dr. Gustaf Neumann	Wirtschaftsuniversität Wien
Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Effelsberg	Universität Mannheim
Prof. Dr. Steffen Hölldobler (Vorsitzender)	Technische Universität Dresden
Prof. Dr. Sabine Süsstrunk	École Polytechnique Fédérale de Lausanne
Prof. Dr. Hans-Peter Lenhof	Universität des Saarlandes
Prof. Dr. Paul Molitor	Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg
Prof. Dr. Myra Spiliopoulou	Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
Prof. Dr. Rüdiger Reischuk (nur Computer)	Universität zu Lübeck

Nicht im Bild:

Prof. Dr. Abraham Bernstein	Universität Zürich
Prof. Dr. Nicole Schweikardt	Humbold-Universität zu Berlin

Inhaltsverzeichnis

Arzt, Steven
Statische Datenflussanalyse für Android-Anwendungen 11

Boruszewski, Olga
Unterstützung der Koexistenz von agilen und traditionellen Anforderungsartefakten 21

De Haan, Ronald
Parametrisierte Komplexität in der polynomiellen Hierarchie 31

Degen, Christoph
Finite Punktprozesse und deren Anwendung im Target Tracking 41

Eckhoff, David
Simulation von Privatsphärenschutz in Fahrzeug-Ad-hoc-Netzen 51

Egarter, Dominik
Load Disaggregation Anwendungen basierend auf Wirkleistungsmessungen 61

Forster, Christian
Visuelle Odometrie und dichte Rekonstruktion fr mobile Roboter 71

Gageik, Nils
Autonome Quadrokopter zur Innenraumerkundung AQopterI8 Forschung und Entwicklung 79

Günther, Tobias
Sichtbarkeitsoptimierung und Massebehaftete Partikel in der Strömungsvisualisierung 89

Häne, Christian
Semantische 3D Modellierung aus Bildern mit geometrischem Vorwissen 99

Jubran, Oday
Rekurrenz in Selbststabilisierung: Theorie, Verifikation und Anwendung 109

Kellnhofer, Petr
Perzeptionelle Modellierung für stereoskopische 3D 119

Kenter, Tobias
Rekonfigurierbare Beschleuniger in der Welt von allgemeinen Rechenaufgaben . . 129

Klarl, Annabelle
HELENA - Handhabung massiver verteilter Systeme mit ELaborierten ENsemble Architekturen 139

Kling, Christoph
Neue Wahrscheinlichkeitsmodelle für Kontextinformationen im WWW 149

Köhler, Stefan
Reichweitenoptimierende Fahr- und Betriebsstrategien für Elektrofahrzeuge 159

Kulik, Alexander
Benutzungsschnittstellen für Kooperation 169

Landhäußer, Mathias
Eine Architektur zur Programmsynthese aus natürlicher Sprache 179

Lenhardt, Jörg
Energieeffiziente Verarbeitung fein granular verteilbarer Lasten auf heterogenen Rechnerverbünden 189

Lerche, Lukas
Implizites Feedback in Empfehlungssystemen 199

Mueller, Stefanie
Interaktionskonzepte für Personal Fabrication Geräte 209

Neumann, Thomas
Rekonstruktion, Analyse und Editierung dynamisch deformierter 3D-Oberflächen 219

Roos, Stefanie
Analyse und Verbesserung von Routingprotokolle für Friend-to-Friend Overlays 229

Runge, Torsten
Modell-basierte Leistungsbewertung und Optimierung von Multi-Core-Architekturen zur Paketverarbeitung in Kommunikationsnetzen . . 239

Smeddinck, Jan
Richtig Herausfordernd: Anpassbarkeit und Adaptivität in bewegungsbasierten Gesundheitsspielen 249

Steigmiller, Andreas
Optimierung von tableaubasierten Schlussfolgerungssystemen

für ausdrucksstarke Beschreibungslogiken 259

Stettinger, Martin
Empfehlungstechnologien für Gruppenentscheidungen 269

Terboven, Christian
Abstraktionen zur performanten Programmierung von Multi-Core Architekturen mit hierarchischem Speicher 279

von Rhein, Alexander
Analysestrategien für konfigurierbare Systeme 289

Wählisch, Matthias
Messung und Implementierung von Internet-Backbone-Sicherheit: Aktuelle Herausforderungen, aufkommender Einsatz und zukünftige Entwicklungen 299

Weiler, Andreas
Design und Evaluation von Verfahren zur Ereigniserkennung in Sozialen Datenströmen 309

Wild, Sebastian
Quicksort mit zwei Pivots und mehr: Eine mathematische Analyse von Mehrwege -Partitionierungsverfahren und der Frage, wie Quicksort dadurch schneller wird 319

Statische Datenflussanalyse für Android-Anwendungen[1]

Steven Arzt[2]

Abstract: Viele Aufgaben des täglichen privaten und geschäftlichen Lebens werden heute über mobile Systeme durchgeführt. Kalender, Aufgabenliste, Webbrowser, Navigationsgerät und andere sind in Form des Smartphones immer verfügbar und mit den aktuellsten Daten des Benutzers synchronisiert. *Apps* erweitern die Funktionalität der Geräte weiter. Während Smartphones unseren Alltag massiv erleichtern, werfen sie auch neue Fragen zu Datenschutz und Privatsphäre auf. Aus dem immer verfügbaren Daten lassen sich bspw. leicht Persönlichkeitsprofile ableiten. In dieser Arbeit stellen wir ein Technik vor, mit welcher automatisiert Datenflüsse in Android-Apps erkannt werden. Gegeben eine beliebige App listet das FLOWDROID-Werkzeug auf, welche Daten von dieser App abgerufen werden, wie diese Daten in der App transformiert werden, und wohin die Daten gesendet werden. Dadurch lassen sich unerwartete Datenlecks effizient erkennen, bevor die App auf dem Gerät installiert wird und Zugriff auf die sensitiven Daten des Benutzers erhält.

1 Einführung

Smartphones sind für Millionen von Menschen zu täglichen Begleitern geworden, mit den sie sowohl ihr privates als auch ihr geschäftliches Leben organisieren. An jedem Ort und zu jeder Zeit Zugriff auf Daten wie den Terminkalender oder das Adressbuch zu haben, gilt heute als selbstverständlich. Sensordaten wie die GPS-Position und der im Gerät verbaute Kompass helfen Benutzern, durch die reale Welt zu navigieren. Mit zusätzlichen Programmen, sogenannten *Apps*, können Benutzer die Funktionalität ihres Geräts zudem erweitern. Apps werden in einem offenen Ökosystem von verschiedensten Anbietern und Entwicklern vertrieben. Alle Daten an einem Ort zu haben, auf einem Gerät, das immer verfügbar und immer verbunden ist, bietet dem Benutzer zweifellos ein hohes Maß an Komfort. Auf der anderen Seite wirft es jedoch auch neue Fragen zu Datenschutz und Privatsphäre auf. Der Endnutzer verfügt kaum über Möglichkeiten, sich darüber zu informieren, wie Apps mit seinen Daten tatsächlich umgehen und auch die Betreiber der App Stores haben nur begrenzte Kontrolle über die auf ihren Plattformen vertriebenen Apps.

Statische Datenflussanalyse ist eine Technik, mithilfe derer automatisiert Datenflüsse in Programmen erkannt werden können. Bisherigen Techniken fehlt jedoch entweder die Unterstützung für die spezifische Semantik der Android-Plattform oder sie liefern keine hinreichende Genauigkeit, Vollständigkeit, Skalierbarkeit oder Geschwindigkeit. In dieser Arbeit stellen wir daher Techniken zur statischen Datenflussanalyse vor, mit denen reale Android-Apps mit großen Codemengen effizient analysiert werden können, auch wenn diese nur im Binärcode vorliegen. Wir präsentieren das FLOWDROID-Werkzeug [Ar14], welches präzise und weitestgehend vollständige Datenflüsse aus populären Apps wie Facebook, PayPal und LinkedIn extrahiert. Die Ergebnisberichte von FLOWDROID helfen

[1] Englischer Titel der Dissertation: “Static Data Flow Analysis for Android Applications”

[2] Fraunhofer SIT, Steven.Arzt@sit.fraunhofer.de

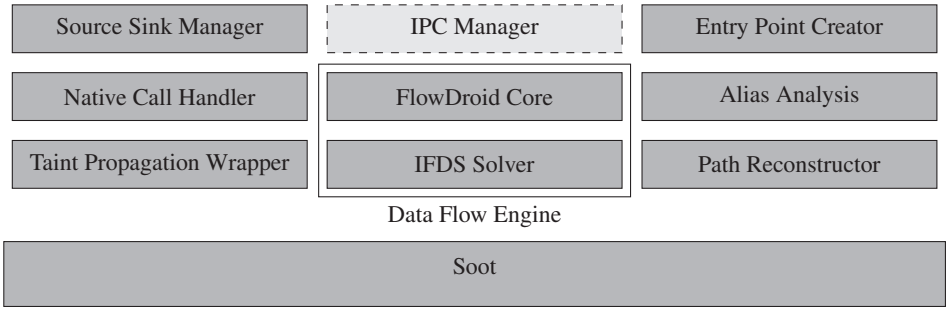


Abb. 1: Architektur von FLOWDROID

App Store-Betreibern dabei, maliziöse und unsichere Apps aus ihren Stores auszuschließen. Store-Betreiber können für alle Entwickler verbindliche Grundsätze der Datennutzung festlegen und die Apps in ihrem Store mit FLOWDROID auf die Einhaltung dieser Regeln hin überprüfen. Klare und einheitliche Regelungen für die Datennutzung leisten einen wesentlichen Beitrag zur Verbesserung der digitalen Souveränität des Benutzers.

2 FLOWDROID

FLOWDROID ist ein Werkzeug für die statische Datenflussanalyse auf Android-Apps und Java-Programmen. Da für viele Apps oder Programme von Drittanbietern kein Quelltext zur Verügung steht, analysiert FLOWDROID ausschließlich den Binärcode. Gegeben eine Spezifikation von Quellen und Senken, ermittelt FLOWDROID sämtliche Verbindungen zwischen diesen Quellen und Senken. Eine Quelle ist eine Codeposition, an der sensitive Informationen gelesen werden, beispielsweise ein Zugriff auf das Adressbuch. Eine Senke ist eine Codeposition, an der Informationen das Gerät verlassen, beispielsweise als SMS-Nachricht. Neben der Information, von welcher Quelle Daten in welche Senke fließen, erhält der Analyst zusätzlich noch den Pfad der Daten durch das Programm, d.h. die Liste der Programmanweisungen, welche die Daten auf dem Weg von der Quelle zur Senke weiterreichen. Ein solcher Pfad kann als Ausgangspunkt für weitere Analysen dienen.

2.1 Architektur

Um die Wiederverwendbarkeit zu fördern, ist FLOWDROID modular aufgebaut. Sein Kern stellt die Datenflussanalyse als solche bereit und abstrahiert von allen plattformabhängigen Modellen oder Algorithmen über offene Schnittstellen. Der Kern bietet für jede Schnittstelle eine Standardimplementierung, welche die Semantik normaler Java-Programme abbildet. Die in Abschnitt 3 beschriebene FLOWDROID-Erweiterung für Android stellt alternative Implementierungen bereit, welche sämtlichen Android-spezifischen Verfahren und Modelle kapseln. Auch andere Forschungsgruppen können diese Schnittstellen nutzen, um aufbauend auf dem FLOWDROID Open Source-Werkzeug eine eigene Datenflussanalyse oder Unterstützung für eine neue Plattform zu implementieren.

Abbildung 1 zeigt die Architektur von FLOWDROID. Alle Komponenten von FLOWDROID basieren auf dem Soot-Rahmenwerk [La11], welches den binären Code der Anwen-

dung in die Jimple-Zwischensprache umwandelt [VH98]. Auf dieser Zwischensprache werden anschließend alle weiteren Analyseschritte durchgeführt. Die Datenflussanalyse ist als IFDS-Problem nach Reps, Horwitz und Sagiv [RHS95] formuliert. Von IFDS erbt FLOWDROID Kontext- und Flusssensitivität. Die Datenflussanalyse propagiert Marker, sogenannte Taints, durch den Kontrollflussgraphen des Programms. Ein solcher Taint legt fest, bei welcher Programmanweisung welche Variablen und Felder sensitive Daten enthalten. Durch die Verwendung von *Access Paths* als primäre Abstraktion für Taints stellt FLOWDROID Objektsensitivität sicher. Access Paths bedeuten, dass nicht nur der Fluss von Variablenwerten oder Feldwerten als Ganzes durch das Programm verfolgt werden kann, sondern eine Kette von Dereferenzierungen, z.B. `a.b.c.d`. Diese Technik erhöht die Präzision des Ansatzes gerade bei komplexen, verschachtelten Datenstrukturen signifikant, da z.B. Zugriffe `a.b.c.e` nicht zu falsch-positiven Ergebnissen führen können, wenn nur `a.b.c.d` als sensitiv anzusehen ist. Während diese Architektur eine Grundlage für eine sehr präzise Analyse liefert, stellen sich im Detail viele Herausforderungen. In Abschnitt 2.2 beschreiben wir beispielsweise eine speziell für FLOWDROID entwickelte Aliasanalyse, die sicherstellt, auch bei der Analyse von Heap-Objekten keine Präzision einzubüßen. Auf die Behandlung von Bibliotheken wird in Abschnitt 4 eingegangen.

Die IFDS-Formulierung des Datenflussproblems stellt den FLOWDROID *Core* dar. Zusammen mit dem Algorithmus zum Lösen des IFDS-Problems, dem Solver, bildet es die *Data Flow Engine*. Dieser Kern ist für alle Analyseziele (Java, Android, eventuell zukünftig weitere) gleich. Aus Performancegründen beinhaltet FLOWDROID einen eigenen, spezialisierten Solver namens *Fast Solver*. Dieser spezialisiert die IFDS-Formulierung auf die Architektur von FLOWDROID und implementiert Techniken zum automatischen Erkennen und Ausfiltern irrelevanter Taints. Je früher ein Taint nicht mehr weiter durch den Kontrollflussgraphen des Programms propagiert wird, desto weniger oft muss er bearbeitet werden. Aufgrund der Struktur von Kontrollflussgraphen sind solche Effekte exponentiell. Im Vergleich zu bestehenden Solvern [Bo12] benötigt der Fast Solver nur halb soviel Arbeitsspeicher und weniger als ein Drittel der Rechenzeit.

2.2 Aliasanalyse

Eine präzise Datenflussanalyse wie FLOWDROID benötigt eine ebenso präzise Aliasanalyse, um Beziehungen zwischen Heap-Objekten zu erkennen. Bestehende Aliasanalysen sind aus mehreren Gründen ungeeignet. Sie unterstützen keine Access Paths, sondern referenzieren lediglich Variablen oder einzelne Felder. Dies bedeutet gegenüber der restlichen Analyse einen massiven Verlust an Genaugkeit. Zudem ist der klassische Anwendungsfall der Aliasanalyse eine binäre Entscheidung: Können zwei Variablen zur Laufzeit auf dieselbe Speicherposition verweisen? Eine Datenflussanalyse muss hingegen, sobald sensitive Daten an eine Speicherposition geschrieben werden, sämtliche anderen Variablen *auflisten*, die auf dieselbe Speicherposition zeigen, und diese ebenfalls durch das Programm verfolgen. Mit dem klassischen binären Ansatz ließe sich dies nur durch eine große Menge an Anfragen simulieren, vereinfacht ausgedrückt durch einen Abgleich aller Paare aus zwei Variablen. Hierdurch entsteht jedoch ein Berechnungsaufwand, der einer Skalierbarkeit der Datenflussanalyse für große Programme entgegensteht.

```
1  void main() {
2    Data p = new ..., p2 =
         new ...
3    taintIt(source(), p);
4    leak(p.f);
5
6    taintIt("public", p2);
7    leak(p2.f);
8  }
9  void taintIt(String in,
       Data out) {
10   x = out;
11   x.f = in;
12   leak(out.f);
13 }
```

List. 1: Quelltext eines Aliasproblems

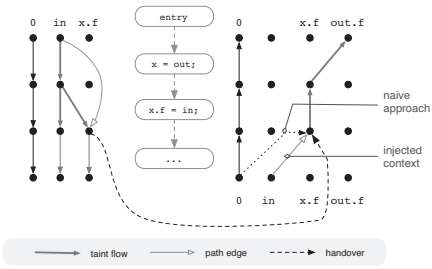


Abb. 2: Taintgraph des Aliasproblems

Um mit verschiedenen Aliasanalysen experimentieren zu können, ist auch dieser Teil von FLOWDROID wie in Abbildung 1 dargestellt vom Kern des Systems über Schnittstellen entkoppelt. Die präzise kontext- und flusssensitive Aliasanalyse von FLOWDROID wurde von Andromeda [Tr13] inspiriert und als zusätzliches IFDS-Problem implementiert. FLOWDROID löst damit zwei IFDS-Probleme: Eine vorwärts gerichtete (d.h. in Richtung des Kontrollflusses des Zielprogramms) verlaufende Datenflussanalyse und eine in entgegengesetzter Richtung, als "rückwärts" verlaufende Aliasanalyse. Letztere prüft, ob vor der Zuweisung eines sensitiven Werts an ein Heap-Objekt bereits Aliase für dieses Heap-Objekt definiert wurden. Sobald die Rückwärtsanalyse einen solchen Alias findet, erzeugt sie einen entsprechenden Taint und übergibt ihn an die normale Vorwärtsanalyse für Datenflüsse. Ab diesem Zeitpunkt wird der Alias wie jeder andere Taint behandelt und entsprechend vorwärts weiter propagiert. Diese Architektur der verschränkten IFDS-Probleme ermöglicht, für Alias- und Datenflussanalyse dieselben Abstraktionen zu verwenden, wodurch ein Präzisionsverlust vermieden wird. Zudem können beide IFDS-Probleme parallel zueinander ausgeführt werden. In FLOWDROID werden die Arbeitselemente beider Analysen auf Worker verteilt, die sämtliche im System zur Verfügung stehenden CPU-Kerne ausnutzen, wodurch die Skalierbarkeit auf modernen Computern massiv verbessert wird.

Codebeispiel 1 zeigt ein Programm, bei dem in Zeile 4 ein Datenleck auftritt, nicht aber in Zeile 7, obwohl der Datenwert in beiden Fällen zuvor durch dieselbe Methode `taintIt()` fließt. In einem Fall handelt es sich jedoch um einen konstanten, nicht sensitiven Wert. FLOWDROID kann diese beiden Fälle präzise unterscheiden. Abbildung 2 zeigt grafisch, wie die beiden IFDS-Probleme ineinander greifen. Ein durchgehender Pfeil bedeutet, dass das Ziel nach der Ausführung der aktuellen Anweisung genau dann sensitive Daten enthält, wenn der Ursprung mindestens eines Pfeils auf diesen Access Path vor der Anweisung bereits sensitive Daten enthielt. Die Pfeile bilden somit einen Graphen, entlang dessen Kanten eine Markierung "Wert ist sensitiv" übertragen wird. Auf der linken Seite sieht man zuerst über die roten Pfeile die normale IFDS-Datenflussanalyse von FLOWDROID. Der gestrichelte Pfeil von der linken auf die rechte Seite zeigt, dass die Aliasanalyse direkt nach der Zuweisung sensitiver Daten an das Heap-Objekt gestartet wird. Dabei wird die Taintabstraktion auf dem Zielfeld `x.f` an den anderen Solver übergeben, der die auf der

rechten Seite dargestellete rückwärtsgerichtete IFDS-Aliasanalyse ausführt. Dieses IFDS-Problem ermittelt den Alias `out.f`. In Summe wird eine Verbindung von `in`, dem ersten Parameter der Methode, und `out.f`, einem Feld des zweiten Parameters, hergestellt. Werden sensitive Daten über den ersten Parameter eingelesen, sind diese nach Rückkehr der Methode auch über das Feld `f` des zweiten Parameters abrufbar durch den Alias.

Bei jeder solchen Übergabe von Taintabstraktionen zwischen den beiden Solvern wird der Kontext beibehalten. Genau genommen teilen sich beide Analysen eine gemeinsame Mengen von Kontexten. Im Beispiel sorgt dies dafür, dass `in` mit dem Feld verbunden wird und nicht der sogenannte *Zero Fact*, die Tautologie. Semantisch bedeutet dies, dass besagtes Feld nur in diesem Fällen sensitive Daten enthält, wenn diese an den ersten Parameter übergeben wurde. Ohne diesen Kontext würde im Beispiel der zweite Parameter der Funktion `taintIt` immer als sensitiv angesehen werden, obwohl der Aufruf in Zeile 7 nur einen konstanten Text verwendet. Dies würde zu einem falsch-positiven Ergebnis führen.

2.3 Pfadrekonstruktion

Das Ziel einer Datenflussanalyse ist es, Verbindungen zwischen Quellen und Senken zu ermitteln. In FLOWDROID werden hierzu, wie im vorherigen Abschnitt beschrieben, entlang des Datenflussgraphen Taints von der Quelle zur Senke propagiert. Eine triviale Möglichkeit wäre, mit jedem Taint die Information zu übertragen, aus welcher Quelle die entsprechenden sensitiven Informationen stammen. Die hätte jedoch zur Folge, dass äquivalente Taints, die lediglich aus unterschiedlichen Quellen stammen, nicht zusammengefasst werden könnten. Würde dieselbe Methode im Code mehrfach verwendet, müsste sie für jede Art von sensitiven Daten neu analysiert werden, obwohl ihre Funktionsweise immer dieselbe ist. Da dies ineffizient wäre, abstrahiert FLOWDROID in den propagierten Taints von der konkreten Quelle. Stattdessen enthält jeder Taint einen Verweis auf seinen Vorgänger, also den Taint, der an der vorherigen Programmanweisung gültig war. Das Ergebnis der Datenflussanalyse ist damit ein gerichteter Graph. Taints an Quellen haben darin keine Vorgänger. Für jeden Taint an einer Senke wird der Graph in einem zweiten Schritt rückwärts durchsucht, um die zugehörige(n) Quelle(n) zu finden. Dieses Verfahren wurde von FlowTwist [Le14] inspiriert und für FLOWDROID weiterentwickelt, um kompatibel mit mehreren parallelen Solvern mit unterschiedlicher Analyserichtung zu sein.

2.4 Codeoptimierung

Um die Präzision der Datenflussanalyse weiter zu steigern, optimiert FLOWDROID den App-Code vor der eigentlichen Analyse. Hierzu werden konstante Werte interprozedural entlang des Kontrollflussgraphen propagiert. Eine konservative Analyse stellt fest, ob es für eine Variable, einen Parameter eines Methodenaufrufs, oder einen Rückgabewert einer Methode lediglich einen konkreten konstanten Wert geben kann. Ist dies der Fall, wird das Codekonstrukt durch diesen konstanten Wert ersetzt. Hierfür erweitert FLOWDROID bereits im Soot-Rahmenwerk enthaltene intraprozedurale Techniken. Dabei werden auch einfache logische und arithmetische Berechnungen ausgewertet. Sind alle Konstanten in den Code eingebettet, werden Bedingungen soweit möglich vereinfacht. Hierdurch kann

Code, der beispielsweise nur in einer Debug-Umgebung ausgeführt wird, die im Produktionscode niemals aktiviert wird, als unerreichbar erkannt und entfernt werden.

3 Statische Datenflussanalyse für Android

Die bisher beschriebenen Funktionen von FLOWDROID sind generisch und wurden am Beispiel von Java-Code demonstriert. Android-Apps unterscheiden sich signifikant von Java-Programmen. Letztere verfügen über eine `main()`-Methode, welche von der JVM als Aufführungsumgebung aufgerufen wird. Im Wesentlichen arbeiten Java-Programmen ab diesem Zeitpunkt unabhängig von ihrer Ausführungsumgebung, welche nur noch zur bestimmte Laufzeitdienste bereitstellt. In Android hingegen sind Apps sehr stark in die Ausführungsumgebung integriert. Als Plugins erweitern sie vom Rahmenwerk zur Verfügung gestellte Basisklassen und überschreiben die darin enthaltenen Methoden. Das Betriebssystem kann diese Methoden direkt aufrufen, um Apps oder auch einzelne Komponenten innerhalb einer App zu steuern. Zudem erhält die Anwendung Statusinformationen wie z.B. Hinweise auf niedrige Batteriestände oder eingehende SMS-Nachrichten.

3.1 Lifecycles und Systemmodelle

Android unterstützt vier verschiedene Arten von Komponenten und bietet damit vier verschiedene elementare Basisklassen. *Activities* repräsentieren grafische Benutzerschnittstellen. *Services* stellen Hintergrunddienste bereit. *Content Provider* lassen sich mit Datenbanken vergleichen, während *Broadcast Receiver* Nachrichten vom Betriebssystem und anderen Apps empfangen. Alle vier Arten von Komponenten verfügen über einen eigenen Lifecycle, mit dem das Betriebssystem Einfluss auf die App nehmen kann.

Eine Datenflussanalyse muss diese Lifecycles und Abhängigkeiten zwischen App und System korrrekt modellieren, um einen präzisen Kontrollfluss zu erhalten. Über diesen Kontrollflussgraphen werden die Taint-Abstraktionen (die Access Paths im Falle von FLOWDROID) propagiert. Ein solches Systemmodell für Android ist nicht statisch, sondern wird von der konkreten Konfiguration einer Android-App gebildet. Der App-Entwickler legt in verschiedenen Konfigurationsdateien und durch eine Reihe von API-Aufrufen z.B. fest, welche Komponenten seine App gegenüber dem Betriebssystem anbietet, wie Benutzerschnittstellen aussehen, und welche Callbacks er vom System erhalten möchte. Für viele Aspekte gibt es mehr als eine Möglichkeit der Konfiguration, z.B. entweder deklarativ in XML-Dateien oder durch Code. Hierdurch wird zusätzlich eine präzise Zuordnung von Code und Konfiguration notwendig, welche nicht trivial ist.

3.2 UI-Komponenten

Im Code werden UI-Elemente durch eindeutige Nummern (IDs) identifiziert. Mit dieser Nummer können dann weitere Eigenschaften, wie z.B. ob es sich um ein Passwortfeld handelt, in der zugehörigen XML-Datei nachgeschlagen werden. Ist auf der Ressource, z.B. einer Schaltfläche, ein Callback definiert, so muss zusätzlich der Name der Callback-Methode ausgelesen werden. Hierbei handelt es sich jedoch nicht um einen vollständig

qualifizierten Namen. Stattdessen muss der reine Methodenname erst noch der korrekten Java-Klasse zugeordnet werden, welche die Callback-Methode implementiert. Hierzu muss für jede Activity-Klasse, d.h. jede Klasse mit grafischer Benutzeroberfläche, die ID des Layouts ermittelt werden, welches die Klasse verwendet. Diese Nummern müssen in einer speziellen Ressourcendatenbank der App aufgelöst werden, um den Namen der zugehörigen Ressource zu erhalten. Erst mit diesem Namen kann schließlich ermittelt werden, welche XML-Datei (und damit auch welche Schaltelemente und deren Callbacks) zu dieser Activity-Klasse gehören. Ein präzises Modell ist hier besonders wichtig, da Callback-Methoden für Schaltflächen in verschiedenen Klassen oftmals identische Namen besitzen. Eine Überapproximation hätte eine massiv erhöhte Anzahl von Kanten im Kontrollflussgraphen zur Folge, was wiederum nicht nur zu falsch-positiven Ergebnissen, sondern auch zur einer massiven Erhöhung des für die Analyse benötigten Rechenaufwands und Arbeitsspeichers führt.

3.3 Dummy Main-Methode

Um das Android-Systemmodell abzubilden, generiert FLOWDROID für jede App eine sogenannte *dummy main*-Methode. Hierbei handelt es sich um eine künstliche `main()` Methode, welche die Komponenten der zu analysierenden App instantiiert und die Interaktion zwischen dem System und der App modelliert. Eine solche `main()`-Methode verleiht der App die Struktur eines normalen Java-Programms. Sie abstrahiert gegenüber dem Kern der Datenflussanalyse und insbesondere dem Algorithmus zur Berechnung des Callgraphen von den Android-spezifischen Elementen der App. Die künstliche `main()`-Methode muss dabei nicht ausführbar sein, sondern lediglich aus Sicht der Datenflussanalyse äquivalent zum realen Laufzeitverhalten der Kombination aus App und Android-Rahmenwerk. Die Generierung der Methode ist die Aufgabe des *Entry Point Creators* aus Abbildung 1.

4 Automatische Erzeugung von Bibliotheksmodellen: STUBDROID

Sowohl Java-Programme als auch Android-Apps verwenden eine Vielzahl an Bibliotheken. Gerade im Bereich der Apps sind die Bibliotheken oftmals größer als die App selbst. Zudem werden Bibliotheken häufig über mehrere Apps hinweg wiederverwendet. Daher ist es nicht sinnvoll, diese Bibliotheken bei jeder Analyse eines Programms oder einer App wieder neu zu betrachten. Dies würde dazu führen, mehr Zeit für die Analyse der Bibliotheken aufzuwenden als für die eigentliche Anwendung und dies bei jedem Analyselauf erneut. Stattdessen präsentieren wir mit STUBDROID [AB16] einen Ansatz, der Bibliotheken vollautomatisch ein einziges Mal analysiert und die darin enthaltenen Datenflüsse zusammenfasst. Dieses Modell kann FLOWDROID anschließend an Stelle der tatsächlichen Implementierung der Bibliothek verwenden.

Da ein Modell von sämtlichen Implementierungsdetails der Bibliothek abstrahiert und Datenflüsse nur in Bezug auf die öffentlichen Schnittstellen der Bibliothek darstellt, reduziert es den zu betrachtenden Code massiv. Alle internen Berechnungen der Bibliothek werden zu einfachen wenn-dann Regeln zusammengefasst. Eine solche Regel kann beispielsweise besagen, dass der Rückgabewert einer Methode `m()` als sensitiv anzusehen ist, wenn ihrem

zweiten Parameter sensitive Daten übergeben wurden. StubDroid unterstützt hierbei beliebig lange Access Paths, d.h. es kann auch angegeben werden, dass nicht der gesamte Rckgabewert, sondern nur `return.a.b.c` als sensitiv anzusehen ist. Durch die Bibliotheksmodelle wird die für die Analyse benötigte Zeit um bis zu 80% reduziert. Im Falle großer Apps ermöglichen die Modelle eine Analyse überhaupt erst, da eine gemeinsame Betrachtung der App mit allen ihren Bibliotheken in realistischer Zeit und mit realistischen Aufwand an Arbeitsspeicher nicht möglich ist. Technisch erweitert StubDroid die FlowDroid-Analyse durch einen *Taint Propagation Wrapper* (siehe Abbildung 1).

5 Benchmarks für Analysewerkzeuge: DroidBench

Während der Zeit- und Speicherverbrauch einer Analyse leicht gemessen und zwischen Ansätzen verglichen werden kann, ist ein Vergleich der Präzision nur schwer durchführbar. Für reale Anwendungen ist normalerweise nicht bekannt, welche Datenflüsse sie enthalten. Diese Information ist aber notwendig, um die Ergebnisse eines Werkzeugs zur Datenflussanalyse als korrekt, falsch-positiv, oder falsch-negativ bewerten zu können. Bisher wurden daher Arbeiten entweder gänzlich ohne solche Messwerte oder auf Basis zufällig ausgewählter und per Hand betrachteter Apps veröffentlicht. Beide Varianten machen eine unabhängige Validierung der Forschungsergebnisse praktisch unmöglich und verhindern, Verfahren auf einfache Weise miteinander vergleichen zu können. Um die notwendige Vergleichbarkeit herzustellen, stellen wir die DroidBench Micro Benchmark-Suite vor. Diese beinhaltet 190 Testfälle mit bekannten Datenflüssen als Vergleichsbasis für beliebige Datenflussanalysen. DroidBench hat sich seit seiner Veröffentlichung im Jahr 2014 zu einem anerkannten Standard für Vergleichstests entwickelt und wird regelmäßig auch von anderen Forschungsgruppen um neue Testfälle erweitert.

Auf DroidBench liefert FlowDroid mehr als 87% aller erwarteten Ergebnisse. 84% aller gemeldeten Ergebnisse sind korrekt. Abbildung 3 vergleicht diese Werte mit den Ergebnissen der bisher aktuellen Analysewerkzeuge, sowohl aus dem akademischen als auch aus dem industriellen Kontext. Für IBM AppScan Source sind zwei Ergebnisse angegeben: *AppScan* bezieht sich nur auf Datenflüsse, *AppScan Erw.* betrachtet auch Warnungen, für die kein Datenfluss ausgegeben wurde. FlowDroid erzielt eine höhere Präzision als alle anderen Werkzeuge mit Ausnahme von DroidSafe [Go15]. Letzteres nimmt hierfür aber eine deutlich geringere Vollständigkeit in Kauf, d.h. findet einige Datenlecks nicht.

Nach unserer Auffassung kann kein Analysewerkzeug garantiereren, sämtliche Datenlecks in einer App zu finden, ohne praktisch unbrauchbar zu werden. Reale Apps verwenden über die JNI-Schnittstelle nativen Code, laden Code zur Laufzeit aus dem Internet nach, oder sind zum Schutz des geistigen Eigentums ihres Entwicklers auf vielfältige Weise verschleiert. Daher können selbst Analysewerkzeuge mit einem Vollständigkeitsbeweis auf ihrem jeweiligen Systemmodell wie JoDroid keine Garantie bieten können. Reale Apps verletzten ein solches Modell in vielen Fällen. Auf DroidBench entgeht JoDroid fast die Hälfte aller Datenlecks. Aus diesem Grund akzeptiert FlowDroid bewusst, bestimmte Datenlecks nicht zu finden, und streben stattdessen eine insgesamt augewogene Balance zwischen Vollständige, Präzision und Performance auf hohem Niveau an.

6 Effizienz von FLOWDROID

Ein vorrangiges Entwicklungsziel von FLOWDROID war es, präzise Analysen auch auf großen Android-Apps in realistischer Zeit und mit realistischem Aufwand an Arbeitsspeicher durchführen zu können. Wir haben FLOWDROID daher auf 25 populären und großen Android-Apps wie beispielsweise Facebook, Instagram, Opera, Paypal und Pokemon Go getestet. Jede Analyse wurde 10 Mal durchgeführt. Über diese 10 Ergebnisse wurde anschließend der Durchschnitt gebildet, um den Einfluss zufälliger Effekte auszugleichen. Im Durchschnitt über alle Apps hinweg benötigte FLOWDROID 174 Sekunden und 12 GB Arbeitsspeicher pro Analyse. Der Speicherbedarf ist hauptsächlich einigen wenigen Apps geschuldet. Alle Apps bis auf drei können auch mit 8 GB analysiert werden, was für einen modernen Computer realistisch ist. FLOWDROID ist zudem so konstruiert, dass es die Analyse abbricht, wenn kein Arbeitsspeicher mehr zur Verfügung steht und die bereits gefundenen Datenflüsse dennoch zur Verfügung stellt.

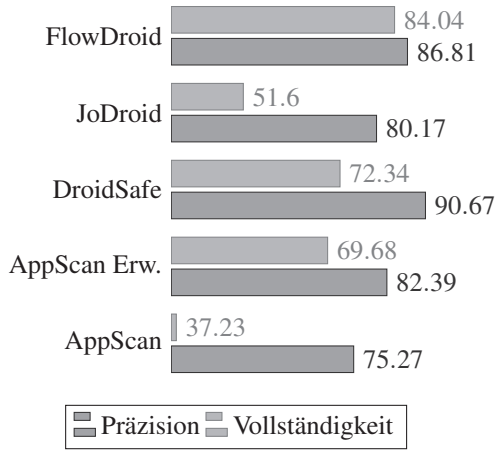


Abb. 3: Vergleich der Datenflusswerkzeuge

7 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde mit FLOWDROID ein präzises, weitgehend vollständiges und effizientes Werkzeug zur Analyse von Datenflüssen in Android-Apps und Java-Programmen vorgestellt. Die grundlegenden Techniken dieser Arbeit lassen sich jedoch auf eine Vielzahl an Plattformen anwenden. Aufbauend auf einer ersten Arbeit [AKB16] bereiten wir das Framework derzeit darauf vor, auch .net-Anwendungen analysieren zu können. Mit seinem modularen Aufbau kann FLOWDROID wurde bewusst gewählt, um FLOWDROID als Testplattform für neue Analysetechniken in jedem der beteiligten Bereiche (Aliasanalyse, Systemmodelle, Behandlung nativen Codes, usw.) einsetzen zu können und auch die Erweiterung auf neue Sprachen und Plattformen so einfach wie möglich zu gestalten. FLOWDROID steht als Open Source-Projekt auf Github kostenlos zum Download bereit.

Die hier vorgestellten Techniken ermöglichen nicht nur, Datenlecks zu identifizieren, sondern können als duales Problem auch zur Detektion von Sicherheitslücken durch fehlende Eingabevalidierung anwendet werden. Hierdurch ist diese Arbeit ein wichtiger Baustein für verschiedenartige Sicherheitsprüfungen. FLOWDROID ist bewusst kein Zertifizierungsansatz und erhebt nicht den Anspruch, die Abwesenheit von Datenlecks zu garantieren. Stattdessen soll es auf realen Anwendungen, die Benutzer heute verwenden und aus realen App Stores herunterladen, in realistischer Zeit hilfreiche Ergebnisse liefern.

Literaturverzeichnis

[AB16] Arzt, S.; Bodden, E.: StubDroid: automatic inference of precise data-flow summaries for the android framework. In: Proceedings of the 38th International Conference on Software Engineering. ACM, S. 725–735, 2016.

[AKB16] Arzt, S.; Kussmaul, T.; Bodden, E.: Towards cross-platform cross-language analysis with soot. In: Proceedings of the 5th ACM SIGPLAN International Workshop on State Of the Art in Program Analysis. ACM, S. 1–6, 2016.

[Ar14] Arzt, S.; Rasthofer, S.; Fritz, C.; Bodden, E.; Bartel, A.; Klein, J.; Le Traon, Y.; Octeau, D.; McDaniel, P.: Flowdroid: Precise context, flow, field, object-sensitive and lifecycle-aware taint analysis for android apps. In: ACM SIGPLAN Notices. Bd. 49. 6, ACM, S. 259–269, 2014.

[Bo12] Bodden, E.: Inter-procedural data-flow analysis with IFDS/IDE and Soot. In: Proceedings of the ACM SIGPLAN International Workshop on State of the Art in Java Program analysis. SOAP '12, S. 3–8, 2012.

[Go15] Gordon, M. I.; Kim, D.; Perkins, J.; Gilham, L.; Nguyen, N.; Rinard, M.: Information-flow analysis of Android applications in DroidSafe. In: Proc. of the Network and Distributed System Security Symposium (NDSS). 2015.

[La11] Lam, P.; Bodden, E.; Lhotak, O.; Hendren, L.: The Soot framework for Java program analysis: a retrospective. In: Cetus Users and Compiler Infastructure Workshop (CETUS 2011). Oktober 2011.

[Le14] Lerch, J.; Hermann, B.; Bodden, E.; Mezini, M.: FlowTwist: efficient context-sensitive inside-out taint analysis for large codebases. In: Proceedings of the 22nd ACM SIGSOFT International Symposium on Foundations of Software Engineering. ACM, S. 98–108, 2014.

[RHS95] Reps, T.; Horwitz, S.; Sagiv, M.: Precise interprocedural dataflow analysis via graph reachability. In: POPL '95. S. 49–61, 1995.

[Tr13] Tripp, O.; Pistoia, M.; Cousot, P.; Cousot, R.; Guarnieri, S.: Andromeda: Accurate and Scalable Security Analysis of Web Applications. In: Fundamental Approaches to Software Engineering. Bd. 7793, LNCS, 2013.

[VH98] Vallee-Rai, R.; Hendren, L. J.: Jimple: Simplifying Java Bytecode for Analyses and Transformations, 1998.



Steven Arzt schloss 2012 sein Masterstudium in Informatik (mit Auszeichnung) und IT-Sicherheit an der Technischen Universität Darmstadt ab. Im Dezember 2016 promovierte er auf dem Gebiet der Statischen Datenflussanalyse ebenfalls an der TU Darmstadt. Steven ist Preisträger des 6. Deutschen IT-Sicherheitspreises (1. Platz) der Horst Görtz-Stiftung und betreut die Open Source-Projekte `Soot` und `FlowDroid`. Derzeit forscht Steven am Fraunhofer SIT im Rahmen von öffentlichen und industriellen Projekten an der Verbesserung der IT-Sicherheit mit Methoden der statischen und dynamischen Programmanalyse. Seine Veröffentlichungen wurden (Stand Mai 2017) mehr als 1.000-mal zitiert.

Unterstützung der Koexistenz von agilen und traditionellen Anforderungsartefakten

Olga Boruszewski[1]

Abstract: Die hier vorgestellte Dissertation [Bo16] befasst sich mit dem Zusammenspiel verschiedener Repräsentationen von Anforderungen in Softwareprojekten. Anforderungen werden auf Anforderungsartefakten, wie Spezifikationen, Use Cases oder Geschäftsprozessmodellen, festgehalten und dann für viele Aktivitäten innerhalb der Softwareentwicklung eingesetzt. Häufig werden mehrere Arten von Anforderungsartefakten zusammen eingesetzt, um verschiedene Blickwinkel abzudecken. Dabei treten Probleme auf, weil die Anforderungen aufgrund von inhaltlichen Überlappungen Abhängigkeiten besitzen. Die Dissertation untersucht den Umgang mit Anforderungsartefakten in Projekten und die dabei entstehenden Probleme und erarbeitet dann Lösungskonzepte. Basierend auf einer Praxisstudie stellt die Arbeit Methoden bereit, mit denen eine Anforderungslandschaft modelliert und optimiert werden kann und mit denen Verknüpfungen automatisiert genutzt werden. Die Arbeit ermöglicht damit, verschiedene Arten von Anforderungen effektiv zu kombinieren und damit auch hybride - also teils agile, teils traditionelle - Softwareentwicklungsansätze zu unterstützen.

Keywords: Software Engineering, Requirements Engineering, Anforderungsartefakte, Artefaktmodelle, Tracing, Anforderungskommunikation, hybride Entwicklungsansätze.

1. Einleitung

Der Erfolg von Softwareprojekten hängt in großem Umfang davon ab, wie gut die Anforderungen an die Software verstanden, ausgearbeitet und umgesetzt werden. Fehler in einer dieser Aktivitäten können dazu führen, dass fertiggestellte Software die Probleme der Kunden nicht löst oder nicht deren Wünschen entspricht. Auch qualitativ hochwertige Software kann so dennoch zu Unzufriedenheit bei den Kunden führen. Um Anforderungen effektiv zu erarbeiten, spielen Artefakte eine wichtige Rolle. Diese helfen, durch Externalisierung von Wissen ein gemeinsames Verständnis herzustellen [GF15], Missverständnisse aufzudecken und Informationen weiter zu konkretisieren [Pa14].

Je nach Art der Artefakte werden unterschiedliche Aspekte von Anforderungen besonders in den Vordergrund gerückt oder weggelassen. Story Cards stellen Anforderungen als einzelne nutzerorientierte Interaktionen dar und fördern so die Priorisierung, Schätzung und Detail-Diskussion einzelner Anforderungen. Abhängigkeiten zwischen Anforderungen sind so jedoch häufig nicht gut sichtbar. Geschäftsprozessmodelle hingegen bringen Aktivitäten der Softwarenutzer in eine Reihenfolge und weisen so auf Abhängigkeiten hin. Die einzelnen Modellelemente lassen sich jedoch wiederum schlecht für sich priorisieren oder beispielsweise zu Komponenten zuordnen.

[1] Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover, Fachgebiet Software Engineering, olga.liskin@gmail.com

Oft werden in einem Projekt mehrere Arten von Artefakten gemeinsam verwendet, um für die unterschiedlichen Aktivitäten jeweils eine passende Repräsentation parat zu haben. Die Informationen in den unterschiedlichen Artefakten überlappen sich dabei teilweise, was zu Abhängigkeiten zwischen Artefaktarten führt. Wird am Prozessmodell eine Aktivität verändert, so muss diese Änderung möglicherweise auch in den User Stories durchgeführt werden, um Inkonsistenzen zu vermeiden.

Die meisten Vorgehensmodelle, wie SCRUM [SB02], V-Modell [RB08] oder RUP [Kr04], folgen einem agilen oder einem traditionellen, das bedeutet plangetriebenen, Entwicklungsansatz. Sie unterscheiden sich unter anderem darin, welche Artefaktarten sie verwenden. In agilen Ansätzen wird die Dokumentation so leichtgewichtig wie möglich gestaltet. Es werden einige wenige Artefaktarten, wie Epics, User Stories und Abnahmetests verwendet und die einzelnen Artefakte so simpel wie möglich gehalten [BA04]. In traditionellen Methoden wird Wert darauf gelegt, dass die Dokumentation möglichst vollständig und möglichst detailliert ist [BT03]. Neben rein agilen oder traditionellen Ansätzen werden auch immer häufiger hybride Entwicklungsansätze eingesetzt, die agile und plangetriebene Methoden vereinen [BT03], [Th15]. Da die typischen Artefakte der einzelnen Ansätze grundsätzlich verschieden sind, können hier besondere Herausforderungen durch deren Abhängigkeiten entstehen. Während die Artefakte, die agil verwendet werden, sich häufig und leicht ändern, sollen Artefakte im plangetriebenen Vorgehen eher einen festen Planungs-Rahmen darstellen und gleich bleiben.

Wie ein gutes Zusammenspiel zwischen verschiedenen Anforderungsartefakten – vor allem auch in hybriden Ansätzen – erreicht werden kann, bildet daher die Forschungsfrage für diese Arbeit.

1.1. Beiträge der Dissertation

Zunächst fehlt in der Wissenschaft bisher ein Überblick darüber, wie in der Praxis Anforderungsartefakte verwendet werden. Dazu gehören Fragestellungen, wie, welche Artefakte Projektteilnehmer aus welchen Gründen einsetzen und welche Herausforderungen sie dabei sehen. Mit einer Studie über den Stand der Praxis leistet diese Dissertation einen ersten Beitrag, indem sie diesen Überblick herstellt. Wie die Studie zeigt, ist ein gutes Zusammenspiel zwischen Anforderungsartefakten ein relevanter Faktor, ohne den die Anforderungskommunikation schnell ins Stocken kommt.

Bisherige Ansätze in der Wissenschaft beschäftigen sich damit, wie die in einem Projekt verwendeten Artefakttypen und deren Verknüpfungen modelliert werden können. Dazu werden sogenannte Traceability-Modelle aufgestellt [Ad13], [MGP09]. Ein Defizit dieser Modelle ist, dass sie nur explizit definierte Verknüpfungen betrachten, jedoch keine weiteren Aspekte modellieren, die das Zusammenspiel von Artefakten beeinflussen. Weitere Aspekte wären zum Beispiel Abhängigkeiten zwischen Artefaktarten oder die Anpassbarkeit eines Artefakts. Außerdem fehlt eine Hilfestellung zur Erstellung inhaltlich guter Modelle. Es bleibt offen, wann nun zwischen zwei bestimmten Artefakttypen ein bestimmter Verknüpfungstyp eingesetzt werden sollte und wann nicht. Genau das ist aber wichtig für die Erstellung hybrider Entwicklungsansätze oder die Individualisierung bestehender Vorgehensmodelle, wie RUP, SCRUM oder V-Modell XT.

Die vorliegende Dissertation schließt diese beiden Lücken, indem sie eine Erweiterung des Traceability-Modell-Konzeptes erstellt. Mithilfe von Anforderungslandschaften werden neben den Artefakttypen und ihren Verknüpfungen weitere Eigenschaften abgebildet, die für die Koexistenz von Artefakten von Bedeutung sind. Aufbauend darauf stellt die Arbeit ein Verfahren zur inhaltlichen Planung und Optimierung von Anforderungslandschaften in Hinblick auf Koexistenz vor. Ein risikobasierter Ansatz gibt Hilfestellung dabei, ob beispielsweise bestimmte Artefakttypen eingeführt und wann diese durch Traceability-Links verknüpft werden sollen. Der Ansatz basiert auf der Praxisstudie und greift damit genau die Probleme aus der Praxis auf.

Um weiterhin mit den Abhängigkeiten gut umgehen zu können, sind Tracing-Methoden notwendig. Diese dokumentieren Abhängigkeiten durch explizite Verknüpfungen und erlauben, schnell zu passenden Informationen zu gelangen. Die automatisierte Verwendung von Verknüpfungen zur Identifikation von relevanten Anforderungsartefakten wird durch das Konzept der Trace Queries [MC13] ermöglicht. Damit werden Suchanfragen auf Projektartefakten formuliert, die dann automatisiert durchgeführt werden. Allerdings müssen Trace Queries bisher manuell und auch selbstmotiviert angestoßen werden.

Um diese Lücke zu schließen, stellt diese Dissertation das Konzept der Trace-Operationen vor. Trace-Operationen bauen auf Trace Queries auf, erweitern diese aber um Auslöser und Überprüfungen, welche es erlauben, Trace Queries automatisiert anzustoßen und die Ergebnisse automatisiert auszuwerten. Durch die Erweiterung wird es möglich, Tracing-Aktivitäten in die eigentlichen anforderungsbezogenen Aktivitäten, wie die Ausarbeitung oder Priorisierung von Anforderungen, zu integrieren.

2. Stand der Praxis: Interviewstudie

Um einen Überblick über den Stand der Praxis zu bekommen, wird im Zuge der Dissertation zunächst eine Interviewstudie durchgeführt. Es wurden 21 Praktiker aus 6 Unternehmen in semi-strukturierten Interviews mit einer durchschnittlichen Dauer von ca. 75 Minuten befragt. Die Interviews wurden aufgezeichnet, transkribiert und die Aussagen im Anschluss kodiert und kategorisiert im Sinne der Aktivitäten aus der Grounded Theory (*Open Coding*, *Selective Coding* und *Categorization*) [GS67].

Die Praxiserfahrungen bestätigen, dass für verschiedene Aktivitäten unterschiedliche Arten von Artefakten gewählt werden. Zum Sammeln der Anforderungen werden häufig generische Dokumente (wie Word-Dokumente) verwendet. Diese erlauben, Information auf beliebige Art darzustellen, während beispielsweise Einzelelemente (wie User Stories) meist striktere Vorgaben haben, wie dass dort nur Nutzerinteraktionen festgehalten werden. Viele Praktiker haben berichtet, dass jedoch die Informationen in generischen Spezifikationsdokumenten oft zu vage und gleichzeitig an anderen Stellen zu spezifisch sind. Hier werden gern Einzelelemente, wie Use Cases oder User Stories verwendet, die helfen, das große Problem in kleine Teile zu teilen und auf diese dann nach und nach im angemessenen Detailgrad einzugehen. Doch auch hier können sich Probleme ergeben, wenn die Elemente zu technisch sind. Dann können Anforderungsgeber sie nicht mehr selbstständig verstehen und richtig priorisieren. Zur Kommunikation mit Anforderungsgebern wurden konkrete Modelle, wie GUI-Mockups als bestgeeigneter Artefakttyp ge-

nannt. Insgesamt wurden immer mehrere Arten von Artefakten verwendet, um die verschiedenen Blickwinkel abzudecken. Dabei haben sich neue Herausforderungen aus den Abhängigkeiten zwischen den Artefakten herausgestellt.

Mehr als 70% der Interview-Teilnehmer sind beim Umgang mit mehreren Artefakten auf Probleme gestoßen. Neben dem Zusatzaufwand zum Dokumentieren und Finden von Informationen an mehreren Orten, hatten sie Schwierigkeiten durch Inkonsistenzen erlebt. Außerdem wurde erwähnt, dass es schwierig war, zu prüfen, ob alle relevanten Elemente aus einem Artefakttyp auch korrekt in einem anderen abhängigen Artefakt auftraten. Die potenziellen Probleme führten zu zusätzlichem Aufwand zur Vermeidung des Eintretens der Probleme. Wenn Informationen übersehen wurden, so traten Missverständnisse oder falsche Annahmen auf, welche wiederum potenziell zu höheren Kosten aufgrund von Fehlern führten. Ein weiterer berichteter Effekt war, dass Projektteilnehmer sehr schnell das Vertrauen in ein Dokument verloren – und aufhörten es zu verwenden – wenn sie mehrmals auf Inhalte stießen, die nicht aktuell oder inkonsistent waren.

3. Ein Konzept zur Unterstützung der Koexistenz von agilen und traditionellen Anforderungsartefakten

In der Interview-Studie wurde gezeigt, dass häufig mehrere Artefakttypen gemeinsam verwendet werden und dass es häufig zu Schwierigkeiten kommt, weil die Artefakte zusammenhängen, diese Zusammenhänge jedoch nicht ausreichend unterstützt werden. Um mit diesen Problemen besser umgehen zu können, ist das Ziel des in der Dissertation vorgestellten Konzeptes die *Verbesserung der Unterstützung der Koexistenz von agilen und traditionellen Anforderungsartefakten.*

Eine Verbesserung lässt sich auf *zwei Ebenen* erreichen. Zum einen ist es auf der *methodischen Ebene* möglich, die Koexistenz von Anforderungsartefakten zu beeinflussen, indem eine explizite Analyse und Planung dazu durchgeführt wird, welche Typen von Anforderungsartefakten eingesetzt und welche Arten von Verknüpfungen besonders unterstützt werden. Der Aufbau mit verwendeten *Typen* von Artefakten und Verknüpfungen wird als **Anforderungslandschaft** bezeichnet. Die zweite Ebene betrifft die *konkrete Projektebene* mit den konkreten darin erstellten *Dokumenten*. Hier lässt sich die Koexistenz von Anforderungsartefakten beeinflussen, indem Verknüpfungen zwischen konkreten Anforderungen gefördert und auch besser ausgenutzt werden. Dies geschieht durch sogenannte **Trace-Operationen**. Abbildung 1 zeigt die beiden Ebenen und ihre Zusammenhänge.

4. Anforderungslandschaften

Anforderungslandschaften zu einem Projekt sind Modelle der verwendeten *Typen* von Anforderungen und Verknüpfungen im Projekt. Sie stellen dar, wie die Anforderungsmenge aufgebaut ist und zeigen Eigenschaften auf, die relevant für den guten Umgang mit Anforderungen und die Koexistenz von Anforderungsartefakten sind. Das Modell

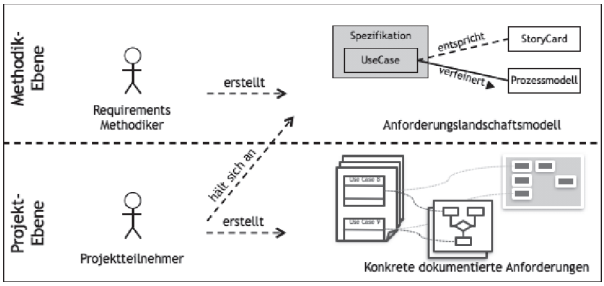


Abb. 1: Übersicht über Anwendungsebenen der hier erarbeiteten Methodik

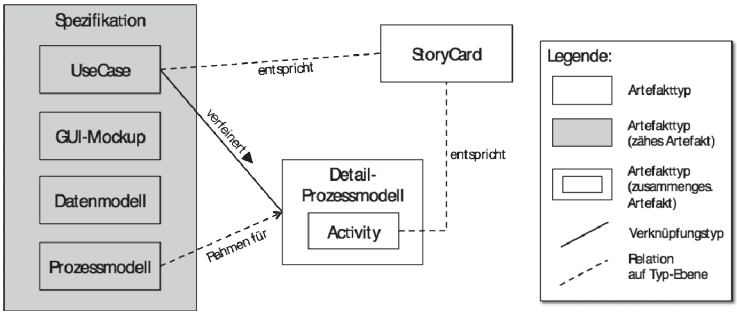


Abb. 2: Beispiel für ein Anforderungslandschaftsmodell

der Anforderungslandschaft zusammen mit der Darstellung wird in der Dissertation basierend auf Erkenntnissen aus der Interview-Studie erarbeitet. Abbildung 2 zeigt ein Beispiel für eine Anforderungslandschaft zusammen mit den relevanten Eigenschaften.

Zunächst ist zu klären, welche Arten von Anforderungsartefakten verwendet werden – beispielsweise ob es eine Spezifikation gibt, ob diese Spezifikation auch Geschäftsprozessmodelle enthält, ob zudem GUI-Mockups verwendet werden. Zu den Artefakttypen ist zudem relevant, in welchen Beziehungen diese zueinander stehen.

In dieser Arbeit wird – im Gegensatz zu vielen Ansätzen in der Literatur – insbesondere zwischen einer *Relation zwischen zwei Artefakten* und einer *expliziten Verknüpfung zwischen zwei Artefakten* unterschieden. Mit *Verknüpfung* wird ein dokumentierter Link bezeichnet. Zwei Artefakte, die in *Relation* zueinander stehen, tun dies nun aber unabhängig davon, ob eine explizite Verknüpfung zwischen ihnen definiert ist oder nicht. Auch wenn zwei Artefakte nicht verknüpft sind, kann es beispielsweise gewünscht sein, nach der Änderung eines Artefaktes ein *abhängiges* anderes Artefakt anzupassen.

Weiterhin ist wichtig, zu einem Artefakt zu betrachten, wie es sich bei Änderungen verhält. Ob die Anforderungen, die in einem Artefakt festgehalten sind, ohne weiteres geändert werden können oder nicht, wird durch die *Zähheit* festgehalten. Ein Artefakt gilt als

zäh, wenn es nur in Absprache geändert werden darf oder wenn es aufgrund seiner Struktur schwierig ist, dort eine Änderung einzuarbeiten.

Eine weitere eigene Darstellung gibt es für zusammengesetzte Artefaktarten. Das sind Artefakte, die in einer *enthält*-Relation stehen. Beispielsweise kann ein Use Case mehrere Use Case-Schritte enthalten. Diese Relation stellt eine besondere Form der Dokumentation dar: Das enthaltene Artefakt ist Teil des übergeordneten enthaltenden Artefaktes und wird zusammen mit diesem dargestellt. Das besondere an dieser Relation ist, dass hier Abhängigkeiten leichter behandelt werden können, da beide Artefakte zusammen aufgeführt sind.

4.1. Hybride Anforderungslandschaften

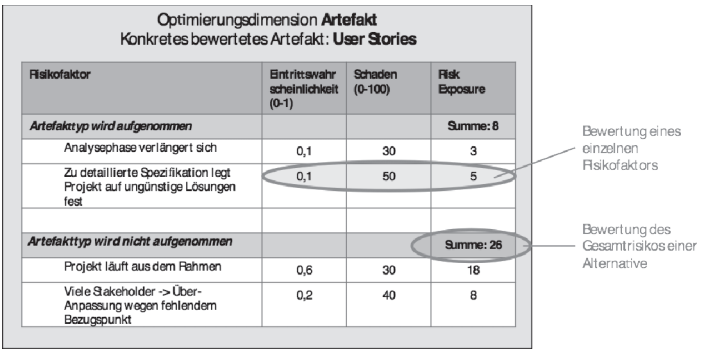
Hybride Entwicklungsansätze vereinen agile und traditionelle Entwicklungsmethoden, um die Vorteile aus beiden Ansätzen zu kombinieren. Ein hybrider Entwicklungsansatz soll ermöglichen, schnell und flexibel auf Änderungen zu reagieren, gleichzeitig aber auch Sicherheit und Nachvollziehbarkeit bieten. Daran angelehnt, kombinieren hybride Anforderungslandschaften agile und traditionelle Anforderungsartefakte und ermöglichen damit auch, ihre jeweiligen Vorzüge zu nutzen. Charakteristisch für eine hybride Anforderungslandschaft ist, dass diese flexible sowie zähe Anforderungsartefakte besitzt. Hybride Landschaften entstehen beispielsweise, weil in traditionellen Projekten agile Artefakte, wie User Stories hinzugefügt werden, um besser auf Änderungen reagieren zu können und höhere Transparenz zur Umsetzung von Kundenwünschen zu bekommen. Alternativ entstehen hybride Landschaften, wenn in agilen Projekten zusätzliche Artefakte hinzugefügt werden, die einen festen Rahmen darstellen. Dies kann notwendig sein, um einen besseren Gesamtüberblick für große Teams zu schaffen oder um Überanpassung durch zu viele Anforderungsgeber zu vermeiden.

4.2. Risikobasierte Optimierung von Anforderungslandschaften

In der Dissertation wird ein risikobasiertes Verfahren vorgestellt, das ermöglicht, den inhaltlichen Aufbau einer Anforderungslandschaft zu optimieren. Es baut auf dem *risikobasierten Ansatz zum Ausbalancieren von agilen und plangetriebenen Methoden* von Boehm und Turner auf [BT03]. Das Verfahren zielt darauf ab, die Projektrisiken, die mit einer Vorgehensweise verbunden sind, zu minimieren. Mögliche Alternativen bergen unterschiedliche Risiken, die im eigenen Projektkontext bewertet werden müssen. Hat eine der Alternativen ein geringeres Risiko, so wird die Anforderungslandschaft auf diese Alternative ausgerichtet.

Hierzu leitet die Dissertation aus den Vor- und Nachteilen, die in der Interview-Studie genannt wurden, ***Risikofaktoren*** ab. Diese Risikofaktoren können nun bewertet werden, indem das Risiko durch das Produkt („*Risk Exposure*“) seiner Eintrittswahrscheinlichkeit und des resultierenden Schadens charakterisiert wird. Durch eine Bewertung der Risikofaktoren kann der Requirements Methodiker sich schließlich ein Bild verschaffen, ob eine der Alternativen risikogünstiger ist und dies als Entscheidungshilfe bei der Optimierung nutzen. Abbildung 3 zeigt hierzu ein Beispiel. Im Beispiel wird der zweite Risikofaktor in der Tabelle mit einer 10%igen Eintrittswahrscheinlichkeit und einem Schaden

von 50 eingeschätzt. Das Gesamtrisiko der Alternative, den Artefakttyp aufzunehmen wird mit einer gesamten Risk Exposure von 8 bewertet. Das Gesamtrisiko der Alternative, den Artefakttyp nicht aufzunehmen beträgt 26, es ist also deutlich höher. Das Artefakt sollte daher in die Landschaft aufgenommen werden.



Risikofaktor	Eintrittswahrscheinlichkeit (0-1)	Schaden (0-100)	Risk Exposure
Artefakttyp wird aufgenommen			**Summe: 8**
Analysephase verlängert sich	0,1	30	3
Zu detaillierte Spezifikation legt Projekt auf ungünstige Lösungen fest	0,1	50	5
Artefakttyp wird nicht aufgenommen			**Summe: 26**
Projekt läuft aus dem Rahmen	0,6	30	18
Viele Stakeholder -> Über-Anpassung wegen fehlendem Bezugspunkt	0,2	40	8

Abb. 3: Optimierung der Nutzung von User Stories durch Bewertung der Risikofaktoren

Insgesamt stellt die Arbeit aus unterschiedlichsten Aussagen zu Vor- und Nachteilen bezüglich des Aufbaus von Anforderungslandschaften 27 Risikofaktoren zu 5 Optimierungsdimensionen auf. Das Verfahren stellt eine Möglichkeit dar, systematisch auf die vielfältigen Praxiserfahrungen aus der Interviewstudie zuzugreifen.

5. Trace-Operationen

Modellierung sowie Planung und Optimierung des Aufbaus von Anforderungslandschaften sind wichtige erste Schritte zum effektiven Umgang mit Anforderungen und damit zu guter Anforderungskommunikation. Dennoch ist es für eine gute Koexistenz genauso wichtig, auch die Projektteilnehmer in ihren alltäglichen Aufgaben im Umgang mit Anforderungen zu unterstützen. Mithilfe von Verknüpfungen (*Traces*) können Teile anforderungsbezogener Aktivitäten teil-automatisiert werden. Ein System kann anhand von Verknüpfungen die Identifikation und Präsentation von abhängigen Elementen übernehmen und die Projektteilnehmer an den richtigen Stellen auf mögliche Abhängigkeiten aufmerksam machen. Dabei ist auch hier wieder von Projekt zu Projekt verschieden, welche Verknüpfungen welcher automatisierten Unterstützung bedürfen. Entsprechend wird eine Möglichkeit benötigt, automatisierbare Operationen individuell für ein Projekt zu konfigurieren. Hierzu erarbeitet die Dissertation das Konzept der *Trace-Operationen*. Abbildung 4 zeigt eine Auswahl an Trace-Operationen und wie diese für die unterschiedlichen Verknüpfungen verwendet werden können.

Jede Trace-Operation besitzt eine ***Trace Query*** im Zentrum. Damit wird festgelegt, wie von einem bestimmten Ausgangsartefakt aus zu anderen relevanten Artefakten oder Informationen navigiert wird. ***Kritiken*** definieren zusätzlich eine ***Prüfung*** des Trace Query-Resultates. Wenn die Auswertung *wahr* liefert, so wird die ***Reaktion*** ausgelöst, die beispielsweise eine Warnung anzeigt.

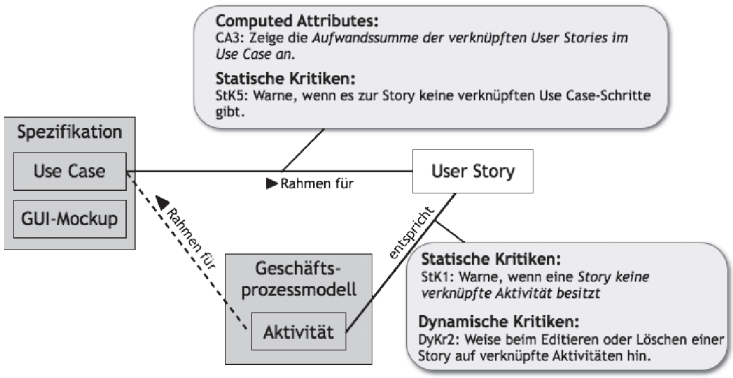


Abb. 4: Beispiel für Trace-Operationen in einer Anforderungslandschaft

In der Dissertation werden zwei Möglichkeiten vorgestellt, solche Trace-Operationen zu beschreiben. Sie unterscheiden sich im Wesentlichen darin, wie die Trace Query dargestellt wird. Zum einen werden die Trace Query und ihre Überprüfung textuell mittels der Object Constraint Language (OCL) beschrieben. In der zweiten Herangehensweise wird die Trace Query grafisch dargestellt. Diese Darstellung basiert auf der Visual Trace Modeling Language (VTML), die durch Mäder und Cleland-Huang [MC13] entwickelt wurde. VTML-Queries basieren auf UML-Klassendiagrammen, die einen Teil eines Artefaktmodells aufgreifen und durch zusätzliche Symbole für Einschränkungen und Aggregationen ergänzen. Sie erlauben es, eine Navigation im Landschaftsmodell visuell darzustellen, was für Nutzer einfacher sein kann als textuelle Beschreibungen. Abbildung 5 zeigt ein Beispiel, in dem eine Trace-Operation jeweils mit beiden Methoden formalisiert ist.

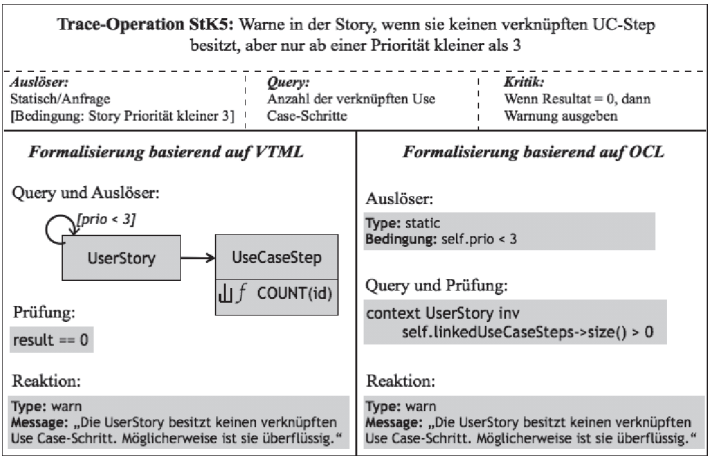


Abb. 5: Beispielhafte Formalisierung einer Trace-Operation basierend auf VTML und OCL

5.1. Validierung des Nutzens von Trace-Operationen

Inwiefern Trace-Operationen Projektteilnehmer tatsächlich dabei unterstützen können, besser mit Anforderungen umzugehen, wird in einem *randomisierten Experiment* untersucht. Teilnehmer zweier Gruppen erhalten dieselbe *Anforderungsmenge* in derselben *Sicht* und führen dieselben *anforderungsbezogenen Aktivitäten* durch. Die *experimentelle Behandlung*, die eine der beiden Gruppen (*LinkedArtifacts*) erhält, ist, dass ihre Anforderungsmenge mit expliziten Verknüpfungen versehen ist und sie durch Trace-Operationen unterstützt wird.

Die Studie zeigt, dass die Performance der *LinkedArtifacts*-Gruppe bei komplexen Aufgaben, die erfordern, dass verschiedene Arten von Artefakten betrachtet werden, tatsächlich besser ist. Bei simplen Aufgaben, bei denen es ausreicht, Artefakte von nur einer Art zu betrachten, ist die Performance bei beiden Gruppen ähnlich. Das typische Problem, dass ein Projektteilnehmer schnell ein primäres Artefakt ändert, jedoch vergisst, die Änderung auch auf andere verwandte Artefakte zu übertragen, ist unabhängig davon aufgetreten, ob Trace-Operationen verwendet wurden. Es hat sich gezeigt, dass stärkere Mechanismen, als die bloße Hervorhebung verknüpfter Artefakte, notwendig sind, um eine ausreichende Berücksichtigung von Abhängigkeiten zu bewirken.

6. Zusammenfassung und Ausblick

Es wurde ein Ansatz für die Unterstützung der Koexistenz von Anforderungsartefakten erarbeitet. Dazu wurde zunächst in einer Studie herausgearbeitet, welche Aktivitäten von Anforderungsartefakten beeinflusst werden. Ein auf den identifizierten Herausforderungen aufbauendes Konzept zur Modellierung ermöglicht es, in einem Projekt eine Anforderungslandschaft aufzubauen, welche die Blickwinkel und Erfordernisse der Projektteilnehmer abdeckt und die entsprechenden Artefakte integriert. Das Konzept der Trace-Operationen erweitert Anforderungslandschaften um zusätzliche Tool-Unterstützung für den alltäglichen Umgang mit Anforderungen und deren Abhängigkeiten.

In Zukunft könnten durch die stärkere Verbindung von Verknüpfungstypen und Trace-Operationen neue Möglichkeiten geschaffen werden, die beiden Konzepte noch umfangreicher zu verwenden. Beispielsweise kann das Konzept so erweitert werden, dass eine *Verknüpfungsstärke* als Attribut von Verknüpfungstypen direkt festlegt, welche Richtlinien und Trace-Operationen mit der Verknüpfung verbunden werden. Andersherum kann der Umgang mit Anforderungen Hinweise auf Abhängigkeiten geben.

7. Literaturverzeichnis

[Ad13] J. Adersberger, Modellbasierte Extraktion, Repräsentation und Analyse von Traceability-Informationen. Dissertation. Herbert Utz Verlag, 2013.

[BA04] K. Beck and C. Andres, Extreme Programming Explained: Embrace Change, 2nd Edition. Addison Wesley, 2004.

[BT03] B. Boehm and R. Turner, Balancing Agility and Discipline: A Guide for the Perplexed. Pearson Education, 2003.

[Bo16] O. Boruszewski: Unterstützung der Koexistenz von agilen und traditionellen Anforderungsartefakten. epubli, 2016.

[GS67] B. G. Glaser and A. L. Strauss, The Discovery of Grounded Theory: Strategies for Qualitative Research. Aldine de Gruyter, 1967.

[GF15] M. Glinz and S. A. Fricker, "On shared understanding in software engineering: an essay," Comput. Sci. - Res. Dev., vol. 30, no. 3, pp. 363–376, 2015.

[Pa14] J. Patton, User Story Mapping. O'Reilly Media, 2014.

[Kr04] P. Kruchten, The Rational Unified Process: an Introduction. Addison-Wesley Professional, 2004.

[MC13] P. Mäder and J. Cleland-Huang, "A visual language for modeling and executing traceability queries," *Softw. Syst. Model.*, vol. 12, no. 3, pp. 537–553, 2013.

[MGP09] P. Mäder, O. Gotel, and I. Philippow, "Getting back to basics: Promoting the use of a traceability information model in practice," in *Proceedings of the ICSE Workshop on Traceability in Emerging Forms of Software Engineering (TEFSE)*, 2009, pp. 21–25.

[RB08] A. Rausch and M. Broy, "Die V-Modell XT Grundlagen," in *Das V-Modell XT: Grundlagen, Methodik und Anwendungen*, R. Höhn and S. Höppner, Eds. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008, pp. 1–27.

[SB02] K. Schwaber and M. Beedle, *Agile Software Development with Scrum*. Prentice Hall, 2002.

[Th15] G. Theocharis, M. Kuhrmann, J. Münch, and P. Diebold, "Is Water-Scrum-Fall Reality? On the Use of Agile and Traditional Development Practices," in *Proceedings of the 16th International Conference on Product-Focused Software Process Improvement (PROFES)*. Springer International Publishing, 2015, pp. 149–166.

Olga Boruszewski



Olga Boruszewski (geb. Liskin) hat an der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität in Hannover Mathematik mit der Studienrichtung Informatik studiert. Dort hat sie an verschieden Softwareprojekt-Lehrveranstaltungen teilgenommen und auch als Tutorin den Übungsbetrieb in der Softwaretechnik und Softwarequalität unterstützt. In einem Auslandssemester an der University of Colorado in Boulder, USA, hat sie weitere Themen der Softwareentwicklung, wie Usability Engineering, vertieft sowie ein Praktikum als Softwareentwicklerin in einem agilen Entwicklungsunternehmen absolviert.

Im Anschluss an das Studium hat sie am Fachgebiet für Software Engineering der Leibniz Universität Hannover promoviert. Dort hat sie sich mit Requirements Engineering, agilen Softwareentwicklungsmethoden sowie Informationsflüssen in der Teamkommunikation beschäftigt. Ihre Interessenschwerpunkte liegen auf Anforderungsartefakten, der Anforderungskommunikation sowie auf agilen Softwareentwicklungsmethoden.

Parametrisierte Komplexität in der polynomiellen Hierarchie[1]

Ronald de Haan[2]

Abstract: In dieser Arbeit erweitern wir die Theorie der parametrisierten Komplexität, um Probleme, die von höheren Ebenen der polynomiellen Hierarchie stammen, adäquat analysieren zu können. Wir erweitern die bekannten Konzepte und Methoden in grundlegender Weise, um auch die bemerkenswerte Effektivität von existierenden SAT-Solvern theoretisch zu berücksichtigen. Wir demonstrieren, dass unser neues Instrumentarium es ermöglicht, die exakte Komplexität einer Vielzahl von fundamentaler Berechnungsproblemen zu bestimmen, und in Folge deren theoretische Schwere einzuordnen und zu vergleichen. Die betrachteten Probleme stammen aus vielen Bereichen der Informatik, z.B. der Künstlichen Intelligenz, Wissensräpresentation, Verifikation und Optimierung.

1 Einführung

Viele wichtige Berechnungsprobleme haben sich als schwer und vermutlich nicht in Polynomialzeit lösbar herausgestellt. Die Forschung der letzten zwei Jahrzehnten hat unter Anderem die folgenden zwei Ansätze hervorgebracht, die mit solchen Problemen umgehen können: (a) festparameter-handhabbare (*fixed-parameter tractable*, FPT) Algorithmen aus dem Gebiet der parametrisierten Komplexität, und (b) Lösung durch Übersetzung in eine äquivalente Eingabe des auslagenlogischen Erfüllbarkeitsproblems (SAT) und die nachfolgende Lösung mittels eines SAT-Solvers. In der vorliegenden Arbeit untersuchen wir die Kombination dieser beiden Ansätze, nämlich die Methode der *festparameter-handhabbaren Übersetzung nach SAT*, die in gewisser Weise das Beste aus den beiden Welten (a und b) vereint, und das Potenzial besitzt, die erstaunliche Mächtigkeit heutiger SAT-Solver auch auf Probleme, die schwerer als NP sind, anzuwenden. Um theoretisch zu erforschen, in wieweit dies tatsächlich möglich ist, sind die bekannten theoretischen Konzepte und Methoden nur unzureichend.

In dieser Arbeit entwickeln wir daher entsprechende neue Konzepte und Methoden, die im Kern aus einer Reihe neuer parameterisierter Komplexitätsklassen bestehen, die hauptsächlich zwischen der ersten und zweiten Stufe der polynomiellen Hierarchie (PH) angesiedelt sind. Diese neuen Klassen ermöglichen es uns, die exakte Komplexität von vielen Berechnungsproblemen zu bestimmen, und theoretische Evidenz zu liefern, ob die Probleme eine festparameter-handhabbare Übersetzung nach SAT erlauben oder nicht.

Die betrachteten Probleme entstammen einem weiten Feld von Anwendungsgebieten, wie zum Beispiel der Künstliche Intelligenz, der Wissensräpresentation, der Verifikation und der Optimierung. Wir fassen die Ergebnisse unserer Untersuchungen von konkreten Problemen in Form eines *Kompendiums mit über 75 Einträgen* zusammen.

[1] Englischer Titel der Arbeit: “Parameterized Complexity in the Polynomial Hierarchy”

[2] Institute for Logic, Language and Computation, University of Amsterdam, R.deHaan@uva.nl

2 Hintergrund: Nicht-Handhabbarkeit meistern

Nicht-Handhabbarkeit ist ein wichtiges Konzept und Forschungsthema der theoretischen Informatik mit Relevanz für fast alle Bereiche menschlicher Aktivität. Beispielsweise gibt es zahlreiche Such- und Optimierungsprobleme, die erhebliche Herausforderungen an die InformatikerInnen stellen, die an Methoden zur praktischen Lösung dieser Probleme arbeiten. Um solche Probleme zu lösen, ist es oft wichtig festzustellen, in welchem Kontext diese Probleme handhabbar (*tractable*) sind, und in welchem Kontext dies nicht der Fall ist (Nicht-Handhabbarkeit, *intractability*).

Wegen der mathematischen Schwierigkeit (oder sogar Unmöglichkeit) in wichtigen Fällen die Nicht-Handhabbarkeit von Problemen absolut (also ohne zusätzlicher Annahmen) zu zeigen, ist das Standardverfahren im Feld der Komplexitätstheorie, die relative Nicht-Handhabbarkeit. Das heisst, mittels geeigneter Algorithmen, die ein Problem in ein anderes Problem übersetzen (sogenannte Reduktionen), kann festgestellt werden, dass das eine Problem mindestens so schwer zu lösen ist wie das andere. Damit ist es auch möglich, die schwersten Probleme innerhalb einer Komplexitätsklasse zu identifizieren. Solche Probleme werden dann als *vollständig* für die Komplexitätsklasse bezeichnet. Ein prominentes Beispiel ist die Komplexitätsklasse NP, für die schon seit den 1970er Jahren hunderte von vollständigen Problemen bekannt sind. Eines der (offenen) Milleniumsprobleme ist die Frage, ob NP-vollständigen Probleme in deterministischer Polynomialzeit gelöst werden können. Viele Forscher vermuten, dass das nicht der Fall ist.

Wenn für ein Problem kein Lösungsverfahren bekannt ist, das für alle möglichen Problemeingaben eine Lösung in Polynomialzeit finden kann, also z.B. für ein als NP-vollständig bekanntes Problem, muss das Problem ja in der Praxis trotzdem gelöst werden. Die InformatikerInnen müssen daher weiter nach möglichst effizienten Methoden suchen, die das Problem zumindest für viele in die Praxis wichtigen Fällen effizient lösen können. Tatsachlich hat die Informatikforschung der letzten Jahrzehnte mehrere Ansätze entwickelt, die mit nicht-handhabbaren Problemen umgehen können. Zwei dieser Ansätze dienen als Grundlage für die vorliegende Arbeit, und deshalb möchten wir diese beiden Ansätze und die ihnen zu Grunde liegenden Ideen hier kurz vorstellen und diskutieren: (a) *festparameter-handhabbare Algorithmen* aus dem Gebiet der parametrisierten Komplexität [DF13, FG06], und (b) *Lösung durch Übersetzung in eine äquivalente Instanz des auslagenlogischen Erfüllbarkeitsproblems (SAT)* und die nachfolgende Lösung mithilfe eines SAT-Solvers [Bi09].

Beide dieser Ansätze wurden erfolgreich verwendet, um vor allem NP-vollständige Probleme, unter Berücksichtigung von zusätzlichen Eigenschaften von Problemeingaben, effizient zu lösen. Hierbei zielt der Ansatz (a) hauptsächlich auf theoretische Laufzeitgarantien, und Ansatz (b) hauptsächlich auf die praktische Lösbarkeit, sogar im industriellen Massstab, ab. In beiden Fällen ist eine möglichst gute Skalierbarkeit in Hinblick auf die Eingabegröße das Ziel.

(a) Festparameter-Handhabbarkeit Der erste der beiden Ansätze erweitert den Standardbegriff der Handhabbarkeit (Lösbarkeit in Polynomialzeit) auf Laufzeiten, die zwar exponentiell sein können, wo allerdings der exponentielle Faktor auf einen bestimmten

Aspekt der Eingabe (repräsentiert durch dem Parameter) limitiert ist. Dieser Parameter ist typischerweise eine ganze Zahl, die eine bestimmte Eigenschaft der Problemeingabe repräsentiert und in realistischen Eingaben als klein angenommen werden kann. Dieser erweiterte Bergriff der Handhabbarkeit wird als Festparameter-Handhabbarkeit (*fixed-parameter tractability, fpt*) bezeichnet. Genauer gesagt, betrachtet man hierbei Laufzeiten, die von einer Funktion folgender Form beschränkt werden können: $f(k) \cdot n^c$, wobei n die Eingabegröße und k den Wert des Parameters bezeichnet; c ist eine Konstante (die weder von n noch von k abhängt), und f ist eine (möglicherweise exponentielle) Funktion. Hier ist es wesentlich zu beachten, dass für jeden konstanten Wert des Parameters k eine polynomielle Laufzeit vorliegt, wobei die Ordnung c des Polynoms *nicht* vom Parameter abhängt (im Gegensatz zu Laufzeiten der Form n^k). Parametrierte Komplexität ist das Forschungsgebiet, das sich mit festparameter-handhabbaren Algorithmen (kurz *fpt-Algorithmen*) und deren Grenzen beschäftigt. Dieses Forschungsgebiet hat sich in den letzten zwei Jahrzehnten sehr schön entfaltet (siehe, zum Beispiel [Bo12, Cy15, DF13]).

Die Laufzeit von Algorithmen und die Schwere von Problemen in diesem zweidimensionalen Raum zu betrachten, der von Eingangröße und Parameterwert aufgespannt wird, hat sich als sehr sinnvoll und weitreichend herausgestellt. Viele Probleme, die ohne Parametrisierung NP-vollständig sind, können mit geeigneten Parametern als festparameter-handhabbar identifiziert werden, und lassen Algorithmen zu, die Eigenschaften von Problemeingaben explizit ausnützen und das Problem einer effizienten Lösung zugänglich machen. Es wurde auch eine parametrisierte Komplexitätstheorie entwickelt, die auf sogenannten *fpt-Reduktionen* zwischen parameterisierten Problemen aufbaut. Hierbei wird ein Problem in ein anderes mittels eines fpt-Algorithmus übersetzt, wobei der neue Parameterwert durch eine Funktion des alten beschränkt bleibt.

Im Prinzip lässt sich dieser Ansatz auch auf Probleme anwenden, die ohne Parametrisierung schwerer als NP sind, also auf höheren Ebenen der polynomiellen Hierarchie angesiedelt sind. Jedoch um solche Probleme festparameter-handhabbar zu machen, ist man bei der Wahl von geeigneten Parametern dazu gezwungen, sehr stark einschränkende Parameter zu wählen, bei denen nicht zu erwarten ist, dass sie in realistischen Problemeingaben klein sind. Daher hatten bisher fpt-Algorithmen wenig Erfolg bei Problemen, die von höheren Ebenen der polynomiellen Hierarchie stammen.

(b) Übersetzung nach SAT Der zweite der beiden Ansätze basiert auf der Übersetzung der Problemeingabe in eine entscheidungsäquivalente Eingabe für ein Zielproblem, für das es leistungsstarke heuristische Methoden („Solver“) gibt. Neben der ganzzahligen linearen Optimierung (*integer linear programming*, ILP) ist das aussagenlogische Erfüllbarkeitsproblem (*satisfiability problem*, SAT) wohl das prominenteste Beispiel für solch ein Zielproblem, für das sehr leistungsstarke Solver verfügbar sind.

SAT
Eingabe: Eine aussagenlogische Formel φ in konjunktiver Normalform (KNF).
Frage: Ist φ erfüllbar?

Das Zusammenspiel von verschieden algorithmischen Methoden (wie z.B. dem Klauselllernen) und extrem effizienten Datenstrukturen (wie z.B. den beobachteten Literalen) hat

die verfügbaren SAT-Solver extrem (und durchaus überraschend) leistungsfähig gemacht. Heute werden grosse SAT-Eingaben mit hunderttausenden von Variablen routinemässig im industriellen Einsatz gelöst. Die Verifikation von Hardware und Software ist eines der bedeutendsten Einsatzgebiete der SAT-Solver, die aber auch in vielen anderen Bereichen sehr erfolgreich verwendet werden. Diese besondere Leistungsfähigkeit der heutigen SAT-Solver stellt die Informatikforschung vor die interessante Frage nach einer theoretischen Erklärung [Va14]. Ein Aspekt der vorliegenden Arbeit ist es, diese bisher unerklärte Leisungsfähigkeit der SAT-Solver, gewissermassen als *black box* im theoretischen Modell zu integrieren.

Da das Erfüllbarkeitsproblem NP-vollständig ist [Co71], kann im Prinzip jedes NP-vollständige Problem in Polynomialzeit nach SAT übersetzt werden, und das gibt tatsächlich für viele NP-vollständigen Probleme auch einen praktikablen Lösungsansatz. Für Probleme, die (vermutlich) schwerer als NP sind, also z.B. Probleme deren Komplexität auf höheren Stufen der polynomiellen Hierarchie angesiedelt ist, ist eine Übersetzung nach SAT in Polynomialzeit (vermutlich) nicht möglich. Deshalb war bisher der Ansatz der Übersetzung nach SAT primär auf Probleme in NP beschränkt.

3 Nicht-Handhabbarkeit durch die Kombination der beiden Ansätze überwinden

In der vorliegenden Arbeit betrachten wir die vor kurzem aufgekommene Idee, die beiden obigen Ansätze zu kombinieren [FS13, PRS13]. Probleme werden mit Hilfe eines fpt-Algorithmus (statt eines Polynomialzeitalgorithmus) nach SAT übersetzt (oder „reduziert“). Dadurch kann die Fähigkeit von fpt-Algorithmen, bestimmte Eigenschaften von Probleminstanzen explizit in Form von Parametern zu berücksichtigen und algorithmisch auszunützen, mit der bemerkenswerten Leistungsstärke von SAT-Solvern kombiniert werden. Solche festparameter-handhabbaren Reduktionen nach SAT (kurz *fpt-SAT-Reduktionen*) stellen ein großes Potential dar, um den Einsatzbereich von SAT-Solvern maßgeblich zu erweitern. Andererseits brauchen die Parameter für eine fpt-SAT-Reduktion bedeutend weniger einschränkend zu sein, als für einen fpt-Algorithmus, der das Problem gänzlich löst.

In anderen Worten, der Ansatz der fpt-SAT-Reduktionen vereint die beiden einzelnen Ansätze (a) und (b) zu einem neuen Ansatz, der mächtiger ist als die beiden einzelnen Ansätze für sich genommen.

Eine Lücke in der bekannten parametrisierten Komplexitätstheorie Viele der algorithmischen Methoden, die in der parameterisierten Algorithmik entwickelt worden sind, lassen sich auch auf die Entwicklung von fpt-SAT-Reduktionen anwenden. Jedoch sind die bekannten komplexitätstheoretischen Konzepte und Methoden nur sehr eingeschränkt dazu geeignet, die Grenzen von fpt-SAT-Reduktionen aufzuzeigen. Viele der Probleme, für die eine fpt-SAT-Reduktion in Frage kommt, befinden sich in einem unerforschten Bereich der Komplexitätslandschaft (siehe Abbildung 1).

Um besser zu verstehen, was mit fpt-SAT-Reduktionen machbar ist, und was nicht, ist eine strukturierte Komplexitätsanalyse notwendig, die auch die Einführung neuer Konzepte beinhaltet.

Beispiel: Minimierung von DNF-Formeln Um die Unzulänglichkeiten bekannter theoretischer Konzepte zu veranschaulichen, betrachten wir zunächst als Beispiel das Problem der Minimierung aussagenlogischer Formeln. Die Aufgabe dieses Problems ist es, durch das Entfernen von Literalen eine aussagenlogische Formel φ_1 in disjunktiver Normalform (DNF) in eine möglichst kleine, logisch äquivalente DNF Formel φ_2 umzuwandeln. Dies ist ein grundlegendes Problem, das für viele praktischen Anwendungen relevant ist. Da dieses Problem Σ_2^p-vollständig ist (d.h. schwerer als NP) [Um00], bietet der Ansatz der Polynomialzeitübersetzungen nach SAT keine praktikable Lösung für dieses Problem. Der Ansatz der fpt-SAT-Reduktionen hat jedoch das Potential, ein Lösungsverfahren zu ermöglichen.

Wenn man als Parameter die Anzahl der von φ_1 zu entfernen Literalen nimmt, scheint eine fpt-SAT-Reduktion tatsächlich in Reichweite zu sein. Für jede konstante Anzahl der zu entfernen Literalen kann das Problem ja in Polynomialzeit in eine SAT-Eingabe übersetzt werden. Wir zeigen in dieser Arbeit, dass dieses parametrisiertes Problem sich in der Lücke zwischen bekannten Komplexitätsklassen (siehe Abbildung 1) befindet. Deswegen reichen die bisher bekannten parametrisierten Komplexitätsklassen nicht aus, um zulänglich untersuchen zu können, ob eine fpt-SAT-Reduktion für dieses Problem möglich ist oder nicht. In der vorliegenden Arbeit erzielen wir theoretische Resultate, die starke Hinweise dafür liefern, dass für das besprochene Minimierungsproblem und für viele weitere Beispielsprobleme keine fpt-SAT-Reduktionen möglich sind.

4 Ziel: Entwicklung und Anwendung neuer Konzepte und Methoden

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, eine strukturierte und grundlegende komplexitätstheoretische Analyse zu ermöglichen, die Potential und Grenzen der Methode der fpt-SAT-Reduktion aufzeigt. Hierbei ist es uns besonders wichtig, uns bei der Entwicklung der Methoden durch die Analyse von konkreten Problemen aus verscheiden Bereichen der Informatik leiten zu lassen. Damit soll sichergestellt werden, dass die entwickelten Konzepte auch tatsächlich anwendbar sind, und nicht rein abstrakte und inhaltsleere Kon-

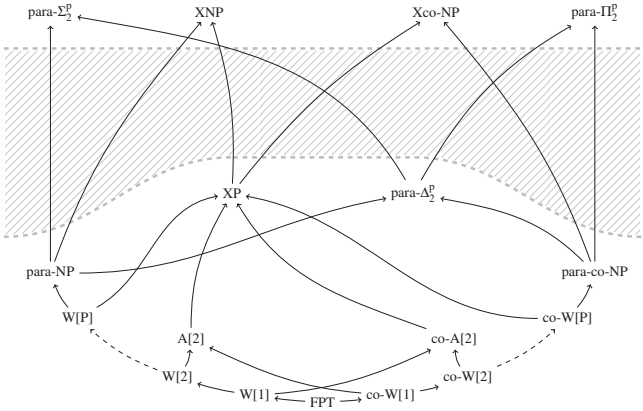


Abb. 1: Die Lücke (gestrichelter grauer Bereich) zwischen den bisher bekannten parametrisierten Komplexitätsklassen: in diesem Bereich wurden vor dieser Arbeit keine Komplexitätsklassen untersucht, obwohl sich dort viele fundamentale parametrisierten Probleme befinden.

strukte bleiben. Die vorgestellte Arbeit ist von den folgenden vier für uns wesentlichen Fragestellungen geprägt:

1. *Was ist das Potential von festparameter-handhabbaren Übersetzungen auf SAT, und macht es einen Unterschied, ob in eine oder mehrere SAT-Eingaben übersetzt wird?* Bisher wurden nur festparameter-handhabbare Übersetzungen in eine einzelne SAT-Eingabe betrachtet, was die parametrisierte Komplexitätsklasse para-NP ergibt. Selbst in diesem Fall ist diese Klasse bisher hauptsächlich nur für negative Resultate herangezogen worden.
2. *Können wir theoretische Methoden entwickeln, um die Möglichkeit von fpt-SAT-Reduktionen in bestimmten Fällen auszuschließen?* Das vorhandene theoretische Instrumentarium ist unzureichend. Es gibt zwar einige bekannten parametrisierten Komplexitätsklassen (z.B. die Klasse para-Σ_2^{p}), die man benutzen kann, um die Unmöglichkeit von fpt-SAT-Reduktionen aufzuzeigen. Die bekannten Klassen sind jedoch nur in sehr drastischen Fällen anwendbar, wo die Unmöglichkeit von fpt-SAT-Reduktionen mehr oder weniger offensichtlich ist.
3. *Können wir eine feingliedrige parametrisierten Komplexitätstheorie entwickeln, die dazu geeignet ist, die Komplexität verschiedener parametrisierter Probleme auszuwerten, die ohne Parametrisierung zwischen der ersten und zweiten Stufe der polynomiellen Hierarchie angesiedelt sind (d.h. zwischen* para-NP *und* para-Σ_2^{p}*)?* Solch eine Theorie ist erforderlich um passende untere und obere Schranken für die Komplexität vieler interessanten parametrisierten Problemen zu finden, die in zahlreichen Bereichen der Informatik auftreten.
4. *Für welche nicht-handhabbaren Probleme, die im Bereich der Künstliche Intelligenz und in anderen Bereichen der Informatik auftreten, bieten fpt-SAT-Reduktionen Potential für einen praktikablen Lösungansatz?* Viele relevante Probleme befinden sich auf der zweiten Ebene der polynomiellen Hierarchie, und können möglicherweise mit dem Ansatz der fpt-SAT-Reduktion effizient gelöst werden. Es fehlt eine strukturierte Untersuchung des Potentials dieses Ansatzes für solche Probleme.

5 Beiträge dieser Arbeit

Als nächstes beschreiben wir die Beiträge, die wir in dieser Arbeit leisten, um die vier vorgenannten Forschungsfragen zu beantworten.

(1) Wir untersuchen die verschiedenen Möglichkeiten, um parametrisierte Probleme anhand festparameter-handhabbarer Übersetzungen in eine oder mehrere SAT-Instanzen zu lösen, und in wieweit eine Übersetzung in mehrere SAT-Instanzen zu einem mächtigeren Verfahren führt.

- Wir liefern die erste strukturierte parametrisierte Komplexitätsuntersuchung, die auf das Enthaltensein in den Klassen para-NP und para-co-NP als primäre positive Ergebnisse abzielt.
- Wir führen verschiedene parametrisierte Komplexitätsklassen ein, die Problemen enthalten, die mittels einer festparameter-handhabbaren Übersetzung in mehrere SAT-Eingaben gelöst werden können. Am wichtigsten hat sich die Klasse $\mathrm{FPT}^{\mathrm{NP}}[\mathrm{few}]$ erwiesen, die Pro-

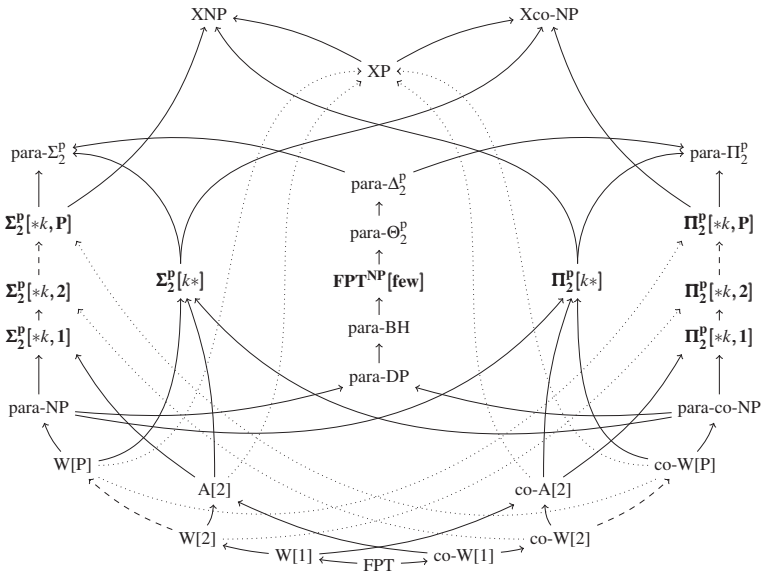


Abb. 2: Die wichtigste parametrisierte Komplexitätsklassen, die wir in dieser Arbeit entwickeln (fett hervorgehoben), und ihre Lage in der breiteren Landschaft parametrisierter Komplexitätsklassen. Die Klassen $\Sigma_2^p[*k,1]$–$\Sigma_2^p[*k,P]$, $\Sigma_2^p[k*]$, $\Pi_2^p[k*]$, und $\Pi_2^p[*k,1]$–$\Pi_2^p[*k,P]$ befinden sich in der Lücke, auf die wir in Abbildung 1 hingewiesen hatten.

bleme beinhaltet, die auf eine vom Parameterwert abhängige Anzahl von SAT-Eingaben übersetzt werden können (siehe Abbildung 2).

- Wir entwickeln theoretische Methoden, um untere Schranken für die erforderliche Anzahl der SAT-Eingaben bei festparameter-handhabbaren Übersetzungen nach SAT zu bestimmen.

(2) Um eine Untersuchung der Grenzen des Potentials von fpt-SAT-Reduktionen zu ermöglichen, zeigen wir, wie mittels Methoden der parametrisierten Komplexität in bestimmten Fällen Hinweise erhalten werden können, dass fpt-SAT-Reduktionen nicht möglich sind.

- Wir zeigen, dass A[2]-Schwere (A[2] ist eine bekannte parametrisierte Komplexitätsklasse) darauf hindeutet, dass für ein parametrisiertes Problem keine fpt-SAT-Reduktion möglich ist (weder eine Übersetzung in eine einzelne, noch in mehrere SAT-Eingaben).

(3) Wir entwickeln neue parametrisierte Komplexitätsklassen, mit denen man feine unterschiedlichen Grade der Komplexität parametrisierter Varianten von Problemen, die von höheren Ebenen der polynomiellen Hierarchie stammen, differenzieren kann.

- Wir liefern starke theoretische Argumente dafür, dass die bekannten parametrisierte Komplexitätsklassen unzureichend sind, um den genauen Grad der Komplexität vieler parametrisierten Problemen festzustellen. Dies gilt insbesondere für Probleme, deren nicht-parametrisierte Formen sich auf höheren Ebenen der polynomiellen Hierharchie

befinden. Das heißt, wir zeigen, dass sich viele fundamentale parametrisierten Probleme in der Lücke befinden, auf die wir in Abbildung 1 hingewiesen haben.

- Wir führen neue parametrisierte Komplexitätsklassen ein, die die parametrisierte Komplexitätslandschaft zwischen der ersten und zweiten Ebene der polynomiellen Hierarchie repräsentieren. Diese Klassen sind in Abbildung 2 abgebildet.

  Diese parametrisierten Komplexitätsklassen basieren auf gewichteten Varianten des Erfüllbarkeitsproblems für quantifizierte boolesche Formeln mit einer einzelnen Quantorenalternierung. Z.B., die Klasse $\Sigma_2^{\mathrm{p}}[k*]$ basiert auf folgendem Problem:

  $\Sigma_2^{\mathrm{p}}[k*]$-WSAT
  Input: Eine quantifizierte boolesche Formel $\varphi = \exists X.\forall Y.\psi$, und eine positive ganze Zahl k.
  Parameter: k.
  Question: Gibt es eine Wahrheitsbelegung α für X mit Hamming-Gewicht k (d.h., α erfüllt genau k Variablen) so dass für alle Wahrheitsbelegungen β auf Y es gilt, dass ψ erfüllt wird durch $\alpha \cup \beta$?

- Wir erhellen die Frage, welche Rolle der Nichtdeterminismus in diesen parametrisierten Komplexitätsklassen spielt, indem wir alternative Charakterisierungen dieser Klassen aufzeigen.

  Wir charakterisieren die Klassen $\Sigma_2^{\mathrm{p}}[k*]$, $\Sigma_2^{\mathrm{p}}[*k,t]$, $\Pi_2^{\mathrm{p}}[k*]$ und $\Pi_2^{\mathrm{p}}[*k,t]$ mittels alternierender Turingmaschinen (mit passenden Schranken für die Laufzeit sowie Einschränkungen von Art und Ausmaß des verfügbare Nichtdeterminismus); dies führt zu einem Pendant des Satzes von *Cook-Levin*.
- Wir zeigen, dass die neuen parametrisierten Komplexitätsklassen eine Vollständigkeitstheorie erzeugen, die es ermöglicht, die genaue Komplexität fundamentaler parametrisierter Probleme zu ermitteln. Dies war mit den bisher bekannten parametrisierten Komplexitätsklassen nicht möglich.
- Außerdem stellen wir Verbindungen zwischen den neu entwickelten Klassen und anderen Bereichen der Komplexitätstheorie her, wie z.B. der *nicht-uniformen Komplexität* und der *subexponentiellen Komplexität*.

  Wir erzielen beispielsweise ein parametrisiertes Pendant des Satzes von *Karp-Lipton*, das eine Verbindung zwischen den neu entwickelten parametrisierten Klassen und den nicht-uniformen parametrisierten Komplexitätsklassen herstellt.
- Wir verallgemeinern die Klassen $\Sigma_2^{\mathrm{p}}[k*]$, $\Sigma_2^{\mathrm{p}}[*k,t]$, $\Pi_2^{\mathrm{p}}[k*]$ und $\Pi_2^{\mathrm{p}}[*k,t]$, indem wir ähnliche parametrisierte Komplexitätsklassen auf höheren Ebenen der polynomiellen Hierarchie, nämlich die Klassen $\Sigma_i^{\mathrm{p}}[w,t]$ und $\Pi_i^{\mathrm{p}}[w,t]$, für beliebige Zeichenketten $w \in \{*,k\}^i$, einführen.

(4) Wir initiieren eine strukturierte Untersuchung der parametrisierten Komplexität von Problemen aus verscheidenen Bereichen der Informatik (wie z.B. KI), bei der wir uns besonders dafür interessieren, ob eine fpt-SAT-Reduktion möglich ist.

- Wir identifizieren verschiedene bekannte praktische Methoden aus der Literatur (z.B. das *bounded model checking* für bestimmte Zeitlogiken, die in der formalen Verifikation von Bedutung sind), die als fpt-SAT-Reduktionen betrachtet werden können. Dies zeigt auf, dass fpt-SAT-Reduktionen auch tatsächlich zu praktikablen Lösungen führen können.

Problem	Parameter	Klasse
Disjunktives Answer-Set Programming *(Ist ein disjunctives Answer-Set Programm konsistent?)*	# der 'kontingenten' Regeln # der disjunctiven Regeln # der nicht-dual-Horn Regeln	$\Sigma_2^{\mathrm{p}}[k*]$ $\Sigma_2^{\mathrm{p}}[*k,\mathrm{P}]$ $\Sigma_2^{\mathrm{p}}[*k,\mathrm{P}]$
DNF Minimierung *(Kann man eine DNF Formel φ durch das Entfernen von Literalen in eine kleinere, äquivalente DNF Formel φ' umwandeln?)*	# der zu entfernen Literalen	$\Sigma_2^{\mathrm{p}}[k*]$
Abductives Schließen *(Kann eine Menge von Konsequenzen durch eine Teilmenge von Hypothesen erklärt werden, unter Berücksichtigung einer logischen Theorie (einer KNF Formel)?)*	# der nicht-Horn Klauseln # der Klauseln der Größe > 2	$\Sigma_2^{\mathrm{p}}[*k,\mathrm{P}]$ $\Sigma_2^{\mathrm{p}}[*k,1]$
Modellprüfung für Prädikatenlogik ($\exists\forall$) *(Erfüllt ein Modell einen prädikatlogischen Satz mit einem $\exists\forall$-Quantorenpräfix?)*	# der existentiellen Variablen	$\Sigma_2^{\mathrm{p}}[k*]$
Implikantminimierung *(Kann man ein Implikant I einer DNF Formel φ durch das Entfernen von Literalen in einen kleineren Implikanten I' von φ umwandeln?)*	# der zu entfernen Literalen Größe der Implikant I'	$\Sigma_2^{\mathrm{p}}[k*]$ $\Sigma_2^{\mathrm{p}}[k*]$
'Robuste' Bedingungserfüllung *(Kann jede Teillösung für eine Menge von Bedingungen auf eine vollständige Lösung erweitert werden?)*	Größe der Teillösungen	$\Sigma_2^{\mathrm{p}}[k*]$
Reparatur logischer Inkonsistenzen *(Kann man eine Teilmenge von einer inkonsistenten Menge aussagelogischer Formeln entfernen, damit die Menge logisch konsistent wird, und dabei bestimmte Formeln erhalten bleiben?)*	# der zu entfernen Formeln	$\mathrm{FPT}^{\mathrm{NP}}[\mathrm{few}]$

Tab. 1: Kleine Auswahl von Problemen aus unserem Kompendium, die für die neu entwickelten parametrisierten Komplexitätsklassen vollständig sind.

- Wir setzen das entwickelte theoretische Instrumentarium dazu ein, um zu untersuchen, für welche der vielen natürlichen parametrisierten Varianten von Problemen aus diversen Bereichen der Informatik, die wir betrachten, fpt-SAT-Reduktionen möglich sind.

  Wir fassen diese Ergebnisse in Form eines ausführlichen Kompendiums (im Garey-Johnson Stil [GJ79]) mit über 75 Einträgen zusammen. Siehe Tabelle 1 für einen kleinen Ausschnitt der Vollständigkeitsergebnisse aus diesem Kompendium.

6 Abschließende Bemerkungen

Die vorliegende Arbeit erweitert die Theorie der parametrisierten Komplexität in geeigneter Weise, um vor allem Probleme, die schwerer als NP sind, zu analysieren. Dabei haben wir auch eine Reihe neuer parameterisierter Komplexitätsklassen eingeführt, die einen bisher unerforschten Bereich in der Komplexitätslandschaft abdecken. Die lange Liste der konkreten Probleme, die wir als vollständig für einzelne neu eingeführte Komplexitätsklassen zeigen konnten, ist ein guter Hinweis dafür, dass die neuen Klassen sinnvoll und nützlich sind. Weiters haben wir die Robustheit der neuen Komplexitätsklassen durch verschiedene alternative Charakterisierungen untermauert. Wir sehen unsere Resultate und Konzepte als den Anfang einer rigorosen komplexitätstheoretischen Untersuchung vieler weiterer

Probleme, wofür wir passende Werkzeuge zur Verfügung stellen. Weiters sehen wir unsere Resultate auch als den ersten Schritt zu einer weiter ausdifferenzierten Theorie, die interessante und herausfordernde Fragestellungen für die komplexitätstheoretische Forschung stellt.

Literaturverzeichnis

[Bi09] Biere, Armin; Heule, Marijn; van Maaren, Hans; Walsh, Toby, Hrsg. Handbook of Satisfiability, Jgg. 185 in Frontiers in Artificial Intelligence and Applications. IOS Press, 2009.

[Bo12] Bodlaender, Hans L.; Downey, Rod; Fomin, Fedor V.; Marx, Dániel, Hrsg. The Multivariate Algorithmic Revolution and Beyond, Jgg. 7370 in Lecture Notes in Computer Science. Springer Verlag, 2012.

[Co71] Cook, Stephen A.: The Complexity of Theorem-Proving Procedures. In: Proc. 3rd Annual Symp. on Theory of Computing. S. 151–158, 1971.

[Cy15] Cygan, Marek; Fomin, Fedor V.; Kowalik, Lukasz; Lokshtanov, Daniel; Marx, Dániel; Pilipczuk, Marcin; Pilipczuk, Michal; Saurabh, Saket: Parameterized Algorithms. Springer, 2015.

[DF13] Downey, Rodney G.; Fellows, Michael R.: Fundamentals of Parameterized Complexity. Texts in Computer Science. Springer Verlag, 2013.

[FG06] Flum, Jörg; Grohe, Martin: Parameterized Complexity Theory, Jgg. XIV in Texts in Theoretical Computer Science. Springer Verlag, Berlin, 2006.

[FS13] Fichte, Johannes Klaus; Szeider, Stefan: Backdoors to Normality for Disjunctive Logic Programs. In: Proceedings of the 27th AAAI Conference on Artificial Intelligence (AAAI 2013). AAAI Press, S. 320–327, 2013.

[GJ79] Garey, Michael R.; Johnson, David R.: Computers and Intractability. W. H. Freeman and Company, New York, San Francisco, 1979.

[PRS13] Pfandler, Andreas; Rümmele, Stefan; Szeider, Stefan: Backdoors to Abduction. In (Rossi, Francesca, Hrsg.): Proceedings of the 23rd International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI 2013). AAAI Press/IJCAI, 2013.

[Um00] Umans, Christopher: Approximability and Completeness in the Polynomial Hierarchy. Dissertation, University of California, Berkeley, 2000.

[Va14] Vardi, Moshe Y.: Boolean satisfiability: theory and engineering. Communications of the ACM, 57(3):5, März 2014.



Ronald de Haan studierte von 2007 bis 2010 im Bachelor-Studiengang Sprachwissenschaft und im Bachelor-Studiengang Künstliche Intelligenz an der Universität Utrecht, sowie von 2010 bis 2012 im Master-Studiengang Computational Logic an der Technischen Universität Dresden, an der Freien Universität Bozen, und an der Technischen Universität Wien. In 2016 schloss er sein Doktorat ab an der Technischen Universität Wien. Zur Zeit forscht er als Postdoc am Institute for Logic, Language and Computation der Universität von Amsterdam.

Finite Punktprozesse und deren Anwendung im Target Tracking [1]

Christoph Degen[2]

Abstract: Das mathematische Modell eines Punktprozesses beschreibt die zufällige Verteilung von Punkten sowohl in der Kardinalität als auch in der räumlichen Verteilung. In dieser Arbeit werden symmetrische Punktprozesse und deren eindeutige Charakterisierung in Form von wahrscheinlichkeitserzeugenden Funktionalen genutzt, um neue und exisitierende Verfahren des Trackings von Objekten zu formulieren und herzuleiten. Dabei entsteht nicht nur ein Katalog, der dem Anwender die Vielfalt der existierenden Tracking–Methoden erklärt und Zusammenhänge zwischen bekannten Algorithmen aufdeckt, sondern der vorgestellte Formalismus eröffnet zusätzlich die Möglichkeit, individuelle Lösungen für neue Problemstellungen des Trackings auf intuitive Art und Weise zu modellieren und anzuwenden. Die Leistungsfähigkeit der präsentierten Methodik wird durch die konkrete Anwendung auf das Problem der passiven, nicht–kooperativen Lokalisierung und Verfolgung von elektromagnetischen Emittern mit Hilfe eines mobilen Antennen–Arrays im urbanen Umfeld unterstrichen.

Keywords: Tracking, Sensordatenfusion, Punktprozess, PGFL, PHD, MHT, Mehrwegeausbreitung, Lokalisierung.

1 Einführung

Tracking ist ein Teilgebiet der Sensoratenfusion und beschäftigt sich mit der Verfolgung dynamischer Objekte auf Basis unvollständiger und mit Fehler behafteter Messungen. Auf Grund der enormen Nachfrage nach leistungsfähigen Algorithmen wurden in den vergangenen Jahrzehnten eine Vielzahl von Methoden und Verfahren in diesem Teilgebiet der Angewandten Informatik entwickelt. Die Vielfalt und Verflechtung der existierenden Konzepte befähigt einerseits zur Lösung von Szenarien mit unterschiedlichsten Randbedingungen, kann andererseits aber nur von den wenigsten Wissenschaftlern vollständig durchschaut werden. Eine Vereinheitlichung der bestehenden Trackingverfahren ist daher für ein tiefgehendes Verständnis dieses Forschungsfeldes von großer Bedeutung.
Die Theorie der Punktprozesse ist ein hochentwickeltes Werkzeug der Wahrscheinlichkeitstheorie und Statistik, das genau wie die Theorie der stochastischen Prozesse eine Vielzahl von Anwendungen in der Finanz– und Wirtschaftsmathematik, Biologie und Physik erfährt. Punktprozesse eignen sich in besonderer Weise zur Modellierung von dynamischen Objekten und Sensormessungen aus Trackinganwendungen, da sowohl die Anzahl als auch die räumliche Verteilung der entsprechenden Elemente nachgebildet werden kann. Das den Punktprozess eindeutig und vollständig charakterisierende wahrscheinlichkeitserzeugende Funktional bietet sich auf Grund seiner kompakten Form als Repräsentant eines

[1] Englischer Titel der Dissertation: „Finite Point Processes and Their Application to Target Tracking“

[2] Fraunhofer–Institut für Kommunikation, Informationsverarbeitung und Ergonomie FKIE, Abteilung Sensordaten– und Informationsfusion SDF, christoph.degen@fkie.fraunhofer.de

Trackingfilters und somit als Grundlage für die einheitliche Darstellung von Trackingverfahren an, da alle notwendigen statistischen Informationen über den Filter auf eine intuitiv verständliche Art und Weise verschlüsselt und zusammengefasst in ihm vorliegen. In dieser Arbeit wird die Entwicklung, Charakterisierung und Vereinheitlichung von Trackingverfahren mit Hilfe von finiten Punktprozessen untersucht und auf die passive, nicht kooperative Lokalisierung und Verfolgung von elektromagnetischen Emittern im städtischen Gebiet mit Hilfe eines mobilen Antennen–Arrays angewendet. Mit Hilfe von vier Kernthesen werden die wesentlichen Beiträge dieser Arbeit herausgestellt.
Abschnitt 2 erarbeitet ein theoretisches Fundament für den Einsatz von finiten Punktprozessen zur Vereinheitlichung und Herleitung von Trackingfiltern. Es wird gezeigt, dass sich viele bekannte Trackingfilter mit Hilfe von wahrscheinlichkeitserzeugenden Funktionalen charakterisieren lassen und die verschiedenen Bausteine eines Trackingfilters werden an Hand seines wahrscheinlichkeiterzeugenden Funktionals erklärt. In besonderer Weise eignet sich die vorgestellte Darstellung dazu, die Gemeinsamkeiten und Unterschiede zwischen einzelnen Filtern hervorzuheben, ein grundlegendes Verständnis für die bestehenden Trackingkonzepte zu entwickeln und neue Ansätze zu modellieren und herzuleiten.
Abschnitt 3 behandelt die passive, nicht kooperative Lokalisierung und Verfolgung von elektromagnetischen Emittern im urbanen Umfeld mit Hilfe eines einzelnen mobilen Antennen–Arrays. Dazu werden die in Abschnitt 2 diskutierten Trackingfilter durch sequentielle Monte–Carlo Verfahren implementiert und auf Basis der Problemstellung weiterentwickelt. Den Abschluss bildet die Entwicklung eines neuartigen Multi–Hypothesen basierten Parameter–Trackingverfahrens für relative Laufzeiten, das Falschmessungen zurückweist, die vor dem ersten Ziel–basierten Mehrweg empfangen werden und auch bei einem hohen Anteil von Falschmessungen, Messausfällen und Sensorrauschen eine zuverlässige Lokalisierung und Verfolgung ermöglicht.

2 Finite Punktprozesse im Target Tracking

Die Aufgabe des Trackings ist die Schätzung eines oder mehrerer dynamischer Zielzustände auf Basis von heterogenen Sensormessungen, die verrauscht, unvollständig, mehrdeutig, fehlerbehaftet oder falsch sein können. Dabei lässt sich sowohl der Mess– als auch der Zustandsprozess als eine zeitliche Aufeinanderfolge von jeweils zufälligen, endlichen und symmetrischen Punktmustern modellieren. Diese in der Praxis getroffene Modellannahme bedeutet, dass jedes Tracking–Problem als eine Abfolge von Realisierung mindestens zweier finiter Punktprozesse eindeutig definiert wird. Das Modell ist weiterhin die Grundlage für die eindeutige Charakterisierung eines Tracking–Filters mit Hilfe von wahrscheinlichkeitserzeugenden Funktionalen (englisch: probability generating functional) (PGFL), deren grundlegenden Eigenschaften eingehend in [Mo62] untersucht werden. Im Folgenden wird die Anwendung von finiten Punktprozessen und PGFLs zur Charakterisierung, Modellierung und der Herleitung von Tracking–Filtern diskutiert.

2.1 Grundlagen

In diesem Abschnitt werden die Grundlagen von Punktprozessen definiert und deren Zusammenhang zum Tracking aufgezeigt. Die folgenden Definitionen und Betrachtungen können hier nur in aller Kürze präsentiert werden und sind unter anderem in [St13], [DVJ03], [HDC13], [De17] zu finden.
Sei $\mathscr{X}$ ein vollständiger separabler metrischer Raum. Für die betrachteten Anwendungen sei im Folgenden $\mathscr{X} \equiv \mathbb{R}^d$, $d > 0$. Sei weiter der Raum der Punktmengen in $\mathscr{X}$ gegeben durch $E_{\mathscr{X}} \equiv \emptyset \cup \bigcup_{n\geq 1} \mathscr{X}^{(n)}$, wobei $\mathscr{X}^{(n)} \equiv \{\{x_1,...,x_n\} | x_i \in \mathscr{X}, i = 1,...,n\}$ den Raum der Mengen mit n Elementen definiert. Sei $(\Omega, \mathscr{F}, \mathbb{P})$ ein beliebiger Wahrscheinlichkeitsraum. Für die messbare Abbildungen $\Phi : (\Omega, \mathscr{F}, \mathbb{P}) \to (E_{\mathscr{X}}, \mathscr{B}(E_{\mathscr{X}}))$, und

$$\begin{aligned} N_{(\cdot)}(B) : (E_{\mathscr{X}}, \mathscr{B}(E_{\mathscr{X}})) &\to (\mathbb{N}, \mathscr{B}(\mathbb{N})) \\ \varphi &\mapsto N_{\varphi}(B) \equiv |\varphi \cap B|, \end{aligned} \tag{1}$$

wird $N_{\Phi(\cdot)}(B) \equiv N_{(\cdot)}(B) \circ \Phi : (\Omega, \mathscr{F}, \mathbb{P}) \to (\mathbb{N}, \mathscr{N})$ definiert. Im Sinne von [DVJ03] definiert $N_{\Phi(\cdot)}(\cdot) : (\Omega, \mathscr{F}, \mathbb{P}) \to M_p \equiv \{\mu \in M : \mu(A) \in \mathbb{N} \text{ for all } A \in B\}$ als messbare Abbildung von einem Wahrscheinlichkeitsraum in den Raum der Punktmaße M_p [Ka91] einen Punktprozess. Anschaulich stellt die Realisierung eines Punktprozesses eine in Kardinalität und Verteilung zufällige Punktmenge dar und kann daher für die Modellierung von Messungen und Zielzuständen im Tracking verwendet werden. Da in praktischen Tracking–Anwendungen die Anzahl der Ziele und Messungen immer endlich ist und zwei Messungen bzw. Ziele nicht den gleichen Zustand annehmen werden im Folgenden simple und finite Punktprozesse im Sinne von [DVJ03] betrachtet.
In [Mo62] wird gezeigt, dass jedem Punktprozess Φ mit symmetrischer Wahrscheinlichkeitsverteilung P_{Φ} eindeutig ein Funktional zugeordnet werden kann. Dieses Funktional nimmt für den Fall, dass der Punktprozess ein symmetrisches Wahrscheinlichkeitsmaß besitzt, eine übersichtliche Form an und bietet daher ideale Voraussetzungen für den Vergleich und die Definition von Punktprozessen.
Durch die funktionale Ableitung bezüglich Dirac–Delta [St13] können viele wichtige Kenngrößen eines Punktprozesses aus dem zugehörigen PGFL abgeleitet werden, die im Tracking genutzt werden, um Filter zu definieren. Dazu gehören die Wahrscheinlichkeit einer Konfiguration, das PGFL des Bayesschen Posterior Prozesses, die faktoriellen Momente, die ZV der Zielanzahl, die Posteriordichte der Zielanzahl und die Likelihood–Funktion. Die Details zu der Herleitung der spezifischen Kenngrößen eines Punktprozesses können in [De17, Kapitel 2] nachgelesen werden. Dabei bedarf die funktionale Ableitung bezüglich Dirac–Delta wie in Abschnitt 2.3 diskutiert besonderer Aufmerksamkeit.

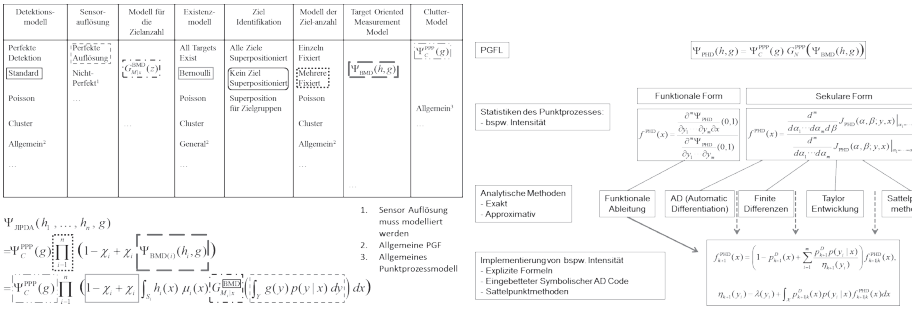
2.2 Die Familie der Punktprozess–Filter

Im vorangegangenen Abschnitt wurde gesagt, dass ein Punktprozess mit symmetrischer Wahrscheinlichkeitsverteilung eindeutig durch ein wahrscheinlichkeitserzeugendes Funktional beschrieben werden. Des Weiteren wurde motiviert, warum Punktprozesse ein ideales mathematisches Modell für die Herausforderungen des Trackings sind. Dies ist die

Grundlage für eine exakte, übersichtliche und einheitliche Darstellung aller praktisch relevanten Trackingfilter mit Hilfe von PGFLs. Tabelle 3.1 in [De17] und Tabelle I. [SDK15] präsentieren eine in ihrer Gesamtheit erstmalige Übersicht in Form der den Filter charakterisierenden PGFL von bekannten klassischen nicht–superpositioniernden Tracking–Filtern wie dem Bayes–Markov Filter, der unter den linearen–Gauß Annahmen den Kalman–Filter repräsentiert, dem Probabilistic Data Association (PDA), dem Joint Probabilistic Data Assoication (JPDA), dem Integrated Probabilistic Data Association (IPDA), dem Joint Integrated Probabilistic Data Association (JIPDA), dem Probabilistic Multi–Hypothesis Tracking (PMHT) und dem Multi–Hypothesen Tracking (MHT) Filter bis hin zu neueren Verfahren wie den Probabiliy Hypothesis (PHD) Intensitäts, den Multi–Bernoulli und den Cardinalized Probability Hypothesis (CPHD) Filtern, die zu den superpositionierenden Filtern zählen. Die Superposition, d.h. die Überlagerung von Zielen in einem Raum, kann dabei als der entscheidende Unterschied zwischen den Filterklassen angesehen werden. Liegt die Superpositionsannahme einem Filter zu Grunde, so sind Ziele ununterscheidbar und müssen auf Basis der in Abschnitt 2 beschriebenen Statistiken extrahiert werden. Ein Vorteil der Superposition ist dabei das Auslassen expliziter Assoziationen zwischen den Messungen und den Zielzuständen und damit das Einsparen von numerischer Komplexität. Im Gegensatz dazu führen klassische nicht–superpositionierende Filter Ziel–Identitäten mit und haben durch die Möglichkeit der Marginalisierung wesentliche Vorteile in der Ziel–Zustandsextraktion und dem Schließen der Bayeschen Rekursion, d.h. der Anpassung der Posteriordichte an die vorgegebenen Modellannahmen. Auf Grund der mathematisch exakten und übersichtlichen Beschreibung ermöglicht diese Darstellung einen einfachen Vergleich zwischen bestehenden Verfahren und hilft so nicht nur die bestehende Methodik einzuordnen und zu verstehen sondern bietet auch die Werkzeuge und Bausteine um neue Filter zu formulieren. So wird in [De17] und [SDK15] zusätzlich eine vollständig neue Klasse von sogenannten Hybriden–PHD Intensitätsfiltern formuliert, indem bestehende Bausteine neu kombiniert werden. Diese Filter trennen Gruppen von Zielen und kombinieren somit die Vorteile von superpositionierenden und nicht–superpositionierenden Filtern. Außerdem wird in [De17] und [SDK15] eine Modellierungs–Übung für den praktisch arbeitenden Tracking–Ingenieur anhand des Beispiels von schlecht–aufgelösten Zielen präsentiert und somit die Bedeutung des Formalismus für die Anwendung hervorgehoben.

Abbildung 1 (a) visualisiert die Bausteine der vorgestellten Methodik anhand des JIPDA–Filters und verdeutlicht die Modularität der Vorgehensweise. Durch den Austausch einzelner Modelle kann ein bestehender Filter so einfach an vorgegebene Randbedingungen angepasst oder ein völlig neues Filter–Konzept generiert werden. Damit bietet die entwickelte Methodik die Chance auf eine intuitive Art und Weise innovative Lösungen für aktuelle Fragestellungen des Trackings zu finden. Die erste Kernthese der Arbeit lautet daher

Die Gesamtheit aller praktisch–relevanten Tracking–Filter kann durch Punktprozesse, insbesondere durch PGFLs beschrieben werden.



(a) Modellierung (b) Herleitung

Abb. 1: *Modellierung:* Ein Tracking–Filter lässt sich vollständig mit einem PGFL charakterisieren. Diese Abbildung stellt die in [De17] und [SDK15] untersuchte Palette von Punktprozessen zur Modellierung von Ziel– und Messmodellen dar und zeigt wie aus Ihnen der JIPDA–Filter konstruiert wird (a). *Herleitung:* Die den Punktprozess und somit auch das Tracking–Modell beschreibenden Statistiken lassen sich durch funktionale oder gewöhnliche Ableitungen bestimmen (b).

2.3 Herleitung der faktoriellen Momente des Bayesschen Posterior Prozesses

Im vorangegangen Abschnitt wurde gezeigt, dass ein PGFL die Eigenschaften eines Tracking–Filters vollständig, einfach und übersichtlich zusammenfasst. Eine Anwendung der in Abschnitt 2.2 beschriebenen Filter ist jedoch nur möglich, wenn die entsprechenden in Abschnitt 2.1 vorgestellten Statistiken eines Punktprozesses aus dem PGFL extrahiert werden können. In [Mo62] und [St14] wird gezeigt, dass diese Extraktion mit Hilfe von funktionaler Differentiation bezüglich Dirac–Delta [Wa74] erfolgt. In [St14] werden sekulare Funktionen mit Hilfe von gewichteten Dirac–Summen definiert und es wird für die Funktionalklasse $\mathscr{P}_1 \equiv \left\{ \Psi : \mathscr{G} \to \mathbb{R} : \ \Psi(g) \equiv F\left(\int_Y g(y)q_1(y)dy, ..., \int_Y g(y)q_k(y)dy\right) \right\}$, $F(s_1,...,s_k) \equiv \sum_{i_1,...,i_k \geq 0} p_{i_1,...,i_k} s_1^{i_1} \cdot ... \cdot s_k^{i_k}$,, $(s_1,..,s_k) \in \mathbb{C}^k$, $p_{i_1,...,i_k} \in [0,1]$ bewiesen, dass die funktionale Ableitung bezüglich Dirac–Delta mathematisch korrekt durch eine gewöhnliche Ableitung bestimmt werden kann. Die in [St14] untersuchte Klasse von Funktionalen ist jedoch für die Gesamtheit der durch Punktprozesse darstellbaren Tracking–Filter nicht ausreichend. Daher wird in [De17] die Funktionalklasse $\mathscr{P}_1$ aus [St14] auf die Klasse $\mathscr{P}_2 \equiv \left\{ \Psi : \mathscr{H} \to \mathbb{R} : \Psi(h) = \sum_{n \geq 0} \frac{a_n}{n!} \int_{\mathscr{X}^n} \prod_{i=1}^{n} h(x_i) f_n(x_1,...,x_n) dx_1 ... dx_n \right\}$ erweitert, wobei $\mathscr{H} \equiv \{h : \mathscr{X} \to \mathbb{R} : |h| < 1, h$ nicht–negativ und Lebesgue–integrierbar$\}$, $\mathscr{X} = \mathbb{R}^d$, $d \geq 1$, $a_n \in [0,1]$, $\sum_{n \geq 0} a_n = 1$, $n \in \mathbb{N}$ und $f_n : \mathscr{X}^n \to \mathbb{R}$ eine beschränkte symmetrische Wahrscheinlichkeitsdichte ist. Mit Hilfe des Satzes der majorisierten Konvergenz [Al12] und kombinatorischen Betrachtungen kann gezeigt werden, dass die Theorie der sekularen Funktionen auf die Funkionalklasse $\mathscr{P}_2$ erweitert werden kann. Details können in [De17] nachgelesen werden. Die zweite Kernthese der Arbeit lautet daher

Eine systematische Herleitung aller bestehender und neuer Punktprozess–Filter ist möglich.

Somit können alle praktisch relevanten Tracking–Filter mit Punktprozesstheorie modelliert und mit gewöhnlichen Ableitung hergeleitet werden. Abbildung 1 (b) skizziert die Möglichkeiten der Herleitung der für die Implementierung des Filters benötigten Statistiken auf Basis des entsprechenden PGFLs. Die Herleitung der Filter durch gewöhnliche Differentiation ermöglicht die Anwendung verschiedener exakter Verfahren wie beispielsweise Automatic Differentation (AD), die als Bibliotheken für nahezu alle Programmiersprachen vorliegt oder approximativer Verfahren wie Sattelpunkt–Approximation, Taylor–Entwicklung und finite Differenzen.

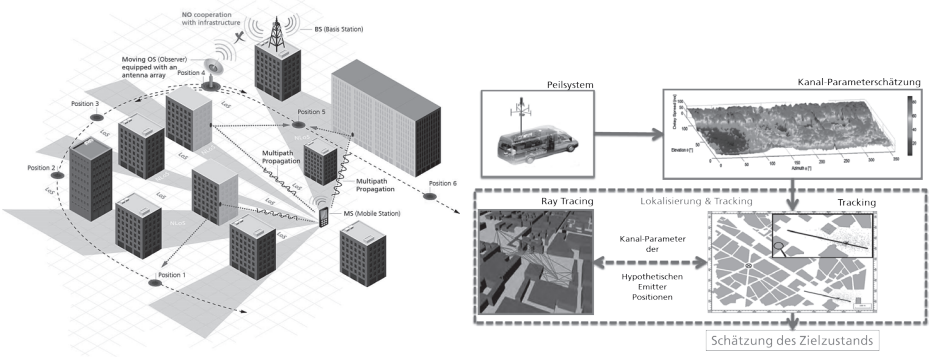
3 Eine Anwendung auf das Problem der Emitterverfolgung unter Mehrwegesausbreitungsbedingungen

Im Fokus des Praxisteils der Dissertation [De17] steht die passive und nicht–kooperative Verfolgung von elektromagnetischen Emittern im urbanen Umfeld mit Hilfe eines Antennen–Arrays (kurz: Blind Mobile Localization (BML)–Problem). Dabei werden Verfahren eingesetzt, die mit der in Abschnitt 2 vorgestellten Methodik hergeleitet werden können. Nach einer kurzen Einführung in die grundlegenden Szenario–Definitionen des BML–Problems in Abschnitt 3.1 werden in Abschnitt 3.2 verschiedene Lösungsmöglichkeiten des BML Tracking–Problems auf Basis von standardisierten und verallgemeinerten PHD Intensitätsfiltern vorgestellt. Diese in [De17] erstmals für das betrachtete Problem vorgestellten Verfahren sind stark abhängig von der korrekten Messung der relativen Laufzeit. Aus diesem Grund wird in Abschnitt 3.3 ein Verfahren zur Vorverarbeitung der Messdaten mit Hilfe eines Multi–Hypothesen Ansatzes vorgestellt, der ebenfalls mit der Theorie aus Abschnitt 2 hergeleitet werden kann.

3.1 Szenario–Grundlagen

Die nicht–kooperative und passive Lokalisierung und Verfolgung von elektromagnetischen Emittern im urbanen Umfeld mit Hilfe eines Antennen–Arrays besitzt zwei Randbedingungen, die eine Entwicklung von Lösungsverfahren besonders anspruchsvoll macht. Zum einen implizieren die Wörter nicht–kooperativ und passiv, dass dem Tracking–Algorithmus keine Informationen über das vom Emitter ausgestrahlte Signal und die Signallaufzeit vorliegen. Zum anderen stellt das urbane Umfeld eine besondere Herausforderung dar. Durch die dichte Bebauung kommt es zur Reflexionen, Streuungen und Beugungen des sich radial ausbreitenden emittierten elektromagnetischen Signals. Daraus ergibt sich wie in Abbildung 2 (a) dargestellt, dass ein Ziel mehrere Messungen pro Sensor–Scan erzeugt, die sogenannten Mehrwege, die jeweils durch ihre relative Laufzeit und ihren Einfallswinkel charakterisiert werden. Zusätzlich zu den Messdaten steht dem Tracking–Aglorithmus Kontextinformation in Form einer Ray–Tracing Simulation zur Verfügung. Auf der Grundlage der Bebauung im betrachteten Gebiet prädiziert der Ray–Tracer für jeden Punkt auf

der Karte und eine vordefinierte Parametrisierung die Ausbreitung des elektromagnetischen Signals und liefert dem Tracking–Algorithmus somit für jede hypothetische Emitterposition eine Menge von prädizierten Mehrwegen. Die Aufgabe eines BML–Tracking–Verfahrens ist es dann auf Basis der Zuordnung der gemessenen und der prädizierten Mehrwege eine Zielzustandsschätzung für jeden Zeitschritt durchzuführen.



(a) BML–Szenario (b) BML–Verarbeitungskette

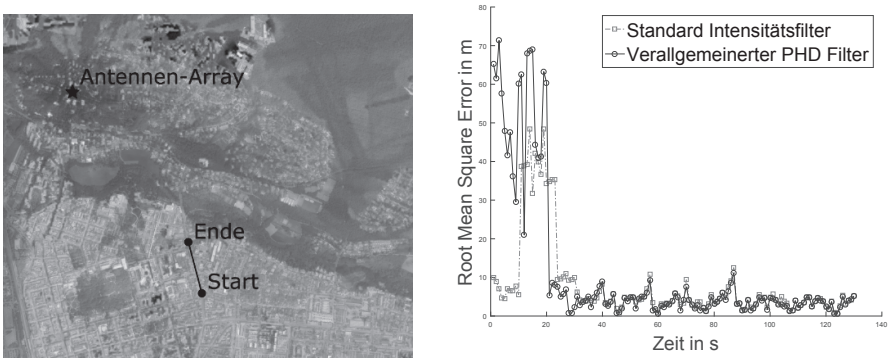
Abb. 2: Auf Grund des urbanen Umfelds kommt es bei einem BML–Szenario zu Mehrwegeausbreitung, d.h. das ausgesandte Signal spaltet sich durch Reflexionen, Beugungen und Streuungen auf und gelangt auf verschieden Pfaden zum Antennen–Array (a). Die Verarbeitungskette bestehend aus einem Antennen–Array, der Signalverarbeitung, Kontextwissen in Form eines Ray–Tracers und der Sensordatenfusion, die in den Abschnitten 3.2 und 3.3 untersucht wird. Ray–Tracing Visualisierung: © 2015 AWE Communications. Observer Modell, Parameterschätzung: © 2015 Saab Medav Technologies GmbH. Daten–Fusion: © 2013 IEEE (b).

3.2 Lösung des BML–Problems mit PHD Intensitätsfiltern

Die Algorithmen der Sensordatenfusion werden durch die in Abschnitt 3.1 formulierten Nebenbedingungen vor die Herausforderung gestellt, dass ein Ziel mehrere Messungen pro Sensor–Scan erzeugt, die im Messraum räumlich nicht zusammengefasst werden können. Vor diesem Hintergrund werden sogenannte PHD und Intensitätsfilter [Ma07], [St13] erstmals auf das vorgestellte Szenario angewendet. Dabei kommen im Wesentlichen zwei unterschiedliche Messmodelle zum Einsatz, die eine Entwicklung verschiedener komplexer Verfahren erfordern, bevor eine Anwendung der Filter auf Realdaten erfolgen kann.
Das Standard–Messmodell des klassischen PHD Intensitätsfilters trifft die Annahme, dass ein Ziel höchstens eine Messung erzeugt. Aus diesem Grund ist die Entwicklung von leistungsfähigen Extraktionsverfahren für den Zielzustand und neuartigen Likelihood–Funktionen zur Bewertung einzelner empfangener Mehrwege erforderlich. Die Lösung des Assoziationsproblems zwischen den Mengen der Messungen und der Zielzustände stellt dabei eine große Herausforderungen dar, da ein räumliches Clustering der Messungen eines Ziel im Messraum nicht möglich ist.
Das verallgemeinerte Messmodell nimmt an, dass ein Ziel beliebig viele Messungen erzeugen kann. Aufwendige numerische Approximationen und Verwerfungsstrategien von Mess–Partitionen sind notwendig, wenn dieses Messmodell in PHD Intensitätsfiltern [CM12]

angewendet werden soll. Aus diesem Grund werden verschiedene Kriterien zur Reduktion der numerischen Komplexität unter Verwendung der Abschnitt 2 vorgestellten Theorie hergeleitet und analysiert. In [De17] wird die Anwendbarkeit der entwickelten Verfahren dabei sowohl in Simulations– als auch in Realdatenszenarien demonstriert. Abbildung 3 (b) zeigt hierzu den Vergleich zweier sequentieller Monte–Carlo Implementierungen des verallgemeinerten PHD– und des standard Intensitätfilters für das in Abbildung 3 (a) gezeigte Szenario. Die dritte Kernthese der Arbeit lautet daher

Das BML–Problem kann mit PHD Intensitätsfiltern gelöst werden.



(a) BML–Szenario (b) Numerischer Vergleich

Abb. 3: Das betrachte Szenario inklusive einer Visualisierung der prädizierten Feldstärke. Kartendaten: © GeoBasis–DE/BKG 2015. Visualisierung Ray–Tracer: © 2015 AWE Communications des Ray–Tracers (a). Numerischer Vergleich der untersuchten Verfahren (b).

3.3 Parameter–Tracking für BML–Probleme

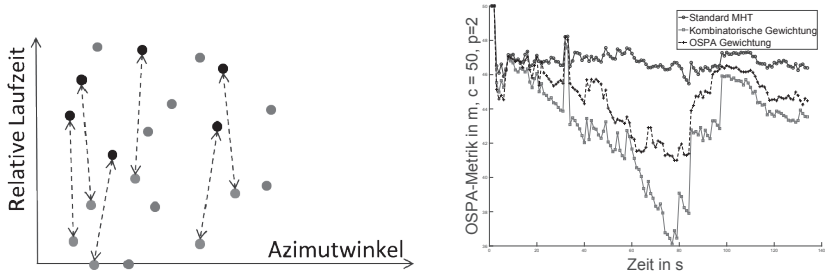
Eine korrekte Zielzustandsschätzung für das untersuchte BML–Problem kann nur erfolgen, wenn die Zuordnung zwischen den gemessenen und den vom Ray–Tracer prädizierten Mehrwegen gelingt. Da die Signallaufzeit der empfangenen Ziel–Signale unbekannt ist, können die empfangenen Mehrwege neben dem Einfallswinkel nur durch eine relative Laufzeit beschrieben werden. Kommt es zu Falschmessungen auf Grund von Objekten, die nicht in der Referenzdatenbank des Ray–Tracers hinterlegt sind (z.Bsp. Autos, Laternenmasten, Personen) so können Mehrwege, die von solchen Objekten stammen, vor dem ersten Mehrwegs eines Ziels am Antennen–Array eintreffen. Daraus folgt, wie in Abbildung 4 (a) zu sehen, dass eine Zuordnung zwischen den gemessenen und den prädizierten relativen Laufzeiten unmöglich ist. Daher wird auf Basis des MHT–Algorithmus, ein Verfahren abgeleitet das eine Vorverarbeitung von Mehrwegemessungen durchführt. Dazu werden durch Marginalisierung die Ereignisse $\{\neg i_C, (i-1)_C\}$ eingeführt, die annehmen, dass die ersten $(i-1)$ Messungen Falschmessungen sind, d.h. von Objekten stammen, die nicht in der Referenzdatenbank enthalten sind und die *i*–te Messung tatsächlich von einem

Ziel stammt. Damit ergibt sich approximativ für die Posteriordichte des MHT–Filters

$$p(x_k|Z_k) \approx p(Z_k|x_k) \cdot p(x_k|Z^{k-1}) \cdot p(\neg 1_C|Z^{k-1}) + \sum_{i=2}^{m_k} p(Z_{k,i}|x_k) \cdot p(x_k|Z^{k-1}) \cdot p(\neg i_C, (i-1)_C|Z^{k-1}). \quad (2)$$

Die Wahrscheinlichkeiten $p(\neg i_C, (i-1)_C|Z^{k-1})$ und $p(\neg 1_C|Z^{k-1})$ werden zum einen mit kombinatorischen Methoden und zum anderen mit Hilfe der optimal subpattern assignment (OSPA) Metrik [SVV08] definiert. In Abbildung 4 (b) ist die numerische Auswertung der OSPA–Metrik zwischen der Menge der tatsächlichen und der durch das jeweilige MHT–Verfahren geschätzten Zielzustände zu sehen. Die vierte Kernthese der Arbeit lautet daher

Ein neuartiges MHT–Verfahren zur Vorverarbeitung von relativen Laufzeiten konnte erfolgreich abgeleitet werden.



(a) Zuordnung von Mehrwegen (b) Numerischer Vergleich

Abb. 4: Entstehen durch Objekte, die nicht in der Ray–Tracing Datenbank enthalten sind Mehrwege, die vor dem ersten Mehrweg eintreffen (rot) kann eine Zuordnung zwischen den prädizierten (blau) und den gemessenen Mehrwegen (schwarz) nicht mehr erfolgen (a). Der numerische Vergleich zeigt, dass unter dem Einfluss von Clutter die vorgestellten Verfahren (rot und schwarz) eine deutlich bessere Performanz als das bisherige State–of–the–Art Verfahren (blau) zeigen (b).

4 Zusammenfassung

Die Theorie der Punktprozesse dient in dieser Arbeit als Hilfsmittel für die Entwicklung einer einheitlichen Formulierung von Tracking–Algorithmen. Diese Darstellung dient nicht nur dem besseren Verständnis und dem Vergleich von bestehenden Verfahren. Sie dient auch dazu, neue maßgeschneiderte Verfahren zu modellieren und mit Hilfe von funktionaler oder gewöhnlicher Differentiation exakt oder approximativ neue Tracking–Verfahren herzuleiten. Dies wird zum einen durch die Entwicklung einer neuen Klasse von Hybriden PHD–Intensitätsfiltern in Abschnitt 2 demonstriert. Zum anderen wird durch die Lösung des Problems der passiven, nicht–kooperativen Verfolgung eines elektromagnetischen Emitters im urbanen Umfeld mit Hilfe eines Antennen–Arrays durch PHD Intensitäts– und MHT–Filter demonstriert, dass sich die in Abschnitt 2 untersuchten Filter für die Lösung komplexer und praxisrelevanter Tracking–Probleme eignen.

Literaturverzeichnis

[Al12] Alt, H. W.: Lineare Funktionalanalysis. Springer, 2012.

[CM12] Clark, D.; Mahler, R.: Generalized PHD filter via a General Chain Rule. In: Proceedings of the 15th International Conference on Information Fusion. Singapore, 2012.

[De17] Degen, C.: Finite Point Processes and Their Application to Target Tracking. Dissertation, Rheinisch Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, 2017. urn:nbn:de:hbz:5n-46056.

[DVJ03] Daley, D.J.; Vere-Jones, D.: An introduction to the theory of point processes, Volume 1: Elementary Theory and Methods. Springer, 2. Auflage, 2003.

[HDC13] Houssineau, J.; Delande, E.; Clark, D.: Notes of the Summer School on Finite Set Statistics. arXiv preprint arXiv:1308.2586, Aug. 2013.

[Ka91] Karr, A. F.: Point Processes and Their Statistical Inference. CRC Press, 2nd. Auflage, 1991.

[Ma07] Mahler, R.: Statistical Multisource-Multitarget Information Fusion. Norwood MA: Archtech House, 2007.

[Mo62] Moyal, J. E.: The General Theory Of Stochastic Population Processes. Acta Mathematica, 108:1–31, 1962.

[SDK15] Streit, R.; Degen, C.; Koch, W.: , The pointillist family of multitarget tracking filters. Submitted to IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems, May 2015. Online available at http://arxiv.org/abs/1505.08000; Website retrieved at the 18.06.2015.

[St13] Streit, R.: The Probability Generating Functional for Finite Point Processes, and Its Application to the Comparison of PHD and Intensity Filters. Journal of Advances in Information Fusion, 8(2):119–132, Dec. 2013.

[St14] Streit, R.: A technique for Deriving Multitarget Intensity Filters Using Ordinary Derivatives. Journal of Advances in Information Fusion, 9:3–12, Jun. 2014.

[SVV08] Schumacher, D.; Vo, B.-T.; Vo, B.-N.: A Consistent Metric for Performance Evaluation of Multi-Object Filters. IEEE Transactions on Signal Processing, 56(8):3447–3457, Aug. 2008.

[Wa74] Walter, W.: Einführung in die Theorie der Distributionen. Bibliographisches Institut - Wissenschaftsverlag, Mannheim, Germany, 1974.



Christoph Degen erhielt sein Diplom in Mathematik 2011 von der Technischen Universität Kaiserslautern. An der Rheinisch Friedrich–Wilhelms–Universität Bonn promovierte er 2017 mit der Arbeit „Finite Point Processes and Their Application in Target Tracking“ zum Dr. rer. nat. Seit 2011 arbeitet er in der Abteilung Sensordaten– und Informationsfusion am Fraunhofer–Institut für Kommunikation, Informationsverarbeitung und Ergonomie. Seine Forschungsschwerpunkte sind neben der Anwendung von Punktprozessen im Target Tracking auch die Anwendung von Partial Observable Markov Decision–Prozessen zur Trajektorienoptimierung.

Simulation von Privatsphärenschutz in Fahrzeug-Ad-hoc-Netzen[1]

David Eckhoff[2]

Abstract: Der drahtlose Datenaustausch zwischen Fahrzeugen ist eine vielversprechende Technologie, um die Sicherheit im Straßenverkehr zu erhöhen. Gleichzeitig könnte die große Menge an erhobenen und gesendeten Daten jedoch starke Einschnitte in die Privatsphäre der Fahrer bedeuten. Die diesem Artikel zugrunde liegende Dissertation beschäftigt sich mit der simulativen Bewertung von Privatsphäre in Fahrzeug-Ad-hoc-Netzen. Die vorgestellte Methodik ermöglichte es, das Privatsphärenproblem detailliert zu erfassen und darauf aufbauend umsetzbare und vor allem zu Sicherheitsfunktionen kompatible Vorschläge auszuarbeiten und zu bewerten.

1 Einführung

Moderne Kraftfahrzeuge bestehen aus einer Vielzahl an Steuergeräten, d.h. kleinen Computern mit spezifischen Aufgaben, wie z.B. der Regelung des Blinkers oder das Auslösen des Airbags im richtigen Moment. Viele Aktionen im Fahrzeug werden von mehreren Steuergeräten gleichzeitig und in Kooperation ausgeführt, was wiederum erfordert, dass diese Computer die Möglichkeit haben miteinander zu kommunizieren. Bei über 100 Steuergeräten pro Fahrzeug, gekoppelt über diverse Bussysteme, kann man sagen, dass Fahrzeuge heutzutage mobile Computernetzwerke sind. Der nächste logische Schritt ist es demnach, Fahrzeuge auch untereinander zu verbinden und in Form von drahtloser Kommunikation Datenaustausch zu ermöglichen.

Die Hauptmotivation dieser Car-2-Car-Systeme ist vor allem die Steigerung der Verkehrssicherheit. Fahrzeuge senden periodisch (z.B. mit einer Frequenz von 10 Hertz) über ein WLAN-System unter anderem ihre Position und Geschwindigkeit; Fahrzeuge in Reichweite (typischerweise bis ca. 500 Meter) empfangen diese Nachrichten und können sich dadurch eine virtuelle Umgebung aufbauen. So wird die frühzeitige Erkennung von Gefahrensituationen ermöglicht, um entweder den Fahrer zu warnen oder automatisierte Eingriffe in die Fahrzeugdynamik vorzunehmen. Die Standardisierung dieser Systeme in Europa (ETSI ITS-G5) und den USA (IEEE WAVE) ist bereits fortgeschritten und zudem haben diverse Feldtests weltweit gezeigt, dass die Technologie ausgereift genug ist. Aus technischer Sicht stünde einer Einführung demnach nichts im Wege.

Die oftmals vernachlässigte Schattenseite solcher allgegenwärtiger Systeme ist die Gefährdung der Privatsphäre des Fahrers. Das periodische und unverschlüsselte Senden von Statusinformationen in Car-2-Car-, oder allgemeiner, Car-2-X-Systemen, könnte dazu miss-

[1] Englischer Titel der Dissertation: “Simulation of Privacy-Enhancing Technologies in Vehicular Ad-Hoc Networks”

[2] Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, david.eckhoff@fau.de

braucht werden, Fahrer virtuell zu verfolgen, d.h. zu jeder Zeit Informationen über den Aufenthaltsort einer Person zu erhalten. Der gravierende Unterschied zu Mobiltelefonen ist, dass der Fahrer in der Regel keine Wahl hat das Gerät abzuschalten, weil ein Betrieb entweder vom Gesetzgeber vorgeschrieben ist, oder, wenn ein Abschalten möglich wäre, der Fahrer gezwungen würde sich zwischen Sicherheit und Privatsphäre zu entscheiden. Ein weiterer Aspekt ist, dass diese Systeme ununterbrochen Informationen übermitteln, d.h. auch wenn ein Fahrer zu schnell fährt oder z.B. einen Spurwechsel ohne Blinken durchführt. Diese Daten können sicherlich helfen, um im Falle eines Unfalles die Schuldfrage zu klären. Jedoch können sie auch missbraucht werden, um ein vollautomatisiertes Verkehrsüberwachungssystem zu installieren, in dem jeder Fahrer bei der kleinsten Ordnungswidrigkeit mit einer Geldstrafe belegt wird. Diese Art von allgegenwärtiger Überwachung hat den Beigeschmack einer Orwellschen Dystopie, die, wenn auch zu diesem Zeitpunkt etwas schwarz-malerisch, einen entscheidenden Einfluss auf das Freiheitsgefühl der Bürger haben würde. Neue Technologien und Systeme sollten also so konzipiert werden, dass sie einen solchen Missbrauch nicht ermöglichen, aber dennoch ihren Zweck vollständig erfüllen können.

Die größte Problematik bei der Evaluierung, ob ein System die Anforderungen an den Privatsphärenschutz erfüllt, ist dass Privatsphäre selber ein unscharfer Begriff ist, der schwer zu isolieren und noch schwerer zu quantifizieren ist. Genau dies ist aber notwendig um beurteilen zu können, ob eine Variante des Systems die Privatsphäre mehr schützt als eine andere. Die diesem Artikel zugrunde liegende Dissertation beschäftigt sich genau mit dieser Fragestellung, nämlich wie komplexe Systeme wie Fahrzeugnetze simuliert werden können, um Erkenntnisse über die Gefährdung der Privatsphäre zu erlangen. Darauf basierend werden eigene Methoden zum Privatsphärenschutz vorgestellt und analysiert.

2 Privatsphäre in Fahrzeugnetzen

Um überhaupt Privatsphärenschutz zu ermöglichen, muss der Begriff Privatsphäre zuerst definiert werden. Alan Westin definiert ihn als „die Fähigkeit eines Individuums die Rahmenbedingungen, unter welchen persönliche Informationen gesammelt und benutzt werden, zu bestimmen" [We67]. Persönliche Informationen werden von der EU als „jegliche Informationen die eine [...] identifizierbare Person betreffen" [Eu95] definiert. Nissenbaum spezifiziert etwas schärfer und definiert Privatsphäre im Rahmen von kontextabhängiger Integrität [Ni04], d.h. jeglicher persönlichen Information hängt ein Kontext an (z.B. ein Arztbesuch) wobei ein Verwenden außerhalb dieses Kontextes eine Verletzung der Privatsphäre darstellt. Solch ein Eingriff in die Privatsphäre kann weitreichende Konsequenzen haben, wie z.B. aufdringliche Werbung, Veröffentlichung von Informationen, die zu Unannehmlichkeiten oder Demütigung der betroffenen Person führen, bis hin zum Missbrauch durch totalitäre Regierungen, die im schlimmsten Fall sensible Informationen (wie z.B. den Aufenthaltsort) benutzen, um politische oder soziale Minderheiten zu verfolgen [SHG03].

Privatsphäre kann in verschiedene Teilbereiche untergliedert werden, z.B. nach Finn et. al [FWF13], die unter anderem zwischen Privatheit der Person, des Verhaltens und des

Ortes unterscheiden. Zusätzlich zu diesen Teilbereichen definieren Pfitzmann und Hansen [PH10] verschiedene Aspekte von Privatsphäre, die durch technische Methoden geschützt werden können. Diese Aspekte sind Anonymität, Unverkettbarkeit von Ereignissen, Nichterkennbarkeit, Abstreitbarkeit und Vertraulichkeit.

Der Schutz von Privatsphäre ist meistens in Abhängigkeit von einem hypothetischen Angreifer zu betrachten. Das Ziel des Angreifers ist es, sensible Informationen (wie z.B. dem Aufenthaltsort eines Individuums) in Erfahrung zu bringen. Die Definition des Angreifers erfolgt üblicherweise über dessen Eigenschaften [Dí02]. So kann er anhand verschiedener Dimensionen charakterisiert werden, z.B. intern vs. extern, lokal vs. global, aktiv vs. passiv, statisch vs. adaptiv, oder bzgl. existierendem Vorwissen. Um den Privatsphärenschutz zweier Systeme miteinander vergleichen zu können, muss das zugrunde liegende Angreifermodell identisch sein. Es ist daher unbedingt notwendig, genau zu spezifizieren, unter welchen Rahmenbedingungen welche Art von Privatsphäre und welche Aspekte bewertet wurden.

Der präsentierten Taxonomie folgend beschäftigen sich die Methoden und Evaluierungen in dieser Arbeit hauptsächlich mit der Privatheit des Ortes unter den Aspekten der Anonymität und Unverkettbarkeit, basierend auf den periodisch gesendeten Nachrichten innerhalb eines Ad-Hoc-Fahrzeugnetzes. Als Angreifer wird ein Externer, Passiver, Lokaler angenommen, der szenariospezifisches Wissen hat, d.h. er weiß über die physischen Grenzen der Fahrzeugdynamik Bescheid, ohne jedoch zum Beispiel konkretes Wissen über den Fahrstil einzelner Personen zu verfügen.

Die Notwendigkeit von effektiven Mechanismen zum Privatsphärenschutz in Ad-Hoc-Fahrzeugnetzen wurde früh erkannt, jedoch sind nur wenige dieser Aspekte tatsächlich in die Standards der ETSI oder IEEE eingeflossen [ES14]. Das europäische ETSI ITS-G5 und das amerikanische IEEE WAVE System weisen sehr viele Ähnlichkeiten auf: In beiden Systemen sollen Fahrzeuge, basierend auf dem WLAN-Standard IEEE 802.11p, periodisch mit bis zu 10 Hertz unverschlüsselte Statusnachrichten versenden. Diese Nachrichten können ohne größeren Aufwand von jedem, der sich in Reichweite befindet, abgehört und benutzt werden, um Fahrzeuge virtuell zu verfolgen. Um diesen Missbrauch zu verhindern, sehen beide Standards den Aufbau einer sogenannten Public-Key-Infrastruktur in Verbindung mit Pseudonymen vor.

Dieses System basiert auf asymmetrischer Kryptographie und der Nutzung von Zertifikaten. Alle Zertifikate beinhalten den öffentlichen Schlüssel, eine Gültigkeitsdauer und eine Signatur, zusammen mit der Identität des Signierers. Jedes Fahrzeug ist mit einem Basiszertifikat, den dazugehörigen öffentlichen und privaten Schlüsseln sowie mit dem Zertifikat der Zertifizierungsstelle ausgestattet. Das Basiszertifikat ist von der Zertifizierungsstelle unterschrieben und erlaubt es dem Fahrzeug pseudonyme Zertifikate, oder kurz, Pseudonyme, anzufordern. Für Car-2-X-Kommunikation werden ausschließlich Pseudonyme benutzt und niemals die Basisidentität selbst. Das Pseudonym ist somit die Absenderadresse des Fahrzeuges. Wenn ein Fahrzeug eine unverschlüsselte Nachricht sendet, so werden das aktuell gültige Pseudonymzertifikat und eine Signatur dieser Nachricht, welche mit dem privaten Schlüssel dieses Pseudonyms erstellt ist, angehängt. Das empfangende Fahrzeug prüft dann die Signatur im Pseudonymzertifikat sowie die Signatur der

Nachricht. Durch diese Mechanismen können Integrität und Authentizität der Nachricht sichergestellt werden.

Sollte ein Fahrzeug den Eigentümer wechseln, das Car-2-X-System im Fahrzeug kompromittiert worden sein oder unabsichtlich fehlerhafte Nachrichten gesendet werden, so ist es notwendig alle noch gültigen Pseudonyme des Fahrzeuges zu widerrufen, um einen negativen Einfluss auf andere Fahrzeuge zu verhindern [EDS13]. Der Prozess des Zertifikatswiderrufes stellt selbst eine Herausforderung an den Privatsphärenschutz dar, wie später im Artikel gezeigt wird.

Die bloße Verwendung einer PKI gewährt noch keinen Schutz der Privatsphäre, da z.B. eine zu geringe Wechselfrequenz des Pseudonymes einem Angreifer die Möglichkeit verschafft, ein Fahrzeug über eine gesamte Fahrt hinweg wiederzuerkennen. Es ist daher entscheidend, welche Pseudonymwechselstrategie angewendet wird. Es existieren eine Reihe an Vorschlägen [Pe15], vom Austausch von Pseudonymen zwischen Fahrzeugen, über zeitlich oder örtlich gebundene Pseudonyme, bis hin zu dem Konzept, nach einem Pseudonymwechsel eine kurze Zeit nicht zu senden, um mithörende Angreifer zu verwirren.

Viele dieser Methoden vernachlässigen jedoch, dass Mechanismen zum Privatsphärenschutz keinen negativen Einfluss auf die Verkehrssicherheit haben dürfen und selbst auch keine neuen möglichen Angriffsvektoren mit sich bringen sollten [ES16]. Ein Ziel dieser Arbeit ist es herauszufinden, wie dieser Privacy-Safety-Tradeoff gelöst werden kann, da es scheint, dass bis zum jetzigen Zeitpunkt viele Schutzmechanismen das falsche Ziel verfolgen: Das Verwirren eines mithörenden Angreifers. Dies steht im direkten Widerspruch zum eigentlichen Ziel von Fahrzeugnetzen, nämlich Fahrzeugen in der Nähe zu erlauben eine virtuelle Umgebung aufzubauen, um Unfälle zu vermeiden.

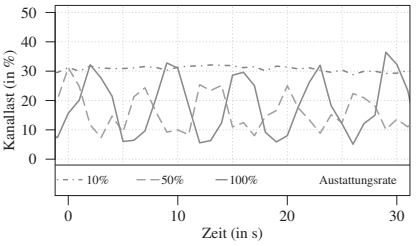
3 Bewertung von Privatsphäre mittels Simulation

Der Einsatz von Simulationswerkzeugen zur Leistungsbewertung von Applikationen und Protokollen im Kontext der Fahrzeugkommunikation ist weit verbreitet. Üblicherweise werden diskrete, mikroskopische, agenten-basierte Simulationsumgebungen eingesetzt, d.h. das Verhalten jedes Fahrzeuges (= Agent) wird autonom bestimmt, woraus sich Effekte auf das Gesamtsystem ergeben. Mikroskopisch bestimmt in diesem Kontext den Abstraktionsgrad. Fahrzeuge bestimmen autonom zu jedem diskreten Zeitschritt ihr Verhalten, wie z.B. Spurwechsel oder Beschleunigung.

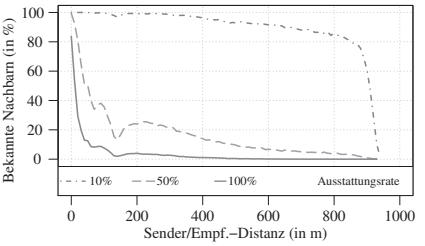
Die Mobilität der Fahrzeuge hat einen entscheidenden Einfluss auf die Netzwerktopologie, und Informationen die von Fahrzeugen empfangen werden, können wiederum Einfluss auf die Mobilität haben. Aus diesem Grund werden Netzwerksimulatoren und Verkehrssimulatoren bidirektional gekoppelt. Im Falle dieser Arbeit sind dies der Netzwerksimulator OMNeT++ und der Verkehrssimulator SUMO.

Eine wichtige Erkenntnis im Rahmen dieser Arbeit ist, dass die eingesetzten Modelle der zugrundeliegenden Funktechnologie einen entscheidenden Einfluss auf die Netztopologie haben können [ESD12], und somit auch direkt auf Mechanismen zum Privatsphärenschutz.

So berücksichtigen diverse Wechselstrategien auch Fahrzeuge in der direkten Umgebung, um zu entscheiden, ob das Pseudonym gewechselt werden soll [Ec11]. Aus diesem Grund wurden für beide Kommunikationsstandards, IEEE WAVE und ETSI ITS-G5, detaillierte Modelle der Medienzugriffsschicht entwickelt [ESG13] und der physische Kanal so gut wie möglich approximiert [So13].



(a) Problem der Kanallastoszillation unter ETSI ITS-G5 bei hoher Ausstattungsrate



(b) Paketkollisionen durch Synchronisierung bei IEEE WAVE führen zu nicht erkannten Nachbarn

Abbildung 1: Exemplarische Ergebnisse der Medienzugriffsmodellierung mit entdeckten Schwachstellen des europäischen und amerikanischen Systems

Zwei weitere wichtige Ergebnisse finden sich in Abbildung 1. Die detailgetreue Modellierung der unteren Schichten ermöglichte die Aufdeckung von Schwachstellen in den Protokollen. Es konnte gezeigt werden, dass die Kanalüberlastkontrolle bei ETSI ITS-G5 zu synchronisierten, starken Oszillationen gesamter Fahrzeugverbünde führen kann (Abbildung 1a), was wiederum zur Folge hat, dass die Kanalkapazität nicht effizient genutzt wird [ESG13]. Dies hat direkten Einfluss auf mögliche Sicherheitsanwendungen. Ähnliche Problematiken treten bei IEEE WAVE auf, jedoch werden diese hier durch den im Standard vorgesehenen periodischen Kanalwechsel hervorgerufen, durch den Fahrzeuge direkt nach dem Kanalwechsel mit einer größeren Wahrscheinlichkeit auf den Kanal zugreifen [ESD12]. In Abbildung 1b erkennt man, dass die daraus resultierenden hohen Paketverluste direkten Einfluss darauf haben, wie viele Fahrzeuge in naher Umgebung erkannt werden. (Beide Erkenntnisse wurden auf sichtbaren Konferenzen präsentiert und auch direkt mit Partnern in den jeweiligen Gremien besprochen, was dazu beitrug, dass Vorschläge zur Behebung dieser Probleme in den Standard einfließen werden.)

Um zu verstehen, welchen Grad an Privatsphärenschutz verschiedene Pseudonymwechselstrategien erreichen, wurde ein modernes Multi-Target-Tracking System entwickelt. Die Idee hierbei ist es, sich in die Rolle des Angreifers zu versetzen und zu versuchen mit den zugrunde liegenden Informationen, sprich den empfangenen Paketen, Fahrzeuge durch das Netzwerk zu verfolgen. Der Angreifer ist so modelliert, dass er verschiedene Empfängerantennen platziert und die unverschlüsselten Übertragungen der Fahrzeuge abhorcht.

Die Problematik und das Prinzip sind in Abbildung 2 dargestellt: Angenommen zwischen Zeitpunkt $t = 2$ und $t = 3$ wechseln Fahrzeuge ihre Pseudonyme, so ist es das Ziel des Angreifers anhand der nun scheinbar anonymen Beobachtungen $o1, o2, o3$ die bereits existierenden Tracks fortzuführen. Ist er in der Lage dies mit hoher Wahrscheinlichkeit zu erreichen, so war dieser Pseudonymwechsel hinsichtlich dieses Angreifers wirkungslos.

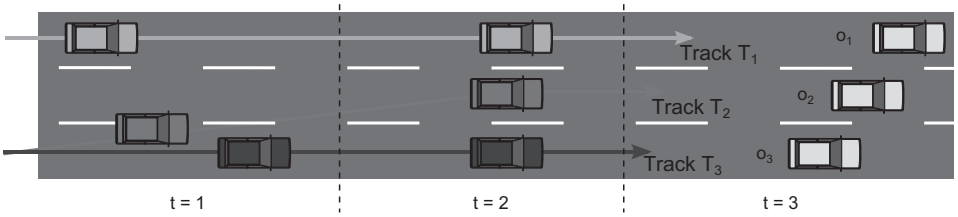
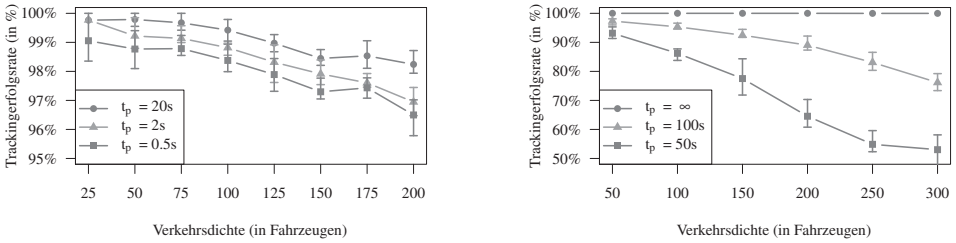


Abbildung 2: Tracking kann verstanden werden als das Problem der Zuordnung von neuen Beobachtungen o_i zu existierenden Tracks T_j.



(a) Vollüberwachtes Kreuzungsszenario

(b) Teilüberwachtes Autobahnszenario

Abbildung 3: Trackingerfolgsrate eines Angreifers bei verschiedenen Pseudonymgültigkeitsdauern t_p. Fehlerbalken zeigen die 25%- und 75%-Quantile über alle Simulationsläufe.

Das entwickelte Trackingsystem wurde mit verschiedenen Pseudonymwechselstrategien aus der Literatur evaluiert. Das entscheidende Ergebnis hierbei ist, dass es selbst auf einer sehr geschäftigen Kreuzung mit hunderten Fahrzeugen nicht möglich ist, einen mithörenden Angreifer zu verwirren, ohne dabei die Verkehrssicherheitsmechanismen des Systems negativ zu beeinflussen. Abbildung 3a zeigt die Ergebnisse für eine vollständig abgedeckte Kreuzung. Ein Fahrzeug gilt als getrackt, wenn der Angreifer es von der Einfahrt in den Kreuzungsbereich bis zum Verlassen virtuell verfolgen kann, sich also nicht von Pseudonymwechseln verwirren lässt. Es ist zu beobachten, dass es selbst unter für die Privatsphäre scheinbar optimalen Bedingungen bei Pseudonymgültigkeitsdauern von $t_p = 0.5s$ und einer Sendefrequenz von 1Hz fast unmöglich ist, einen Angreifer zu verwirren (Tracking-Erfolgsrate von über 95%).

In einem zweiten Szenario wurde der Effekt von Pseudonymwechseln bei Fahrzeugen untersucht, die sich zum Zeitpunkt des Wechsels nicht in Reichweite eines Angreifers befanden. Zu diesem Zweck wurde ein Autobahnabschnitt untersucht, in dem ein Angreifer am Anfang und am Ende eine Empfängerantenne platziert hat. In der Mitte entstand dadurch ein ca. 800 Meter breiter Bereich, in dem der Angreifer keine Pakete empfangen konnte. Fahrzeuge gelten in diesem Szenario als getrackt, wenn der Angreifer in der Lage war Fahrzeuge von Anfang bis zum Ende des Abschnittes zu verfolgen, sie also beim Passieren der zweiten Empfangsantenne wiederzuerkennen. Die Ergebnisse in Abbildung 3b zeigen, dass bei Pseudonymgültigkeitsdauern von 50s (ca. 90% Chance, dass ein Fahrzeug sein Pseudonym im nicht überwachten Bereich wechselt) nur noch 50% aller Fahrzeuge verfolgt werden konnten.

Die bisherige Herangehensweise muss also grundlegend geändert werden. Weg von dem Ziel mithörende Angreifer zu verwirren, hin zu einem Privatsphärenschutz, der effektiv ausnutzt, wenn ein Angreifer nicht mithört. Zusätzlich sollte dieser Schutz niemals die Verkehrssicherheit negativ beeinflussen und außerdem ressourcenschonend bzgl. Speicherplatz im Fahrzeug und Kommunikationsoverhead sein. Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine solche Lösung entwickelt, die im nächsten Kapitel vorgestellt wird.

4 Effizienter und praktikabler Privatsphärenschutz

Die Basis des vorgeschlagenen Ansatzes bildet ein Pseudonympool, der aus für alle Fahrzeuge synchronen, nicht überlappenden Zeitschlitzen besteht [Ec11]. Jedes Fahrzeug verwaltet einen solchen Pool und wechselt sein Pseudonym, sobald der nächste Zeitschlitz aktiv wird. An den Zeitschlitzgrenzen ändert folglich jedes Fahrzeug im gesamten Netzwerk sein Pseudonym. Die Konfiguration dieser Pools basiert daher nur auf zwei Parametern: der Größe des Pools sowie der Länge eines Zeitschlitzes.

Nimmt man an, dass alle Fahrzeuge synchrone Uhren haben (z.B. durch GPS), dann ist der Pseudonymwechsel nahezu exakt synchron. Damit diktiert die Zeitschlitzlänge automatisch die Pseudonymwechselstrategie. Dies impliziert des Weiteren, dass alle Fahrzeuge, die zu diesem Zeitpunkt nicht von einem Angreifer überwacht werden können, ein neues, dem Angreifer unbekanntes Pseudonym verwenden. Das erschwert das Tracking, wenn diese Fahrzeuge wieder in einen vom Angreifer überwachten Bereich einfahren und ist eine wichtige Eigenschaft des Systems. Die Verwirrung des Angreifers kann auf diese Weise maximiert werden, was wiederum mit einer Maximierung der Privatsphäre der betroffenen Fahrzeuge gleichzusetzen ist [ES16]. Je kleiner die Zeitschlitzlänge gewählt ist, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit, dass ein Fahrzeug sein Pseudonym wechselt, während es sich außerhalb der Reichweite eines Angreifers befindet. Dies ist damit der entscheidende Parameter für die Privatsphäre des Systems.

Ein weiterer Vorteil von nicht überlappenden Zeitschlitzen ist, dass sogenannte Sybil-Angriffe, also Angriffe, bei denen ein Fahrzeug mehrere Fahrzeuge imitiert, nicht mehr möglich sind, weil zu jedem beliebigen Zeitpunkt nur ein valides Pseudonym pro Fahrzeug verfügbar ist. Weiterhin erlaubt das Zeitschlitzverfahren effiziente Pseudonymwiderrufsverfahren, wie anschließend gezeigt wird.

Die Problematik, dass Mechanismen zum Privatsphärenschutz einen negativen Einfluss auf die Verkehrssicherheitsfunktionen der Car-2-X-Systeme haben können, stellt eine große Hürde beim Design dieser Mechanismen dar. Der Ansatz der synchronen Zeitschlitze nimmt den Fahrzeugen die autonome Entscheidung, wann das Pseudonym gewechselt werden soll. Das heißt, alle Fahrzeuge auf einer geschäftigen Kreuzung werden gleichzeitig ihr Pseudonym wechseln, was potentiell (wenn auch mit kleiner Wahrscheinlichkeit) negative Effekte auf die Sicherheit haben kann. Aber selbst wenn diese Wahrscheinlichkeit nur ein Zehn-tausendstel beträgt, so führt die schiere Menge an Fahrzeugen auf der Straße irgendwann zu einem Unfall, der ohne den Schutzmechanismus verhindert werden hätte können.

Die Simulationsstudie in Abschnitt 3 hat gezeigt, dass es fast unmöglich ist, lokale Angreifer zu verwirren. Neuere Studien, die auf Daten aus echten Feldtests basierend, bestätigen diese Ergebnisse [ES16]. Nur wenn die Sendefrequenz auf für Verkehrssicherheit unzureichende Werte gesetzt wird, kann ein mithörender Angreifer verwirrt werden. Jedoch können selbst in diesen Fällen sogenannte Fingerprinting-Angriffe eingesetzt werden, um Fahrzeuge zu verfolgen [Bl15]. Die logische Konsequenz aus diesen Erkenntnissen ist demnach ein System, in dem Pseudonymwechsel lokal bekannt gegeben werden. Das heißt, dass nach jedem Pseudonymwechsel das alte Pseudonym kurz mitgeführt werden muss.

Mit diesem Ansatz wird jeglicher theoretischer Einfluss des Schutzmechanismusses auf die Verkehrssicherheit vermieden. Des Weiteren hat dieser Ansatz nur einen geringen Overhead, da lediglich eine zusätzliche Signaturverifikation pro Fahrzeug in der Umgebung benötigt wird. Sobald ein Fahrzeug kryptographisch beweisen konnte, dass es die privaten Schlüssel für das alte und das neue Pseudonym besitzt, müssen empfangene Fahrzeuge nur noch eine Signatur prüfen. Um ein Fahrzeug anhand dieser Ankündigungen verfolgen zu können, benötigt ein Angreifer entweder globales Wissen über alle gesendeten Nachrichten oder er muss das Fahrzeug physisch verfolgen. Das ist jedoch kein Nachteil des Systems, da ein Hinterherfahren unabhängig von Car-2-X-Kommunikation möglich ist.

Der Einsatz von zeitschlitz-basierten Pseudonympools erlaubt die Einführung von effizienten Mechanismen zum Widerruf von Pseudonymzertifikaten [EDS13]. Anstatt eine Liste mit allen widerrufenden Pseudonymen zu veröffentlichen wird die Berechnung der gesperrten Pseudonyme auf die Fahrzeuge verschoben. Um dies zu erreichen, wird jedem Pseudonym ein sogenannter Verknüpfungswert C_v^i angehängt, wobei i die Zertifikatsnummer und v das Fahrzeug ist.

Diese Verknüpfungswerte sind durch eine kryptographische Hashfunktion $h(\cdot)$ und ein fahrzeugspezifisches Passwort κ_v miteinander verbunden. Der Wert C_v^i kann dann mit Hilfe des Schlüssels κ_v^i und einer bekannten, symmetrischen Verschlüsselungsfunktion $e(\cdot)$ berechnet werden. (Die hier dargestellte Version des Ansatzes beruht auf der Vereinfachung des Systems durch [Wh13], siehe Abbildung 4)

$$\begin{array}{ccccccc} \kappa_v & \xrightarrow{h(\kappa_v)} & \kappa_v^2 & \xrightarrow{h(\kappa_v^2)} & \kappa_v^3 & \xrightarrow{h(\kappa_v^3)} & \cdots \\ \downarrow e(\kappa_v) & & \downarrow e(\kappa_v^2) & & \downarrow e(\kappa_v^3) & & \\ C_v^1 & & C_v^2 & & C_v^3 & & \cdots \end{array}$$

Abbildung 4: Graphische Repräsentation des Zertifikatwiderrufs basierend auf Verknüpfungswerten

Hat ein Fahrzeug v also n Pseudonyme, und die Zertifizierungsstelle CA möchte nur die zukünftigen Pseudonyme $\geq j$ widerrufen, dann wird die Hashfunktion $h(\cdot)$ genau $j-1$ mal auf Fahrzeugpasswort κ_v angewendet. Der resultierende Schlüssel κ_v^j wird anschließend zusammen mit der Anzahl der zu widerrufenden Pseudonyme $n-j$ veröffentlicht.

Somit kann jedes Fahrzeug alle nun widerrufenen Pseudonyme selbst berechnen. Durch die Nichtumkehrbarkeit der kryptographischen Hashfunktion ist es nicht möglich die Verknüpfungswerte für Zertifikate $< j$ zu berechnen. Dies schützt die Privatsphäre der betroffenen Fahrzeuge, da selbst wenn ein Angreifer in der Vergangenheit mitgehörte Pseudonyme gespeichert hat, eine Zuweisung der Pseudonyme zu Fahrzeugen nicht möglich ist.

5 Schlussfolgerung

Die in der zugrunde liegenden Dissertation vorgestellten Methoden und Taxonomien erlaubten es, das Privatsphärenproblem in Fahrzeug-Ad-hoc-Netzen detailliert zu erfassen. Dabei fiel auf, dass viele Lösungsansätze aus der Literatur inkompatibel mit den Rahmenbedingungen von Fahrzeugnetzen sind und es unpraktikabel ist, mithörende Angreifer durch Pseudonymwechsel zu verwirren. Durch die Nutzung von synchronen, nicht überlappenden, zeitschlitz-basierten Pseudonympools und der lokalen Ankündigung von Pseudonymwechseln, kann ein Schutzmechanismus installiert werden, der wenig Overhead aufweist, keinen negativen Einfluss auf Sicherheitsfunktionen mit sich bringt, aber gleichzeitig die Privatsphäre aller Fahrzeuge effektiv schützt. Zusätzlich verhindert dieser Ansatz im Gegensatz zu anderen Vorschlägen aus der Literatur sogenannte Sybilangriffe und erlaubt des Weiteren die Nutzung von effizienten Widerrufsmechanismen.

Literaturverzeichnis

[Bl15] Bloessl, Bastian; Sommer, Christoph; Dressler, Falko; Eckhoff, David: The Scrambler Attack: A Robust Physical Layer Attack on Location Privacy in Vehicular Networks. In: 4th IEEE International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC 2015), CNC Workshop. IEEE, Anaheim, CA, S. 395–400, February 2015.

[Dí02] Díaz, Claudia; Seys, Stefaan; Claessens, Joris; Preneel, Bart: Towards Measuring Anonymity. In: Second International Workshop on Privacy Enhancing Technologies (PET 2002). Jgg. LNCS 2482. Springer, S. 54–68, April 2002.

[Ec11] Eckhoff, David; Sommer, Christoph; Gansen, Tobias; German, Reinhard; Dressler, Falko: SlotSwap: Strong and Affordable Location Privacy in Intelligent Transportation Systems. IEEE Communications Magazine, 49(11):126–133, November 2011.

[EDS13] Eckhoff, David; Dressler, Falko; Sommer, Christoph: SmartRevoc: An Efficient and Privacy Preserving Revocation System Using Parked Vehicles. In: 38th IEEE Conference on Local Computer Networks (LCN 2013). IEEE, Sydney, Australia, S. 855–862, October 2013.

[ES14] Eckhoff, David; Sommer, Christoph: Driving for Big Data? Privacy Concerns in Vehicular Networking. IEEE Security and Privacy, 12(1):77–79, February 2014.

[ES16] Eckhoff, David; Sommer, Christoph: Marrying Safety with Privacy: A Holistic Solution for Location Privacy in VANETs. In: 8th IEEE Vehicular Networking Conference (VNC 2016). Columbus, OH, USA, December 2016.

[ESD12] Eckhoff, David; Sommer, Christoph; Dressler, Falko: On the Necessity of Accurate IEEE 802.11p Models for IVC Protocol Simulation. In: 75th IEEE Vehicular Technology Conference (VTC2012-Spring). IEEE, Yokohama, Japan, S. 1–5, May 2012.

[ESG13] Eckhoff, David; Sofra, Nikoletta; German, Reinhard: A Performance Study of Cooperative Awareness in ETSI ITS G5 and IEEE WAVE. In: 10th IEEE/IFIP Conference on Wireless On demand Network Systems and Services (WONS 2013). IEEE, Banff, Canada, S. 196–200, March 2013.

[Eu95] European Parliament: Directive 95/46/EC. Official Journal, L 281:0031–0050, November 1995.

[FWF13] Finn, Rachel L; Wright, David; Friedewald, Michael: Seven Types of Privacy. In (Gutwirth, Serge; Leenes, Ronald; de Hert, Paul; Poullet, Yves, Hrsg.): European Data Protection: Coming of Age. Springer, S. 3–32, 2013.

[Ni04] Nissenbaum, Helen: Privacy as Contextual Integrity. Washington Law Review, 79(1):119–158, June 2004.

[Pe15] Petit, Jonathan; Schaub, Florian; Feiri, Michael; Kargl, Frank: Pseudonym Schemes in Vehicular Networks: A Survey. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 17(1):228–255, March 2015.

[PH10] Pfitzmann, Andreas; Hansen, Marit: , A terminology for talking about privacy by data minimization: Anonymity, Unlinkability, Undetectability, Unobservability, Pseudonymity, and Identity Management, August 2010. v0.34.

[SHG03] Schilit, B.; Hong, J.; Gruteser, M.: Wireless Location Privacy Protection. Computer, 36(12):135–137, December 2003.

[So13] Sommer, Christoph; Joerer, Stefan; Segata, Michele; Tonguz, Ozan K.; Lo Cigno, Renato; Dressler, Falko: How Shadowing Hurts Vehicular Communications and How Dynamic Beaconing Can Help. In: 32nd IEEE Conference on Computer Communications (INFOCOM 2013), Mini-Conference. IEEE, Turin, Italy, S. 110–114, April 2013.

[We67] Westin, Alan: Privacy and Freedom. Atheneum, 1967.

[Wh13] Whyte, William; Weimerskirch, Andre; Kumar, Virendra; Hehn, Thorsten: A Security Credential Management System for V2V Communications. In: 5th IEEE Vehicular Networking Conference (VNC 2013). IEEE, Boston, MA, S. 1–8, December 2013.



David Eckhoff arbeitet als Postdoc bei TUMCREATE in Singapur, einem gemeinsamen Forschungsinstitut der TU München und der Nanyang Technological University Singapur. In 2009 schloss er sein Diplom (Dipl.-Inf. Univ.) als bester seines Jahrgangs ab und promovierte anschließend mit Auszeichnung (Dr.-Ing.) im Jahr 2016 bei Prof. Reinhard German an der Universität Erlangen. Im Jahr 2016 arbeitete er als Gastwissenschaftler in der Gruppe von Prof. Lars Kulik an der Universität Melbourne in Australien. Im Oktober 2016 trat er eine Stelle bei TUMCREATE in Singapur in der Gruppe von Prof. Alois Knoll an. Seine Forschungsinteressen beinhalten Datenschutz, Smart Cities, Fahrzeugnetze und intelligente Transportsysteme mit dem Fokus auf Modellierung und Simulation.

Load Disaggregation Anwendungen basierend auf Wirkleistungsmessungen [1]

Dominik Egarter[2]

Abstract: Mit der Hilfe von Smart Metering können wertvolle Informationen über die Gerätenutzung in Haushalten abgerufen werden. Dabei wird mittels Load Disaggregation versucht herauszufinden, welche Geräte benützt werden und wie viel diese Geräte verbrauchen. Diese Dissertation beschäftigt sich mit diesem Thema und präsentiert dabei 3 unterschiedliche Anwendungen, die unterschiedliche Probleme im Bereich Load Disaggregation lösen.

1 Einführung

Es gibt weltweit ein starkes Bestreben den Energiebedarf und dessen Nutzung (bestmöglich) zu optimieren, um die heutige Umwelt zu schonen und demnach die Umweltbelastung zu reduzieren. Die EU hat die 20/20/20 Ziele für Europa in Kraft gesetzt, um erneuerbare Energien zu fördern, die Energieeffizienz zu steigern und den Energiebedarf zu reduzieren. In diesem Zusammenhang ist Smart Metering ein engagiertes Vorhaben für ganz Europa und insbesonders für Österreich, die Energieeffizenz durch ein verbessertes Verbrauchsfeedback zu optimieren. Durch Smart Metering wird es möglich zu erfahren, wann und wie viel Energie verbraucht worden ist. Dieses Wissen kann einerseits dazu verwendet werden das Energiebewusstsein zu verbessern und anderseits den eigenen Energieverbrauch und demnach Kosten zu sparen. Diese zusätzlichen Informationen bzw. das Vorhandensein von Daten des Energieverbrauches eröffnen die Möglichkeit neuer Ansätze des Verbrauchsmanagement, die ohne Smart Metering nicht vorstellbar wäre. Dies und neue Algorithmen zum Erkennen von Mustern in Daten, können dazu verwendet werden den Informationsgrad noch weiter zu steigern. Ein möglicher Ansatz hierzu ist Load Disaggregation bzw. Non-intrusive Load Monitoring (NILM). NILM versucht in diesem Zusammenhang den Hausverhaltsverbrauch auf die Gerätekomponenten mittels eines zentralen Messansatzes (z.B. Smart Metering) mit minimalen Kosten der Messeinheiten herunterzubrechen. Die grundsätzliche Idee von NILM ist es, statistische Informationen des Geräteverbrauches zu nutzen um mittels Algorithmen zum Erkennen von Mustern (Machine Learning), die verwendeten Geräte und dessen Verbrauch aus den Messdaten eines Haushaltes bestmöglich zu schätzen. Non-intrusive Load Monitoring wurde in den 1980ern von George Hart entwickelt und findet in den letzten Jahren immer größeres Interesse in der Forschung und

[1] Englischer Titel der Dissertation: Load Disaggregaton using on Active Power Measurements
[2] Kelag, dominik.egarter@kelag.at

in der Wirtschaft. Die Ansätze und dessen Ergebnisse sind vielfältig und versuchen unterschiedlichste Use Cases und Bedingungen zu erfüllen. In meiner Dissertation 'Load Disaggregation based on Active Power Measurement' habe ich es mir zum Ziel gemacht einen speziellen Anwendungsfall wissenschaftlich zu untersuchen und im weiteren Sinne auch neue Wege und Ideen im Bereich NILM und Energiemanagement zu eröffnen. Diese Arbeit hat sich die Rahmenbedingung gesetzt nur mit Wirkleistungs-Verbräuchen von Haushaltsgeräten zu arbeiten. Die Gerätedaten sind ausschließlich von realen Geräten abgeleitet und es wird eine Sampling-Frequenz von 1 Messwert pro Sekunde verwendet. Unter Berücksichtigung dieser Rahmenbedingungen bearbeitet diese Dissertation drei verschiedene Anwendungen für Non-Instrusive Load Monitoring. Zunächst wird ein einfacher Optimierungsansatz (siehe Load Disaggregation as a Knapsack Model) vorgeschlagen, um das Problem von aggregierten Stromverbrauchern zu lösen. Sechs verschiedene metaheuristische Optimierungsverfahren werden dafür verwendet und mit realen Daten getestet. Um die Komplexität zu beurteilen, befasst sich diese Arbeit mit zwei Komplexitätsmaßen zur Klassifizierung des NILM-Problems (siehe Complexity Analysis of Load Disaggregation). Diese Anwendung wurde durch die Tatsache inspiriert, dass es keine generell übliche Problemdefinition für NILM gibt. Verschiedenste NILM-Ansätze verwenden reale Datensätze mit verschiedenen Vorbearbeitungsstufen und Systemannahmen. Ein fairer Vergleich zwischen verschiedenen NILM-Algorithmen ist daher ohne ein Komplexitätsmaß zur Beschreibung eines NILM-Problems nicht möglich. Schlussendlich führt diese Arbeit auch noch einen neuen unbeobachteten (un-supervised) NILM-Ansatz ein (siehe Unsupervised Approach). Dieser Ansatz funktioniert ohne Systeminformationen und verbessert dieses ständig. Er arbeitet online und ist fähig auf Embedded-Hardware zu laufen. Die drei Ansätze und dessen Ergebnisse werden im Folgenden genauer beschrieben und es wir ein Ausblick gegeben, in welcher Form die gezeigten Ansätzen für weitere Forschung dienen kann und in welcher Form die Ansätze auch außerhalb der Wissenschaft in den realen Haushalten Anwendung finden können.

Es gibt weltweit ein starkes Bestreben den Energiebedarf und dessen Nutzung (bestmöglich) zu optimieren, um die heutige Umwelt zu schonen und demnach die Umweltbelastung zu reduzieren. Die EU hat die 20/20/20 Ziele für Europa in Kraft gesetzt, um erneuerbare Energien zu fördern, die Energieeffizienz zu steigern und den Energiebedarf zu reduzieren. In diesem Zusammenhang ist Smart Metering ein engagiertes Vorhaben für ganz Europa und insbesonders für Österreich, die Energieeffizenz durch ein verbessertes Verbrauchsfeedback zu optimieren. Durch Smart Metering wird es mÖglich zu erfahren, wann und wie viel Energie verbraucht worden ist. Dieses Wissen kann einerseits dazu verwendet werden das Energiebewusstsein zu verbessern und anderseits den eigenen Energieverbrauch und demnach Kosten zu sparen. Diese zusätzlichen Informationen bzw. das Vorhandensein von Daten des Energieverbrauches eröffnen die Möglichkeit neuer Ansätze des Verbrauchsmanagement, die ohne Smart Metering nicht vorstellbar wäre. Dies und neue Algorithmen zum Erkennen von Mustern in Daten, können dazu verwendet werden den Informationsgrad noch weiter zu steigern. Ein möglicher Ansatz hierzu ist Load Disaggregation bzw. Non-intrusive Load Monitoring (NILM). NILM versucht

in diesem Zusammenhang den Hausverhaltsverbrauch auf die Gerätekomponenten mittels eines zentralen Messansatzes (z.B. Smart Metering) mit minimalen Kosten der Messeinheiten herunterzubrechen. Die grundsätzliche Idee von NILM ist es, statistische Informationen des Geräteverbrauches zu nutzen um mittels Algorithmen zum Erkennen von Mustern (Machine Learning), die verwendeten Geräte und dessen Verbrauch aus den Messdaten eines Haushaltes bestmöglich zu schätzen.

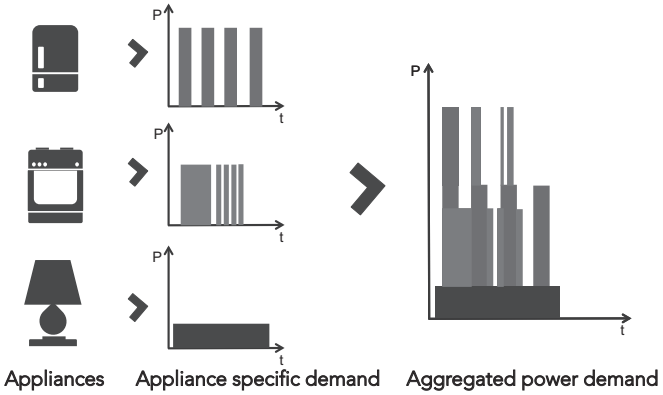


Abb. 1: Konzept von Non-Intrusive Load Monitoring

In Abbildung 1 wird das allgemeine Konzept von NILM veranschaulicht. Dabei werden drei typische Haushaltsgeräte anhand ihres Verbrauchsverhaltens modelliert und dessen typischen Muster im Gesamtverbrauch wiedergefunden. Load Disaggregation wurde in den 1980ern von George Hart entwickelt und findet in den letzten Jahren immer größeres Interesse in der Forschung und in der Wirtschaft. Die Ansätze und dessen Ergebnisse sind vielfältig und versuchen unterschiedlichste Use Cases und Bedingungen zu erfüllen. In meiner Dissertation "Load Disaggregation based on Active Power Measurement"habe ich es mir zum Ziel gemacht einen speziellen Anwendungsfall wissenschaftlich zu untersuchen und im weiteren Sinne auch neue Wege und Ideen im Bereich NILM und Energiemanagement zu eröffnen. Diese Arbeit hat sich die Rahmenbedingung gesetzt nur mit Wirkleistungs-Verbräuchen von Haushaltsgeräten zu arbeiten. Die Gerätedaten sind ausschließlich von realen Geräten abgeleitet und es wird eine Sampling-Frequenz von 1 Messwert pro Sekunde verwendet. Unter Berücksichtigung dieser Rahmenbedingungen bearbeitet diese Dissertation drei verschiedene Anwendungen für Non-Instrusive Load Monitoring. Zunächst wird ein einfacher Optimierungsansatz (siehe Load Disaggregation as a Knapsack Model) vorgeschlagen, um das Problem von aggregierten Stromverbrauchern zu lösen. Sechs verschiedene metaheuristische Optimierungsverfahren werden dafür verwendet und mit realen Daten getestet. Um die Komplexität zu beurteilen, befasst sich diese Arbeit mit zwei Komplexitätsmaßen zur Klassifizierung des NILM-Problems (siehe Complexity Analysis of Load Disaggregation). Diese Anwendung wurde durch die Tatsache inspiriert, dass es keine generell übliche Problemdefinition für NILM gibt. Verschiedenste NILM-Ansätze verwenden reale Datensätze mit verschiedenen Vorbearbeitungsstufen und Systemannahmen.

Ein fairer Vergleich zwischen verschiedenen NILM-Algorithmen ist daher ohne ein Komplexitätsmaß zur Beschreibung eines NILM-Problems nicht möglich. Schlussendlich führt diese Arbeit auch noch einen neuen unbeobachteten (un-supervised) NILM-Ansatz ein (siehe Unsupervised Approach). Dieser Ansatz funktioniert ohne Systeminformationen und verbessert dieses ständig. Er arbeitet online und ist fähig auf Embedded-Hardware zu laufen. Die drei Ansätze und dessen Ergebnisse werden im Folgenden genauer beschrieben und es wir ein Ausblick gegeben, in welcher Form die gezeigten Ansätzen für weitere Forschung dienen kann und in welcher Form die Ansätze auch außerhalb der Wissenschaft in den realen Haushalten Anwendung finden können.

2 Load Disaggregation as a Knapsack Model

Die grundsätzliche Idee von NILM ist es bekannte Energieprofile so anzuordnen, damit die Summe dieser angeordneten Energieprofile das gewünschte aggregierte Verbrauchsprofil eines Haushaltes ergibt. Im Kapitel 'Load Disaggregation as a Knapsack Model' wird diese Idee verwendet um die leistungsfähige von den heutigen modernen Optimierungsalgorithmen wissenschaftlich zu verifizieren. Dabei wird das NILM-Problem als Rucksack-Problem (knapsack problem) modelliert. Es werden die folgenden 6 metaheuristischen Algorithmen verwendet, um das NILM-Problem zu lösen: Evolutionäre Algorithmus, Simulated Annealing, Differential Evolution, Partical Swarm Optimization, Cuckoo Search Algorithmus und Firefly Algorithmus.

Die Verwendung von metaheuristischen Algorithmen bietet dabei die Möglichkeit mittels 'trial and error' in angemessener Zeit zu einem gewünschten Ergebnis zu kommen. Dabei sind die Algorithmen charakteristisch für deren Randomisierungsteil neue Lösungen zu finden und dem Verwertungsteil die besten Lösungen für die Optimierung weiter zu verwenden. Die Idee in diesem Kapital ist es das Knapsack Model auf das NILM-Problem anzuwenden. Im Allgemeinen versucht das Knapsack Model eine Anzahl von Gegenständen bestmöglich in einen Rucksack mit gegebenem Volumen zu packen. Dabei bekommt man für jeden Gegenstand einen Profit, welchen es zu optimieren gilt ohne die Kapazität des Rucksackes zu übersteigen. Wird nun diese Idee für NILM angewendet, versucht man den Verbrauch von Geräten in ein Verbrauchsprofil bestmöglich mit geringsten Fehlern zu platzieren. Dabei werden alle Geräte und dessen Verbräuche als gleich wichtig bewertet. Das Konzept des Algorithmus ist in Abbildung 2 dargestellt.

Um die Idee nun testen zu können, wurden Gerätedaten von öffentlich zugänglichen Verbrauchsdatensätzen verwendet. Dabei wurden 6 verschiedene Gerätetypen und Verbräuche untersucht. Es wurden zwei Testszenarien verwendet bei welchen die Verbrauchswerte eines Gerätes sich ähnelten oder unterschiedlich waren. Es wurde getestet wie gut ein Optimierungsalgorithmus mit der Tatsache umgehen kann, dass das Verbrauchsverhalten von 2 Geräten im selben Bereich (z.B. 200W und 220W) sein kann. Die Auswertungen zeigten, dass der Algorithmus sehr gut mit

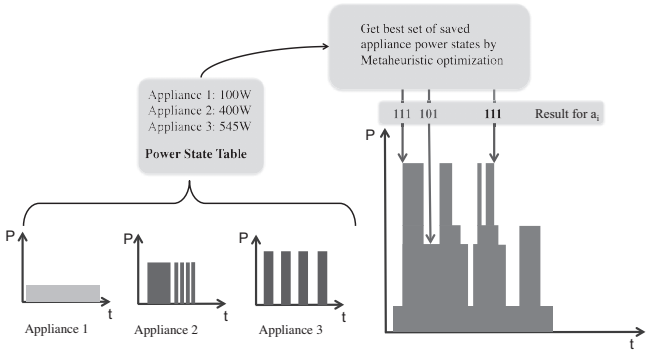


Abb. 2: Konzept zur metaheuristischen Optimierung des NILM-Problems als Rucksackproblem

unterschiedlichen Verbrauchswerten umgehen kann. ähneln sich jedoch Geräte, so ist es nötig neues Wissen und Informationen dem Algorithmus zur Verfügung zu stellen.

2.1 Complexity Analysis of Load Disaggregation

Für die Bewertung von Algorithmen zur Mustererkennung bedarf es einer Metrik um die Ergebnisse vergleichbar zu machen. Möglichkeiten hierbei gibt es einerseits im Bereich der Vergleichsmetriken wie zum Beispiel die True-Positive Bewertung bis hin zur Sensitivität- und Spezifität-Analyse und andererseits die Verwendung von Standardproblemen wie man es aus vielen Bereichen wie Computervision kennt. Im Bereich Load Disaggregation können diese Ansätze angewendet werden, jedoch muss hier die Tatsache berücksichtigt werden, dass unterschiedlichste Algorithmen auch unterschiedliche Bedingungen an die Daten haben und diese günstig für den Algorithmus anwenden. Die Idee in diesem Kapitel ist demnach nicht den Algorithmus und dessen Ergebnis vergleichbar zu machen, sondern das Problem von Load Disaggregation an sich zu beurteilen. Um dies zu lösen wird das Problem anhand des Verbrauches von Geräten und der Tatsache, dass sich das Load Disaggregation Problem durch die Aggregation von diesen Verbrauchswerten über die Zeit bildet, bewertet. Dabei wird anhand der möglichen Verbrauchswerte und dessen Kombination mit anderen Geräten und dessen Verbräuchen, ein Komplexitätswert berechnet. Die Verbrauchswerte von Haushaltgeräten bzw. die Messung dieser Verbrauchswerte sind jedoch nicht zu jedem Zeitpunkt gleich. Die Messwerte sind rauschbehaftet. Um diesen Zusammenhang auch in der Berechnung eines Komplexitätswertes zu berücksichtigen, wird für jeden Verbrauchswert eine Wahrscheinlichkeitsdichte mittels Verbrauchswert und eines angenommenen Rauschwertes gebildet. Der Komplexitätswert verwendet nun diese Wahrscheinlichkeitsdichten und bildet anhand der Schnittflächen mit anliegenden Verbrauchswerten einen Komplexitätswert. Das Konzept der Berechnung ist in Abbildung 3 dargestellt.

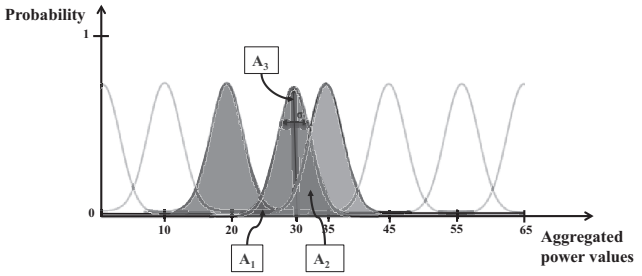


Abb. 3: Prinzip zur Berechnung des Komplexitätswertes

Dabei wird für einen bestimmten Verbrauchswert (Fläche A1) die Schnittfläche mit anderen Verbrauchswerten (Fläche A2 und A3) gebildet. Der errechnet Wert gibt nun an, wie viele ähnliche Verbrauchswerte es gibt einen bestimmten Verbrauchswert zu finden. Die Berechnung dieses Komplexitätswertes wurde für mehrere, öffentlich verfügbare Datensätze und dessen Häuser getestet. Es wurde getestet welcher Datensatz eine höhere Komplexität für Load Disaggregation darstellt. Das Ergebnis dieser Analyse ist in Abbildung 4 dargestellt.

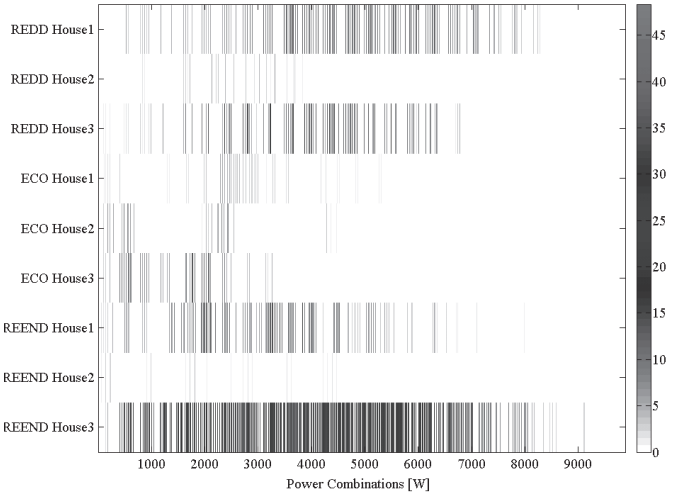


Abb. 4: Komplexitätsberechnung für unterschiedliche Datensätze und Haushaltsverbräuche

Dabei ist ersichtlich, dass je höher der Komplexitätswert, desto schwieriger ist es einen bestimmen Verbrauchswert anhand der möglichen Verbrauchswerte anzunähern bzw. zu erkennen.

Der präsentierte Ansatz kann auch auf gemessene Zeitreihen angewendet werden. Dabei wird nicht ein bestimmter möglicher Verbrauchswert von Geräten verwendet, sondern der aggregierte gemessene Verbrauchswert eines Haushaltes. Abbildung 5

stellt ein Ergebnis dieser Berechnung auf eine Zeitreihe eines Haushaltsverbrauches angewendet dar

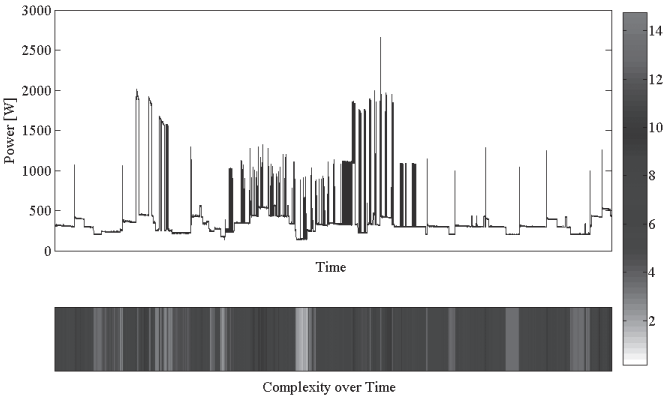


Abb. 5: Komplexitätswerte für eine gemessene Zeitreihe eines Haushaltes

Das vorgestellte Komplexitätsmaß ist unabhängig davon, ob ein Gerät einen oder mehrere Zustände und Verbräuche haben kann. Bedingung ist jedoch, dass diese Verbrauchswerte bekannt sind. Der berechnete Komplexitätswert ist abhängig vom angenommenen Rauschwert. Je genauer dieser bekannt ist, desto besser ist die Aussage des Komplexitätsmaßes.

3 Unsupervised Approach

Eine Vielzahl von Load Disaggregation Ansätzen verwenden Lernphasen und sind darauf ausgelegt offline zu arbeiten. Der in diesem Kapitel präsentierte Ansatz arbeitet online und benötigt keine Lernphasen. Er lernt die Modelle der Geräte während der Laufzeit des Algorithmus und ist demnach ein unsupervised Load Disaggregation Ansatz. Darüberhinaus ist der Algorithmus so ausgelegt, dass er auf kostengünstiger Hardware laufen kann. Vorstellbar hierfür ist z.b. ein Raspberry PI. Die Idee des Algorithmus kann in 4 Teile (siehe Abbildung 6) gegliedert werden: feature detection, state clustering & appliance creation, classification and appliance database update. Dabei werden im Teil 'Feature Detection' die gemessenen Verbrauchsdaten eines Haushaltes analysiert. Es wird versucht mittels 'Edge Detection' fallende und steigende Flanken im Verbrauch zu erkennen. Die erkannten Flanken entsprechen dem Ein- und Ausschaltverhalten eines Haushaltgerätes. Im nächsten Schritt 'State Clustering & Appliance Creation' werden die erkannten Verbrauchswerte geclustert, um Gerätemodelle bilden zu können. Es werden ähnlich steigende und fallende Flanken zusammengefasst und in ein Gerätemodell integriert. Ein Gerät wird in diesem Zusammenhang mittels eines 'Hidden Markov Models' abgebildet. Im nächsten Schritt werden die erkannten Gerätemodelle vom Teil "Classification"verwendet um Geräte im aggregierten Verbrauch eines Haushaltes zu erkennen.

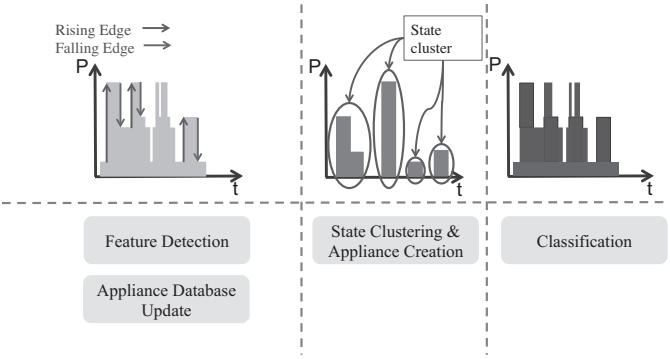


Abb. 6: Darstellung des Unsupervised Ansatzes

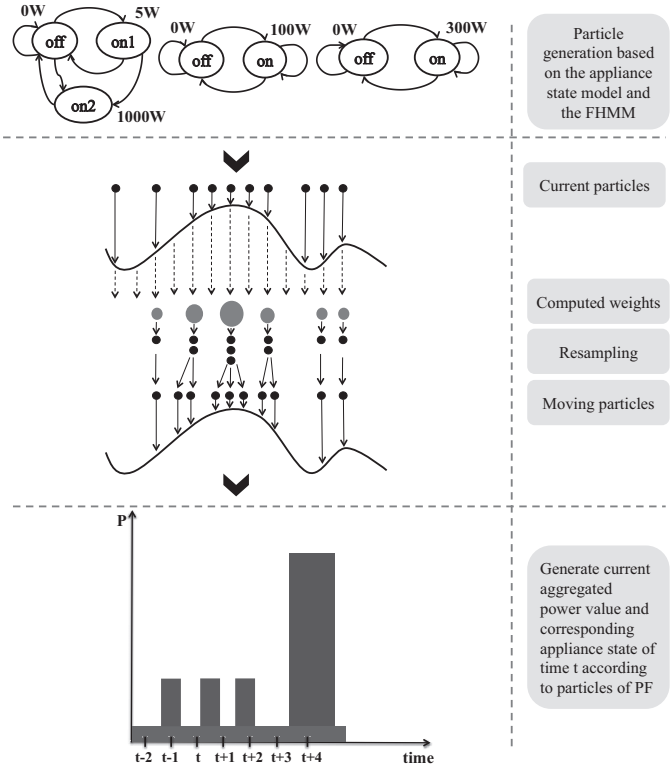
Als Klassifizierer wird das Prinzip eines Partikelfilters verwendet. Das Prinzip versucht mittels Gerätemodelle einen Zustandsraum anhand von geschätzten Wahrscheinlichkeitsdichten zu generieren, welcher dazu verwendet wird, den jeweiligen Zustand eines Gerätes zu erkennen. Dieser Prozess verwendet immer den letzten vorhandenen Messpunkt und macht eine Aussage über den aktuellen Status eines Gerätes (im welchen State ist ein Gerät). Das Prinzip ist in Abbildung 7 dargestellt. Wie vorher beschreiben, wird während der Laufzeit im Teil 'Feature Detection' Gerätecharakteristika erkannt und mittels dem nächsten Schritt 'State Clusterin & Appliance Creation' zu Gerätemodellen zusammengefasst. Dieser Prozess wird ständig wiederholt und verbessert. Dabei werden entweder neue Gerätemodelle erkannt oder bereits vorhandenen Gerätemodelle verbessert. Der Prozess wird im Teil 'Appliance Database Update' behandelt. Der Ansatz wurde auf echte, onlineverfügbare Daten angewendet und zeigte ein vielversprechendes Verhalten. Es wurden sehr hohe Erkennungsraten von über 90% für den Klassifizierer erreicht. Der Ansatz eignet sich zum Beispiel zur Umsetzung von Energiemanagementsystemen mit in-home Displays, welche ohne die Verwendung von Daten an ein Auswerteservice auskommt. Dabei bekommen Bewohnerinnen und Bewohner ein aktuelles Feedback des Haushaltsverbrauches ohne ihre Daten preisgeben zu müssen.

4 Veröffentlichungen

D. Egarter, V.P. Bhuvana and W. Elmenreich. **PALDi: Online Load Disaggregation based on Particle Filtering**. *IEEE Transactions on Instrumentations and Measurement*, 2014.

T. Khatib, A. Monacchi, W. Elmenreich, D. Egarter, S. D?Alessandro and A. M. Tonello. **European end-user?s level of energy consumption and current structural barriers for smart homes: A case study of residential sectors in Austria and Italy.** *Energy Technology & Policy*, 2014

C. Klemenjak, D. Egarter and W. Elmenreich. **YOMO - The Arduino based Smart Metering Board.** *Computer Science ? Research and Development*, 2015



[ht]

Abb. 7: Funktionsweise des Klassifizierungsansatzes

M. Pöchacker, D. Egarter and W. Elmenreich **Proficiency of Power Values for Load Disaggregation.** *IEEE Transactions on Instrumentations and Measurement*, 2016

D. Egarter, A. Monacchi and W. Elmenreich **Integration of Legacy Appliances into the Home Energy Management System.** *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 2015

A. Reinhardt, G. Konstantinou, D. Egarter and D. Christin **Worried About Privacy? Let Your PV Converter Cover Your Electricity Consumption Fingerprints** *IEEE International Conference on Smart Grid Communication*, 2015

M. Schellander, T. Khatib, W. Elmenreich and D. Egarter. **Techno-economical Assessment of Grid-connected Photovoltaic Power Systems Productivity in Summer Season in Klagenfurt.** *IEEE International Conference on Power and Energy (PECON)*, 2014

C. Klemenjak, D. Egarter and W. Elmenreich. **YOMO - The Arduino based Smart Metering Board.** *Energieinformatik*, 2014

G. Brandner, J. Klinglmayr, D. Egarter, U. Schilcher and C. Bettstetter. **Precision of Pulse-Coupled Oscillator Synchronization on FPGA-Based Radi-**

os. *10th International ITG Conference on Systems, Communications and Coding*, 2015

A. Monacchi, D. Egarter, W. Elmenreich, S. D?Alessandro and A. M. Tonello. **GREEND: an energy consumption dataset of households in Italy and Austria.** *IEEE International Conference on Smart Grid Communication (SmartGridComm)*, 2014.

D. Egarter, C.Prokop and W. Elmenreich. **Load Hiding of Household's Power Demand.** *IEEE International Conference on Smart Grid Communication (SmartGridComm)*, 2014.

D. Egarter, A. Sobe, and W. Elmenreich. **Evolving Non-Intrusive Load Monitoring.** *Proceedings of the European Conference on the Applications of Evolutionary Computation (at EvoStar conference)*, Vienna, Austria, April 2013.

D. Egarter, M. Pöchacker and W. Elmenreich. **Complexity of Power Draws for Load Disaggregation**, Energieinformatik 2016, 2016

D. Egarter and W. Elmenreich. **Autonomous Load Disaggregation Approach based on Active Power Measurements.** *IEEE Workshop on Pervasive Energy Services (PerEnergy)*, 2015

D. Egarter, V.P. Bhuvana and W. Elmenreich. **Appliance State Estimation based on Particle Filtering.** *5th ACM Workshop On Embedded Systems For Energy-Efficient Buildings (BuildSys 2013)*, Rome, Italy, November 2013.

D. Egarter and W. Elmenreich. **EvoNILM - Evolutionary Appliance Detection for Miscellaneous Household Appliances.** *Proceedings of the Workshop on Green and Efficient Energy Applications of Genetic and Evolutionary Computation Workshop (at GECCO conference)*, Amsterdam, Netherlands, July 2013.

A. Monacchi, D. Egarter, and W. Elmenreich.**Integrating Households into the Smart Grid.** *Workshop on Modeling and Simulation of Cyber-Physical Energy Systems (at E-Energy conference)*, Berkeley, CA, May 2013.

W. Elmenreich and D. Egarter. **Design guidelines for smart appliances.** *Proceedings of the 10th International Workshop on Intelligent Solutions in Embedded Systems*, Klagenfurt, Austria, July 2012.

D. Egarter, A. Monacchi, M. Pöchacker, K. Schweiger and B. Steinwender: **Smart Grid: Visionen & Herausforderungen,** published in Energie - Interdisziplinäre Perspektiven auf eine knappe Ressource (Profil Verlag; G. Getzinger, H. Gross)



Dominik Egarter wurde am 30.Dezember 1986 geboren. Er studierte in Klagenfurt, Österreich das Diplomstudium für Informationstechnik, welches er mit Auszeichnung abschloss. Anschließend entschloss er sich ein Doktoratsstudium für Information Technology mit dem Schwerpunkt Smart Metering und Daten-Analysen zu starten. Im 2016 schloss er dieses Studium mit Auszeichnung ab. Heute ist Dominik bei der KELAG in Klagefurt angestellt, wobei seine Arbeitsschwerpunkte im Bereich Smart Metering und Big Data/Daten-Analysen liegen.

Visuelle Odometrie und dichte Rekonstruktion für mobile Roboter[1]

Christian Forster[2]

Abstract: Damit ein autonomer Roboter sich bewegen und den Raum mit Menschen teilen kann, muss er eine interne Repräsentation seiner Umgebung erstellen und sich gleichzeitig darin positionieren. In dieser Dissertation werden Methoden untersucht, wie ein Roboter in Echtzeit eine solche Repräsentation mittels Kameras und Inertialsensoren erstellen kann. Der erste Beitrag ist eine semidirekte Methode zur Bewegungsschätzung welche sehr genau und robust ist und darüber hinaus den aktuellen Stand der Technik im Bereich Rechenzeit signifikant übertrifft. Im zweiten Beitrag wird gezeigt, wie die Genauigkeit der vorgeschlagenen Methode durch die Fusion mit Inertialsensoren nochmals verbessert werden kann. In einem Experiment wurde gezeigt wie die Kameraposition über eine Distanz von 300 Metern auf 0.3 Meter genau bestimmt werden kann. Im dritten Beitrag wird eine probabilistische Methode entwickelt welche es ermöglicht die Oberflächenrekonstruktion zu verdichten. In einem integrierten System erlaubt dieser Algorithmus einem autonomen Mikrodrone selbständig einen Landeplatz zu finden welcher frei von Hinternissen ist. Der letze Beitrag nützt die Tatsache aus, dass der Roboter die Datenaufnahme beeinflussen kann. Es wird ein Algorithmus entwickelt der die optimale Trajektorie berechnet um möglichst schnell die Tiefe jedes Pixels im Referenzbild zu schätzen, d.h. die Oberfläche im Bild dreidimensional rekonstruiert.

1 Motivation

Es scheint problemlos, wie Menschen die Umgebung wahrnehmen und damit interagieren. Die Fähigkeit des visuellen Cortexes, die riesige Masse an Informationen, bereitgestellt von der Retina, zu verarbeiten, ist überwältigend. Sofort können wir unsere Bewegung im Raum beschreiben, die Grösse und Struktur vom Raum, in dem wir uns befinden, charakterisieren und nur schwer werden wir von Reflektionen, Schatten und Verdeckungen getäuscht. Menschenähnliche Wahrnehmung von Raum und Bewegung in künstlichen Systemen zu reproduzieren ist eine riesige Herausforderung für die Forschung. Nichts desto trotz, schon die kleinsten Schritte in diese Richtung haben das Potential, eine Flut an industriellen Anwendungen zu ermöglichen. Beispiele von diesem Potential sind autonome Autos, Serviceroboter und Assistenzsysteme für Blinde. Und tatsächlich haben wir guten Grund optimistisch zu sein: In den letzten zwanzig Jahren wurde ein gigantischer Fortschritt gemacht, unterstützt durch die stetige Verbesserung von Prozessoren und Sensorik. Heute sind Computer besser als Menschen in der Detektion von Strassenschildern und die autonomen Autos von Google sind schon mehr als eine Million Meilen selbst gefahren.

[1] Englischer Titel der Dissertation: "Visual Inertial Odometry and Active Dense Reconstruction for Mobile Robots"

[2] Robotics and Perception Group, Universität Zürich, ch.forster@gmail.com

2 Kamerabasierte Bewegungsschätzung und Rekonstruktion

Damit ein autonomer Roboter sich bewegen und den Raum mit Menschen teilen kann, muss er eine interne Repräsentation seiner Umgebung erstellen. Die ideale Repräsentation hängt von der Aufgabe ab, die der Roboter ausführen soll. Muss der Roboter zum Beispiel ein Paket transportieren, dann ist eine nützliche Repräsentation eine Karte von Merkmalen der Umgebung, die der Roboter mit seiner Sensorik wiedererkennen kann. Ist diese Karte nicht von Anfang an verfügbar, muss sie der Robot selbst erstellen, während er sich gleichzeitig darin lokalisiert. Dieses berühmte Problem der Robotik ist bekannt unter der Abkürzung SLAM, was für "*Simultaneous Localization and Mapping*" steht. Kameras sind sehr nützliche Sensoren für mobile Roboter, da sie sehr klein, günstig und allgegenwertig sind. Weil jedes einzelne Kamerabild aber aus hunderttausenden Pixel-Messungen besteht, ist es eine grosse Herausforderung, aus dieser Datenflut die Kamerabewegung und gleichzeitig die Umgebung dreidimensional zu rekonstruieren. Dieser Prozess wird auch als visual-SLAM bezeichnet, oder als visuelle Odometrie. Noch schwieriger wird es, wenn dies in Echtzeit auf einer Recheneinheit mit beschränkter Kapazität, wie sie in Robotern eingesetzt wird, geschehen soll. Ausserdem wird die Robustheit des Systems ein sehr wichtiger Faktor, wenn der mobile Roboter sich in einer unkontrollierten Umgebung bewegt. In diesem Fall treten Verdeckungen, Beleuchtungsänderungen und wenig texturierte Oberflächen auf, was das Wiedererkennen von visuellen Merkmalen im Bild verhindert und deshalb die kamerabasierte Bewegungsschätzung erschwert.

3 1. Beitrag: Visuelle Odometrie

Der erste Beitrag dieser Dissertation [Fo16] ist ein effizienter, robuster und sehr genauer Algorithmus für die visuelle Odometrie. Dieser Algorithmus schätzt die Bewegung einer einzelnen Kamera ausschliesslich anhand der von der Kamera aufgenommenen Bildern. Dazu wurden *direkte Methoden*, welche mit den Intensitätswerten der Pixel operieren, untersucht. Dies steht im Gegensatz zu merkmalbasierten Methoden, welche als erster Schritt visuelle Merkmale im Bild detektieren und daraufhin die restliche Bildinformation verwerfen [Fo12, Fo13, FPS13]. Ein Vorteil von direkten Methoden ist, dass die Pixel-Korrespondenz von Bild zu Bild durch die Geometrie des Problems gegeben ist und durch die Minimierung von Pixel-Intensitätsunterschieden weiter optimiert werden kann. Die Optimierung der Kamerapositionen und der 3D Geometrie der Umgebungsstruktur wird jedoch sehr rechenintensiv, wenn die Karte wächst. Daher wird ein halb-direkter (*semi-direct*) Algorithmus vorgeschlagen [Fo17b, FPS14b], der in einem ersten Schritt die Pixel-Korrespondenz mittels direkten Ansätzen ermittelt und daraufhin auf bewährten merkmalbasierten Methoden aufbaut, um die Geometrie des Problems zu optimieren.

Die bedeutendste Innovation dabei ist der vorgeschlagene *Sparse-Image-Align* Algorithmus, der zwei Bilder robust und effizient anhand der Intensitätswerten von ausgewählten Pixeln aligniert. Im Zusammenspiel mit einem direkten Ansatz für die Schätzung der Tiefenwerte von den ausgewählten Pixeln, erlaubt diese Methode die Bewegungsschätzung in Umgebungen mit sehr wenig Textur. Abbildung 1 zeigt die visuellen Merkmale, sowohl



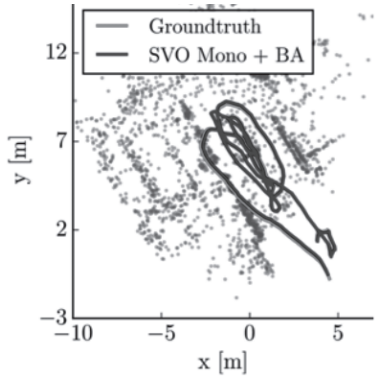


Abb. 1: Die Abbildung links zeigt die visuellen Merkmale, die der Algorithmus detektiert und kartographiert. Durch die dreidimensionale Rekonstruktion dieser Eck- und Kantenpunkte über mehrere Bilder, wird die Bewegung der Kamera geschätzt. Die Abbildung rechts zeigt die rekonstruierten Merkmale im dreidimensionalen Raum und die berechnete Trajektorie, die mit der wahren Trajektorie verglichen wird.

Eckpunkte als auch Kantenpunkte, die der Algorithmus nutzt, um die Bewegung und die dreidimensionale Karte der Umgebung zu schätzen.

Experimentelle Resultate zeigen, dass der vorgeschlagene Algorithmus sehr genaue Schätzungen in Echtzeit erzielt, wobei insbesondere in Bezug auf die Rechenzeit signifikant bessere Resultate als im aktuellen Stand der Technik erreicht werden. In einer Erweiterung wird ausserdem gezeigt, wie der Algorithmus auf Kamerasysteme mit mehreren Kameras sowie auch Fischaugen-Kameras erweitert werden kann [Zh16]. Unter folgendem Link kann ein Video mit einer Zusammenfassung der Experimente und Resultate abgerufen werden: https://youtu.be/hR8uq1RTUfA

Seine Robustheit hat dieser Algorithmus durch seinen täglichen Einsatz zur Bewegungsschätzung von kamerabasierten Mikrodrohnen in der Robotics and Perception Group bewiesen [Fa15, Gi15]. Über 300 Mal wurde das System schon an Messen, Konferenzen und internen Demonstrationen vorgeführt. Ausserdem wurde die entwickelte Software an Firmen lizenziert, die sie zum Beispiel für die 3D Rekonstruktion mit dem Smartphone und für Anwendungen der Virtuellen Realität einsetzen. Eine Open-Source Version der Software[3] wurde der Forschungsgemeinschaft frei zur Verfügung gestellt und wird heute zum Beispiel vom Autonomy and Robotics Center der NASA Langley eingesetzt.

[3] Die Software is verfügbar unter `https://github.com/uzh-rpg/rpg_svo`

3.1 2. Beitrag: Fusion von Kameras mit Intertialsensoren

In einer Erweiterung wird gezeigt, wie Inertialmessungen von Gyroskop und Beschläunigungssensor in die vorgeschlagene visuelle Odometrie integriert werden können [Fo15a, Fo17a]. Dies stellt den zweiten Beitrag dieser Dissertation dar. Die Anwendung von Inertialsensoren, welche die Beschleunigung und Rotationsgeschwindigkeit messen, ist ideal, da die Messungen komplementär zur visuellen Sensorik sind und darüber hinaus preislich so günstig sind, dass sie in vielen mobilen Geräten bereits verbaut werden. Inertialsensoren werden nicht durch visuelle Störungen beeinträchtigt und bieten über einen kurzen Zeithorizont (im Rahmen von Bruchteilen von Sekunden) eine gute Schätzung der Bewegung. Über längere Zeit hingegen weist die Integration von Inertialmessungen einen starken Drift auf (getrieben durch die zweifache Integration von Messrauschen), was wiederum mit der Detektion von visuellen Messungen kompensiert werden kann.

In der Dissertation wird gezeigt, wie die Messungen dieser beiden Sensorsysteme modelliert und in einer Optimierung fusioniert werden können, um die optimale Trajektorie zu berechnen. Im Gegensatz zu früheren Arbeiten, wird eine effizientere Methode für die Optimierung vorgeschlagen. Dies resultiert aus der formalen Beschreibung der Messungenauigkeiten der beiden Sensorsysteme, was eine analytische Berechnung der Ableitungen der Kostenfunktionen ermöglicht. In einem Experiment wurde gezeigt, dass dieser Ansatz über 360 Meter Distanz nur 30 cm Fehler akkumuliert, was halb so viel ist wie die besten Vergleichsmethoden. In der Abbildung 2 werden zwei weitere Experimente veranschaulicht, in welchen die Kamera mit den Intertialsensoren um ein Gebäude und in einem Treppenhaus bewegt wird.

Die Software zur Datenfusion wurde im Open-Source Projekt *GTSAM* integriert [4] und ein Video mit einer Zusammenfassung der Resultate kann unter folgendem Link abgerufen werden: https://youtu.be/CsJkci5lfco

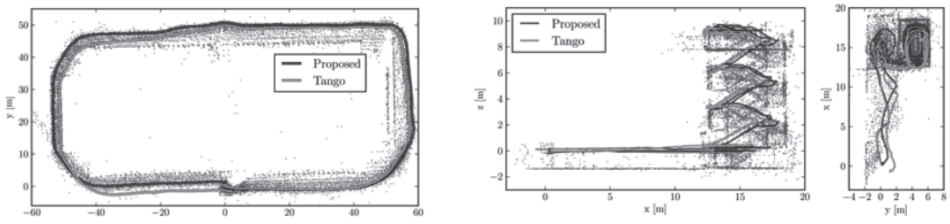


Abb. 2: Vergleich des vorgeschlagenen Algorithmus, welcher Bild und Inertialmessungen kombiniert, gegenüber dem Google Tango Sensor — einem kommerziellen Produkt, das ebenfalls auf Bild und Inertialmessungen basiert. Während im Bild links der Tango Sensor 2.2 Meter Drift akkumuliert, erreicht der vorgeschlagene Ansatz weniger als 1.0 Meter Drift.

[4] Die Software is verfügbar unter `https://bitbucket.org/gtborg/gtsam`

3.2 3. Beitrag: Probabilistische Oberflächenrekonstruktion

Das Rekonstruieren von visuellen Merkmalen in Video-Bildern resultiert in dünn besetzten Punktwolken (siehe Abbildung 1 und 2). Ein Roboter hingegen braucht für die Manipulation, die Bewegungsplanung oder für das Ausweichen von Hindernissen eine dichte Repräsentation der Oberfläche (siehe Abbildung 3).

Das Ziel von früheren Arbeiten im Bereich der dichten Rekonstruktion von Oberflächen mittels Bildern ist meistens das Erzielen von möglichst hoher Genauigkeit [FPS13]. In der Robotik ist es hingegen sehr wichtig, dass man auch ein Mass für die Unsicherheit der Rekonstruktion schätzt, was als Mass für das Risiko bei der Bewegungsplanung oder für das optimale Fusionieren mit anderen Sensormodalitäten benutzt werden kann. Aus diesen Überlegungen entstand der dritte Beitrag dieser Dissertation: Ein Echtzeit Algorithmus für die probabilistische Rekonstruktion der Umgebung mittels einer einzelnen Kamera [PFS14]. Abbildung 3 zeigt exemplarisch die Rekonstruktion einer Oberfläche mittels dem vorgeschlagenen Algorithmus. Wichtig ist anzumerken, dass für jeden Oberflächenpunkt auch ein Mass der Unsicherheit geschätzt wird.

Als Demonstration wurde der Algorithmus auf einer Mikrodrohne implementiert, welche mit einer nach unten schauenden Kamera ausgestattet ist. Der Algorithmus rekonstruiert in Echtzeit die Oberfläche unterhalb der Drohne. In einem Experiment wurde gezeigt, wie diese Information es der Drohne erlaubt, autonom einen sicheren Landeplatz zu finden und daraufhin zu landen [Fo15b]. Ein Video von diesem Experiment is unter folgendem Link abrufbar: https://youtu.be/phaBKFwfcJ4.

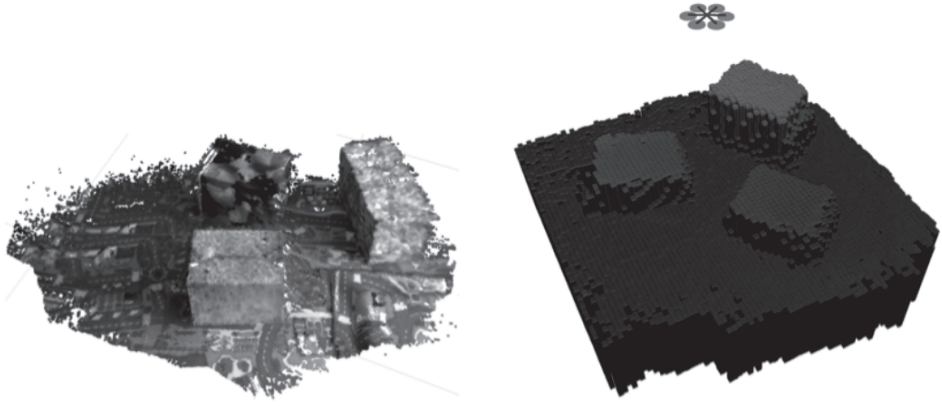


Abb. 3: Resultate des Projekts “Fliegender 3D Scanner”. Eine Drohne rekonstruiert die dreidimensionale Oberfläche mittels Bildinformationen einer nach unten schauenden Kamera. Links: Rekonstruktion der Oberfläche in Echtzeit auf einem leistungsstarken Grafikprozessor. Rechts: Rekonstruktion in Echtzeit auf dem Smartphone Prozessor der Drohne. Diese Rekonstruktion erlaubt es der Drohne, einen idealen Landeplatz zu finden.

3.3 4. Beitrag: Aktive Rekonstruktion mit einer Mikrodrohne

Eine spannende Anwendung von Computervision in der Robotik ist die Tatsache, dass der Roboter die Datenaufnahme beeinflussen kann. Daraus resultiert folgende Frage: Gegeben ist ein Bild der Umgebung; Was ist die optimale Trajektorie, welche eine Kamera durchlaufen muss, um möglichst schnell die Tiefe jedes Pixels im Referenzbild zu schätzen, d.h. die Oberfläche im Bild dreidimensional zu rekonstruieren? Diese Frage wird im letzten Beitrag dieser Dissertation untersucht. Dazu wurde eine Methode vorgeschlagen [FPS14a], um die Messungenauigkeit und dadurch den Informationsgewinn jeder Kameraposition zu berechnen. Die Innovation dieser Arbeit ist, dass für diese Berechnung nicht nur die relative Bewegung der Kamera und die geschätzte 3D Struktur der Oberfläche benutzt wird, sondern auch die Textur der Oberfläche im Referenzbild. Dies führt in Experimenten dazu, dass Roboter Trajektorien wählen, welche bildliche Doppeldeutigkeiten auflösen. Ein Beispiel davon ist in Abbildung 4 illustriert. Die Textur der Oberfläche in diesem Experiment weist eine dominante Gradientenrichtung auf. Wenn sich die Kamera in der Mitte befindet, dann ist der berechnete Informationsgewinn orthogonal zum Gradienten grösser als parallel dazu (im farblich kodierten Feld bedeutet Rot mehr Informationsgehalt als Grün oder Blau). Die Intuition dahinter ist, dass eine Bewegung parallel zum Gradienten die Tiefenschätzung erschwert, da Pixel entlang des Gradienten in den einzelnen Kamerabildern einander nicht eindeutig zugewiesen werden können.

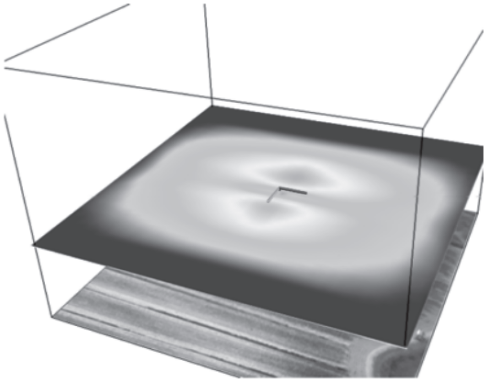


Abb. 4: Informationsgewinn für die Rekonstruktion einer Oberfläche als Funktion der Bewegungsrichtung der Kamera. Der Informationsgewinn in der Ebene horizontal zur aktuellen Kameraposition (in der Mitte) ist als Hitzekarte dargestellt. Wärmere Farben deuten auf einen höheren Informationsgewinn. Das Experiment zeigt, dass eine Bewegungsrichtung orthogonal zur dominanten Gradientenrichtung der Oberflächentextur optimal für die Rekonstruction ist.

Literaturverzeichnis

[Fa15] Faessler, M.; Fontana, F.; Forster, C.; Mueggler, E.; Pizzoli, M.; Scaramuzza, D.: Autonomous, Vision-based Flight and Live Dense 3D Mapping with a Quadrotor MAV. J. of Field Robotics, S. 1556–4967, 2015.

[Fo12] Forster, C.; Lynen, S.; Kneip, L.; Siegwart, R.: Centralized Multi-Robot Monocular SLAM. In: Robotics: Science and Systems (RSS). Workshop on Integration of Perception with Control and Navigation for Resource-limited, Highly dynamic, Autonomous Systems. 2012.

[Fo13] Forster, C.; Lynen, S.; Kneip, L.; Scaramuzza, D.: Collaborative Monocular SLAM with Multiple Micro Aerial Vehicles. In: IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS). S. 3962–3970, 2013.

[Fo15a] Forster, C.; Carlone, L.; Dellaert, F.; Scaramuzza, D.: IMU Preintegration on Manifold for Efficient Visual-Inertial Maximum-a-Posteriori Estimation. In: Robotics: Science and Systems (RSS). 2015.

[Fo15b] Forster, C.; Faessler, M.; Fontana, F.; Werlberger, M.; Scaramuzza, D.: Continuous On-Board Monocular-Vision–based Aerial Elevation Mapping for Quadrotor Landing. In: IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA). S. 111–118, 2015.

[Fo16] Forster, C.: Visual Inertial Odometry and Active Dense Reconstruction for Mobile Robots. Dissertation, University of Zurich, April 2016.

[Fo17a] Forster, C.; Carlone, L.; Dellaert, F.; Scaramuzza, D.: On-Manifold Preintegration Theory for Fast and Accurate Visual-Inertial Navigation. IEEE Transactions on Robotics, Februar 2017.

[Fo17b] Forster, C.; Zhang, Z.; Gassner, M.; Werlberger, M.; Scaramuzza, D.: SVO 2.0: Semi-Direct Visual Odometry for Monocular and Multi-Camera Systems. IEEE Transactions on Robotics, April 2017.

[FPS13] Forster, C.; Pizzoli, M.; Scaramuzza, D.: Air-Ground Localization and Map Augmentation Using Monocular Dense Reconstruction. In: IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS). S. 3971–3978, 2013.

[FPS14a] Forster, C.; Pizzoli, M.; Scaramuzza, C.: Appearance-based Active, Monocular, Dense Depth Estimation for Micro Aerial Vehicles. In: Robotics: Science and Systems (RSS). 2014.

[FPS14b] Forster, C.; Pizzoli, M.; Scaramuzza, D.: SVO: Fast Semi-Direct Monocular Visual Odometry. In: IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA). S. 15–22, 2014.

[Gi15] Giusti, A.; Guzzi, J.; Ciresan, D.; He, F. Lin; Rodriguez, J. P.; Fontana, F.; Faessler, M.; Forster, C.; Schmidhuber, J.; Caro, G. A. Di; Scaramuzza, D.; Gambardella, L.: A Machine Learning Approach to Visual Perception of Forest Trails for Mobile Robots. IEEE Robotics and Automation Letters, 2015.

[PFS14] Pizzoli, M.; Forster, C.; Scaramuzza, D.: REMODE: Probabilistic, Monocular Dense Reconstruction in Real Time. In: IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA). S. 2609–2616, 2014.

[Zh16] Zhang, Z.; Rebecq, H.; Forster, C.; Scaramuzza, D: Benefit of Large Field-of-View Cameras for Visual Odometry. In: IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA). 2016.



Christian Forster (1986, Schweizer) studierte Maschinenbau im Bachelor Studiengang an der ETH Zürich (2009), Robotik mit Auszeichnung im Masterstudiengang an der ETH Zürich (2012) und promovierte 2016 mit Auszeichnung bei Prof. Davide Scaramuzza mit der Dissertation *Visual Inertial Odometry and Active Dense Reconstruction for Mobile Robots* an der Universität Zürich. Im Jahr 2011 war er Gastforscher am CSIR in Südafrika und im Jahr 2014 war er Gast am Georgia Institute of Technology in der Gruppe von Prof. Frank Dellaert. Im Jahr 2015 war er Mitgründer des Zurich Eye Projekts am Wyss Institut Zürich. Zurich Eye hat sich zum Ziel gesetzt einen Sensor zu entwickeln der es Maschinen erlaubt sich im Inneren von Räumen Millimeter genau zu lokalisieren. Das Projektteam von Zurich Eye wurde Ende 2016 von Oculus (eine Untergruppe von Facebook) übernommen. Seit 2016 arbeitet Christian Forster bei Oculus an Computer Vision Systemen für die virtuelle Realität.

Autonome Quadrokopter zur Innenraumerkundung

Nils Gageik[1]

Abstract:
Diese Schrift ist die **Kurzfassung** der gleichnamigen Dissertation [Ga15]. Die Arbeit beschreibt alle Aspekte der Entwicklung eines neuartigen, autonomen Quadrokopters, genannt AQopterI8, zur Erkundung von beliebigen Innenräumen. Dank seiner einzigartigen modularen Komposition von Soft- und Hardware ist der AQopterI8 in der Lage auch unter widrigen Umweltbedingungen autonom zu agieren und eine breite Bandbreite an Anforderungen zu erfüllen.
In der Kurzfassung werden das Konzept des Gesamtsystems, sein Soft- und Hardwaredesign sowie die entwickelten Verfahren zur Hinderniserkennung, Kollisionsvermeidung und Autonomen Suche kurz erläutert. Die Zusammenfassung schließt mit einem kurzen Fazit der Arbeit.

1 Konzept des Gesamtsystems

Abbildung 1 beschreibt grob das Konzept der Arbeit. Das Gesamtsystem wird wie jeder Roboter in die drei Teilsysteme Sensorik, Signalverarbeitung und Steuerung eingeteilt. Hinzu kommen Blöcke für die Kommunikation mit der Kommandostation (Ground Station) für TM und TC sowie die Aktuatoren. Eine Besonderheit bzw. Neuheit des Systems liegt in der gleichzeitigen Verwendung von fünf verschiedenen, redundanten, komplementären on-Board Sensortypen, die in die Lagesensoren (z.B. IMU), Positions- und Höhensensoren (z.B. Fourier Tracking, Luftdruck), Optische Hinderniserkennung (z.B. Infrarot), Nicht-Optische Hinderniserkennung (z.B. Ultraschall) und Hochgenaue Hinderniserkennung (z.B. PMD) eingeteilt sind. Abbildung 2 (links) illustriert den Aufbau als Prototypen.

2 Hardwaredesign

Abbildung 2 (rechts) stellt das Hardware-Design des AQopterI8 dar. Es zeigt die Schnittstellen und Verknüpfungen aller funktionalen Komponenten des Systems wie Prozessoren, Sensoren, Aktuatoren und Funkmodule, die in dieser Arbeit verbaut und verwendet wurden. Die insgesamt 42 Sensoren werden entsprechend ihrer Verwendung in Sensoren zur Höhenbestimmung, Orientierungsbestimmung, Hinderniserkennung, Positionsbestimmung und Objekterkennung gegliedert.
Zur Arbeit gehören insgesamt 10 Quadrokopter unterschiedlicher Konfiguration (Flugfähige Subsysteme), mit denen die verschiedenen Methoden, Ansätze und Entwicklungen empirisch validiert werden konnten (Abb. 3).
Darunter befinden sich drei Quanipulatoren (Abb. 4), d.h. Quadrokopter mit Manipulator (Roboterarm), die in die Umgebung eingreifen können.

[1] Gründer und Gesellschafter-Geschäftsführer d. Emqopter GmbH, n.gageik@emqopter.de

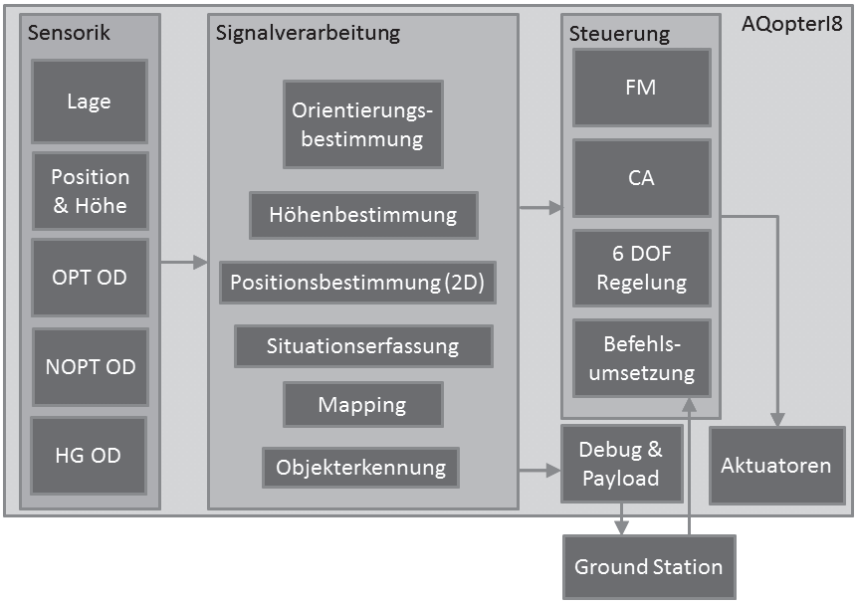


Abb. 1: Gesamtkonzept

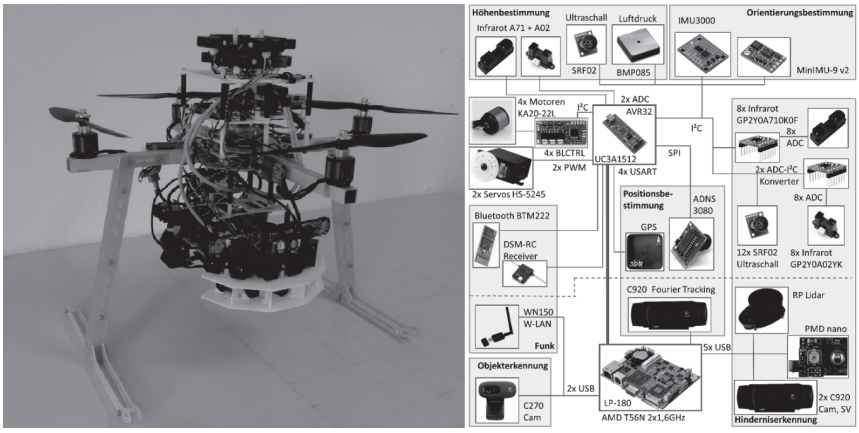


Abb. 2: AQopterI8 Gesamtsystem und Hardware Design

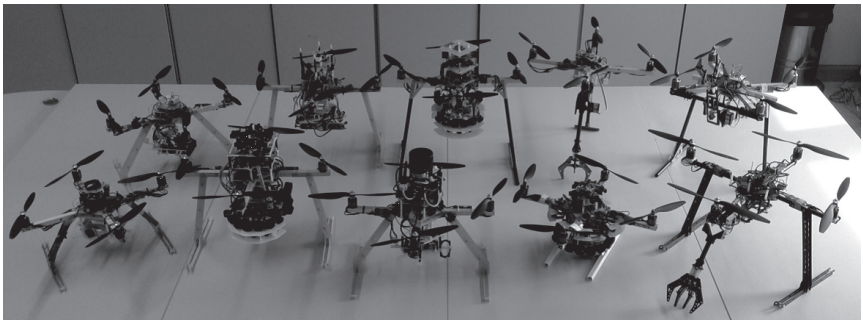


Abb. 3: HW-Instanzen des AQopterI8



Abb. 4: Quanipulatoren (Quadrokopter mit Manipulator)

3 Weighted Filter

Mit Weighted Filter (WF) ist der eigens zum Bewerten widersprüchlicher Datenquellen entwickelte Algorithmus gemeint, der in dieser Arbeit zur Höhenbestimmung und Hinderniserkennung Anwendung findet. Hintergrund ist die Verwendung verschiedener unverlässlicher Sensoren, wobei zunächst keine expliziten Informationen über die Richtigkeit der Sensordaten zur Verfügung stehen. Die Korrektheit der Messungen muss somit mit Hilfe der Messgröße selbst und im Kontext redundanter Messungen überprüft werden, wobei das Ergebnis der Datenfusion die so ermittelte beste Messung ist.
Eben dieses Problem ist typisch bei der Verwendung von Ultraschall und Infrarotsensoren zur Entfernungsmessung. Beide Sensortypen liefern zuweilen aufgrund vielfältiger Fehlerquellen stark verrauschte oder falsche Messwerte. Bei näherer Betrachtung des Problems lassen sich jedoch im Kontext mehrere Phänomene nutzbar machen, die es dem Weighted Filter im Normalfall erlauben, aus widersprüchlichen Daten den korrekten Wert zu bestimmen.
Das erste genutzte Phänomen ist die Tatsache, dass schlechte oder falsche Messungen oftmals stark verrauscht sind. Dies lässt sich durch die Varianz der Messungen bzw. an Hand der Differenz aufeinanderfolgender Messungen feststellen. Des Weiteren kann bei einem dynamischen System wie einem Quadrokopter davon ausgegangen werden, dass Messungen unmöglich über einen längeren Zeitraum konstant sind. Ändert sich ein Wert gar nicht, so ist der Sensor aller Wahrscheinlichkeit nach ausgefallen. Außerdem gilt, ist der Wert au-

ßerhalb des gültigen Messbereichs, so wird er ebenfalls verworfen.
Kerngedanke des Weighted Filters ist jedoch der Vergleich aller zur Verfügung stehenden Sensoren bzw. Sensormessungen miteinander. Der Sensor, dessen Messungen am besten mit allen gültigen Messungen übereinstimmen, ist am wahrscheinlichsten korrekt. Dabei ist zu beachten, dass bei der Bewertung nicht allein die aktuelle Messung aber auch nicht alle Messungen berücksichtigt werden sollten. Lange zurückliegende Messungen liefern nur bedingt Informationen über die aktuelle Gültigkeit. Eine vereinzelte Messung mag aber zufällig mal schlecht sein, das System sollte dann aber nicht sofort dem Sensor misstrauen, da dies erfahrungsgemäß zu mehr Schwankungen, einer geringeren Stabilität und somit schlechteren Resultaten führt. Die kurzfristige Historie fließt also beim Weighted Filter in einem geeigneten Maße ebenfalls mit ein.
In Abgrenzung zum weitverbreiteten Kalman Filter behandelt der Weighted Filter primär das Problem der Gewichtung von Messungen. Bei einem Kalman Filter erfolgt die Gewichtung über die Kovarianzmatrizen von Prozessrauschen und Messrauschen. Dabei geht der Kalman Filter davon aus, dass das Rauschen normalverteilt ist, d.h. es ist mittelwertfrei und durch eine Varianz vollständig beschrieben. Jedoch gibt es eine Reihe von Messfehlern, bei denen diese Voraussetzungen nicht erfüllt sind. Das Problem lässt sich zwar durch eine dynamische Parametrisierung der Kovarianzen umgehen, dennoch stellt dies die größte Schwierigkeit bei der Implementierung eines Kalman Filters dar. Eine Lösung des Problems liefert der Weighted Filter, der jedem Sensor dynamisch Gewichte zuweist. Mit diesen Gewichten können die Kovarianzmatrizen des Kalman Filters aktualisiert werden. Dabei ist insbesondere zu beachten, dass beim Kalman Filter fehlerhafte Messungen das Ergebnis verfälschen, wenn es nicht gelingt, dies bei Messung und Datenfusion zu erkennen und zu verhindern.
Um dieses Problem zu umgehen, verwendet der Weighted Filter nur die beste Messung. In abgeschwächter Form können auch mehrere gute Messungen eingehen. Somit kann der Weighted Filter auch ohne Kalman Filter zur Datenfusion zum Einsatz kommen. Dies ist auch dann sinnvoll, wenn ein Kalman Filter zu aufwändig erscheint, da ein weiterer Nachteil des Kalman Filters in seiner Komplexität und dem damit verbundenen Rechenaufwand besteht.

4 TAF Filter

Der Triple Awareness Filter (TAF, dt.: dreifache Wahrnehmung) ist ein selbstentwickelter, einfacher Algorithmus zur Datenfusion bei zweidimensionaler Hinderniserkennung und Kollisionsvermeidung, ohne Manipulation der Höhe. Er geht von dem Konzept aus, die Umgebung des Quadrokopters über 8 Sektoren als die verfügbaren Abstände in 8 Richtungen wahrzunehmen (Abb. 5 links). Die Aufgabe des Filters besteht nun darin, aus drei je 45 Grad versetzt gemessenen Abständen die kürzeste Entfernung auszuwählen und dabei Fehler und Störungen zu unterdrücken. Dieser kürzeste Abstand entspricht dem verfügbaren Platz in die jeweilige Richtung. Wie in Abbildung 5 (mittig) zu sehen ist, wird aus dem Abstand nach vorne (rot markiert, engl. main) und den Abständen der direkten Nachbarn vorne links und vorne rechts (gelb markiert, engl.: direct neighbor) - ein gemeinsamer Abstand nach vorne bestimmt. Diese Reduktion ist notwendig und korrekt, da das Problem

der Kollisionsvermeidung hinreichend beschrieben ist durch den verfügbaren Abstand in die vier Raumrichtungen vorne, links, rechts und hinten. Alle weiteren Abstände darüber hinaus sind Kompositionen dieser Raumrichtungen und lassen sich somit durch selbige ausdrücken.

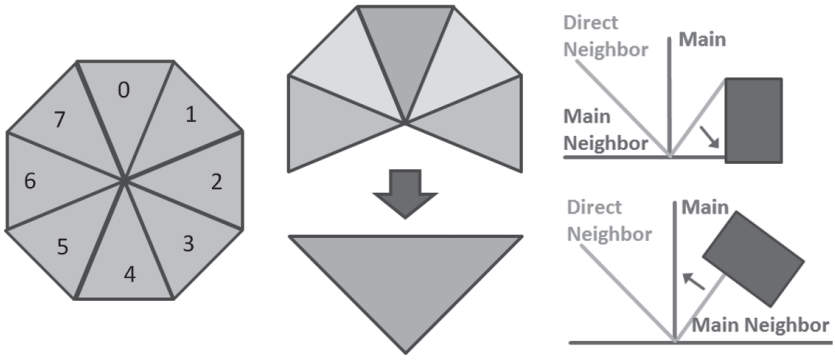


Abb. 5: TAF Konzept

Damit besteht das zugrundeliegende Problem in der Frage, wie multiple Abstände unterschiedlicher Richtungen miteinander zu fusionieren sind. Dazu liefert der TAF Algorithmus eine Lösung. Das Ziel der Fusion ist die Bestimmung des minimalen Abstandes zur Vermeidung von Kollisionen. Die Verwendung der Min-Funktion, d.h. die schlichte Bildung des Minimums, ist nicht ausreichend, da hierbei die nachfolgend beschriebenen Schwierigkeiten auftreten.

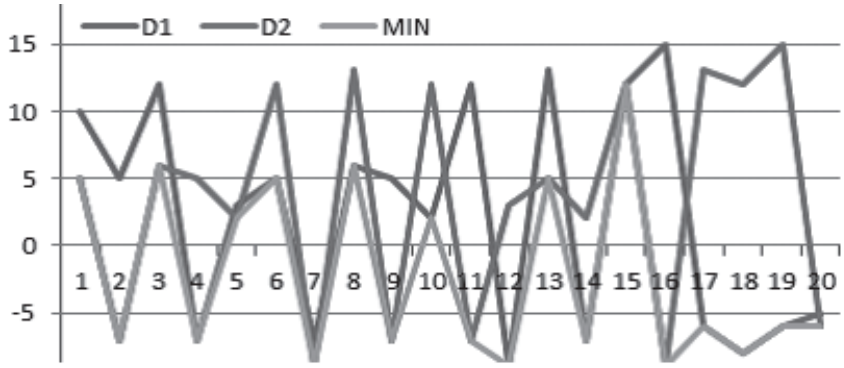


Abb. 6: Minimum (grün) zweier verrauschter Signale D1 und D2

Bei mehreren, ggf. teils stark verrauschten, Signalen ist deren Minimum deutlich niedriger als der Mittelwert jedes einzelnen Signals (vgl. Abb. 6). Die Mittelwerte von D1 und D2 betragen 2,25 und 3,6. Der Mittelwert der Min-Funktion min(D1,D2) beträgt -2,25 und entspricht kaum mehr den beiden ursprünglichen Signalen. Somit wird die Messung durch Bildung des Minimums stark verfälscht. Dieses Problem hängt sehr stark mit dem sprung-

haften Verhalten der Min-Funktion zusammen. Es führt zu einem sehr schnellen Wechsel zwischen den verschiedenen Signalen bzw. Sensoren, was einer stabilen Regelung zuwider läuft. Deshalb verwendet der TAF nicht lediglich die aktuelle Messung, sondern die Ergebnisse der letzten drei Messungen.

Ein weiteres Problem besteht darin, dass die Min-Funktion den Kontext, in dem die Messungen stehen, nicht berücksichtigt. Der TAF hat zum Ziel, den kürzesten relevanten Abstand in eine Raumrichtung zu ermitteln. Wenn der Quadrokopter sich z.B. in einem Gang befindet, so messen die 45 Grad nach vorn versetzten Sensoren auch die Wand an der Seite. Über die Min-Funktion würde die Wand an der Seite vorne miteinfließen. Um dies zu vermeiden, verwendet der TAF auch die 90 Grad versetzten Sensoren (Abb. 5 rechts: blau, main neighbor). Ist deren Abstand niedriger als der Abstand der direkten Nachbarn, so fließt der entsprechende direkte Nachbar nicht ein.

Diesen Ausführungen mag entgegen gehalten werden, dass im beschriebenen Beispiel mit dem Gang die Wand nicht nach vorne wandert, sofern die korrekte Richtung miteinfließt. In dem Fall würde eine Vereinfachung wie beim TAF nicht postuliert. Es stellt sich dann aber die Frage, wie die Messungen in die Regelung einfließen sollen und wie dabei die unterschiedlichen Richtungen Berücksichtigung finden. Spätestens bei der Regelung muss eine Vereinfachung oder Fusion stattfinden. Experimente mit zusätzlichen überlagerten Reglern haben gezeigt, dass das System stabiler ist, wenn exakt ein Regler pro unabhängige Raumachse verwendet wird. Zudem ist das Problem durch die vier Abstände vorne, hinten, links und rechts minimalistisch beschrieben.

5 Hinderniserkennung mit Ultraschall (US) und Infrarot (IR)

Abbildung 7 veranschaulicht das Konzept der Hinderniserkennung basierend auf den 28 Abstandsmessungen der 16 IR und 12 US Sensoren. Herz des Systems sind 12 WF und 4 TAF. Als Stützinformation werden die gemessenen Positionsänderungen der optischen Schätzung (OF) und die Lagewinkel der Orientierungsbestimmung (IMU) hinzugezogen. Die optische Schätzung und die inertiale Schätzung ergeben die jeweiligen Positionsänderungen für die Weighted Filter.

Die Fusion der unterschiedlichen Sensordaten erfolgt mittels WF. Die 12 WF aus Abbildung 7 haben das in Abbildung 8 zu sehende identische Design. Jeder WF fusioniert jeweils 5 Sensoren: 2x IR (lang und kurz), US, OF und IMU, wobei (nur) OF und IMU stets dieselben Sensoren sind. Genau genommen besteht in diesem Fall jeder WF aus zwei WF bzw. aus zwei Schritten. Der IR WF fusioniert den langen und den kurzen IR Sensor mit den übrigen Sensoren als Referenzsensoren. Das ist erforderlich, weil häufig zumindest einer der beiden IR Sensoren falsche Messwerte liefert und somit ein fehlerhafter Wert die Gewichtung verschlechtern würde. Im Anschluss an die IR Fusion wird das Ergebnis der IR Sensoren mit dem US Sensor fusioniert.

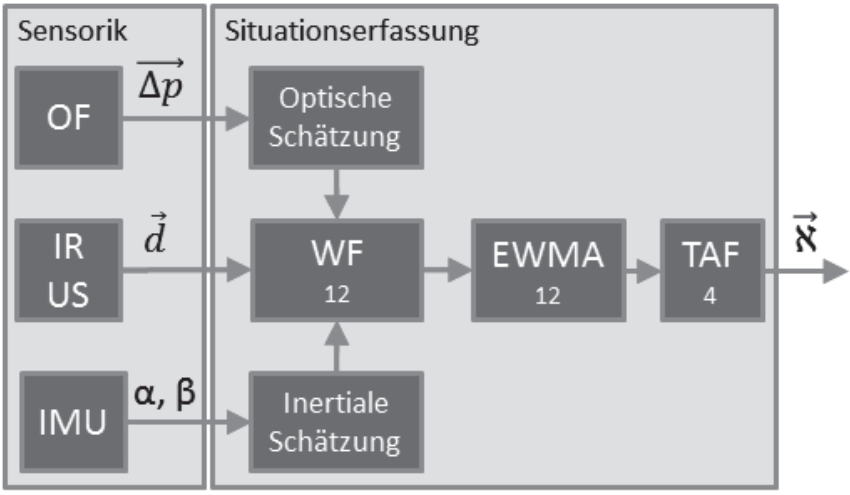


Abb. 7: Konzept der Hinderniserkennung basierend auf IR und US Sensoren zur Abstandsmessung

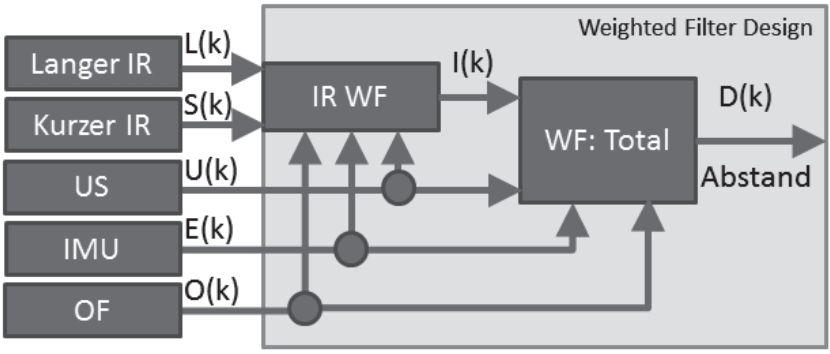


Abb. 8: Weighted Filter Design zur Hinderniserkennung



Abb. 9: Anordnung der 12 US Sektoren (links) und 8 IR Sektoren (rechts)

Die 12 US Sensoren sind 30 Grad zueinander verschoben angeordnet und decken somit 12 Sektoren ab, während die zweimal 8 IR Sensoren 45 Grad verschoben sind und somit 8 Sektoren bilden (Abb. 9). Daher gehen die geometrisch nächsten IR Sensoren in zwei WF ein.
Zur Hinderniserkennung werden 16 IR und 12 US Sensoren verwendet. Die relativ hohe Anzahl an Sensoren ist notwendig, um eine möglichst zuverlässige Abdeckung der Umgebung zu gewährleisten. Somit können Fehler einzelner Sensoren kompensiert werden.

6 Kollisionsvermeidung

Das Konzept der Hinderniserkennung und Kollisionsvermeidung wird in Abbildung 10 zusammengefasst. In die Hinderniserkennung bestehend aus der Sensorik und der Situationserfassung wurde bereits kurz eingeführt. Die Situationsbewertung beurteilt an Hand der Situationserfassung, ob und inwiefern durch die Abstandsregelung in die Steuerung eingegriffen werden muss, um Kollisionen zu vermeiden. Die Abstandsregelung beinhaltet einen Regler, der den Abstand zu Hindernissen in alle vier Raumrichtungen aktiv regelt.

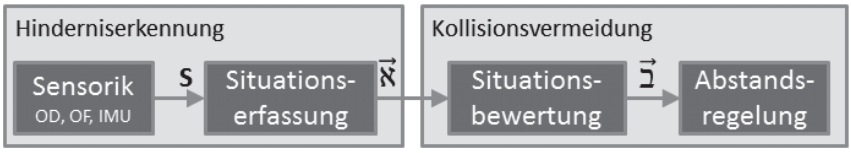


Abb. 10: Hinderniserkennung und Kollisionsvermeidung

7 Autonome Suche

Neben einem autonomen Flug mitsamt Hinderniserkennung und Kollisionsvermeidung bei beliebigen Objekten wie z.B. Personen, ist der AQopterI8 auch in der Lage, die Anzahl an Objekten, hier rote Bälle, die auf dem Boden verteilt sind, autonom, d.h. nur unter Verwendung bordeigener Ressourcen, zu zählen und deren Positionen wiederzugeben.
Das Konzept sieht vor, dass der Suchbereich vom Operator als quadratisches Feld vorgegeben wird. Dieser Bereich wird vom Quadrokopter autonom abgeflogen und mit Hilfe einer nach unten gerichteten Kamera wird die Anzahl roter Bälle gezählt. Gleichzeitig wird deren Position abgespeichert. Am Ende ergibt sich eine Karte, aus der die Lage der roten Bälle hervorgeht. Der Sichtbereich (engl. Field of View, FOV) ist dabei der Bereich, den die Kamera am Boden abdeckt.
Der virtuelle Sichtbereich (engl. Virtual FOV, VFOV) gibt den Bereich an, mit dem der Suchalgorithmus die Suche plant. Die Wegpunktliste wird dabei zu Beginn der Suche automatisch vom Suchalgorithmus in Abhängigkeit des Suchbereichs, des VFOV und der Suchstrategie erstellt. Der Suchalgorithmus stellt sicher, dass der komplette Suchbereich zumindest einmal im Sichtbereich auftaucht. Somit wird quasi der komplette Suchbereich abgescannt (vgl. Abb. 11).

Der Sichtbereich kann als Parameter eingestellt werden. Je kleiner der Sichtbereich ist, desto mehr Wegpunkte werden generiert und desto engmaschiger wird die Suche. Die Suchstrategie kann ebenfalls eingestellt werden. Aktuell sind zwei Suchstrategien implementiert. Die Tiefensuche sucht zunächst den kompletten Suchbereich im Äußeren ab und pflanzt sich dann zirkulär nach innen fort. Dagegen deckt die Breitensuche zunächst die Bereiche nahe dem Startpunkt ab und fährt sukzessive mit den weiter entfernten Bereichen fort.
Mehrfachzählungen desselben Objektes werden durch Maskierung verhindert, d.h. über jedes bereits gefundene Objekt wird an der Position eine Maske gelegt. Objekte, die im Maskierbereich gefunden werden, werden nicht aufgenommen. Mit Maskierbereich ist die Distanz gemeint, die das Quadrat um das Ziel definiert.
In diesem Experiment ist der Quadrokopter auf 1m Höhe den Suchbereich autonom abgeflogen und hat alle 8 Objekte erkannt und mit einem maximalen Fehler von 20cm vollständig und korrekt lokalisiert (Null Fail Positive, Null Fail Negative). Das Experiment wurde unter Änderung der beschriebenen Parameter mehr als hinreichend häufig wiederholt, so dass der Einfluss der Parameter auf das Ergebnis aussagekräftig diskutiert werden konnte.

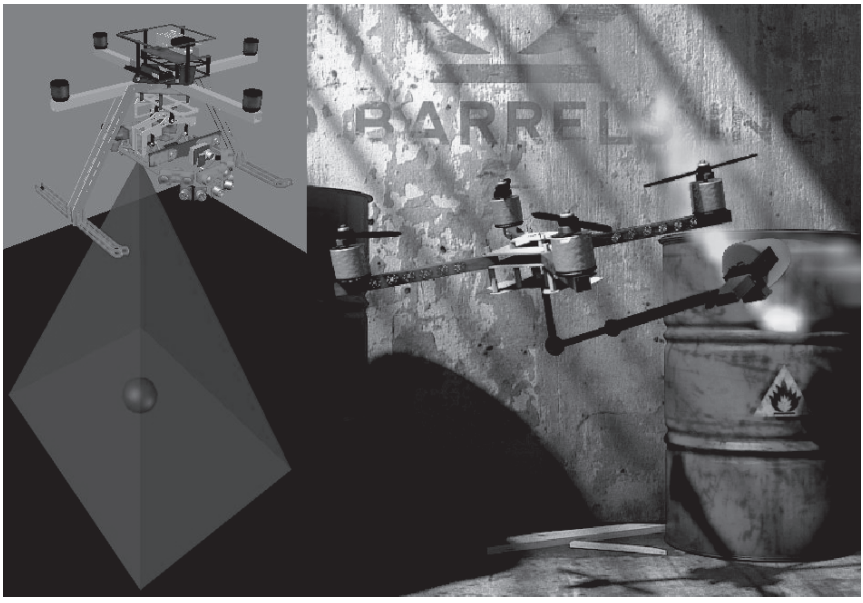


Abb. 11: Konzept Suche (links) und Rettungshelfer mit Propellern (rechts)

8 Fazit und Ausblick

Durch eine hohe Zahl von mehr als 1000 Versuchen (Flügen) im Fluglabor erfolgte die Evaluierung und Bewertung des Systems, die die Vor- und Nachteile der entwickelten

Ansätze und Lösungen klar herausarbeitet. Die Evaluierung der Kollisionsvermeidung ergab z.B., dass der AQopterI8 in der Lage ist Hindernissen wie Wänden und Personen auszuweichen. Dabei kann der Quadrokopter den Abstand zu Hindernissen regeln und damit auch in engen Tunneln (Breite 1,8m) fliegen. Entwicklungen wie der autonome Flug, die autonome Suche und der gerichtete Flug zeigen neue Lösungswege und Zusammenhänge für technische Fragen und Probleme auf. Schließlich wurde das Lehrsystem QCS mit Hilfe eines online Fragebogens didaktisch analysiert und es offenbarte sich dessen Wert für die Lehre.
Zum Ausblick dieser ca. 5 jährigen Arbeit gehört eine ganze Reihe an Aspekten, wobei hier nur auf das Wesentliche eingegangen werden kann. Dies betrifft die bereits erfolgte Firmengründung mit Produktentwicklung und wirtschaftlicher Verwertung der wissenschaftlichen Leistung im Rahmen eines Exist-Stipendiums.
Zu den Aktivitäten im Rahmen des Projektes Rettungshelfer mit Propellern, das 2014 mit dem Förderpreis der Universität und der Mainfränkischen Wirtschaft ausgezeichnet wurde, gehört die Entwicklung und Integration eines Manipulators zur Verwendung im Feuerwehreinsatz. Für die nächsten Schritte dieses ambitionierten Vorhabens arbeiten wir aktuell an einer Finanzierung (Abb. 11), wobei die ersten Hürden bereits genommen sind.

Interessenten an der Thematik sind herzlich eingeladen Kontakt aufzunehmen.

Literaturverzeichnis

[Ga15] Gageik, Nils: Autonome Quadrokopter zur Innenraumerkundung. Dissertation, Universität Würzburg, 2015.



Nils Gageik, 1982 in Aachen geboren, studierte Technische Informatik an der RTWH Aachen und schloss im Oktober 2010 sein Studium mit dem Diplom ab. Von November 2010 bis April 2016 war N. Gageik als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Julius-Maximilians-Universität Würzburg angestellt. Dort leitete er das Quadrokopter-Labor sowie das Forschungsprojekt AQopterI8. Im März 2016 promovierte N. Gageik mit Auszeichnung. Von Mai 2016 bis April 2017 war N. Gageik Exist-Stipendiat und Ideengeber des Projektes Embedded Qopter. Im Juni 2016 entstand daraus das Unternehmen Emqopter, welches N. Gageik als Gesellschafter-Geschäftsführer bis heute leitet.
Im April 2014 wurde N. Gageik für seine Arbeit mit dem Förderpreis der Mainfränkischen Wirtschaft (IHK) ausgezeichnet. Im Juli 2016 gewann N. Gageik den Promotionspreis der Fakultät Informatik. Im Februar gehörte die Emqopter GmbH zu den BayStartUp BP-Siegern und wurde im Mai mit dem StartZuSchuss Förderpreis ausgezeichnet. Im Mai 2017 erhielt N. Gageik außerdem den Promotionspreis der Unterfränkischen Gedenkjahrstiftung überreicht. Im Juni des selben Jahres ist der Konzern Jopp Holding GmbH als Gesellschafter der Emqopter GmbH eingestiegen.

Sichtbarkeitsoptimierung und Massebehaftete Partikel in der Strömungsvisualisierung[1]

Tobias Günther[2]

Abstract: Die folgende Arbeit ist im Bereich der wissenschaftlichen Visualisierung angesiedelt, die sich als Teilgebiet der Computergrafik versteht und interdisziplinär mit anderen wissenschaftlichen Disziplinen, wie etwa der Meteorologie, der Medizin und dem Ingenieurswesen, verknüpft ist. Im ersten Teil werden optimierungsbasierte Ansätze vorgestellt, die die Sichtbarkeit von allgemeinen Linien und Flächen einstellen um eine Balance zwischen der Darstellbarkeit von Informationen und der Vermeidung von Verdeckung zu finden. Der zweite Teil ist neuen Visualisierungsmethoden für zeitabhängige Strömungen gewidmet, was die erwartungstreue Darstellung von integrationsbasierten Skalarfeldern und die Einführung einer neuen Klasse von Wirbeldefinitionen beinhaltet. Im dritten Teil werden massebehaftete Partikel als ein neues Anwendungsfeld in der Strömungsvisualisierung eingeführt. Im Einzelnen wird Integralgeometrie extrahiert und visualisiert, das Wirbelverhalten und die Separation von masse-abhängigen Partikeln studiert, traditionelle Vektorfeldtopologie auf den masse-abhängigen Fall erweitert und ein neuer Ansatz zur Entdeckung der Herkunft von Schmutzpartikeln in Strömungen präsentiert.

Die in diesem Artikel vorgestellten Methoden wurden in einer Dissertation [Gü16] veröffentlicht, die von der Fakultät für Informatik der Universität Magdeburg angenommen wurde. Die einzelnen vorgestellten Verfahren sind in begutachteten internationalen Zeitschriften veröffentlicht worden.

1 Sichtbarkeitsoptimierung

In der 3D Strömungsvisualisierung kommt es häufig zu Verdeckungsproblemen, sobald dichte Linienfelder oder mehrere Flächen dargestellt werden. Ein wichtiger Aspekt ist daher die sorgfältige Auswahl von Darstellungsprimitiven, sodass die relevanten Strukturen im Datensatz bestmöglich kommuniziert werden können.

1.1 Sichtbarkeitsoptimierung für 3D Linienfelder

Die Auswahl von Stromlinien, die ein Vektorfeld bestmöglichen repräsentieren ist ein fundamentales und bereits lange ausstehendes Problem [GRT13]. Wenn zu viele Linien gezeigt werden, kommt es zu Verdeckungen von relevanten Strukturen. Wenn Linien entfernt werden, ohne deren Rolle im Bild zu beachten, können wichtige Strukturen verloren gehen. Des Weiteren wäre dadurch nicht sichergestellt, dass relevante Strukturen nicht verdeckt werden. Letzten Endes gilt es daher immer eine Balance zwischen der Präsentation relevanter Information und der Vermeidung von Verdeckungen zu finden. Die Aufgabe

[1] Englischer Titel der Dissertation: Opacity Optimization and Inertial Particles in Flow Visualization

[2] ETH Zürich, tobias.guenther@inf.ethz.ch

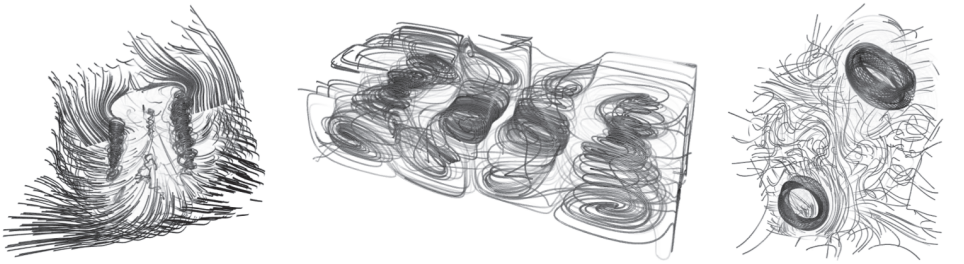


Abb. 1: Anwendungen der interaktiven, globalen Linienselektion. Die Lösung der linearen Optimierung mit beschränktem Lösungsraum berechnet Transparenzen, die den Blick auf relevante Strukturen freigeben, die vom Nutzer als wichtig eingestuft wurden, wie bspw. Wirbel hinter einem Hubschrauber (links), Konvektionszellen (mitte) und Feldlinien von magnetischen Ringen (rechts).

ist es daher eine Visualisierung zu erschaffen, die die Sicht auf relevanten Strukturen freimacht. Gegeben ist hierfür eine Menge an Linien und ein benutzerdefiniertes Wichtigkeitsmaß. Das vorgeschlagene Verfahren diskretisiert die Linien in Segmente und minimiert die folgende quadratische Energie, wobei g_i die Wichtigkeit eines Segments, h_{ij} den Verdeckungsgrad zweier Segmente und a_{ij} die Nachbarschaft zweier Segmente bezeichnet:

$$E = \frac{p}{2} \sum_{i=1}^{n} (\alpha_i - 1)^2 \tag{1}$$

$$+ \frac{q}{2} \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} \left(\alpha_i \, (1 - g_i)^{\lambda} \, h_{ij} \, g_j \right)^2 \tag{2}$$

$$+ \frac{r}{2} \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} \left(\alpha_i \, (1 - g_i)^{\lambda} \, h_{ji} \, g_j \right)^2 \tag{3}$$

$$+ \frac{s}{2} \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} \frac{a_{ij}}{2} (\alpha_i - \alpha_j)^2 \tag{4}$$

unter der Nebenbedingung $0 \leq \alpha_i \leq 1$. Term (1) agiert als Regularisierung um die Sichtbarkeit zu maximieren. Weiterhin wird die Verdeckung von relevanten Strukturen minimiert (2), der Hintergrund aufgeräumt (3) und der Transparenzverlauf entlang der Linien geglättet (4). In Abbildung 1 sind Beispiele zu sehen: Wirbelstrukturen in der Luftströmung hinter einem Hubschrauber (der Hubschrauber selbst ist nicht dargestellt), Konvektionszellen in einer dünnen Schicht Flüssigkeit, die von unten erhitzt wird um Auftrieb zu erzeugen und Feldlinien von magnetischen Ringen, die im Laufe einer Simulation zerfallen und sich neu formieren. Im Vergleich zu existierenden Arbeiten ist dies das erste Verfahren, das eine globale Optimierung ausführt, sowie interaktiv und blickabhängig ist.

1.2 Hierarchische Sichtbarkeitsoptimierung für Zeitabhängige 3D Linienfelder

Die Selektion von relevanten Linien in zeitabhängigen Strömungen wurde in der Literatur bislang noch nicht betrachtet. Aus diesem Grund wird die oben vorgestellte Sichtbarkeitsoptimierung erweitert [GRT14], wofür zwei Schritte notwendig sind. Zunächst muss die

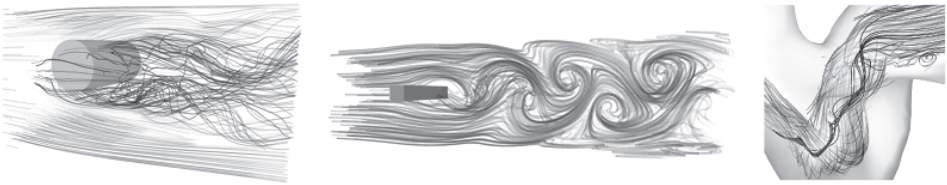


Abb. 2: Sichtbarkeitsoptimierung für eine zeitabhängige, turbulente Zylinderströmung (links), eine von-Kármánsche Wirbelstraße (mitte) und Blutfluss (rechts).

Rechenzeit verkürzt werden, um die Sichtbarkeit von Linien berechnen zu können, die sich mit der Zeit verformen. Des Weiteren muss die zeitliche Kohärenz sichergestellt werden, um störendes Flackern zu vermeiden. Die Rechenzeit der Sichtbarkeitsoptimierung wird durch die Anzahl der Unbekannten bestimmt, d.h., die Anzahl der Liniensegmente für die die Transparenz berechnet werden soll. Um die Anzahl der Segmente zu reduzieren, wird eine blickabhängige Unterteilung der Linien durchgeführt, sodass nahe der Kamera feiner unterteilt wird als im fernen Hintergrund. Mögliche Unterteilungen werden hierarchisch vorberechnet und können zur Laufzeit ausgewählt werden, sodass ein Budget an Liniensegmenten eingehalten wird und die Liniensegmente auf dem Bildschirm gleichgroß sind. Um die zeitliche Kohärenz sicherzustellen wird die zu minimierenden Energie um einen weiteren Energieterm ergänzt, der das Ergebnis zeitlich glättet. Abbildung 2 zeigt Beispiele: eine turbulente Zylinderströmung in der sich starke Verwirbelung hinter einem Hindernis entwickelt, eine ruhigere Strömung in der sich die bekannte von-Kármánsche Wirbelstraße herausbildet und die Verwirbelung von Blut in einem Blutgefäß.

1.3 Sichtbarkeitsoptimierung für Flächen

Der nächste Schritt ist die Erweiterung der Sichtbarkeitsoptimierung auf Flächen [Gü14]. Die Idee ist hierbei sehr ähnlich zum bisherigen Verfahren. Zunächst wird eine gegebene Menge an Flächen in Patches unterteilt. Für jedes Patch wird eine quadratische Energie unter Nebenbedingungen minimiert, die die optimale Sichtbarkeit der Patches bestimmt. Die Unterteilung der Flächen und die Berechnung der Energieterme sind jedoch aufwändiger, als es bei den Linien der Fall war. Um die Flächen in etwa gleichgroße Patches zu zerlegen, wird eine Menge von Punkten uniform auf den Flächen verteilt, sodass deren geodätische

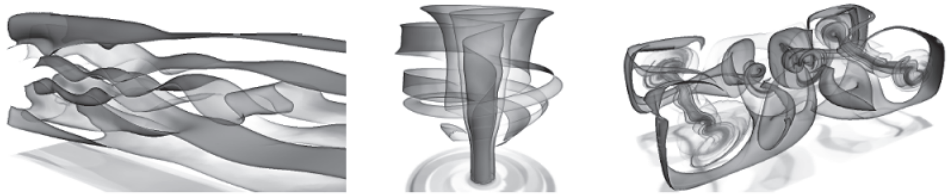


Abb. 3: Sichtbarkeitsoptimierung für Stromflächen in einer Zylinderströmung (links), einem statischen Mixer (mitte) und einer Konvektionsströmung (rechts).

Abstände untereinander maximiert werden. Die etwa gleichgroßen Patches ergeben sich aus den Voronoi-Regionen um den Punkten. Die resultierenden Visualisierungen sind nach wie vor blickabhängig, zeitlich kohärent und interaktiv. Abbildung 3 zeigt einige Ergebnisse in einer Zylinderströmung, in einem statischen Mixer, sowie in der bereits zuvor verwendeten Konvektionsströmung.

2 Merkmalsextraktion in zeitabhängigen Strömungen

Die Entwicklung von Analysemethoden für zeitabhängige Strömungen ist seit Jahren ein hochaktuelles Forschungsthema. Im Folgenden werden Techniken aus dem Lichttransport inhomogener partizipierender Medien auf die erwartungstreue Darstellung von integrationsbasierten Skalarfeldern angewendet, beispielsweise auf den sogenannten Finite-Time Lyapunov Exponent. Des Weiteren wird eine neue Klasse von Wirbeldefinitionen für Strömungen vorgestellt, die von rotierenden mechanischen Teilen induziert werden, wie etwa Rührwerken, Hydrozyklonen, Zentrifugalpumpen oder Ventilatoren.

2.1 Monte Carlo Rendering von Finite-Time Lyapunov Exponenten

Für die Verbesserung der Genauigkeit von Wettervorhersagen gewinnen hochauflösende, multimodale Klimadaten zunehmend an Bedeutung, denn hochaufgelöste numerische Simulationen der atmosphärischen Prozesse erlauben neue Einblicke in deren Dynamik. Die präsentierten Visualisierungen in Abbildung 4 zeigen atmosphärische Luftströmungen. Mit Hilfe der neuen Visualisierungstechnik [GKT16] können dichte Strömungsfelder und die Lagrange-Strukturen darin sichtbar gemacht werden. Die Methode approximiert nichtlokale Strömungsintegrale um den Finite-Time Lyapunov Exponenten (FTLE) abzuleiten, der Regionen mit stark separierendem Verhalten hervorhebt. Dabei bezeichnet die *flow map* $\phi_t^\tau(\mathbf{x}) = \phi(\mathbf{x},t,\tau)$ den Ort, den ein Partikel das an $(\mathbf{x},t)$ gestartet wurde nach einer Zeit τ erreicht. Der räumliche Gradient der *flow map* $\nabla\phi(\mathbf{x},t,\tau) = \frac{\partial}{\partial\mathbf{x}}\phi(\mathbf{x},t,\tau)$ beschreibt das Verhalten von Partikeln die nah beinander gestartet wurden. Da wir an Separation interessiert sind, betrachten wir den rechten Cauchy-Green Deformationstensor $\nabla^{\mathrm{T}}\nabla$. Dessen größter positiver Eigenwert $\lambda_{\max}$ enthält die stärkste (quadrierte) Separationsrate. Mit

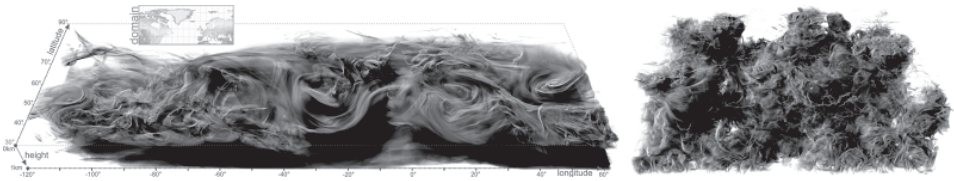


Abb. 4: Hochqualitative Visualisierungen einer Reanalyse-Simulation vom Europäischen Zentrum für Mittelfristige Wettervorhersagen (ECMWF), die die Luftströmung über der nördlichen Hemisphäre am 10. April 2010 zeigt (links). Des Weiteren ist eine Kumuluswolken-Simulation zu sehen (rechts), in der die Windbewegung zwischen Troposphäre und Stratosphäre untersucht wird.

angemessener Normierung erhalten wir:

$$\mathrm{FTLE}(\mathbf{x},t,\tau) = \frac{1}{|\tau|} \ln \sqrt{\lambda_{\max}(\nabla^{\mathrm{T}}\nabla)}, \tag{5}$$

Die Extremalstrukturen dieses Skalarfelds agieren als Transportbarrieren, die von atmosphärischen Treibhausgasen wie Kohlenstoffdioxid nicht überwunden werden können. Die Strukturen haben damit maßgeblichen Einfluss auf die Temperaturdiffusion und die Bildung von Wolken. Die Berechnung der Visualisierung erfordert viel Sorgfalt, da die Strukturen besonders fein sind. Das in Abbildung 4 angewandte Verfahren [GKT16] nutzt eine erwartungstreue Monte Carlo Integration, die sonst in der Strahlungsphysik und der modernen Filmproduktion Verwendung findet. Im Vergleich zu bisherigen Verfahren, ist dies das erste Verfahren, das Diskretisierungsfehler in der Darstellung komplett vermeidet. Für die Berechnung werden jedoch mehrere Milliarden Differentialgleichungen integriert, bis das Bild hinreichend konvergiert und das Monte Carlo Rauschen verschwunden ist.

2.2 Rotations-invariante Wirbelmaße

Das folgenden Kapitel befässt sich mit Strömungen, die um eine feste und bekannte Achse rotieren [GST16]. Beispiele sind Rührwerke, Rotorblätter, Hydrozyklone, Zentrifugalpumpen und Ventilatoren. Um das Problem zu motivieren stelle man sich einen zylindrischen Behälter vor, der mit einer Flüssigkeit gefüllt ist und in dem sich ein Propeller dreht. Die Rotation des Propellers mit konstanter Winkelgeschwindigkeit induziert eine Bewegung des Fluids. Ein Beobachter könnte nun am Rand des Behälters stehen oder sich mit dem Propeller mitdrehen. Das Ergebnis der meisten Wirbelextraktionsmethoden hängt allerdings von der Rotation des Betrachters ab. Selbst die weitverbreiteten Galilei-invarianten Verfahren liefern bei rotierenden Beobachtern unterschiedliche Ergebnisse, was die Frage aufwirft: In welchem Koordinatensystem erhält man die “korrekten” Wirbel? Ausgehend von einer formalen Definition von Rotationsinvarianz, wird ein generellen Ansatz konzipiert, der es erlaubt jedes Galilei-invariante Wirbelkonzept in ein rotations-invariantes zu überführen. Da eine Rotation einer Translation in Polarkoordinaten entspricht, sind alle Galilei-invarianten Verfahren in Polarkoordinaten automatisch rotations-invariant. Dies schließt sowohl die Berechnung von Wirbelkernlinien ein, als

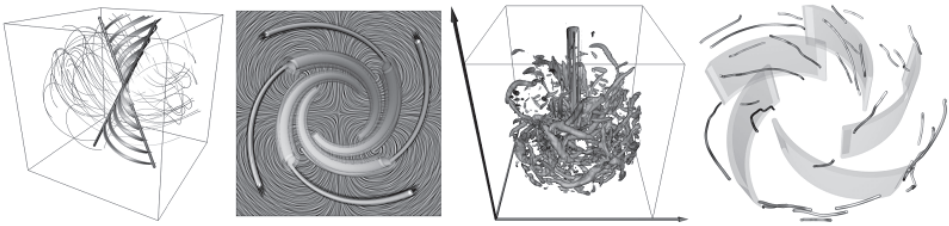


Abb. 5: Rotations-invariante Wirbelkerne in analytischen Vektorfeldern (links und mitte links), regionen-basierte Wirbelmaße in einem rotierenden Mixer (mitte rechts) und Wirbelkernlinien in einer Zentifugalpumpe (rechts).

auch die weitverbreiteten regionen-basierten Techniken. Abb. 5 zeigt Beispiele in analytischen und numerischen Strömungen.

3 Masse-abhängige Partikel in Strömungen

Im Folgenden werden massebehaftete Partikel als ein neues Anwendungsfeld in der Strömungsvisualisierung eingeführt, was neue Herausforderungen und Anwendungen eröffnet. Bisherige Forschung im Bereich der Strömungsvisualisierung beschränkte sich auf die Analyse masseloser Partikel. In vielen Anwendungsgebieten spielt die Masse von Partikeln, und die daraus resultierende Trägheit, allerdings eine essentielle Rolle in der Strömungsmechanik, beispielsweise wenn Sandpartikel mit Luftfahrzeugen interagieren. Die zugrundeliegende gewöhnliche Differentialgleichung von selbst einfachen Partikelbewegungsmodellen ist bis zu sieben-dimensional, da der Partikelzustand durch Position (3D), Geschwindigkeit (3D) und Zeit (1D) charakterisiert ist.

3.1 Masse-bedingte Separation von Partikeln

Die Dynamik masse-abhängiger Partikel ist abhängig von der Größe und Dichte der Partikel und ist bestimmt von Trägheit und Gravitation. Die Flugbahnen dieser Partikel werden durch gewöhnliche Differentialgleichungen zweiter Ordnung beschrieben, die als hoch-dimensionale Vektorfelder aufgefasst werden können. Nach der Erweiterung von geometrie-basierten Verfahren auf den masse-abhängigen Fall [Gü13], konzentriert sich die Arbeit auf das Separationsverhalten von masse-abhängigen Partikeln [GT15]. Man stelle sich hierfür zwei Partikel mit unterschiedlicher Masse vor, die vom gleichen Punkt starten, aber durch ihre Trägheit von der Strömung an unterschiedliche Orte transportiert werden. Um den Einfluss der Masse auf das Separationsverhalten zu analysieren wird das "Finite-Time Mass Separation"-Feld eingeführt, das an die oben genannten Finite-Time Lyapunov Exponenten angelehnt ist, d.h., es misst die Stärke der Separation. Durch progressives Abtasten des Massespektrums wird die Masse bestimmt, um die die stärkste

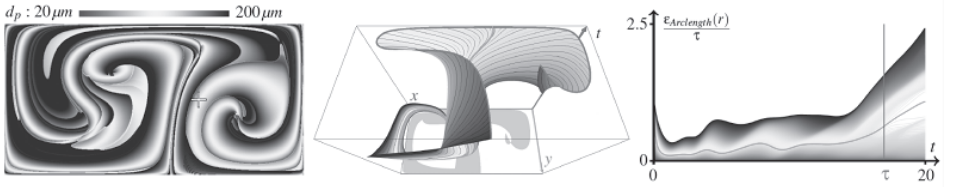


Abb. 6: Die Flugbahn von masse-abhängigen Partikeln hängt stark von deren Größe ab. Eine kleine Variation der Größe führt zu teils starken Veränderungen. Die Partikelgröße, um die die stärkste Veränderung auftritt (links) variiert dabei auch räumlich. Mit Hilfe von Raumzeit-Visualisierungen (mitte) lässt sich für einen gegeben Startpunkt die Menge aller Orte zeigen, die Partikel unterschiedlicher Größe erreichen können. In Raumzeit entsteht dabei eine Fläche. Die relative Verteilung von Partikeln unterschiedlicher Größe entlang der Frontlinie (rosa) lässt sich dabei auch über die Zeit darstellen (rechts), was quantitative Aussagen erlaubt.

Separation auftritt, was einen Einstiegspunkt für weitere Analysen bietet. Zugehörig dazu werden zwei weitere Ansichten angeboten, welche die Bewegungsbahnen des gesamten Massespektrums in Raumzeit zeigen, sowie die Verteilung der Massen auf der Partikelfront. Abbildung 6 gibt ein Beispiel für eine einfache analytische Strömung.

3.2 Statische 2D Vektorfeld-Topologie von Masse-abhängigen Partikeln

Die Vektorfeld-Topologie ist ein etabliertes und mächtiges Werkzeug zur Analyse des asymptotischen Verhaltens von Partikeln. Bestandteile der Topologie sind zum einen diejenigen Strukturen, an denen sich Partikel nach endlos langer Zeit sammeln werden, zum anderen aber auch die Strukturen, die dieses Verhalten bestimmen. Da dies in der Regel wenige Strukturen sind, erlaubt die Vektorfeld-Topologie einen vereinfachten und kompakten Blick auf das Verhalten von Partikeln. Traditionsgemäß beschäftigt sich die Vektorfeld-Topologie in der Visualisierung lediglich mit der Bewegung masseloser Partikel. Die traditionelle statische 2D Vektorfeld-Topologie lässt sich auf den masse-abhängigen Fall erweitern [GT16a]. Um dies zu erreichen, wird ausgenutzt, dass masse-abhängige Partikelbewegung in einem hoch-dimensionalen Vektorfeld beschrieben werden kann. Obwohl die topologische Analyse auf dem hoch-dimensionalen Feld ausgeführt wird, stellt sich heraus, dass die Extraktion und Klassifizierung der topologischen Strukturen effizient im niedrig-dimensionalen Raum der zugrundeliegenden Strömung berechnet werden kann. Aus dieser theoretischen Analyse leiten sich interessante Beobachtungen ab, bspw. dass immer und überall anziehendes Verhalten auf die Partikel wirkt. Abbildung 7 gibt einige Beispiele in synthetischen Strömungen.

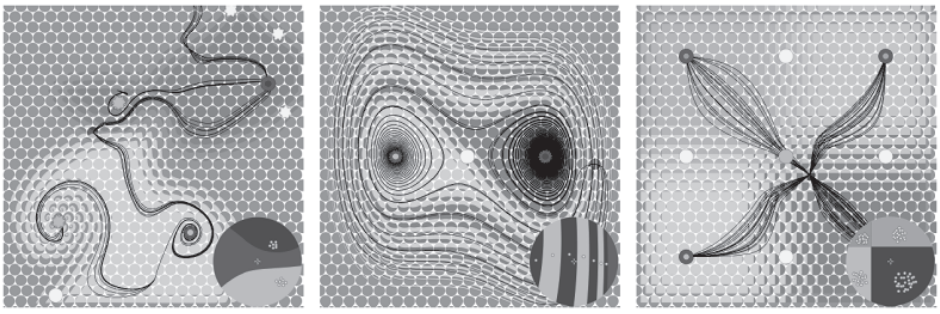


Abb. 7: Visualisierung des asymptotischen Verhaltens von masse-abhängigen Partikeln in drei synthetischen Strömungen: Magnetfeld (links), Oszillator (mitte) und ein analytisches Feld (rechts).

3.3 Herkunftsbestimmungen von Masse-abhängigen Partikeln

In masse-abhängigen Strömungen stellt die Rückwärtsintegration von Partikeln eine enorme Herausforderung dar [GT16b]. Eine stabile numerische Rückwärtsintegration ist in der Praxis sehr wichtig, denn sie erlaubt das Aufspüren der Herkunft von Verschmutzungen in Strömungen. Die Schwierigkeit der Rückwärtsintegration leitet sich aus der Erkenntnis des vorherigen Kapitels ab: Die immer und überall wirkenden anziehenden Kräfte werden

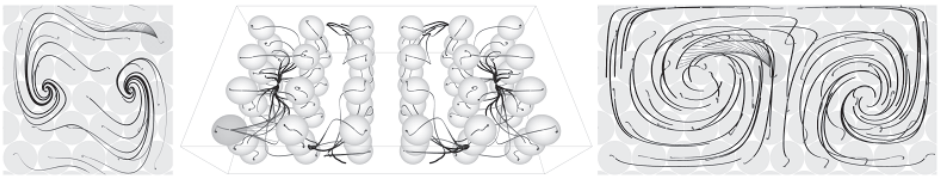


Abb. 8: Visualisierungen der möglichen Herkunftsorte (blau) von masse-abhängigen Partikeln für ausgewählte Beobachtungsorte (Zentren der grauen Kreise und Kugeln). Es stelle sich heraus, dass sich die möglichen Herkunftsorte auf Kurven beschränken. In der Arbeit wird gezeigt, wie diese Kurven als Integralkurven beschrieben und somit durch Standardmethoden extrahiert werden können.

bei der Rückwärtsintegration umgekehrt und drücken die Partikel im hoch-dimensionalen Raum auseinander. Die kleinste Änderung der Anfangskonfiguration wird dabei vervielfacht, was zu extrem ungenauen Lösungen führt. Anstatt die Anfangskonfiguration der Rückwärtsintegration vorzugeben wird die Problemstellung umformuliert. Es wird nach Partikeln gesucht, die zwar am Beobachtungsort der Verschmutzung ankommen, allerdings mit einer bestimmten Geschwindigkeit in der Strömung losgelassen wurden. Die Ankunftsgeschwindigkeit am Beobachtungsort wird dabei nicht festgelegt. Die Menge an möglichen Herkunftsorten beschreibt eine Kurve, die als Integralkurve extrahiert werden kann. Für die kompakte Visualisierung wird in Abb. 8 eine Reihe von Beobachtungsorten regelmäßig im Raum platziert und mögliche Herkunftsorte und die Ankunftsgeschwindigkeiten mit Hilfe von Kurven visualisiert. Das Verfahren löst die Rückwärtsintegration von masse-abhängigen Partikeln wesentlich genauer als bisherige Verfahren.

3.4 Wirbelkerne von Masse-abhängigen Partikeln

Wirbelstrukturen spielen in Strömungen häufig eine wichtige Rolle, da sie den Treibstoffverbrauch von Fahr- und Flugzeugen beeinflussen, die Treibstoffmischung in Verbrennungsprozessen bestimmen oder sogar Mikroorganismen über die Weltmeere transportieren. Die Verwirbelung von masse-abhängigen Partikeln wurde bislang noch nicht untersucht. Um die Wirbel in masse-abhängigen Strömungen zu extrahieren, werden zwei Methoden erweitert, die im masselosen Fall etablierte sind [GT14]. Während das Partikelverhalten im masselosen Fall nur von dem zugrundeliegenden Vektorfeld abhängt, haben masse-abhängige Partikel neben dem Ort auch eine eigene Geschwindigkeit. Der Zustand beider Variablen wird durch ein hoch-dimensionales Vektorfeld beschrieben und die direkte Extraktion von Wirbeln in diesem hoch-dimensionalen Raum geht mit einem großen Rechenaufwand einher, zumindest, wenn Standardverfahren direkt angewendet werden. Die Suche kann im niedrig-dimensionalen Raum ausgeführt werden, wenn zusätzliches Wissen mit einbezogen wird. Die Extraktion wird dadurch genauso aufwändig wie im masselosen Fall und kann sogar mit den gleichen Algorithmen durchgeführt werden. Das Verfahren lässt sich daher leicht in existierende Strömungsvisualisierungssoftware integrieren. Als alternative Strategie zum Auffinden von Wirbeln wird ein integrations-basierter Ansatz erweitert, der die Dichte von Partikeln über die Zeit beobachtet. Damit lassen sich Strukturen entdecken, die auf umgebende Partikel anziehend wirken. Tritt dabei eine Ro-

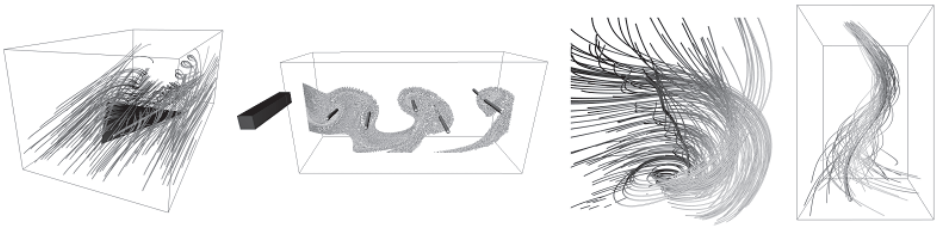


Abb. 9: Wirbelkerne in der Strömung um einen Delta-Wing (links), in einer Wirbelstraße (mitte l.), in einem Hurrikane (mitte r.) und einer analytischen Strömung (rechts).

tation auf, handelt es sich um anziehende Wirbel, sogenannte Attraktoren. Abbildung 9 zeigt die Wirbelkernlinien von masse-abhängigen Partikeln anhand einiger Beispiele.

4 Conclusion

Dieser Artikel fasste eine Reihe von Beiträgen in der geometrie-basierten, sowie der Merkmals- und Topologie-basierten Strömungsvisualisierung zusammen. Im ersten Teil wurde die Selektion von relevanten Linien in 3D Strömungen als Optimierungsproblem formuliert, um eine Balance zwischen der Präsentation relevanter Information und der Vermeidung von Verdeckungen zu finden. Das Verfahren wurde anschließend auf zeitabhängige Linien und statische Flächen erweitert. Bislang wählt das Verfahren Linien und Flächen von einer vorberechneten Menge an Kandidaten aus, wodurch keine neuen Details hinzukommen, wenn der Nutzer hinein zoomt. Die Skalierbarkeit ist noch verbesserbar und die Wahrnehmung der Tiefe von transparenten Strukturen könnte durch Hinzufügen von anderen visuellen Kodierungen verbessert werden.

Der zweite Teil widmete sich der Merkmalsextraktion in zeitabhängigen Strömungen. Zunächst wurde ein progressives Renderingverfahren vorgestellt, mit dem die hochfrequenten Strukturen des Finite-Time Lyapunov Exponenten frei von Diskretisierungsfehlern dargestellt werden können. In der Rendering-Literatur gibt es eine Reihe von Beschleunigungsstrategien, die in diesem Kontext ebenfalls anwendbar sind. Des Weiteren wird ein generisches Verfahren vorgestellt, mit dem Galilei-invariante Merkmalsextraktoren rotations-invariant gemacht werden können. Dies ermöglicht die Extraktion von Wirbeln, die sich auf Kreisbahnen um ein bekanntes Zentrum bewegen. Eine offene Frage ist, wie dieses Zentrum automatisch gefunden werden kann.

Der dritte Teil befasste sich mit der Bewegung von kleinen Objekten in Strömungen, wie etwa Sandpartikeln in der Luft. Im Rahmen der Arbeit wurden einige Standard-Visualisierungstechniken auf den masse-abhängigen Fall erweitert, einschließlich der Integralgeometrien, der Wirbelextraktion, dem Separationsverhalten, der statischen Vektorfeld-Topologie im 2D, sowie ein Verfahren für die stabile Rückwärtsintegration wurde vorgeschlagen. Es gibt noch viele weitere Konzepte, einschließlich der texturbasierten Visualisierung, die auf den masse-abhängigen Fall erweitert werden können.

Literaturverzeichnis

[GKT16] Günther, Tobias; Kuhn, Alexander; Theisel, Holger: MCFTLE: Monte Carlo Rendering of Finite-Time Lyapunov Exponent Fields. Computer Graphics Forum (Proc. EuroVis), 35(3):381–390, 2016.

[GRT13] Günther, Tobias; Rössl, Christian; Theisel, Holger: Opacity Optimization for 3D Line Fields. ACM Transaction on Graphics (Proc. SIGGRAPH), 32(4):120:1–120:8, 2013.

[GRT14] Günther, Tobias; Rössl, Christian; Theisel, Holger: Hierarchical Opacity Optimization for Sets of 3D Line Fields. Computer Graphics Forum (Proc. Eurographics), 33(2):507–516, 2014.

[GST16] Günther, Tobias; Schulze, Maik; Theisel, Holger: Rotation Invariant Vortices for Flow Visualization. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics (Proc. IEEE SciVis 2015), 22(1):817–826, 2016.

[GT14] Günther, Tobias; Theisel, Holger: Vortex Cores of Inertial Particles. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics (Proc. IEEE SciVis), 20(12):2535–2544, 2014.

[GT15] Günther, Tobias; Theisel, Holger: Finite-Time Mass Separation for Comparative Visualizations of Inertial Particles. Computer Graphics Forum (Proc. EuroVis), 34(3):471–480, 2015.

[GT16a] Günther, Tobias; Theisel, Holger: Inertial Steady 2D Vector Field Topology. Computer Graphics Forum (Proc. Eurographics), 35(2):455–466, 2016.

[GT16b] Günther, Tobias; Theisel, Holger: Source Inversion by Forward Integration in Inertial Flows. Computer Graphics Forum (Proc. EuroVis), 35(3):371–380, 2016.

[Gü13] Günther, Tobias; Kuhn, Alexander; Kutz, Benjamin; Theisel, Holger: Mass-Dependent Integral Curves in Unsteady Vector Fields. Computer Graphics Forum (Proc. EuroVis), 32(3):211–220, 2013.

[Gü14] Günther, Tobias; Schulze, Maik; Martinez Esturo, Janick; Rössl, Christian; Theisel, Holger: Opacity Optimization for Surfaces. Computer Graphics Forum (Proc. EuroVis), 33(3):11–20, 2014.

[Gü16] Günther, Tobias: Opacity Optimization and Inertial Particles in Flow Visualization. University of Magdeburg, June 2016.



Tobias Günther wurde am 26. Juni 1988 in Gardelegen geboren. Er studierte an der Otto-von-Guericke Universität in Magdeburg, von der er 2011 den B.Sc. in Computervisualisitik und 2013 den M.Sc. in Informatik erhielt. Nach dem Studium ging er in die Forschung und erhielt 2016 den Dr.-Ing. von der Otto-von-Guericke Universität Magdeburg unter der Betreuung seines Doktorvaters Prof. Holger Theisel. Seit 2016 arbeitet er als Postdoc am Computer Graphics Laboratory an der ETH Zürich in der Arbeitsgruppe von Prof. Markus Gross. Er interessiert sich für die vielseitige Forschung in den Bereichen der wissenschaftlichen Visualisierung, dem progressiven Lichttransport und der Echtzeit-Computergraphik.

Semantische 3D Modellierung aus Bildern mit geometrischem Vorwissen[1]

Christian Häne[2]

Abstract: 3D Rekonstruktion aus Bildern und semantische Segmentierung von Farbbildern wurden traditionellerweise als zwei separate Probleme betrachtet. Meine Dissertation führt Algorithmen ein, die es erlauben die 3D Rekonstruktion und die semantische Segmentierung in einer einzelnen konvexen Optimierung zu berechnen. Durch eine starke Kopplung zwischen Geometrie und Semantik kann dadurch eine bessere Rekonstruktion erreicht werden.

1 Einleitung

Vollautomatische digitale 3D Modellierung von realen Umgebungen und Objekten aus einem Satz von Eingabebildern wurde in den letzten zwei Jahrzehnten ausgiebig untersucht. Das Ziel ist es, eine digitale Kopie von realen Umgebungen und Objekten zu erstellen. Die Anwendungsmöglichkeiten dieser Technologie sind vielseitig. Während für einige der Anwendungen das digitale 3D Modell das schlussendliche Ziel ist, wird für andere Anwendungen die digitale 3D Rekonstruktion als Vorbereitungsschritt verwendet. Digitale 3D Modelle können zum Beispiel als digitales Archiv für Kunstgegenstände oder archäologische Stätten dienen. Das *Digital Michelangelo* Projekt [Le00] hat Skulpturen von Michelangelo mittels Lasern vermessen und digital in 3D rekonstruiert. Das *MURALE* Projekt [Va02] hat Technologien entwickelt um archäologische Stätten digital einzuscannen und zu visualisieren. Ein anderer Anwendungsfall sind Kinofilme. Das System, welches in [DTM96] präsentiert wurde, ist später verwendet worden um einige Spezialeffekte für den Film *The Matrix* zu erstellen. Digitale Rekonstruktion von Umgebungen spielt auch eine wichtige Rolle in der Robotik. Ein Roboter möchte über seine Umgebung informiert sein, um Pfadplanung durchzuführen und Hindernisse zu erkennen. Für diese Anwendungen ist die 3D Rekonstruktion meist ein vorbereitender Schritt. Sobald ein 3D Modell der Umgebung verfügbar ist, wird das 3D Modell weiter analysiert, um zu verstehen wo der Roboter sich frei bewegen kann, und wo sich die Hindernisse befinden. Ein Beispiel einer solchen Anwendung für selbstfahrende Fahrzeuge ist [BFP09]. Ein weiteres Gebiet in dem die Semantik der Geometrie eine wichtige Bedeutung hat, ist im Computer Aided Design (CAD). Angenommen ein Architekt möchte ein existierendes Gebäude digital erfassen als Ausgangspunkt für einen Umbau. Ein System das automatisch zwischen semantischen Klassen wie Gebäude, Boden oder Vegetation unterscheidet, kann sehr hilfreich sein da es die Bearbeitungszeit gegenüber einer manuellen Verarbeitung stark verringern kann.

[1] Englischer Titel der Dissertation: "Semantic 3D Modeling from Images with Geometric Priors"

[2] Department of Electrical Engineering and Computer Sciences, UC Berkeley, chaene@eecs.berkeley.edu

Das Hauptziel meiner Dissertation [Hä16] war es, Algorithmen zu entwickeln, welche die Geometrie und die semantische Segmentierung in einem gemeinsamen Vorgang berechnen. Frühere Systeme haben die zwei Probleme separat gelöst. Durch die Optimierung von Geometrie und Segmentierung mittels einer gemeinsamen Optimierung können bessere Lösungen erzielt werden. Eine Gebäudefassade ist zum Beispiel viel wahrscheinlicher vertikal als horizontal. Solche Abhängigkeiten können in einer gemeinsamen Formulierung ausgenützt werden und bessere Resultate erzielt werden, als wenn beide Probleme separat gelöst werden.

Um eine digitale 3D Rekonstruktion zu erstellen wird ein Sensor benötigt, der die reale 3D Geometrie vermessen kann. Die Sensoren können in zei Gruppen eingeteilt werden: aktive und passive Sensoren. Unter den aktiven Sensoren sind die beliebtesten Sensoren Laser Scanner, Structured Light Scanner oder Time-of-Flight Kameras. Passive Sensoren wie zum Beispiel Fotokameras können auch als 3D Sensor verwendet werden. Dafür werden mehrere Bilder aufgenommen. Durch die Erstellung von Korrespondenzen zwischen den Bildern wird die Position von Punkten im dreidimensionalen Raum mittels Triangulation bestimmt. Um mehrere Messungen, die vom selben Blickwinkel aufgenommen wurden zu speichern, werden Bilder verwendet, in denen jedes Pixel einer Tiefenmessung entspricht, genannt Tiefenkarte. Kameras haben den Vorteil gegenüber aktiven Systemen, dass sie bei vielen Wetterbedingungen verwendet werden können, sehr wenig Instandhaltung benötigen, günstig sind und in vielen Systemen bereits verbaut sind. Zusätzlich enthalten die Bilddaten wichtige Informationen für die semantische Segmentierung. Die Experimente, die in meiner Arbeit gemacht wurden, basieren ausschliesslich auf Tiefenkarten die aus Farbbildern berechnet wurden. Viele der vorgeschlagenen Algorithmen sind jedoch nicht auf diesen Sensortyp limitiert. Alle Sensoren haben gemeinsam, dass für ein komplettes und konsistentes 3D Modell mehrere Tiefenkarten in eine gemeinsame Repräsentation fusioniert werden. Um Messungenauigkeiten und Rauschen zu entfernen wird eine Optimierung verwendet, die glatte Lösungen bevorzugt.

Um semantische Information aus Bildern zu extrahieren wird zuerst eine Merkmalbeschreibung eines Pixels und seines Kontexts aus den Eingabebildern extrahiert. Solche Merkmale versuchen die Textur des Bildes, vorherrschende Gradienten, Farbe und viele weitere Informationen, die aus Farbbildern extrahiert werden können, zu beschreiben. Mittels manuell segmentierten Referenzbildern und maschinellem Lernen wird ein Klassifikator gelernt, der zwischen den semantischen Klassen unterscheiden kann. Die Ausgabe solcher Systeme ist eine pro Superpixel oder pro Pixel Wahrscheinlichkeit für jede der semantischen Klassen. Meistens sind diese rohen Klassifikatorausgaben verrauscht und folgen den Objektkanten nicht. Deshalb wird häufig eine globale Optimierung in einem Markov Random Field (MRF) oder eine konvexe Optimierung verwendet.

Wie bereits oben erwähnt wurde die Optimierung von 3D Geometrie und semantische Segmentierung von Bildern traditionellerweise als zwei separate Probleme betrachtet und deshalb in einer individuellen Optimierung berechnet. Meine Dissertation hat Methoden eingeführt, die es erlauben, die semantische und geometrische Information in einem gemeinsamen Fusionierungsprozess zu bestimmen. Die semantische Segmentierung von 3D Geometrie kann je nach Anwendungsfall verschiedene Granularität aufweisen. Um ein

selbstfahrendes Fahrzeug zu bewegen, kann es ausreichend sein, zwischen fahrbarer Geometrie und Hindernissen zu unterscheiden. Für Rekonstruktionen von Gebäuden, zum Beispiel für Katastermodelle oder Gebäudeverwaltung werden Klassen wie Boden, Gebäude und Vegetation verwendet. Obwohl das immer noch relativ wenige Klassen sind, gibt es bereits Wechselbeziehungen zwischen Geometrie und Semantik. Zum Beispiel hat die Klasse Boden eine starke Präferenz horizontal zu sein und horizontale Geometrie hat eine starke Bevorzugung Boden zu sein. Wenn man auch Übergänge zwischen zwei semantischen Klassen, die nicht direkt in den Eingabebildern gesehen werden können in Betracht zieht, wie zum Beispiel den Übergang zwischen Boden und Gebäude, kann man auch geometrisches Vorwissen über solche Übergäge ausnützen. Um Objekte zu rekonstruieren, für welche Instanzen aus einer spezifischen Objektklasse eine ähnliche Geometrie haben, kann man auch objektklassenspezifisches Vorwissen ausnützen. Diese Formulierungen rekonstruieren nicht nur das Objekt, sondern auch die unmittelbare Umgebung und geben eine Segmentierung zwischen Objekt und Umgebung aus.

Meine Dissertation ist in drei Teile gegliedert. Für diese Kurzfassung werde ich im Folgenden die drei Teile vorstellen und deren wichtigsten Ergebnisse präsentieren.

2 Echtzeitrekonstruktion mit Fischaugenbildern

Der erste Teil meiner Arbeit stellt ein Echtzeitsystem zur Hinderniserkennung für selbstfahrende Fahrzeuge vor. Das System verwendet vier Fischaugenkameras die so auf dem Fahrzeug angebracht sind, dass der ganze Raum rund um das Fahrzeug von Kameras gesehen werden kann. Ähnliche Kamerasysteme sind in einigen Serienfahrzeugen bereits eingebaut. Die vorgeschlagene Methode, ermöglicht es, Tiefenkarten direkt auf Fischaugenbildern zu berechnen (siehe Abb. 1). Frühere Verfahren haben dazu die Fischaugenbilder zuerst in normale Lochbildkamerabilder oder andere geeignete Projektionsmodelle umgerechnet, dabei war häufig eine binokulare Kameranordnung notwendig. Das vorgeschlagene System verwendet mehrere, zeitlich nacheinander aufgenommene Bilder von derselben Kamera. Um eine 3D Rekonstruktion zu ermöglichen muss sich das Fahrzeug dabei bewegen. Der Vorteil, die Tiefenkarten direkt auf den Fischaugenbildern zu berechnen liegt darin, dass dadurch das gesamte Sichtfeld der Fischaugenkamera verwendet werden kann. Des Weiteren zeigen die Experimente, dass die Tiefenmessungen durch das Verwenden des originalen Projektionsmodells auch auf dem Sichtbereich den beide Versionen (Fischaugenbild und ein in ein Lochbildkamerabild umgerechnetes Bild) abdecken, weniger Ausreisser enthalten. Die Berechnungen werden auf einer Grafikkarte in Echtzeit durchzuführt. Die Kameraposen, die für die Berechnung benötigt werden, können direkt aus der Odometrie vom Fahrzeug extrahiert werden.

Die Daten, die in den Tiefenkarten enthalten sind, sind für Navigationsaufgaben von selbstfahrenden Fahrzeugen in der Form ungeeignet, da sie nur die Geometrie darstellen und keine semantische Information enthalten. Deshalb verwendet das System elementare semantische Information, nämlich ob eine gewisse Geometrie ein Hindernis darstellt oder nicht. Es wird für jeden 3D Punkt ausgewertet, ob er zum Boden gehört oder vom Boden hervorsteht. Gleichzeitig werden mehrere 3D Punkten zusammengefasst und nur jeweils

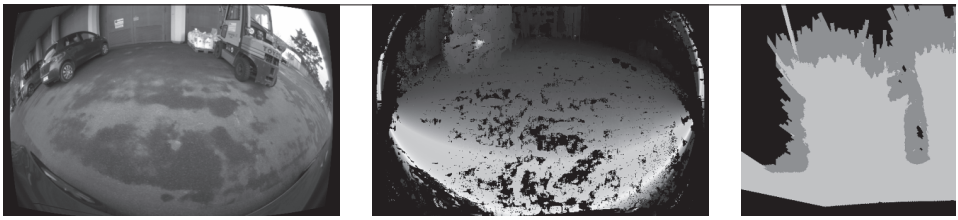


Abb. 1: Beispielresultate des vorgeschlagenen Rekonstruktionssystems für selbstfahrende Fahrzeuge. (links) Beispiel Eingabebild, (mitte) Beispiel Tiefenkarte (rot nah, blau fern), (rechts) Beispiel Hinderniskarte (grün fahrbar, rot Hindernis, schwarz unbeobachtet).

das Hindernis, welches auf der 2D Bodenebene in einer gewissen Richtung am nächsten zur Kamera ist, ausgegeben. Durch das Zusammenfassen mehrerer Punkte wird die Information komprimiert und gleichzeitig werden Ausreisser gefiltert und die Messungenauigkeit über mehrere Messungen gemittelt. Diese Hindernisinformationen, die für jede Kamera separat berechnet werden und mit einer Wiederholrate von 12.5Hz (Bildwiederholrate der verwendeten Kameras) über die Zeit ausgegeben werden, werden in einem Fusionierungsschritt in eine 2D Hinderniskarte eingetragen (siehe Abb. 1). Diese Hinderniskarte kann dann für Navigationsaufgaben, wie zum Beispiel Pfadplanung, verwendet werden. Gegenüber früheren Systemen hat das vorgeschlagene System den Vorteil, dass es keine spezielle binokulare Anordnung der Kameras benötigt, das ganze Sichtfeld der Fischaugenkameras verwendet wird und es die Kameraposen direkt von der Fahrzeugodometrie beziehen kann. Das System wird im selbstfahrenden Auto vom V-Charge Forschungsprojekt [Sc16] verwendet.

3 Volumetrische semantische 3D Rekonstruktion

Im zweiten Teil meiner Arbeit stelle ich ein System vor, welches gemeinsame volumetrische 3D Rekonstruktion und semantische Segmentierung ermöglicht und es erlaubt, klassenabhängiges Vorwissen über die Geometrie zu verwenden. Die klassische volumetrische Tiefenkartenfusionierung formuliert das Problem als Segmentierung eines Volumens in freier Raum und besetzter Raum. Die Oberfläche kann dann als Übergang vom freien in den besetzten Raum extrahiert werden. Um semantische Information in die Formulierung einzuführen, wird die 2-Klassen Segmentierung in eine semantische Segmentierung erweitert, in welcher jedem Volumenelement eine semantische besetzte Klasse oder freier Raum zugewiesen wird. Alle Rekonstruktionsmethoden die in diesem Teil vorgestellt werden haben gemeinsam, dass die semantische Segmentierung des Volumens und somit die finale Rekonstruktion, mittels eines einzelnen konvexen Minimierungsproblems gelöst wird.

3.1 Mathematische Segmentierungsformulierung

In der Literatur wurden zwei verschiedene Möglichkeiten vorgeschlagen um Segmentierungsprobleme zu formulieren. Eine Möglichkeit ist es, den Raum von Beginn an als diskreten Raum zu betrachten. Die Formulierung ist dann ein probabilistisches graphisches

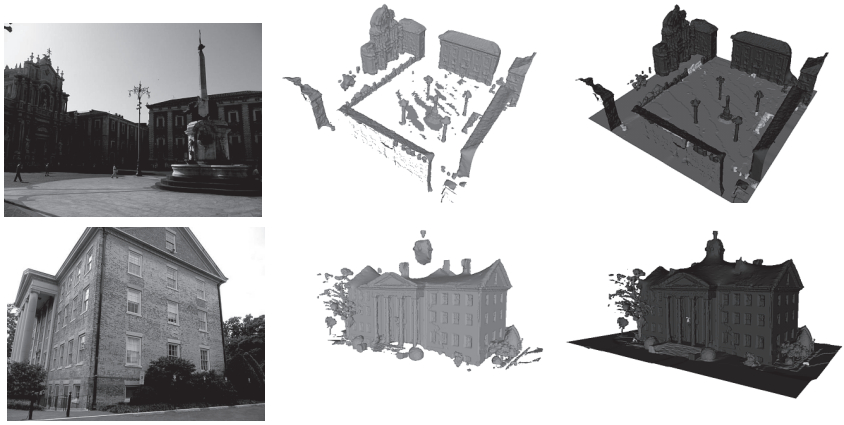


Abb. 2: Beispielresultate, (links) Beispieleingabebild, (mitte) Standardrekonstruktion der Geometrie, (rechts) Resultate des gemeinsamen Rekonstruktions- und Segmentierungssystems.

Modell, wobei die Elemente des Raums als Knoten im Graph repräsentiert werden, die mit Kanten verbunden sind, welche verwendet werden um die Segmentierung zu regularisieren. Die zweite Möglichkeit ist es, den Raum im Kontinuum darzustellen und das Segmentierungsproblem direkt darin zu formulieren. In dieser Art von Formulierung wurden konvexe Relaxationen vorgeschlagen, die es erlauben global optimale Lösungen für das relaxierte Problem zu finden. Der Raum wird nur am Schluss für die numerische Optimierung diskretisiert. Die Formulierungen im Kontinuum haben den Vorteil, dass die Lösungen wesentlich weniger Artefakte vom diskreten Gitter aufweisen. Sie haben jedoch den Nachteil, dass sie nur Regularisierungskosten, die eine Metrik über die Klassen bilden, erlauben. Das heisst, die Dreiecksungleichung muss erfüllt sein, was bedeutet dass die Summe der Kosten für die Sprünge von Klasse A zu Klasse B und von Klasse B zu Klasse C grösser gleich einem direkten Sprung von Klasse A zu Klasse C sein muss. Diese Einschränkung existiert bei den diskreten graphischen Modellen nicht. Die vorgeschlagene Formulierung wird durch die Analyse dieser zwei Formulierungen hergeleitet. Sie hat keine Einschränkung auf metrische Regularisierungskosten und hat trotzdem die Vorteile bezüglich der Gitterartefakte die Formulierungen im Kontinuum haben. Des Weiteren ermöglicht die Formulierung die Verwendung von Regularisierungskosten, die von der Richtung des Übergangs zwischen den Klassen abhängt.

3.2 Gemeinsame 3D Rekonstruktion und semantische Segmentierung

Um eine gemeinsame 3D Rekonstruktion und semantische Segmentierung zu erreichen, wird die oben eingeführte mathematische Formulierung für semantische Segmentierung verwendet. Die Methode wird im Volumen formuliert. Jedes Volumenelement bekommt eine Klasse zugewiesen. Um die Segmentierung durchzuführen werden die Datenkosten und die Regularisierungskosten benötigt. Die Datenkosten beschreiben, wie wahrscheinlich es ist, dass ein gewisses Volumenelement eine gewisse Klasse zugewiesen bekommt. Die Re-

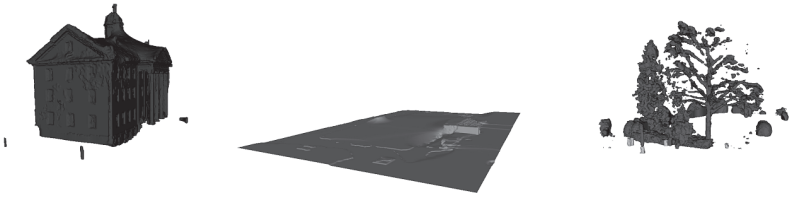


Abb. 3: Individuelle semantische Segmente. Die Ausgabe des Systems lässt sich direkt in die einzelnen semantischen Segmente zerlegen. Auch versteckte Oberflächen wie der Übergang zwischen Boden und Gebäude werden vom vorgeschlagenen Algorithmus abgeschätzt.

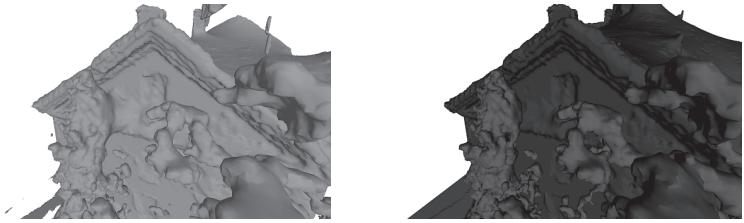


Abb. 4: Detailvergleich, (links) in der geometrischen Rekonstruktion wird der Baum fälschlicherweise mit dem Gebäude verbunden, (rechts) dank den semantischen Klassen rekonstruiert das System die Gebäudefassade korrekt.

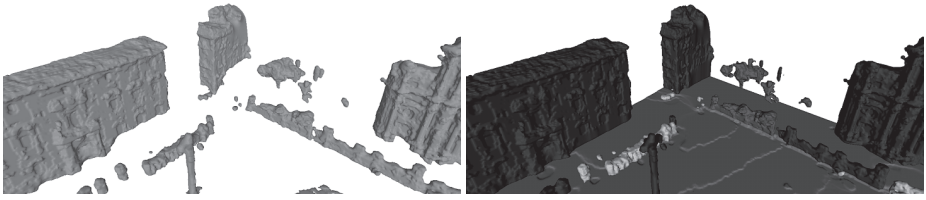


Abb. 5: Detailvergleich, (links) in der geometrischen Rekonstruktion fehlt der Boden und die Gebäude sind im unteren Teil nicht komplett, (rechts) der vorgeschlagene Algorithmus rekonstruiert den Boden und die Gebäude stehen korrekt auf dem Boden.

gularisierungskosten beschreiben wie wahrscheinlich ein Übergang zwischen zwei semantischen Klassen in eine bestimmte Richtung ist oder anders gesagt, wie stark ein Übergang bestraft wird. Die Datenkosten werden aus den Tiefenkarten und pro Pixel semantischen Klassenwahrscheinlichkeiten des semantischen Klassifikators berechnet. Die Regularisierungskosten werden von einem Katastermodell gelernt. Das Katastermodell enthält die Oberflächen zwischen semantischen Klassen, was es ermöglicht die Wahrscheinlichkeiten eines Übergangs zwischen zwei bestimmten semantischen Klassen mit einer bestimmten Richtung zu bestimmen. Um den konvexen Regularisierungsterm daraus zu bestimmen, werden Wulff-Formen verwendet. Mathematisch sind Wulff-Formen konvexe Mengen. In der vorgeschlagenen Methode werden sie verwendet um die Regularisierungskosten durch das Auswählen einer geeigneten konvexen Form zu definieren.

Der Algorithmus wurde auf Datensätzen aus Bildern von Gebäuden ausgewertet. Beispiele aus Datensätzen von ca. 120 Bildern sind in Abb. 2 dargestellt. Die Ausgabe des Systems kann direkt in die einzelnen semantischen Segmente zerlegt werden (siehe Abb. 3). Dank dem geometrischen Vorwissen, welches im Regularisierungsterm eingebunden ist, werden auch verdeckte oder für traditionelle geometrische Rekonstruktionen nicht genügend gesehene Oberflächen rekonstruiert (siehe Abb. 4, 5).

3.3 Objektrekonstruktion mit kategoriespezifischem Vorwissen

Objekte die transparente, reflektierende oder sonst für die 3D Rekonstruktion schwierige Oberflächen aufweisen stellen ein besonderes Problem für die 3D Rekonstruktion dar. Um trotzdem eine überzeugende Rekonstruktion zu erhalten, wird in der Literatur vorgeschlagen, die Ähnlichkeit der Objektformen innerhalb einer Objektklasse auszunutzen. Meine Arbeit schlägt eine neuartige Formulierung vor, die auf den Oberflächenrichtungen basiert und direkt in die oben beschriebene Multiklassenrekonstruktion eingebunden werden kann. Die zugrunde liegende Beobachtung ist, dass die Oberflächenrichtungen an korrespondierenden Stellen von Objekten der gleichen Klasse ähnlich sind. Zum Beispiel ist bei einem Auto das Dach nahe der horizontalen Richtung und die Windschutzscheibe ist ungefähr im 45° Winkel. Um während dem Rekonstruktionsvorgang Formen der Klasse des Objekts gegenüber beliebigen Formen zu bevorzugen, wird ein Regularisierungsterm verwendet, der die Oberflächenrichtungen, die in dieser Objektklasse lokal vorkommen, bevorzugt. Gegenüber den Rekonstruktionen von Gebäuden von oben ist nun der Regularisierungsterm zusätzlich positionsabhängig. Das heisst, für jedes Volumenelement vom Rekonstruktionsvolumen wird eine separate Wulff-Form aus Trainingsdaten extrahiert. Um diese Prozedur effizient durchzuführen werden die Wulff-Formen als Schnittmenge von Halbräumen parametrisiert. Für diese Formulierung werden als Datenkosten ausschliesslich Tiefenkarten verwendet, die aus den Eingabebildern berechnet wurden. Es wird keine bildbasierte semantische Segmentierung benötigt. Die Segmentierung wird alleine dadurch bestimmt, dass die Umgebung die nicht zur gewählten Objektklasse gehört, nicht mit dem kategoriespezifischen Vorwissen übereinstimmt. Einige Resultate sind in Abb. 6 dargestellt. Mit der vorgeschlagenen Methode wird für die Klasse Auto der Boden korrekt unter dem Auto rekonstruiert, das Auto berührt den Boden nur an den Rädern. Dies ist möglich, da das vorgeschlagene Modell von den Trainingsdaten gelernt hat, dass ein Übergang zwischen Auto und Boden nur an den Rädern vorkommt.

Die oben vorgestellte oberflächenrichtungsbasierte Formulierung hat den Nachteil, dass für jedes Volumenelement eine Wulff-Form gespeichert werden muss. Zusätzlich benötigt die Optimierung als Eingabe die Orientierung und Position des zu rekonstruierenden Objekts. Für Formulierungen wo der Regularisierungsterm nicht positionsabhängig ist, und deshalb Übergänge im Ganzen Rekonstruktionsvolumen gleich bestraft werden, ist eine Ausrichtung bezüglich der Orientierung, welche in der Praxis einfacher berechnet werden kann, genügend. Die Alternative ist eine Rekonstruktionsmethode für Objekte, welche keine positionsabhängigen Regularisierungsterme verwendet. Um trotzdem interessante Objektformen zu beschreiben, teilt die vorgeschlagene Methode die Objekte in Segmente auf. Für die Klasse Tisch sind das zum Beispiel die Tischplatte und die Tischbeine. Gleichzeitig



Abb. 6: Ergebnisse für die Rekonstruktion von Autos und Flaschen. (von links nach rechts pro Beispiel), Beispiel Eingabebild, Rekonstruktion ohne kategoriespezifisches Vorwissen, Rekonstruktion mit dem oberflächenrichtungsbasierten kategoriespezifischen Vorwissen.

zur Rekonstruktion erhält man dadurch auch eine Segmentierung des Objekts. Um nun den Regularisierungsterm zu definieren, muss nur eine geeignete Wulff-Form, also eine konvexe Form, für jeden Übergang definiert werden. Für das Beispiel Tisch wird der Übergang Tischplatte zu freier Raum so gewählt, oder von Trainingsdaten gelernt, dass horizontale Flächen wesentlich weniger stark bestraft werden als vertikale Flächen. Der Übergang von Tischbein zu freier Raum soll hauptsächlich vertikal sein. Des Weiteren soll das Tischbein oben einen Übergang zur Tischplatte und unten zum Boden haben. Einige Beispielergebnisse des Algorithmus sind in Abb. 7 dargestellt.

4 Tiefenkartenregularisierung mit geometrischem Vorwissen

Im dritten Teil meiner Dissertation werden Methoden untersucht, deren Ausgabe eine Tiefenkarte ist. Eine erste Methode ist dazu gedacht, Umgebungen zu rekonstruieren, die hauptsächlich aus planaren Flächen bestehen, also von Menschenhand geschaffene Umgebungen wie zum Beispiel Städte. Der Algorithmus rendert zuerst mehrere Tiefenkarten die einen ähnlichen Sichtpunkt haben, in eine einzelne Ansicht. Der eingeführte Regularisierungsterm bestraft Flächen die nicht planar sind. Dazu wird ein Patchverzeichnis verwendet. Die Optimierung bestimmt daher pro Pixel die Koeffizienten der Verzeichniselemente. Durch die Verwendung eines Totalvarationsterms als Regularisierung der Koeffizienten wird eine stückweise planare Rekonstruktion bevorzugt. Ein Beispiel ist in Abb. 8 dargestellt.

Ein zweiter Algorithmus verwendet einen Klassifikator, der von einem einzelnen Farbbild Wahrscheinlichkeiten für Oberflächenrichtungen vorhersagen kann. Diese zusätzlichen Informationen über die Geometrie helfen an Stellen, wo eine direkte Berechnung der Tiefe nicht möglich ist, zum Beispiel wenn die Bilder nicht genügend Textur aufweisen. Im vor-

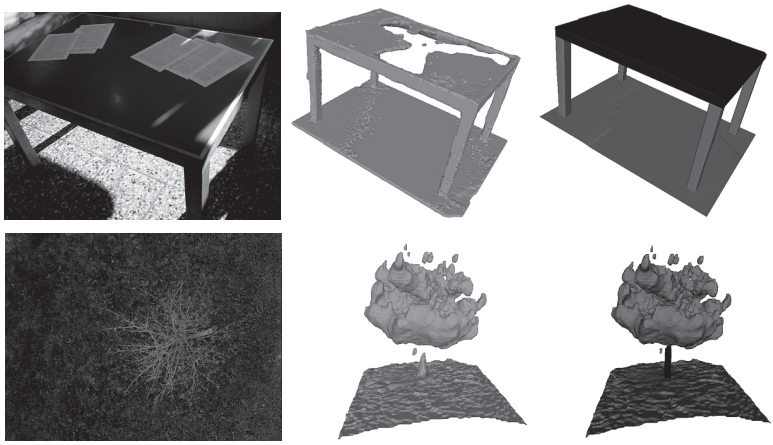


Abb. 7: Ergebnisse für die Rekonstruktion von Tischen und Bäumen, (links) Beispiel Eingabebild, (mitte) Rekonstruktion ohne kategoriespezifisches Vorwissen, (rechts) Rekonstruktion mit dem segmentbasierten kategoriespezifischen Vorwissen.

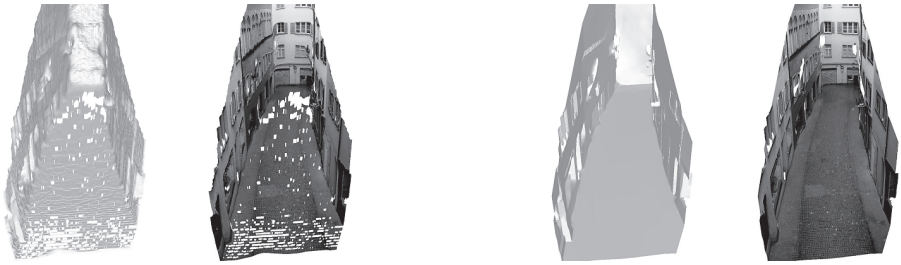


Abb. 8: Stückweise planare Rekonstruktion, (links) Rekonstruktion mit standard Regularisierungsterm, (rechts) Rekonstruktion mit dem vorgeschlagenen Regularisierungsterm der stückweise planare Flächen bevorzugt.

geschlagenen Algorithmus werden die Wahrscheinlichkeiten der Oberflächenrichtungen, in ähnlicher Weise wie oben für die volumetrischen Rekonstruktionen, in Wulff-Formen dargestellt und als Regularisierungsterm verwendet. Im Extremfall kann man damit Rekonstruktionen aus nur einem Farbbild berechnen, wenn auch ein von Trainingsdaten gelernter Klassifikator für die Abschätzung der Tiefe verwendet wird (siehe Abb. 9).

5 Schlussfolgerung

Meine Arbeit hat Algorithmen eingeführt, die gemeinsame semantische Segmentierung und 3D Rekonstruktion ermöglichen. Diese zwei Probleme wurden in früheren Systemen unabhängig gelöst. Durch eine Kopplung der Geometrie und der Semantik mittels Oberflächenrichtungen erreichen die eingeführten Algorithmen eine bessere Rekonstruktion, als wenn nur die Geometrie rekonstruiert wird. Zusätzlich erhält man eine konsistente semantische Segmentierung der Geometrie als Ausgabe vom Algorithmus.



Abb. 9: Rekonstruktion von einem einzelnen Farbbild, (links) Eingabebild, (mitte, rechts) berechnete Punktwolke.

Literaturverzeichnis

[BFP09] Badino, Hernán; Franke, Uwe; Pfeiffer, David: The stixel world-a compact medium level representation of the 3d-world. In: Symposium of the German Association for Pattern Recognition (DAGM). 2009.

[DTM96] Debevec, Paul E; Taylor, Camillo J; Malik, Jitendra: Modeling and rendering architecture from photographs: A hybrid geometry-and image-based approach. In: International Conference on Computer graphics and interactive techniques (SIGGRAPH). 1996.

[Hä16] Häne, Christian: Semantic 3D Modeling from Images with Geometric Priors. Dissertation, ETH Zürich, 2016.

[Le00] Levoy, Marc; Pulli, Kari; Curless, Brian; Rusinkiewicz, Szymon; Koller, David; Pereira, Lucas; Ginzton, Matt; Anderson, Sean; Davis, James; Ginsberg, Jeremy; Shade, Jonathan; Fulk, Duane: The digital Michelangelo Project: 3D Scanning of Large Statues. In: International Conference on Computer graphics and interactive techniques (SIGGRAPH). 2000.

[Sc16] Schwesinger, Ulrich; Bürki, Mathias; Timpner, Julian; Rottmann, Stephan; Wolf, Lars; Paz, Lina Maria; Grimmett, Hugo; Posner, Ingmar; Newman, Paul; Häne, Christian; Heng, Lionel; Lee, Gim Hee; Sattler, Torsten; Pollefeys, Marc; Allodi, Marco; Valenti, Francesco; Mimura, Keiji; Goebelsmann, Bernd; Derendarz, Wojciech; Mühlfellner, Peter; Wonneberger, Stefan; Waldmann, Rene; Grysczyk, Sebastian; Last, Carsten; Brüning, Stefan; Horstmann, Sven; Bartholomäus, Marc; Brummer, Clemens; Stellmacher, Martin; Pucks, Fabian; Nicklas, Marcel; Siegwart, Roland: Automated Valet Parking and Charging for e-Mobility Results of the V-Charge Project. In: Intelligent Vehicles Symposium (IV). 2016.

[Va02] Van Gool, Luc; Pollefeys, Marc; Proesmans, Marc; Zalesny, Alexey: The MURALE project: image-based 3d modeling for archaeology. British Archaeological Reports (BAR) International Series, 1075:53–64, 2002.



Christian Häne hat sein Doktorat mit einem Dr. sc. Titel an der ETH Zürich 2016 abgeschlossen. Davor hat er seinen BSc und MSc Titel in Informatik von der ETH Zürich erhalten. Während seines Doktorats hat er ein dreimonatiges Praktikum bei Microsoft Research in Cambridge, UK absolviert. Heute ist er als Postdoctoral Scholar an der University of California, Berkeley tätig. Er hat dafür vom Schweizerischen Nationalfonds ein Mobilitätsstipendium bekommen. Für seine Doktorarbeit hat er die ETH Medaille für ausgezeichnete Doktorarbeiten erhalten.

Rekurrenz in Selbststabilisierung: Theorie, Verifikation und Anwendung[1]

Oday Jubran[2]

Zusammenfassung: Selbststabilisierung ist ein Konzept der Fehlertoleranz, welches eine Wiederherstellung eines Systems nach Ausfall durch transiente Fehler garantiert, ohne von sich aus in einen solchen zu geraten. In der Literatur wird Selbststabilisierung meist in Hinblick auf die Wiederherstellung einer sicheren Ausführung untersucht. In dieser Arbeit wird das Konzept der Selbststabilisierung generalisiert, um mehrere Eigenschaftsarten abzudecken, die die Betrachtung der Wiederherstellung eines Systems hin zu einer möglichst hohen Servicequalität ermöglichen. Hierzu wird das Design, die Analyse und das Re-Engineering von Systemen, die bekannte Probleme in verteilten Systemen lösen, angewendet. Die Probleme sind: die Zeitschlitzzuteilung in Zeitmultiplexverfahren sowie der wechselseitige Ausschluss und eine erweiterte Version davon. Zusätzlich wird eine automatische Verifikationsmethode präsentiert, die die Verifikation solcher Eigenschaften in selbststabilisierenden Systemen erleichtert.

Stichwörter: Selbststabilisierung, Zuverlässigkeit, Rekurrenz, verteilter Algorithmus, Verifikation

1 Einführung

"Ich dachte, dass ich in [Di74] drei Lösungen veröffentlicht hätte, jedoch später lernte ich, dass ich auch drei Probleme veröffentlicht hatte, da die Programme ohne einen Beweis ihrer Korrektheit angegeben worden sind." – Dijkstra [Di86]. Diese Aussage beschreibt, wie schwierig es war für die Algorithmen, die Dijkstra in seiner wegweisenden Arbeit [Di74] 12 Jahre zuvor zeigte, einen Korrektheitsbeweis zu finden. Diese Algorithmen – zu diesem Zeitpunkt – adressierten Systeme mit mehreren Prozessen, die keinen gemeinsamen Speicher teilen. Das Ziel der Algorithmen ist es, die Prozesse in die Lage zu versetzen ein globales Übereinkommen oder irgendeine Art von Synchronisation zwischen ihnen zu erreichen, ohne die Notwendigkeit eines gemeinsamen Speichers oder sogar einer Voreinstellung. Deswegen geben beide [Di74, Di86] eine positive Antwort auf die Frage, ob es möglich ist, für teilnehmenden Komponenten in einem verteilten System, auf eine Spezifikation übereinzukommen, ohne die Existenz einer globalen Kontrolle oder einer Voreinstellung.

Diese Arbeit behandelt ein bestimmtes Konzept der Fehlertoleranz in verteilten Systemen, dem von Dijkstra in seinem Werk [Di74] der Weg bereitet wurde. In diesem Konzept, wird von einem System verlangt sich von Ausfällen durch flüchtige, transiente, seltene Fehler oder dynamischen Topologieänderungen wiederherzustellen und in der Lage zu sein schließlich korrekt von einer beliebigen anfänglichen Konfiguration (globaler

[1] Englischer Originaltitel: "Recurrence in Self-Stabilization: Theory, Verification, and Application"

[2] Carl von Ossietzky Universität Oldenburg, Department für Informatik. oday.jubran@gmail.com

Zustand) auszuführen, wenn genügend Zeit zur Wiederherstellung gegeben wurde. Dieses Konzept nennt sich *Selbststabilisierung*, und wird modelliert – in Bezug auf Zustand und Ausführungen – durch zwei Eigenschaften:

1. *Konvergenz*: Wenn ein System sich in einem unzulässigem Zustand befindet, dann garantiert das System in endlicher Zeit einen erlaubten Zustand zu erreichen.
2. *Abgeschlossenheit*: Wenn ein System sich in einem erlaubten Zustand befindet, wird es von selbst niemals einen unzulässigen Zustand erreichen.

Verteilte Systeme sind in der Regel Fehlern ausgesetzt. Als Beispiele, Rauschen kann Funksignale überlagern und die Kommunikation in drahtlosen Sensornetzen stören. Hinzufügen oder Entfernen von Komponenten in einem Netzwerk kann die Topologie und das Routing beeinflussen. Somit hat die Selbststabilisierung einen signifikanten Einfluss in verteilten Systemen, da in den meisten Fällen die Komponenten eines Systems nicht über die volle Kenntnisse der Konfiguration verfügen.

1.1 Problemstellung

Die klassische Selbststabilisierung bezieht sich auf Eigenschaften die über Konfigurationen definiert sind und eine Konfiguration gilt als erlaubt, genau dann wenn sie die gegebene Eigenschaft erfüllt. So garantieren die Konvergenz- und Abschlussaspekte, dass eine ein Ausführungssuffix erreicht wird, in dem eine Eigenschaft von allen Konfigurationen erfüllt wird. Solche Eigenschaften sind in der Praxis *Sicherheitseigenschaften*. Von diesem Zeitpunkt an wird, die Stabilisierung eines Systems oder die Wiederherstellung von transienten Fehler an Sicherheitseigenschaften festgemacht, die über Konfigurationen definiert sind. Darüber hinaus, ist das Zeit-Effizienz-Problem in der klassischen Selbststabilisierung tatsächlich eine Frage die Konvergenzzeit zu reduzieren, um Sicherheit zu erreichen. Beachten Sie, dass einige andere Konzepte der Selbststabilisierung Spezifikationen über das Systemverhalten betreffen, jedoch folgen diese nicht unbedingt einem bestimmten Muster und sie untersuchen ungewöhnliche Fälle.

In der Selbststabilisierung gibt es die Annahme, dass Fehler transient sind. Zusätzlich, kann ein selbststabilisierendes System praktisch sein z.B. durch das Erreichen von hoher Verfügbarkeit unter der Annahme, dass Fehler selten aufkommen. Mit diesen beiden Annahmen gibt es implizit genug Zeit für jedes Verhalten eines Systems zu stabilisieren und eine erwünschte Servicequalität zu erreichen, bevor der nächste Fehler das System trifft. Diese Tatsachen begrenzen die Untersuchungen der Selbststabilisierung auf Sicherheitseigenschaften, die über Konfigurationen definiert sind und vernachlässigen andere Aspekte der Servicequalität eines Systems.

Die Hauptfrage welche in dieser Arbeit angegangen wurde, ist, wie Selbststabilisierung Eigenschaften der Performanz des Systems abdecken kann: die Menge an Ausgabe die das System pro Zeiteinheit produziert, oder Effizienz: Die Menge an Ausgabe in Abhängigkeit der Eingabe, und Servicequalität? In anderen Worten, wie kann Selbststabilisierung,

um andere Arten von Eigenschaften abzudecken, verallgemeinert werden, in welchen Wiederherstellung nicht nur Sicherheit, sondern einen gewisse Servicequalität zu erreichen bedeutet.

1.2 Beitrag

Der Beitrag dieser Arbeit ist wie folgt. Zuerst wird ein generalisiertes Modell der Selbststabilisierung, das Performanzaspekte abdeckt, präsentiert. Das Modell beinhaltet ein allgemeines Schema der Eigenschaften, die wir als *Rekurrenzeigenschaften* bezeichnen. Dieses Modell deckt beides, Diskrete und Echtzeitsysteme, ab. Zweitens, Selbststabilisierung in Bezug auf Rekurrenzeigenschaften wird auf drei Probleme der verteilten Berechnung angewandt: (1) *Wechselseitiger Ausschluss*, (2) eine erweiterte Version davon, nämlich *eindeutige Prozessauswahl*, und (3) *Zeitmultiplexverfahren (TDMA) Zeitschlitzzuteilung* in einer gegebenen Umgebung im Einklang mit der *Europäischen Norm* EN 54-25 [DI05]. Schließlich wird ein automatischer Verifikationssansatz für selbststabilisierende Systeme unter Beachtung von Rekurrenzeigenschaften, einschließlich einer Fallstudie, gezeigt.

1.3 Inhalt

Der Rest dieses Artikels ist wie folgt strukturiert. Abschnitt 2 zeigt Rekurrenzeigenschaften und das verallgemeinerte Konzept der Selbststabilisierung. Als nächstes, Abschnitt 3 wendet das verallgemeinerte Konzept auf das Problem des wechselseitigen Ausschluss an. Dann zeigt Abschnitt 4 die begründete und eindeutige Prozessauswahlprobleme und wendet das verallgemeinerte Konzept an um diese zu lösen. Hierauf betrachtet Abschnitt 5 das TDMA Zeitschlitzzuteilungsproblem im verallgemeinerten Konzept. Danach zeigt Abschnitt 6 den automatischen Verifikationssansatz. Schließlich legt Abschnitt 7 die Schlussfolgerung dar.

2 Rekurrenz in der Selbststabilisierung

Dieser Abschnitt zeigt die neue Bedingung, die im Rahmen der Selbststabilisierung betrachtet wird. Diese Bedingung basiert auf einem Kernmaß, das auf endliche Ausführungen von Systemen (oder Algorithmen), wie folgt angewandt wird: gegeben eine endliche Ausführung Ξ, dieses Maß ist das Verhältnis der Konfigurationen, die eine Bedingung con in Ξ erfüllen. Dieses Verhältnis wird die **Rekurrenz** der Bedingung in der Ausführung genannt, gegeben durch $\mathsf{Rek}_{\mathsf{con}}(\Xi)$.

Zum Beispiel, sei con eine Bedingung definiert über die Konfigurationen einer Topologie. Als Notation, bezeichne $\underline{\gamma}$, dass eine Konfiguration γ con erfüllt. Für die folgende endliche Ausführung: $\Xi : \underline{\gamma_0}, \underline{\gamma_1}, \gamma_2, \gamma_3, \underline{\gamma_4}, \gamma_5, \underline{\gamma_6}, \gamma_7, \gamma_9, \underline{\gamma_9}, \gamma_{10}, \underline{\gamma_{11}}$, ist die Rekurrenz von con in Ξ das Ergebnis einer Divisionsoperation: $\mathsf{Rek}_{\mathsf{con}}(\Xi) = \frac{6}{12} = 0.5$.

Mit dem Begriff der Rekurrenz über endlichen Ausführungen definiert, wird die Eigenschaft über möglicherweise unendliche Ausführungen wie folgt definiert: gegeben eine unendliche Ausführung Ξ', die Eigenschaft zeigt, dass jedes Ausführungspräfix von Ξ' zumindest Δ Rekurrenz einer Bedingung con besitzt. Die Eigenschaft wird $\mathbf{con_\Delta}$ genannt.

Als nächstes wird die Definition der Selbststabilisierung verallgemeinert, um die Eigenschaft con_Δ wie folgt abzudecken: Man sagt eine Ausführung $\gamma_0, \gamma_1, \ldots$ hat eine **con_Δ-Konvergenzzeit** von **c** schritten, genau dann wenn c die kleinste Zahl ist, so dass das Ausführungssuffix $\gamma_c, \gamma_{c+1}, \ldots$ von Ξ con_Δ erfüllt. Zum Beispiel die folgende Ausführung hat eine con_Δ-Konvergenzzeit von 5.

$$\gamma_0, \gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4, \underline{\gamma_5}, \gamma_6, \gamma_7, \gamma_8, \underline{\gamma_9}, \gamma_{10}, \gamma_{11}, \gamma_{12}, \underline{\gamma_{13}}, \ldots$$

Man spricht bei einem System von einer con_Δ-Konergenzzeit von c schritten, genau dann wenn c die maximale (dass heißt der schlimmste Fall) con_Δ-Konvergenzzeit unter allen Ausführungen des Systems ist. Abbildung 1 illustriert diese Intuition. Merke dass die klassische Selbststabilisierung sich widerspiegelt, durch setzen von $\Delta = 1.0$.

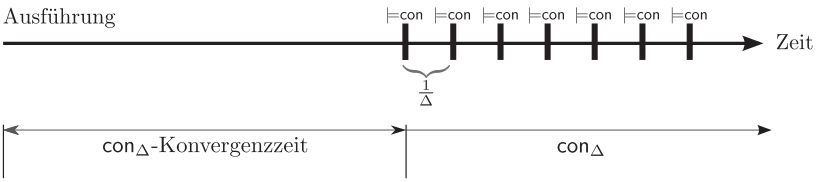


Abb. 1: con_Δ-Konvergenz

Neben der con_Δ-Konvergenz, ist die con_Δ-Aufwärmzeit vorhanden, um die geleistete Dienstqualität während der Konvergenz eines Systems zu betrachten. Man sagt eine Ausführung $\gamma_0, \gamma_1, \ldots$ hat eine **con_Δ-Aufwärmzeit** von w schritten, genau dann wenn w die minimale Zahl, so dass für jedes $i \geq w$, die Rekurrenz von con im Ausführungspräfix $\gamma_0, \ldots, \gamma_i$ von Ξ (das heißt $\mathsf{Rek}_{\mathsf{con}}(\gamma_0, \ldots, \gamma_i)$) größer oder gleich Δ ist. Abbildung 2 stellt die Aufwärmzeit dar für eine Ausführung Ξ.

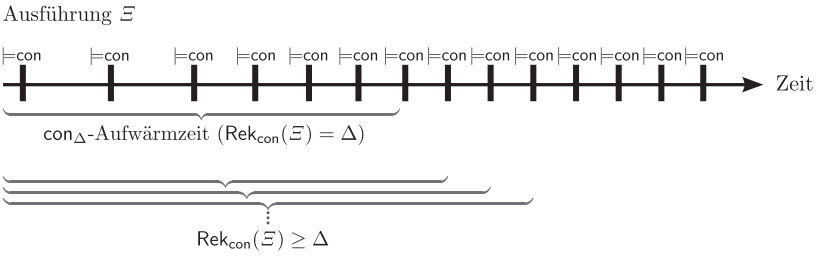


Abb. 2: con_Δ-Aufwärmzeit

Das gleichen Konzept wird auch für Echtzeitsysteme modelliert, in welchen Evolutionen über die Zeit eigenständige Ausführungen ersetzen. Die Rekurrenz einer Bedingung in einer Evolution über ein endliches Zeitintervall, ist die akkumulierte Zeit in welcher con erfüllt ist, dividiert durch das gesamte Intervall.

3 Wechselseitiger Ausschluss

Das verallgemeinerter Konzept der Selbststabilisierung wird angewandt zum Entwurf eines effizienten selbststabilisierenden Algorithmus in Bezug auf *wechselseitigen Ausschluss* (Engl. *Mutual Exclusion*, kurz *Mutex*), welches ein bekanntes Problem aus dem Gebiet der Selbststabilisierung ist. Die Spezifizierung des wechselseitigen Ausschluss ist wie folgt: gegeben eine Menge von mehreren Prozessen die eine Aufgabe nebenläufig ausführen, dann besteht Mutex aus zwei Eigenschaften: Ersten, wenn einem Prozess die Ausführung einer bestimmten Aktion freigegeben ist, dann sollte diese andere Prozesse nicht freigegeben sein. Zweitens, jedem Prozess sollte es gestattet sein, die Aktion unendlich oft auszuführen. Die zweite Eigenschaft wird *Fairness* genannt.

Im Rahmen dieser Arbeit, gibt die Effizienz eine hohe Rekurrenz des gewähren eines Privilegs zu Prozessen wieder, was eine hohe Servicequalität des Algorithmus impliziert. Drei Algorithmen wurden entworfen, um ein Abwägen zwischen folgenden Komplexitätsmaßen zu messen: die Konvergenzzeitkomplexität bzgl. wechselseitigen Ausschluss, die Konvergenzzeit bzgl. Δ Rekurrenz auf gewähren eines Privilegs und der Platzbedarf. Die drei Algorithmen basieren auf Algorithmus 3 aus [BPV08], welcher ein synchrones Inkrementierungssystem mit einem endlichen Bereich von ganzzahligen Werten umsetzt. Das Ziel dieses Systems ist, in jedem synchronen Schritt, wiederholt eine Variable hochzuzählen, die einem jeweiligen Prozess gehört, während die Werte aller Prozesse gleich bleiben sollen. Dem Ansatz von [DG13] folgend, kann Mutex erreicht werden, in dem man jedem Prozess ein Privileg gewährt, wenn seine Kennung gleich dem momentanen Ganzzahlwert ist. Tabelle 1 fasst die Ergebnisse zusammen, wobei $\mathsf{diam}(\mathscr{G})$ den Durchmesser eines Graphen, n die Größe des Graphen, und *priv* die Bedingung das ein Prozess privilegiert ist angibt.

	Algorithmus A	Algorithmus B	Algorithmus C
Konvergenzzeit bzgl. Mutex	$\mathsf{diam}(\mathscr{G})-1$	$\lceil \mathsf{diam}(\mathscr{G})/2 \rceil -1$	$\lceil \mathsf{diam}(\mathscr{G})/2 \rceil -1$
Rekurrenz Δ	1.0	$\mathsf{n}/(\mathsf{n}+\lceil \mathsf{diam}(\mathscr{G})/2 \rceil -1)$	1.0
$priv_{\Delta}$-Konvergenzzeit	$2 \cdot \mathsf{diam}(\mathscr{G})$	$\mathsf{max}\{(\lceil 2.5 \cdot \mathsf{diam}(\mathscr{G}) \rceil -1), (\mathsf{n} + \lceil \mathsf{diam}(\mathscr{G})/2 \rceil -2)\}$	$\lceil 2.5 \cdot \mathsf{diam}(\mathscr{G}) \rceil -1$
Platz	$\mathsf{n}+\mathsf{diam}(\mathscr{G})$	$\mathsf{n} + \lceil 1.5 \cdot \mathsf{diam}(\mathscr{G}) \rceil -1$	$\mathsf{n}+\lceil 1.5 \cdot \mathsf{diam}(\mathscr{G}) \rceil -1$

Tab. 1: Zeit- und Platzkomplexität für die drei Algorithmen

Durch Überwachen der Ergebnisse, Reduzierung der Konvergenzzeit bzgl. Mutex oder der Platzanforderung kann ein weiteren Aspekt der Performanz beeinflusst werden: eine schnelle Konvergenz bzgl. Mutex impliziert keine schnelle Einrichtung der gewünschten Rekurrenz. Dieser Zielkonflikt wird hinsichtlich Algorithmen A und B offensichtlich. Der wesentliche Algorithmus ist Algorithmus C, welcher eine verbesserte Version der ersten Beiden, durch Überarbeitung des Inkrementierungssystems von [BPV08] ist. Algorithmus C erreicht beides 1.0 Rekurrenz von *priv* und optimale Konvergenzzeit bzgl. Mutex. Bemerke, dass dieser Algorithmus eventuell nicht bzgl. $priv_{1.0}$ in $2 \cdot \mathsf{diam}(\mathscr{G})$ schritten konvergiert, wie Algorithmus A es tut.

Die Optimalität der Konvergenzzeit bzgl. Mutex unter dem synchronen Prozess-Scheduler, die $\lceil \mathsf{diam}(\mathscr{G})/2 \rceil - 1$ gleicht, ist begründet im Verfeinern des früheren Beweises von [DG13], welcher die Optimalität von $\lceil \mathsf{diam}(\mathscr{G})/2 \rceil$ einfordert.

4 Schnelle und begründete eindeutige Prozessauswahl

In Mutex ist das Ziel von Fairness sicherzustellen, dass jeder Prozess die Chance erhält seine Aktionen unendlich oft auszuführen, ohne für immer blockiert zu werden. Dies fügt üblicherweise Einschränkungen zur Optimierung des Algorithmus bzgl. anderer Eigenschaften hinzu. Zu diesem Zweck, zeigt dieser Abschnitt ein spezielles Problem, dass mit wechselseitigem Ausschluss in Bezug steht. Das Problem betrachtet das Gewähren eines einmaligen Privilegs zu Prozessen um eine spezielle Aktion auszuführen, ähnlich zu Mutex, jedoch mit einer speziellen Beachtung der Fairness. Dieses Problem wird *eindeutige Prozessauswahl* genannt und hat eine einfache und eine erweiterte Definition.

In der einfachen Definition wird Fairness im Design des Algorithmus vernachlässigt, während man eine Anforderung behält, dass wenn ein anfragender Prozess p existiert, dann wird einem anfragenden Prozess q (d.h. nicht notwendigerweise p) schließlich Privileg gewährt. Das ermöglicht immer noch allen anfragenden Prozessen privilegiert zu werden, unter der Bedingung: Der Algorithmus sollte hoch rekurrent sein im Gewähren von Privilegien, verglichen mit der Häufigkeit des Anfragens von Privilegien. Ein praktisches Beispiel für solch eine Erscheinung ist ein Überwachungssystem von Umweltaktionen, wie Erdbeben, wobei es praktikabler ist eine schnelle Auswahl zu ermöglichen, anstelle gleichmäßig alle Prozesse abzudecken.

In der erweiterten Definition, der Auswahl von Prozessen denen Privileg gewährt wird, sollte begründet sein in lokalen und globalen Kriterien, welches als *begründete eindeutige Prozessauswahl* referenziert wird. Die ist für Systeme nützlich die als Prozess-Scheduler auftreten, welche die Ausführung anderer Systeme optimieren.

In dieser Arbeit, folgt der Entwurf von selbststabilisierenden Algorithmen bzgl. eindeutiger Prozessauswahl der Auffassung von *Weiterleitung von Information mit Rückmeldung* (Engl. *Propagation of Information with Feedback*, kurz *PIF*) [Ch82, Se83]. PIF ist eine Art Wellenalgorithmus der Token in einer Art Breitensuche und Rückmeldung erhält. Zwei selbststabilisierende PIF-Algorithmen wurden entworfen um jeweils eine schnell und begründete eindeutiger Prozessauswahl zu erreichen.

Eine Ausführung von beliebigen Algorithmen ist begründet in einer unendlichen Wiederholung von zwei PIF Zyklen, wobei in jedem Zyklus, die Wurzel Token verbreitet und Rückmeldungen erhält. Im ersten Zyklus verbreitet die Wurzel ein *Such*-token, dass sich durch den Baum ausbreitet. Dann wird ein *Feedback*-token zur Wurzel gesendet. Im einfachen Fall wird das Feedback-token direkt gesendet, sobald der anfragende Prozess das Such-token erhält. Im erweiterten Fall werden die Feedback-tokens von allen Blättern zur Wurzel aggregiert, um eine begründete Auswahl zu erreichen. Im zweiten Zyklus wählt die Wurzel einen Prozess und sendet zu diesem ein *Ausführungs*-token. Sobald der ausgewählte Prozess seine Aktion ausführt, sendet er ein *Fertig*-token zur Wurzel.

Merke, dass obwohl dieses Szenario einfach erscheint, ist dies was Selbststabilisierung bzgl. eindeutiger Prozessauswahl anbelangt nicht der Fall. Tabelle 2 fasst die Komplexitätsmaße für eindeutige Prozessauswahl zusammen (kurz *EPA*) und vergleicht diese mit zwei anderen Ansätzen, unter der Annahme, dass ein Prozess anfragt: (1) der virtuelle Ring Ansatz, in welchem ein Token in einer Art Tiefensuche in einem Baum herumgereicht wird, um den anfragenden Prozess zu finden und (2) die synchrone Übereinstimmung, welche auf dem Inkrementierungssystem, präsentiert in Abschnitt 3, basiert ist. Offensichtlich ist der bedeutende Beitrag, dass die Rekurrenz Δ in diesem Fall $\mathcal{O}(\frac{1}{\mathsf{depth}(\mathscr{T})})$ ist, während sie für die anderen Fälle $\mathcal{O}(\frac{1}{\mathsf{n}})$ ist.

	EPA Algorithmus	Virtueller Ring	Synchrone Übereinstimmung
EPA-Konvergenzzeit	$\mathsf{depth}(\mathscr{T})$	$\mathcal{O}(\mathsf{depth}(\mathscr{T}))$	$\lceil \mathsf{diam}(\mathscr{G})/2 \rceil - 1$
Rekurrenz Δ	$1/(4 \cdot \mathsf{depth}(\mathscr{T}))$	$1/(\mathsf{n} + \lvert\mathscr{E}\rvert - 1)$	$1/\mathsf{n}$
$priv_\Delta$-Konvergenzzeit	$7 \cdot \mathsf{depth}(\mathscr{T})$	$\mathcal{O}(\mathsf{depth}(\mathscr{T}))$	$2 \cdot \mathsf{diam}(\mathscr{G}) + \mathsf{n}$
Platz pro Prozess	$4(\mathsf{n}+1)$	3	$\mathsf{n} + \mathsf{diam}(\mathscr{G})$

Tab. 2: Eindeutige Prozessauswahl von einigen Arten von Algorithmen, unter der Annahme, dass es genau einen anfragenden Prozess gibt ($\mathscr{T} \to$ Baum, $\mathscr{G} \to$ Graph, $\mathsf{n} \to$ Baumgröße, und $\mathscr{E} \to$ Kanten)

5 TDMA Zeitschlitzzuteilung

Das Problem der Zeitmultiplexverfahren (Engl. *Time-Division-Multiple-Access*, kurz *TDMA*) Zeitschlitzzuteilung [Ra02] wird in diesem Abschnitt betrachtet, für Systeme die sich an die Europäische Norm EN 54-25 [DI05] halten. Allgemein beschäftigt TDMA sich mit der Zuteilung von Knoten einer Topologie zu Zeitschlitzen, zugunsten der Zeitplanung von Kommunikation zwischen Knoten, wenn ein Kommunikationsmedium nur eine begrenzte Anzahl von Nachrichten zu jedem Zeitpunkt erlaubt. TDMA garantiert, dass die Knoten das Medium ohne Nachrichtenkollision oder Verlust teilen.

In TDMA wird Zeit in periodische Intervalle genannt *Zeitfenster* aufgeteilt, wobei jedes Fenster in *Zeitschlitze* geteilt wird. Jeder Schlitz wird einem Knoten zugeteilt und ein Knoten sendet Nachrichten nur während seines zugeteilten Zeitschlitzes. Möglichkeiten allen Netzwerkknoten die selbe Zeit anzubieten, hängen von der Netzwerkarchitektur ab. In vielen praktischen Fällen, z.B. drahtlose Sensornetzwerke, ist jeder Knoten mit einer Hardware-Uhr ausgestattet. Jedoch Temperatur-, Spannungsänderungen und Rauschen können zu einer Veränderung der Kristallfrequenz führen, weswegen eine Gangabweichung auftritt. Deswegen ist eine Uhrensynchronisation erforderlich.

Allgemein können Uhrensynchronisationsmechanismen die Kommunikation zwischen mehreren Knoten, um Zeitstempel auszutauschen, beinhalten. Jedoch können sie nicht die Abwesenheit von Gangabweichung aus zwei Gründen garantieren: (1) Zwei aufeinanderfolgende Uhrsynchronisationen können weit genug auseinander liegen, dass eine Uhr kritisch hoch dazwischen abweicht. (2) Erhaltene Zeitstempel können unkorrekt sein, wenn diese von einem Knoten kommen, der keine Referenzuhr bereitstellt, sondern ebenso seine Uhrzeit von einem dritten Knoten erhält.

Eine beschränkte Gangabweichung kann geduldet werden, durch die Nutzung der Idee einer Schutzzeit [PS13]. Schutzzeit besteht aus zwei Zeitintervallen die am Anfang und am Ende jedes Zeitschlitzes hinzugefügt werden. Während der Schutzzeit eines Zeitschlitzes, wenn ein Knoten beauftragt ist zu senden, dann sendet er nicht. Jedoch, wenn er mit Zuhören beauftragt ist, tut er dies. Mit diesem Aufbau bringt eine beschränkte Gangabweichung keine Nachrichtenkollision oder Nachrichtenverlust. Jedoch vergrößert die Schutzzeit die Zeitschlitzlänge und verzögert Nachrichten, was wiederum die Performanz reduziert: Es senkt die Rekurrenz des Sendens von Nachrichten mit der Zeit. Das Ziel ist zu optimieren, d.h. minimieren der Schutzzeit.

Der Beitrag betreffend dieses Problems ist wie folgt. Zuerst, wird ein formales Modell von Systemen im Sinne von EN 54-25 [DI05] einschließlich Echtzeitaspekte und unter einigen Annahmen gezeigt. Das Modell formalisiert einen TDMA Zeitplan mit einem Uhrensynchronisationsmechanismus für Baumtopologien. Zweitens, werden basierend auf dem Modell, jeweils die Topologische Beschreibung der Zeitschlitzzuteilung, welche die größte und kleinste optimale Schutzzeit unter allen Zuteilungen benötigt gegeben. Dies spezifiziert welche Zeitschlitzzuteilungen die höchste Rekurrenz vom senden der Nachrichten hat. Als nächstes werden Gleichungen zum Berechnen der optimalen Schutzzeit für jeden der vorherigen Fälle gegeben. Darauf werden scharfe untere und obere Schranken, für die Rekurrenz Δ vom Nachrichten senden, für beliebige Zeitschlitzzuteilung gegeben. Schließlich zeigt eine Fallstudie eines Drahtlosen Feueralarmsystems, wie das gegebene Modell leicht erweitert werden kann, um auf die Alltagssituation zu passen.

6 Automatische Verifikation von Rekurrenzeigenschaften

Dieser Abschnitt untersucht die Durchführbarkeit der Verifikation von Rekurrenzeigenschaften mittels automatischer Verifikationswerkzeugen. Rekurrenzeigenschaften – con_Δ-Konvergenz und con_Δ-Aufwärmen – sind über unendlichen Ausführungen definiert, und die Rekurrenz von con ist nicht notwendigerweise einheitlich während jeder Ausführung. Dies erschwert automatische Verifikation. Das Ziel dieser Arbeit ist zu vereinfachen und automatische Verifikation von Rekurrenzeigenschaften zu ermöglichen, im Grunde durch das Überwinden des Problems des Vorhandenseins unendlicher Ausführungen.

Der Vereinfachungsansatz zu Verifizieren beliebiger con_Δ-Konvergenz oder con_Δ-Aufwärmen ist wie folgt. Zuerst wird gezeigt, dass wenn eine Ausführung Ξ eines Systems (oder eines Algorithmus) eine betrachtete Eigenschaft verletzt, dann existiert eine *endliche* Unterausführung Ξ' von Ξ mit einer *festen Länge*, so dass (1) Ξ' die Eigenschaft verletzt , und (2) Ξ' ist *minimal*; d.h. es gibt keine strikte Unterausführung von Ξ', die die Eigenschaft verletzt. Ξ' wird ein *minimales Gegenbeispiel* genannt. Zweitens, da jede Konfiguration eines selbststabilisierenden Systems als Anfang betrachtet wird, folgt das Ξ' ein Ausführungspräfix einer Ausführung des Systems ist. Schließlich, durch die ersten und zweiten Gegebenheiten, falls eine Ausführung des Systems existiert, welche die Eigenschaft verletzt, dann existiert ein Ausführungspräfix des Systems,

welches ein minimales Gegenbeispiel ist. Dies impliziert, dass das Überprüfen von Ausführungspräfixen endlicher Länge ausreicht, um zu verifizieren, ob ein System die Eigenschaft erfüllt.

Es ist bekannt, dass für jedes System das con_Δ-Konvergenz in c Schritten (bzw. con_Δ-Aufwärmen in w Schritten) erfüllt, gibt es ein minimales Gegenbeispiel dessen Länge $\mathsf{c}+1$ (bzw. in $[w+1, 2w+1]$) ist.

Um dies zu illustrieren, die folgenden Ausführungen sind Gegenbeispiele der Eigenschaft $\mathsf{con}_{0.5}$-Konvergenz von $3 = \mathsf{c}$ Schritten. Die minimalen Gegenbeispiele haben Größe $4 = \mathsf{c}+1$ und sind zwischen den Klammern gekennzeichnet.

$\Xi_1 : (\gamma_0, \gamma_1, \gamma_2, \gamma_3,) \quad \underline{\gamma_4}, \gamma_5, \underline{\gamma_6}, \gamma_7, \underline{\gamma_8}, \gamma_9, \underline{\gamma_{10}}, \gamma_{11}, \underline{\gamma_{12}}, \cdots$
$\Xi_2 : \gamma_0, \gamma_1, \gamma_2, \underline{\gamma_3}, \quad (\gamma_4, \underline{\gamma_5}, \gamma_6, \gamma_7,) \quad \underline{\gamma_8}, \gamma_9, \underline{\gamma_{10}}, \gamma_{11}, \underline{\gamma_{12}}, \cdots$
$\Xi_3 : \underline{\gamma_0}, \quad (\underline{\gamma_1}, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4,) \quad \underline{\gamma_5}, \gamma_6, \underline{\gamma_7}, \gamma_8, \underline{\gamma_9}, \gamma_{10}, \underline{\gamma_{11}}, \cdots$

Die folgende Ausführung ist ein minimales Gegenbeispiel, welches nicht $\mathsf{con}_{0.5}$-Aufwärmzeit von $3 = \mathsf{w}$ Schritte erfüllt. Es hat eine Länge von $7 = 2\mathsf{w}+1$.

$\Xi : \gamma_0, \gamma_1, \underline{\gamma_2}, \underline{\gamma_3}, \underline{\gamma_4}, \gamma_5, \gamma_6.$

Modellprüfung (Engl. *Model Checking*) kann angewandt werden, um die Nichtexistenz eines Gegenbeispieles zu verifizieren und zu schlussfolgern, dass ein System eine Rekurrenzeigenschaft erfüllt. Als eine Fallstudie wird der Modellprüfer NUXMV [Ca14] angewandt, um die Rekurrenzeigenschaften des wechselseitigen Ausschlussalgorithmus zu verifizieren, wobei dies Algorithmus C in Abschnitt 3 ist. Die Ergebnisse der Modellprüfung bestätigen die theoretische Analyse. Das Haupthindernis ist, dass die Zustandsexplosion durch die Anzahl an Prozessen die Prüfzeit enorm anhebt.

7 Fazit

Das verallgemeinerte Konzept der Selbststabilisierung vergrößert die Klasse der Eigenschaften, die die klassische Selbststabilisierung abdeckt. Es modelliert Performanzeigenschaften, die über die Ausführungen für beide, Diskrete und Echtzeitsysteme, definiert sind. Es zeigt wie selbststabilisierende Algorithmen entworfen oder umgearbeitet werden können, um Effizient bzgl. ihrer Servicequalität zu werden.

Das neue Konzept der Selbststabilisiserung kann noch weiter erweitert werden, um mehr Eigenschaften abzudecken. Erstens kann das Konzept weiter verallgemeinert werden, um abzudecken, dass eine Bedingung notwendig zumindest einmal halten muss, in einem Teilabschnitten von Ausführungen oder Evolutionen, anstelle von Konfigurationen. Dies stellt eine Möglichkeit bereit, eine Gleichförmigkeit in der Häufigkeit der Erfüllung einer Bedingung, während einer Ausführung, zu erzwingen. Zweitens kann die Rekurrenz Δ neu definiert werden, um *Gewicht* oder *Grad* des Erfüllens einer Bedingung pro Konfiguration zu beinhalten. Das Gewicht kann z.B. das Verhältnis aus lokalen Zuständen in einem verteilten System widerspiegeln, die eine lokale Bedingung erfüllen.

Literaturverzeichnis

[BPV08] Boulinier, Christian; Petit, Franck; Villain, Vincent: Synchronous vs. Asynchronous Unison. Algorithmica, 51(1), 2008.

[Ca14] Cavada, Roberto; Cimatti, Alessandro; Dorigatti, Michele; Griggio, Alberto; Mariotti, Alessandro; Micheli, Andrea; Mover, Sergio; Roveri, Marco; Tonetta, Stefano: The nuXmv Symbolic Model Checker. In: Proceedings of the 26th International Conference on Computer Aided Verification (CAV). Jgg. 8559 in LNCS. Springer, S. 334–342, 2014.

[Ch82] Chang, Ernest J. H.: Echo Algorithms: Depth Parallel Operations on General Graphs. IEEE Transactions on Software Engineering (TSE), 8(4):391–401, 1982.

[DG13] Dubois, Swan; Guerraoui, Rachid: Introducing Speculation in Self-Stabilization – An Application to Mutual Exclusion. In: Proceedings of the 32nd ACM Symposium on Principles of Distributed Computing (PODC). ACM, S. 290–298, 2013.

[Di74] Dijkstra, Edsger W.: Self-stabilizing Systems in Spite of Distributed Control. Communications of the ACM, 17(11):643–644, 1974.

[Di86] Dijkstra, Edsger W.: A Belated Proof of Self-Stabilization. Distributed Computing, 1(1):5–6, 1986.

[DI05] DIN e.V.: , Fire Detection and Fire Alarm Systems – Part 25: Components Using Radio Links and System Requirements, German Version EN 54-25:2005, 2005.

[PS13] Perahia, Eldad; Stacey, Robert: Next Generation Wireless LANS: 802.11 n and 802.11 ac. Cambridge university press, 2013. ISBN: 978-1107016767.

[Ra02] Rappaport, Theodore S.: Wireless Communications: Principles and Practice, Jgg. 2. Prentice Hall, 2002. ISBN: 978-0130422323.

[Se83] Segall, Adrian: Distributed Network Protocols. IEEE Transactions on Information Theory, 29(1):23–34, 1983.



Oday Jubran wurde am 5. Mai 1986 in Jerusalem geboren. Er erhielt den Bachelor in Wirtschaftsinformatik – mit dem Nebenfach Betriebswirtschaftslehre – von der Universität Bethlehem, Palästina im Jahr 2008. Danach hat ihm der DAAD ein Master-Stipendium in Deutschland zugesprochen. Er erhielt den Master in Informatik von der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg im Jahr 2012. Später beschäftigte er sich als Wissenschaftlichermitarbeiter an der Carl von Ossietzky Universität Oldenburg, und er hat dort seine Doktorarbeit in Informatik im Jahr 2016 abgeschlossen. Jetzt beschäftigt er sich mit der Softwareentwicklung und Forschung in der Industrie.

Perzeptionelle Modellierung für stereoskopische 3D[1]

Petr Kellnhofer[2]

Abstract: Anwendungen von virtueller und erweiterter Realität verwenden in der Regel eine stereoskopische Darstellung und schließen intensive Objekt- und Betrachterbewegung ein. Die Integration von hohen Dynamikumfängen stellt eine weitere erstrebenswerte Funktionalität dar. Meine Dissertation beschäftigt sich mit den komplexen Wechselwirkungen zwischen all diesen visuellen Wahrnehmungselementen. Wir beschreiben die Enschränkungen aktueller Bildschirmtechnologien und überwinden sie, indem wir Wahrnehmungsmodelle zusammen mit unseren eigenen Studien verwenden, um den Betrachterkomfort zu steigern, die wahrgenommen Tiefe zu verstärken und visuelle Artefakte zu reduzieren. Die Dissertation ist zweigeteilt, um sich getrennt voneinander sowohl mit dynamischer Bewegung als auch mit hohen Dynamikumfängen in Wechselwirkung mit stereoskopischem 3D zu beschäftigen. Eine einheitliche Forschungsmethodologie und algorithmischen Herangehensweise zieht sich hingegen durch den gesamten Text.

1 Einführung

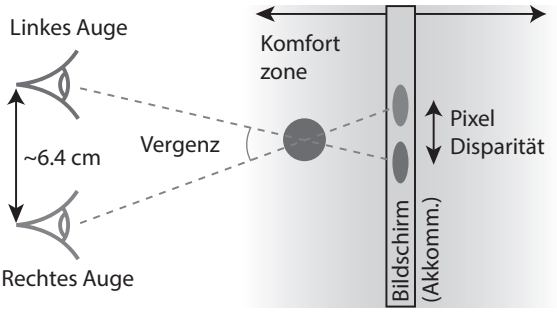


Abb. 1: Die Grundprinzipien der stereoskopischen Darstellung und des Vergenz-Akkomodation-Konflikts, der die reproduzierbare Tiefe auf aktuellen Geräten limitiert.

Stereoskopisches 3D hat sich inzwischen als ein wichtiger Bestandteil in der digitalen Bilderzeugung, in Computerspielen und in der Filmproduktion etabliert. Dies wiederum hat auch intensive Forschungsbemühungen hervorgerufen, den Eindruck der Tiefenwahrnehmung zu verbessern. Ein besseres Verständnis der Einschränkungen von 3D Bildschirmen und dem menschlichen Wahrnehmungsvermögen hat den Weg zu einer intelligenteren Verarbeitung der Inhalte geebnet. Üblicherweise bereitet stereoskopisches 3D einige Probleme, wenn es auf aktuellen Geräten dargestellt wird. Das Unbehagen, das durch Rivalität der beiden Ansichten oder übermäßig große Disparitäten zusammen mit dem sogenannten Vergenz-Akkommodation-Konflikt (Abb. 1) ausgelöst wird, kann leicht die

[1] Englischer Titel der Dissertation: “Perceptual modeling for stereoscopic 3D”

[2] Universität des Saarlandes und Max-Planck-Institut für Informatik, pkellnho@mpi-inf.mpg.de

Vorteile der binokularen Wahrnehmung schmälern, Ermüdungserscheinungen hervorrufen und folglich dazu führen, dass das Betrachten in althergebrachtem 2D bevorzugt wird [La09]. Die Modellierung der Wahrnehmung des menschlichen Sehsystems (HVS) ist eine Möglichkeit, um sowohl Inhalte im Hinblick auf die beste Betrachtererfahrung für ein allgemeines Publikum zu optimieren, als auch spezifische Eigenschaften eines Geräts zu berücksichtigen oder auf individuelle Betrachter abzustimmen. Wir verwenden Wahrnehmungsstrukturen, um neue Herausforderungen in modernen Multimedia-Systemen anzugehen [Ke16a]. Head-Mounted Displays (HMD) für virtuelle Realität (VR) und erweiterte Realität (AR) sind ein Beispiel für solche Geräte. Sie verwenden ein stereoskopisches Display zusammen mit einem Tracking des Benutzers für direkte Bewegungsinteraktion. Bildschirme mit hohem Dynamikumfang (HDR) sind eine weitere spannende Innovation, die den Verbrauchermarkt erreicht, und können potentiell ebenfalls in HMDs eingebaut werden. Die Dissertation untersucht Wechselwirkungen von stereoskopischem 3D sowohl mit Bewegung als auch mit HDR, und ist entsprechend in zwei Teile gegliedert. Wir zeigen, wie sich die Eigenschaften des HVS unter Bewegung oder einem hohen Dynamikumfang der Adaptionsluminanz verändern und wie wir dieses Verhalten nutzen können, um die Wahrnehmungscharakteristiken bei stereoskopischen Bildschirmen zu verbessern. Auf diese Weise erreichen wir eine bessere Tiefenreproduktion, schwächen visuelle Artefakte ab und verbessern den Betrachterkomfort.

Die Forschungsmethodik ist in der gesamten Dissertation einheitlich, sowohl für den Teil über Bewegung als auch für den Teil über HDR Stereoskopie. Unsere Methoden sind fest in der Wahrnehmungsforschung verankert und erweitern diese oft durch eigene Messungen in Fällen, bei denen spezieller Bedarf aufgrund unserer Anwendungen entsteht. Wir verallgemeinern die Beobachtungen in ein Wahrnehmungsmodell, das wiederum in ein Berechnungsmodell umgewandelt wird, um unsere Eingabedaten zu verarbeiten. Dieses Modell kann entweder direkt als Metrik verwendet, oder - häufiger - in den Rahmen einer Optimierung integriert werden, welche eine Verbesserung der angestrebten Bildqualität wie Tiefenwiedergabe oder Betrachterkomfort zu erreichen versucht. Am Ende wird der Kreis durch eine Validierungsstudie geschlossen, die bestätigt, dass Eigenschaften, die ursprünglich für einfache Stimuli beobachtet wurden, auch gelten, wenn das Modell auf komplexe Bilder angewendet wird.

2 Stereoskopisches 3D und Bewegung

Im ersten Teil der Dissertation konzentrieren wir uns auf Bewegung in stereoskopischen Anwendungen. Diese Bewegung stammt sowohl vom Inhalt selbst, da Filme oder interaktive Anwendungen naturgemäß Bewegung beinhalten, als auch von der Eigenbewegung des Betrachters, wie sie durch HMDs mit Kopf- und Blick-Tracking nachgebildet wird und dadurch das Eintauchen in virtuelle Welten und neue Wege in der Mensch-Maschine-Interaktion erlauben. Über den üblichen Schwerpunkt zeitliche Kohärenz zu erreichen hinausgehend, studieren wir die zeitlichen Grenzen des HVS und wie Bewegung uns dabei unterstützt, die Welt zu verstehen.

2.1 Optimierung von Disparität für Bewegung in der Bildebene

Aufgrund einer Diskretisierung sowohl im Raum als auch in der Zeit unterliegt stereoskopische Bewegung, die auf einem Bildschirm abgebildet wird, einer Reihe von Einschränkungen im Hinblick auf die von Natur aus kontinuierliche Welt [Ke14a]. Wir beschreiben, wie Aufnahmeprotokolle, die sich an den Inhalt anpassen, bei zeitsequentiellen Bildschirmen unechte Bewegungen in der Tiefenwahrnehmung reduzieren können. Eine andere Bewegungsverzerrung stammt von einer Kombination aus Bildschirmdesign und einer speziellen Einschränkung des HVS selbst. Wir untersuchen dieses Verhalten für einen anaplyphen Bildschirm und schlagen eine zeitliche Ausgleichung des entstehenden Pulfrich-Effekts vor.

2.2 Optimierung von Disparität für Bewegung in die Tiefe

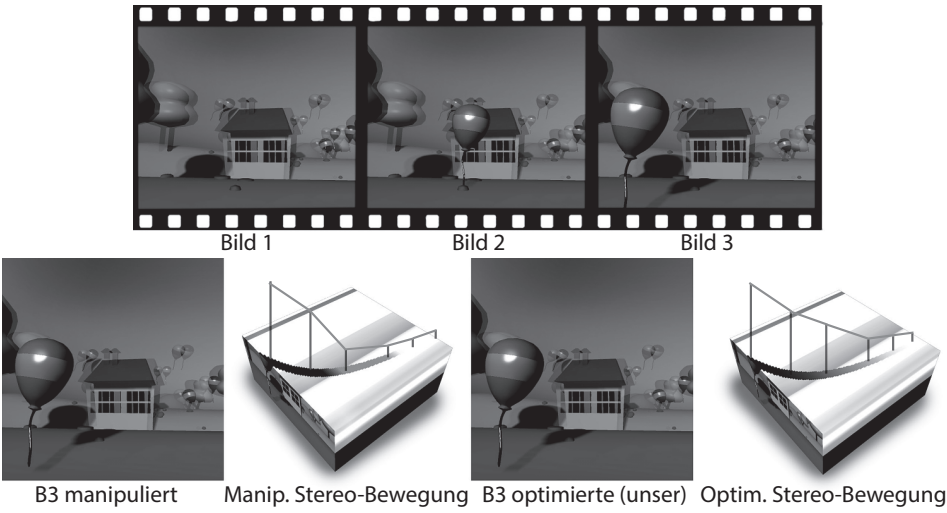


Abb. 2: Eine Bildsequenz mit einem Ballon, der sich in der Tiefe bewegt *(oben)*. Die Verzerrung der Tiefenbewegung als Resultat einer typischen Disparitätsmanipulation *(unten links)* und unser optimiertes Ergebnis *(unten rechts)*.

Die Wahrnehmung von dynamischem Stereoinhalt beruht darauf, das komplette Disparität-Zeit-Volumen, das ein bewegter Szenenpunkt durchläuft, wiederzugeben [Ke13]. Dieses Volumen kann während der Disparitätsmanipulation, die lediglich Disparitätsveränderungen in jedem Einzelbild berücksichtigt, stark verzerrt werden, selbst wenn die zeitliche Kohärenz dieser Veränderung beibehalten wird (Abb. 2). Wir führen experimentelle Messungen durch um herauszufinden, wie empfindlich ein menschlicher Betrachter auf verschiedene Disparitätsverzerrungen reagiert. Daraufhin schlagen wir eine auf Wahrnehmungsmodellen zeitlicher Disparitätsveränderungen basierende Optimierung vor, die Stereobewegung von Inhalten nach einer beliebigen Manipulation der Disparität erhält. Des Weiteren führen wir ein neues 3D-Warping-Verfahren ein, das Stereobildpaare erzeugt, die dieser optimierten

Disparität entsprechen. Nutzerstudien zeigen, dass unser Verfahren sowohl den Betrachterkomfort als auch die Leistungsfähigkeit in Aufgaben zur Tiefenbestimmung verbessert.

2.3 Blickgesteuerte Disparitätsmanipulationen

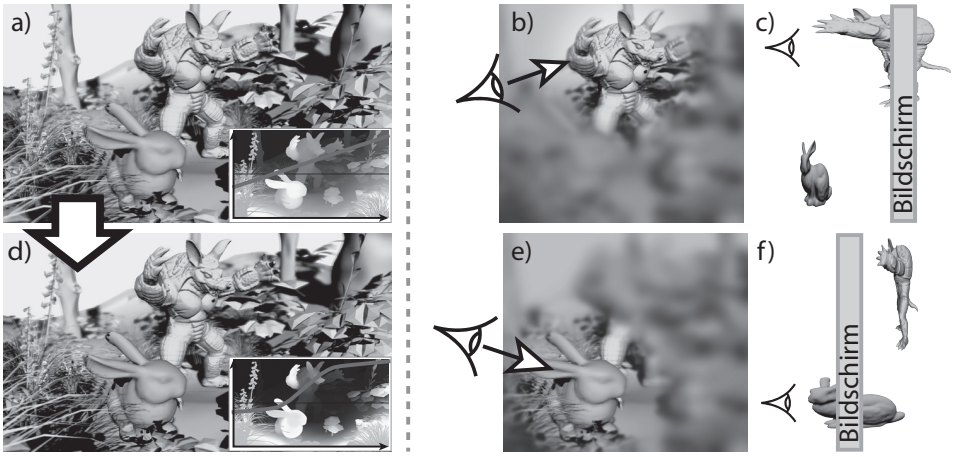


Abb. 3: Unser Ansatz (d) geht über übliche Disparitätsanpassungen (a) hinaus und passt sich der Bildregion an, die der Betrachter fixiert, wie beispielsweise das Gürteltier (b) oder das Kaninchen (e). In dieser Bildregion wird die Disparität nahtlos angepasst, um den Tiefeneindruck zu verstärken und Unbehagen zu reduzieren, das durch den Akkomodation-Vergenz-Konflikt entsteht (c,f).

In vielen Szenarien ist der Tiefenumfang, der durch das Wahrnehmungselement der Disparität mittels Stereoskopie wiedergegeben werden kann, stark eingeschränkt und in der Regel durch technische Bedingungen festgelegt [Sh11]. Wir zeigen, dass dieses Problem erheblich verringert werden kann, wenn die Fixationsbereiche des Auges grob abgeschätzt werden können [Ke16b]. Wir schlagen ein Verfahren zur stereoskopischen Tiefenanpassung vor, das Augen-Tracking oder andere Informationen zur Vorhersage von Blickrichtungen verwendet (Abb. 3). Wir verwenden einen handelsüblichen Augen-Tracker, um die Blickrichtung abzuschätzen, allerdings könnte eine RGB-Kamera in Kombination mit einem Computer-Vision-Algorithmus zur Blickrichtungserkennung in naher Zukunft eine Alternative sein [Kh16]. Anders als frühere Arbeiten wenden wir sukzessive, nicht wahrnehmbare Tiefenanpassungen während der Augenfixation an und nutzen aus, dass Wahrnehmungsstudien dem menschlichen Sehsinn eine relativ geringe Empfindlichkeit in Bezug auf zeitlichen Disparitätsmodulationen attestieren [Ke15a, KGB14]. Wir messen die Geschwindigkeitsbegrenzungen von Disparitätsveränderungen in verschiedenen Szenarios bei denen Tiefe angepasst wird, und formulieren ein neues Modell, das solch eine nahtlose Verarbeitung von stereoskopischen Inhalten steuert. Auf der Grundlage dieses Modells schlagen wir eine latenzunempfindliche Echtzeitsteuerung vor, die lokale Manipulationen an stereoskopischen Inhalten vornimmt, um das Optimum zwischen Tiefenwiedergabe und Betrachtungskomfort zu finden. Außerdem zeigen wir den Nutzen unseres Modells in Offline-Anwendungen, zum Beispiel als Vorverarbeitung in der stereoskopischen Filmproduktion. Eine Validierungsstudie belegt erhebliche Verbesserungen der Tie-

fenwahrnehmung, ohne dass bei der Anwendung unserer Methoden die visuelle Qualität leidet.

2.4 Bewegungsparallaxe als ein Tiefenwahrnehmungselement

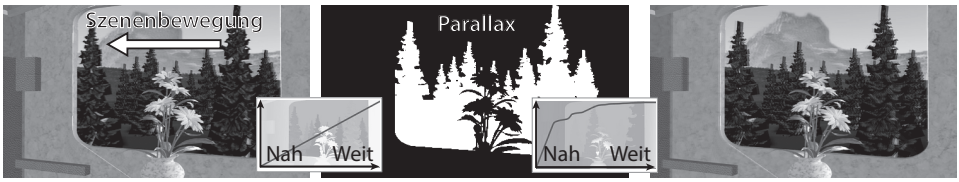


Abb. 4: Die Bewegung des Zuges erzeugt einen Parallaxeneffekt im Bereich der Landschaft (*links*). Unsere Methode erkennt Bildregionen, in denen Bewegungsparallaxe als ein zusätzliches Tiefenwahrnehmungselement fungiert (*mitte, weiß*) und verwendet unser Modell, um das Tiefenbudget von diesen Bildregionen (*der Landschaft*) in solche Regionen umzuverteilen, in denen die Disparität stärker gebraucht wird (*das Innere des Zuges, rechts*).

Aktuelle Bildschirme, insbesondere automultiskopische, können lediglich einen beschränkten Disparitätsumfang wiedergeben. Wir untersuchen Bewegungsparallaxe, ein verhältnismäßig starkes Tiefenwahrnehmungselement [NS09], das jedoch völlig zweidimensional und deshalb in seiner Wiedergabe nicht beschränkt ist [Ke16c]. In vielen praktischen Szenarien kann Tiefe durch Bewegungsparallaxe eine aggressive Kompression der Disparität kompensieren. Wir führen psychovisuelle Experimente durch, welche den Einfluss von Bewegungsparallaxe auf die Tiefenwahrnehmung messen, und setzen ihn mit der Tiefe, die von binokularer Disparität herrührt, in Beziehung. Unser gesamtheitliches Disparität-Parallaxe-Berechnungsmodell prognostiziert die empfundene Tiefe, die von beiden Wahrnehmungselementen stammt. Daraufhin stellen wir neue Methoden zur Disparitätsmanipulation vor, die zuerst die aus der Bewegungsparallaxe gewonnene Tiefe messen und dann entsprechend die binokulare Disparität anpassen. Eine Nutzerstudie zeigt, dass Zuordnungen des Tiefenbudgets in Abhängigkeit von der Stärke der Bewegungsparallaxe die Tiefenwahrnehmung insgesamt verbessert (Abb. 4).

3 Teil II: Stereoskopisches 3D und HDR

Im zweiten Teil der Dissertation untersuchen wir zum ersten Mal die Wiedergabe von stereoskopischen Inhalten auf Bildschirmen mit hohem Dynamikumfang (HDR). Wir erforschen den Effekt von sowohl sehr hellen als auch sehr dunklen Luminanzniveaus auf die Disparitätswahrnehmung. Mit Hilfe von genauen Simulationen betrachten wir den gesamten Luminanzumfang, der vom menschlichen Sehsinn wahrgenommen werden kann und weiterhin die Möglichkeiten handelsüblicher Bildschirme überschreitet.

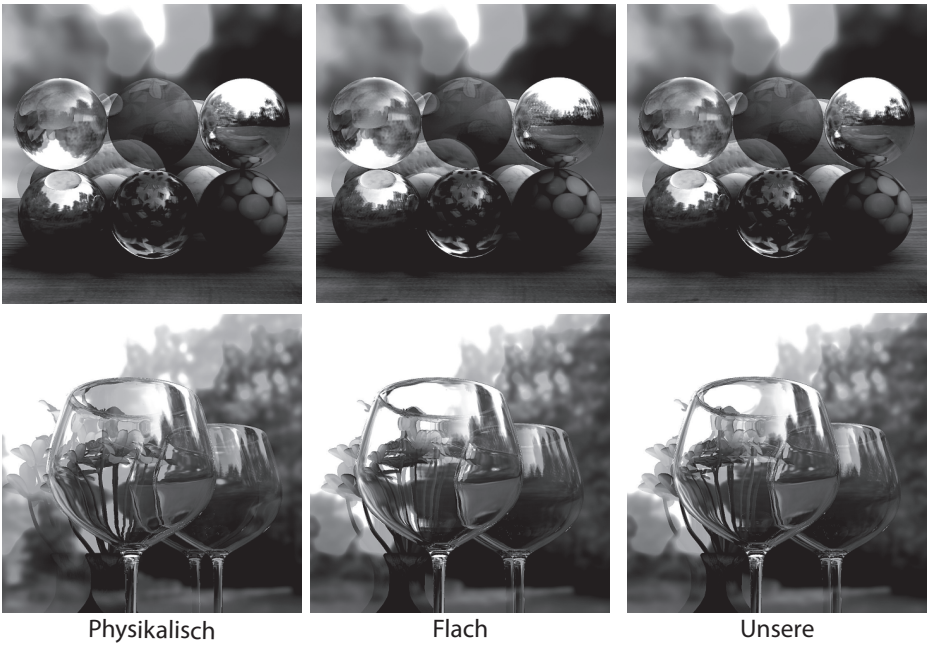


Abb. 5: Unsere Methode (*Rechts*) findet einen Kompromiss zwischen dem physikalisch korrekten stereoskopischen Rendern von Reflexionen und Refraktionen (*Links*) und deren flacher Platzierung auf Objektoberflächen (*Mitte*). Auf diese Weise wird gleichzeitig eine ansprechende Tiefenerscheinung und ein angenehmes Betrachten beibehalten.

3.1 Wahrnehmung von Disparität bei photopischem Sehen

Helle Bilder, die bei Tageslicht entstanden sind, werden oft mit glänzend reflektierenden oder lichtbrechenden Oberflächen in Verbindung gebracht. Ungeachtet des Reizes, den diese blickwinkelabhängigen Effekte ausüben, verursachen sie bei ihrer Darstellung in stereoskopischem 3D doch eine Herausforderung. Lichttransport durch optische Schnittstellen kann leicht unangenehm große Disparitäten oder Verzerrungen der entstehenden Bilder zur Folge haben. Dies verhindert die Fusion der Bilder und verursacht unangenehme Rivalität (Abb. 5, oben). Obwohl solche Effekte auch in der Realität vorkommen [Mu13], behaupten wir, dass sie auf aktuellen Bildschirmen unerwünscht sind, da das Fehlen korrekter Akkommodation und die fehlende Möglichkeit, den unangenehmen Blickwinkel durch eine Kopfbewegung zu verändern, den Sinneseindruck erheblich verändern. Wir schlagen ein Optimierungsschema vor, das die Kameraparameter für jeden Pixel so modifiziert, dass visuell angenehme und realistische Disparitäten beibehalten und störende Rivalitäten verhindert werden (Abb. 5, unten). Wir validieren unseren Ansatz in einer Nutzerstudie, in der unsere Methode einen größeren Betrachtungskomfort und gleichzeitig einen höheren Realitätsgrad im Vergleich zu konkurrierenden Arbeiten erreicht [Da14].

3.2 Wahrnehmung von Disparität bei skotopischem Sehen

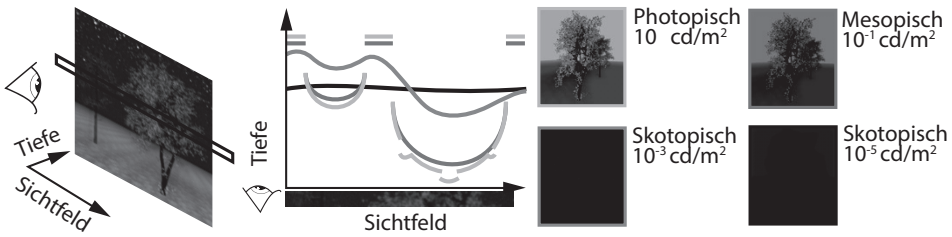


Abb. 6: Die Wahrnehmung von Tiefe wird bei sehr dunklen Luminanzniveaus vermindert, da kleine Elemente nicht mehr zu unterscheiden sind. Unser Modell berechnet dieses Verhalten und erlaubt es uns diesen Effekt auf normalen photopischen Bildschirmen zu simulieren.

Das Erscheinungsbild einer skotopischen Nachtszene bei wenig Licht kann auf einem photopischen Bildschirm durch Farbentsättigung, verringerte Sehschärfe und die Purkinje-Blauverschiebung simuliert werden (”Day-for-Night”) [Fe96, TSF02]. Wir behaupten, dass eine wirklichkeitsgetreue Stereoabbildung von Nachtszenen auf photopischen Stereobildschirmen nicht nur eine Manipulation der Farben, sondern auch eine der binokularen Disparität erfordert (Abb. 6). Zu diesem Zweck führen wir ein psychophysisches Experiment durch, um ein Disparitätsmodell für skotopische Luminanzniveaus zu konstruieren [Ke14b]. Mit Hilfe dieses Modells können wir die binokulare Disparität von skotopischen Stereoinhalten, die auf einem photopischen Bildschirm dargestellt werden, an die Disparitäten anpassen, die wahrgenommen würden, wenn die Szene tatsächlich skotopisch wäre. Das Modell erlaubt eine Echtzeitverarbeitung für interaktive Anwendungen, wie zum Beispiel Simulationen oder Computerspiele.

3.3 Wahrnehmung von Luminanz an der Minimalreizschwelle



Abb. 7: Das Erscheinungsbild von Rauschen im menschlichen Wahrnehmungssystem bei Adaptationsniveaus nahe der Minimalreizschwelle ist dynamisch und abhänging von der tatsächlichen Lichtstärke. Anders als frühere Arbeiten erfasst unser Modell diese Eigenschaften, um ein realistischeres Erscheinungsbild zu erzeugen.

Wenn die menschliche Lichtmengenwahrnehmung nah an der Minimalreizschwelle arbeitet, ist stereoskopisches Sehen nicht mehr möglich und das Erscheinungsbild im Vergleich zum üblichen photopischen oder skotopischen Sehen verändert sich wesentlich

[Ke15b]. Die meisten Beobachter berichten von zeitlich variierendem Rauschen aufgrund von Quantenrauschen (bedingt durch die geringe Anzahl der Photonen) und spontanen photochemischen Reaktionen (Abb. 7) [HSP42]. Bisher wurde statisches normalverteiltes Rauschen, das sich nicht an die absolute Lichtmenge anpasst, benutzt, um ein skotopisches Erscheinungsbild auf photopischen Bildschirmen für Filme und interaktive Anwendungen zu simulieren. Unser wahrnehmungskalibriertes Berechnungsmodell bildet die experimentell hergeleitete Verteilung und Dynamik von "skotopischem Rauschen"bei einem gegebenen Luminanzniveau nach und unterstützt animierte Bilder. Die Echtzeitsimulation wird beim Vergleich zu einfacheren Alternativen in einem Wahrnehmungsexperiment bevorzugt.

4 Conclusion

Der kommerzielle Erfolg von stereoskopischen Filmen der neuesten Generation im Vergleich zu früheren Bemühungen ab den 1950er Jahren kann sowohl durch technische Weiterentwicklungen als auch durch Fortschritte in unserem Verständnis der menschlichen stereoskopischen Wahrnehmung erklärt werden. Aufgrund von umfassender vorausgegangener Forschung sind wir heutzutage deutlich besser über die Einschränkungen des menschlichen Sehsystems in Bezug auf die Wahrnehmung von Disparität und anderen Phänomenen informiert. Daraus folgen praktische Richtlininen, die befolgt werden sollten, um bequeme und angenehme 3D-Inhalte zu produzieren. In dieser Dissertation zielen wir darauf ab, dieses Verständnis weiter auszudehnen, indem wir die stereoskopische Tiefe nicht isoliert betrachten, sondern auch Wechselwirkungen unserer Tiefenwahrnehmung mit anderen Phänomenen multimedialer Inhalte untersuchen. Konkret haben wir den Einfluss von Bewegung unterschiedlicher Art und einen großen absoluten Luminanzumfang erforscht. Diese beiden Aspekte sind wichtig für aufkommende Bildschirmtechnologien wie beispielsweise Head-Mounted Displays für virtuelle Realität, die sich auf Interaktion und freie Bewegung stützen, aber auch auf HDR Bildschirme, die realitätsgetreuere Luminanzeindrücke erzeugen.

Wir haben die Leistungsfähigkeit des menschlichen Sehsystems unter verschiedenen Bedingungen gemessen, um Lücken in früheren Untersuchungen zu schließen oder einen größeren Anwendungsumfang zu ermöglichen. Auf diese Weise konnten wir Modelle der menschlichen Wahrnehmung und zweckmäßige Algorithmen konstruieren, die zentrale Aspekte des stereoskopischen Sehens, wie zum Beispiel den Realitätsgrad, den Betrachterkomfort oder die Tiefenwahrnehmung, verbessern. Die Ergebnisse wurden in Nutzerstudien validiert, durch die eine Verbindung zwischen den auf künstlichen Stimuli basierenden Modellen und komplexen realitätsnahen Beispielen hergestellt wird.

Unsere Ergebnisse haben nicht nur im Rahmen aktueller stereoskopischer Spiele und Filme Gültigkeit, sondern können auch in Szenarien mit virtueller und erweiterter Realität angewendet werden, bei denen Genauigkeit in der Tiefenreproduktion mittels stereoskopischer Verfahren ein wichtiger Bestandteil für Immersion und die Glaubhaftigkeit der Erlebnisse ist.

Obwohl einige der von uns behandelten Einschränkungen möglicherweise durch zukünftige Hardware aufgelöst werden können, glauben wir dennoch, dass viele Ideen dieser Arbeit weiterhin Gültigkeit haben werden. Dies kann anhand des Beispiels von Disparitätsanpassungen für sehr dunkle Luminanzbedindungen veranschaulicht werden. In diesem Fall wäre die Lösung, einen sehr dunklen Bildschirm zu verwenden, zwar möglich, aber nicht sehr praktikabel, denn es würde eine kontrollierte Umgebungsbeleuchtung und lange Adaptationszeiten erfordern und dieses Verfahren damit für den Gelegenheitsnutzer unattraktiv machen. Daher werden Verfahren, welche die Sinneserfahrung imitieren anstatt die Realität physikalisch korrekt zu reproduzieren, auch in Zukunft reizvoll bleiben.

Literaturverzeichnis

[Da14] Dabała, Łukasz; Kellnhofer, Petr; Ritschel, Tobias; Didyk, Piotr; Templin, Krzysztof; Myszkowski, Karol; Rokita, Przemysław; Seidel, Hans-Peter: Manipulating refractive and reflective binocular disparity. Computer Graphics Forum (Proc. Eurographics 2014), 33(2):53–62, 2014.

[Fe96] Ferwerda, James A.; Pattanaik, Sumanta; Shirley, Peter; Greenberg, Donald: A Model of Visual Adaptation for Realistic Image Synthesis. In: Proc. SIGGRAPH. S. 249–58, 1996.

[HSP42] Hecht, Selig; Shlaer, Simon; Pirenne, Maurice Henri: Energy, quanta, and vision. J Gen Phys, 25(6):819–840, 1942.

[Ke13] Kellnhofer, Petr; Ritschel, Tobias; Myszkowski, Karol; Seidel, Hans-Peter: Optimizing Disparity for Motion in Depth. Computer Graphics Forum (Proc. EGSR 2013), 32(4):143–152, 2013.

[Ke14a] Kellnhofer, Petr; Ritschel, Tobias; Myszkowski, Karol; Seidel, Hans-Peter: Improving Perception of Binocular Stereo Motion on 3D Display Devices. Proc. SPIE, 9011:901116–901116–11, 2014.

[Ke14b] Kellnhofer, Petr; Ritschel, Tobias; Vangorp, Peter; Myszkowski, Karol; Seidel, Hans-Peter: Stereo Day-for-Night: Retargeting Disparity for Scotopic Vision. ACM Trans. Appl. Percept., 11(3), 2014.

[Ke15a] Kellnhofer, Petr; Leimkühler, Thomas; Ritschel, Tobias; Myszkowski, Karol; Seidel, Hans-Peter: What Makes 2D-to-3D Stereo Conversion Perceptually Plausible? In: Proceedings of the ACM SIGGRAPH Symposium on Applied Perception. SAP '15, ACM, New York, NY, USA, S. 59–66, 2015.

[Ke15b] Kellnhofer, Petr; Ritschel, Tobias; Myszkowski, Karol; Eisemann, Elmar; Seidel, Hans-Peter: Modeling Luminance Perception at Absolute Threshold. Computer Graphics Forum (Proc. EGSR 2015), 34(4):155–164, 2015.

[Ke15c] Kellnhofer, Petr; Ritschel, Tobias; Myszkowski, Karol; Seidel, Hans-Peter: A Transformation-Aware Perceptual Image Metric. Proc. SPIE, 9394:939408–939408–14, 2015.

[Ke16a] Kellnhofer, Petr: Perceptual modeling for stereoscopic 3D. Dissertation, Saarland University, 2016.

[Ke16b] Kellnhofer, Petr; Didyk, Piotr; Myszkowski, Karol; Hefeeda, Mohamed M.; Seidel, Hans-Peter; Matusik, Wojciech: GazeStereo3D: Seamless Disparity Manipulations. ACM Transactions on Graphics (Proc. SIGGRAPH), 35(4), 2016.

[Ke16c] Kellnhofer, Petr; Didyk, Piotr; Ritschel, Tobias; Masia, Belen; Myszkowski, Karol; Seidel, Hans-Peter: Motion Parallax in Stereo 3D: Model and Applications. ACM Transactions on Graphics (Proc. SIGGRAPH Asia 2016), 35(6), 2016.

[KGB14] Kane, David; Guan, Phillip; Banks, Martin S: The limits of human stereopsis in space and time. The Journal of Neuroscience, 34(4):1397–1408, 2014.

[Kh16] Khosla, Aditya; Krafka, Kyle; Kellnhofer, Petr; Kannan, Harini; Bhandarkar, Suchi; Matusik, Wojciech; Torralba, Antonio: Eye Tracking for Everyone. In: IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Las Vegas, USA, June 2016.

[La09] Lambooij, Marc; IJsselsteijn, Wijnand; Fortuin, Marten; Heynderickx, Ingrid: Visual Discomfort and Visual Fatigue of Stereoscopic Displays: A Review. J. Imaging Sci. Technol., 53(3):1, 2009.

[Le16] Leimkühler, Thomas; Kellnhofer, Petr; Ritschel, Tobias; Myszkowski, Karol; Seidel, Hans-Peter: Perceptual real-time 2D-to-3D conversion using cue fusion. In: Proceedings of the 2016 Graphics Interface Conference. GI '16. Canadian Information Processing Society, 2016.

[Mu13] Muryy, Alexander A.; Welchman, Andrew E.; Blake, Andrew; Fleming, Roland W.: Specular reflections and the estimation of shape from binocular disparity. Proc. of the National Academy of Sciences, 110(6):2413–2418, 2013.

[NS09] Nawrot, Mark; Stroyan, Keith: The motion/pursuit law for visual depth perception from motion parallax. Vision Research, 49(15):1969–1978, 2009.

[Sh11] Shibata, Takashi; Kim, Joohwan; Hoffman, David M.; Banks, Martin S.: The zone of comfort: Predicting visual discomfort with stereo displays. J. Vision, 11(8):11, 2011.

[TSF02] Thompson, William B.; Shirley, Peter; Ferwerda, James A.: A spatial post-processing algorithm for images of night scenes. J. Graph. Tools, 7(1):1–12, 2002.



Petr Kellnhofer wurde am 26. Januar 1988 in Tschechien geboren. Von 2007 bis 2012 studierte er Informatik mit Schwerpunkt Computergrafik an der Westböhmischen Universität in Pilsen. Im Jahr 2012 erhielt er seinen Abschluss als Master (Ing.) mit der Abschlussarbeit "Non-rigid Transformations for Musculoskeletal Model", die von Doc. Josef Kohout betreut wurde. Von 2012 bis 2016 war er Doktorand im Bereich Computergrafik an der Universität des Saarlandes und dem Max-Planck-Institut für Informatik in Saarbrücken unter der Leitung von Prof. Karol Myszkowski und Prof. Hans-Peter Seidel. Sein Forschungsinteresse sind die menschliche Wahrnehmung, stereoskopisches 3D und Computergrafikanwendungen. Während seiner Promotion publizierte er in internationalen Konferenzen und Zeitschriften und erhielt den "Best Student Paper Award" für die Arbeit "A Transformation-Aware Perceptual Image Metric" [Ke15c] und den "Best Student Paper Award" für die Arbeit "Perceptual real-time 2D-to-3D conversion using cue fusion" [Le16]. Während eines Forschungsaufenthaltes am MIT CSAIL untersuchte er neuartige Displays unter der Leitung von Prof. Wojciech Matusik. Er verteidigte seine Dissertation "Perceptual modeling for stereoscopic 3D" im November 2016. Seit 2017 ist er Postdoktorand in der Gruppe von Prof. Matusik am MIT CSAIL.

Rekonfigurierbare Beschleuniger in der Welt von allgemeinen Rechenaufgaben[1]

Tobias Kenter[2]

Abstract: Rekonfigurierbare Beschleuniger, sogenannte FPGAs, sind schon lange als eine vielversprechende Architektur bekannt, die durch Anpassung an vielfältige Aufgaben hohe Rechenleistung und Effizienz erreichen kann. Dennoch werden sie bisher kaum für allgemeine Rechenaufgaben, sondern vorwiegend für Spezialaufgaben eingesetzt. In der vorgestellten Dissertation analysieren wir diese Diskrepanz und arbeiten Möglichkeiten und Herausforderungen, insbesondere bei der produktiven Anwendungsentwicklung für FPGAs, heraus. Die eigenen Beiträge dieser Arbeit konzentrieren sich vorwiegend auf den Bereich von FPGA-Overlay-Architekturen und kombinieren analytische Untersuchungen mit konkreten Lösungsansätzen und Implementierungen. So wird einerseits erstmalig der Performance-Unterschied zwischen Overlay-Lösungen und vollständig problemspezifischen FPGA-Schaltungen umfassend quantifiziert. Andererseits stellen wir automatisierte Übersetzungswerkzeuge für ein solches Overlay, verbesserte Laufzeitsysteme für Beschleuniger und eine höchst genaue Stereokorrespondenzberechnung mit FPGA-Beschleunigung vor. Vielbeachtete aktuelle Trends beim kommerziellen Einsatz rekonfigurierbarer Beschleuniger unterstreichen die hohe Relevanz unserer Arbeiten.

1 Einführung

Der Bedarf an immer höherer Rechenleistung für wachsende und neu aufkommende Rechenlasten und Märkte ist eine Herausforderung für die Rechnerarchitektur. Grenzen bei der Leistungsaufnahme und sinkende Geschwindigkeitszuwächse durch größere und zunehmend parallele Prozessoren machen Architekturinnovationen notwendig. Durch Effizienzsteigerungen und individuell angepasste Parallelität können spezialisierte Beschleuniger dazu beitragen die Rechenleistung für bestimmte Rechenlasten zu erhöhen. Ohne Programmierbarkeit fehlt ihnen jedoch die Flexibilität für allgemeine Rechenaufgaben (General-purpose computing) und sie können somit nicht davon profitieren, Kosten auf verschiedene Nutzungsszenarien und Märkte zu verteilen. Die Architektur von FPGAs (Field Programmable Gate Arrays), einer bestimmten Variante programmierbarer Logikbausteine, kombiniert Programmierbarkeit mit einem hohen Potenzial zur Spezialisierung für verschiedene Rechenlasten.

Das größte Hindernis zu breiterer Nutzung von FPGAs als Rechenbeschleuniger ist der Mangel an produktiven Formalismen und Werkzeugen für Anwendungsentwickler. Für spezielle Rechenlasten, deren Performance- oder Effizienzziele anders nicht erreicht werden können, wurden mit hohem Aufwand technisch ausgefeilte Lösungen mit FPGAs entwickelt [He07]. Für allgemeinere Rechenaufgaben kann ein solcher Aufwand häufig nicht

[1] Englischer Titel der Dissertation: „Reconfigurable Accelerators in the World of General-Purpose Computing“

[2] Universität Paderborn, kenter@uni-paderborn.de

geleistet werden. Dies gilt insbesondere, wenn die Zielarchitektur nicht, wie es beim Aufkommen von Grafikkarten (GPUs) als Beschleuniger ausnahmsweise der Fall war, bereits in sehr vielen Systemen vorhanden ist. Die FPGA-Hersteller und -Forschungsgemeinde haben einen hohen Aufwand betrieben, die Zugänglichkeit und Produktivität von Programmiermodellen, -sprachen und -werkzeugen zu verbessern. In dieser Dissertation analysieren wir, wie drei komplementäre Ansätze sich gegenseitig so ergänzen können, dass ein Durchbruch für die breite Nutzung von FPGAs als Rechenbeschleuniger möglich ist. Wir konzentrieren uns dabei auf übergelagerte Architekturen auf FPGAs (im Folgenden kurz Overlays). Solche Overlays sind ein vielversprechender Ansatz, die Produktivität bei der FPGA-Nutzung zu erhöhen, waren aber in verschiedenen Aspekten bisher unzureichend verstanden. So stellen wir erstmals eine umfassende Analyse dazu vor, mit welchen Kompromissen bei der erzielten Rechenleistung der Produktivitätsgewinn von instruktionsprogrammierten Overlays einher geht. Zudem leisten wir wesentliche Beiträge zu Fragen der konkreten Codegenerierung für solche Zielarchitekturen, der automatisierten Partitionierung zwischen Beschleunigercode und Programmteilen, die auf einem konventionellen Prozessor verbleiben, sowie der Laufzeitintegration solcher gemischter Ausführungsmodelle.

Das Themengebiet der gemischten Ausführung zwischen konventionellen Hochleistungsprozessoren und FPGA-Beschleunigern betrachten wir darüber hinaus auch aus der Perspektive der Rechnerarchitektur. Eine engere Integration zwischen FPGA und Prozessor hat nämlich einerseits einen großen Einfluss auf die produktive Anwendungsentwicklung für solche Systeme, andererseits aber auch direkte Auswirkungen auf die erzielbare Performance und Effizienz. In dieser Arbeit analysieren wir das Potenzial derartiger Systemintegration und diskutieren, auf welche Weise und in welchem Rahmen wir dieses Potenzial vorhersagen können. Die Herausforderung dabei ist, dass die mit einer Architektur erzielbare Rechenleistung und systemspezifische Anwendungsimplementierungen voneinander abhängen. Nachdem die engere Systemintegration von Grafikbeschleunigern schon seit einiger Zeit verfolgt wird, greift die Industrie diesen Trend inzwischen auch für FPGAs auf.

Im weiteren Verlauf dieses Überblicks werden die insgesamt sieben Kapitel der Dissertationsarbeit in drei Abschnitten und einem Fazit aufbereitet. Zunächst fassen wir in Abschnitt 2 unsere Betrachtungen und Ergebnisse im Bereich von Overlay-Architekturen zusammen. In Abschnitt 3 stellen wir Arbeiten zu Übersetzungs- und Laufzeittechniken für das zuvor genauer betrachtete Overlay und darüber hinaus vor. Abschnitt 4 behandelt die Untersuchungen zur Systemintegration von rekonfigurierbaren Beschleunigern mit konventionellen Prozessoren.

2 Vergleich zwischen Overlay-Lösungen und voller Spezialisierung

In den grundlegenden Betrachtungen dieser Dissertation wird herausgearbeitet, wie die Nutzung von Overlay-Architekturen einen wichtigen Beitrag zur verbreiteten Nutzung von FPGAs für allgemeine Rechenaufgaben leisten kann. Im Vergleich zu hochoptimierten anwendungsspezifischen Bibliotheken ermöglichen Overlays durch geringeren Entwicklungsaufwand, deutlich mehr Anwendungen zu erschließen. Sie liefern somit ein Kaufar-

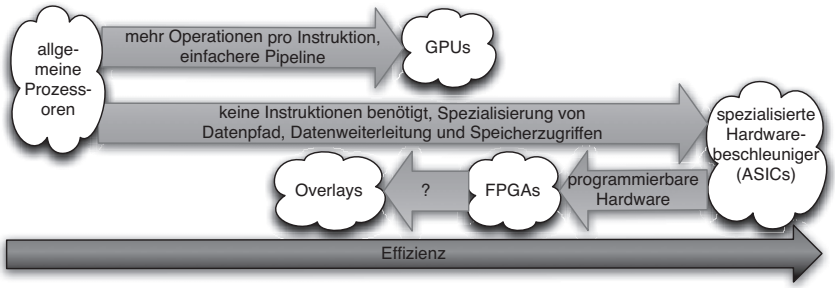


Abb. 1: Qualitative Illustration, wie sich architektonische Ansätze von Beschleunigern auf die Effizienz auswirken. Die Quantifizierung der Performanceauswirkungen von Overlays ist eine zentrale Forschungsfrage in dieser Dissertation.

gument für FPGAs in Systemen, die für ein breites und variables Anwendungsspektrum beschafft werden. Auch im Vergleich zur Synthese von FPGA-Designs aus Hochsprachencode, bei der insbesondere OpenCL als Beschreibungssprache vielversprechend ist, können Overlays den Entwicklungsaufwand deutlich reduzieren und vermeiden insbesondere auch die FPGA-typischen extrem langen Syntheselaufzeiten von einigen Stunden bis hin zu Tagen.

Wir unterscheiden bei den Overlay-Architekturen zwischen Prozessor-ähnlichen instruktionsprogrammierbaren Overlays und strukturell programmier- oder konfigurierbaren Overlays. Für beide Ansätze wurden diverse Architekturen vorgestellt, die ihre Effizienz aus verschiedenen Kombinationen von Parallelität, Pipelining und zielgerichteten Datenzugriffen und -wiederverwendung gewinnen. Diese werden im akademischen Umfeld bereits unter verschiedenen Gesichtspunkten wie Produktivität, Portierbarkeit und Skalierbarkeit untersucht. Insbesondere für instruktionsprogrammierbare Overlays war aber bis zu unseren Arbeiten weitgehend unklar, wie nah die Leistungsfähigkeit solcher Architekturen an die Leistung vollständig spezialisierter FPGA-Implementierungen herankommt. Abbildung 1 illustriert den Kontext dieser Forschungsfrage im Vergleich zu alternativen Beschleunigerarchitekturen.

Zur Beantwortung dieser Frage haben wir eine vielseitige Auswahl von Rechenaufgaben mit identischen Schnittstellen auf einem Overlay-basierten FPGA-System und mit weitreichend spezialisierten FPGA-Designs implementiert. Die Aufgaben sind dabei alle laufzeitintensiven Arbeitsschritte (häufig als Kernels bezeichnet) aus einer Anwendung zur Berechnung der Stereokorrespondenz, was wiederum der wichtigste und aufwändigste Zwischenschritt zur Tiefenberechnung aus einem Paar von Stereobildern ist. Indem wir dem bis vor kurzem qualitativ besten publizierten Algorithmus [Me11] in diesem Bereich folgen, erreichen wir einerseits einen von FPGA-spezifischen Optimierungen unbefangenen Vergleich zwischen Overlay und spezialisierten Kernels, andererseits aber auch die bis dato genaueste Stereoberechnung mit FPGA-Beschleunigung. Andere FPGA-Implementierungen in diesem Bereich (z.B. [Sh14, JM14, Ti14]) passen die Arbeitsschritte und ihre Abfolge unterschiedlich stark an die Zielarchitektur an und erreichen damit

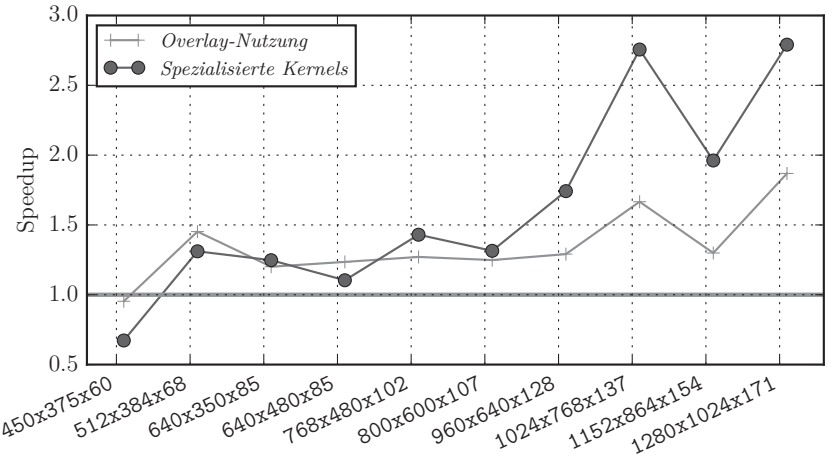


Abb. 2: Geschwindigkeitsvorteile der vollständig integrierten Berechnung der Stereokorrespondenz auf zwei Systemen mit FPGA Beschleunigern. In diesen Messwerten sind alle Zeiten zum Datentransfer und der Rekonfiguration enthalten, sodass die Lösung mit Overlays besonders bei kleinen Eingabegrößen gut abschneidet.

bei reduzierter Ergebnisqualität höhere Performanz oder geringeren Platzbedarf auf dem FPGA.

Bedingt durch die Verfügbarkeit und die Möglichkeiten die jeweiligen Ansätze mit Overlay und spezialisierten Kernels effektiv umzusetzen, wurden die beiden Ansätze auf zwei verschiedenen Zielplattformen realisiert. Die Convey HC-1 mit einem instruktionsprogrammierbaren FPGA-Overlay mit Vektorarchitektur und die Maxeler MPC-X Plattform mit einer eigenen Beschreibungssprache für hochgradig spezialisierte Datenflusskernels stellen zum jeweiligen Anschaffungszeitpunkt modernste Systeme mit performantem Serverprozessor und FPGA-Beschleuniger dar.

Auf beiden Zielplattformen wird die vollständig integrierte Berechnung der Stereokorrespondenz ausgeführt, indem die laufzeitintensiven Kernels auf den jeweiligen FPGA-Beschleuniger ausgelagert werden. Vorbereitende und verwaltende Arbeitsschritte verbleiben auf dem jeweiligen Hauptprozessor. Die in diesem Ausführungsmodell enthaltenen Laufzeiten für Datentransfers, Synchronisation und im Falle der spezialisierten Kerneldesigns auch Rekonfiguration begrenzen die erzielbare Performance. Dennoch überzeugen, in Abbildung 2 illustriert, beide Beschleunigerplattformen für die meisten Eingabegrößen der Anwendung durch Geschwindigkeitsvorteile gegenüber dem leistungsfähigen Hauptprozessor der Maxeler MPC-X Plattform.

Um die konzeptionell bedingten Performance-Unterschiede zwischen der Verwendung eines instruktionsprogrammierbaren Overlays und vollständig spezialisierten FPGA-Designs zu quantifizieren, mussten wir Einflüsse der konkreten Plattformen und ihrer Laufzeitumgebungen herausrechnen. In der Dissertation und in [KSP15] werden diese Schritte ausführlich erläutert. Anschließend kann gezeigt werden, dass die Verwendung des Overlays

im Schnitt etwa einen Faktor 3 weniger isolierte Kernelperformance liefert als vollständig an die Aufgabe angepasste FPGA-Implementierungen. Im Gegenzug sind für das Overlay die Laufzeiten der verwendeten Werkzeuge zur Übersetzung beziehungsweise Synthese um mehrere Größenordnungen kürzer und betragen nur Sekunden anstelle von Stunden oder gar Tagen. Die für einen Mehrwert notwendige hohe Produktivität wird aber nicht allein durch die Werkzeuglaufzeiten erreicht, sondern vor allem durch automatisierte Werkzeuge zur Code- oder Konfigurationsgenerierung für und Auslagerung auf Beschleuniger. Unsere Beiträge dazu werden im folgenden Abschnitt 3 diskutiert.

3 Übersetzungs- und Laufzeittechniken für FPGA-Beschleuniger

In verwandten Arbeiten wurden für verschiedene strukturell programmierbare oder konfigurierbare Overlays schnelle Codegenerierung und hoher Automatisierungsgrad der Werkzeuge bereits demonstriert [CS10, Fe11, Bi13]. Die Auswahl und Auslagerung geeigneter Kernels steht dabei entweder nicht im Vordergrund oder macht sich die enge Kopplung des rekonfigurierbaren Beschleunigers im Datenpfad eines eingebetteten Prozessors zunutze. Für die in Abschnitt 2 untersuchte Overlay-Architektur mit Vektorinstruktionen und die weniger eng gekoppelte Convey HC-1 Plattform war eine hohe Produktivität noch nicht demonstriert. Die verfügbaren Werkzeuge erforderten noch signifikanten Entwicklungsaufwand und schöpften weder die Leistungsfähigkeit noch die Vielseitigkeit des Overlays voll aus [KSP12].

Um die postulierten Produktivitätsvorteile kohärent zu demonstrieren, wollten wir daher für diese Plattform mit dem analysierten Vektor-Overlay Methoden und Werkzeuge präsentieren, die eine vollständig automatisierte Auslagerung auf den FPGA-Beschleunger ermöglichen und bessere Ergebnisse bei der Codegenerierung erzielen. Mit dem in [KVP14] vorgestellten Übersetzungssystem ist uns dies gelungen. Es baut auf der LLVM Compiler Infrastruktur[3] auf und kombiniert existierende und selbstentwickelte Analyse- und Transformationsphasen um zur Auslagerung geeignete Programmteile zu identifizieren und extrahieren. Anschließend generiert das System Beschleunigercode und orchestriert die notwendigen Datentransfers.

Zwischen den technischen Möglichkeiten der Overlay-Architektur und den existierenden Übersetzungswerkzeugen haben wir als wesentliche Lücke für die Produktivität die fehlende Codegenerierung für indirekt über Zeiger angesprochene Datenstrukturen ausgemacht. Im Sinne der Ergebnisqualität haben wir auch die Vektorisierung von äußeren Schleifen untersucht, die nach Vorläufern in der Zeit der Vektorgroßrechner auch auf aktuellen Prozessoren mit sogenannten SIMD-Instruktionen (Single Instruction Multiple Data) wieder aufgegriffen wurde [NZ08].

Neben der korrekten Funktionalität haben wir auch die Auswirkungen verschiedener Programmeigenschaften und Vektorisierungsmethoden anhand von systematisch variierten Schleifen untersucht. Wir unterscheiden zwischen verschachtelten Schleifen, die Vektorisierung der inneren oder äußereren Schleifen erfordern, oder unabhängig sind, zwischen

[3] http://llvm.org/

Tab. 1: Erreichte Performancegewinne als geometrisches Mittel für verschiedene Gruppen von Schleifen. Tiefgestellte Indizes zeigen die Größe der jeweiligen Gruppen. Identische Schleifen sind sowohl im Innen/Außen als auch im Passend/Transponiert Gruppenpaar enthalten.

	Innen	*Außen*	*Passend*	*Transponiert*	*Unabhängig*	Mittel
Array	6.51_{08}	6.67_{08}	13.10_{08}	3.31_{08}	2.05_{08}	4.46_{24}
Zeiger	2.00_{08}	2.01_{08}	2.62_{08}	1.52_{08}	0.88_{06}	1.52_{22}
Mittel	3.60_{16}	3.66_{16}	5.86_{16}	2.25_{16}	1.35_{14}	2.61_{46}

für die Zugriffsfolgen passenden oder transponierten Datenanordnungen und zwischen direkter Adressierung in Arrays und indirekter mit Zeigern. Wie in Tabelle 1 zusammengefasst, kann unser Ansatz für das Overlay für fast alle Gruppen von Schleifen Performancegewinne gegenüber der Ausführung auf einem konventionellen Serverprozessor erzielen. Die Adressierung und Datenanordnung, die wir hier als vom Programm vorgegeben betrachten, haben dabei deutlich größeren Einfluss auf die Performance als die Vektorisierungsmethode.

Eine weitere, hier nicht gezeigte Einflussgröße für das Auslagerungspotenzial ist die Schleifengröße selbst. In diesem Kontext haben wir gezeigt, dass es häufig vorteilhaft ist, konkrete Auslagerungsentscheidungen erst zur Programmlaufzeit zu treffen. Damit können, basierend auf Programmtransformationen zur Übersetzungszeit, wohlinformierte Entscheidungen über die Auslagerung getroffen werden, ohne dass das Programm vorher mit charakteristischen Eingabedaten vermessen werden muss. Dieser Ansatz stellte sich auch für das weitere Umfeld von Laufzeitsystemen [Lö16] für Beschleuniger als sehr vielversprechend heraus [Va14, Va16].

4 Systemintegration von Prozessoren und Beschleunigern

Neben dem Schwerpunkt auf Produktivität zur weiteren Verbreitung von FPGAs, müssen diese auch in etablierte Rechnersysteme und Märkte integriert werden und dazu architektonisch mit allgemeinen Prozessoren zusammenpassen und -arbeiten. Die engere Integration der Komponenten, beispielsweise in eine gemeinsame Speicherhierarchie, wie sie seit einigen Jahren im Bereich der Grafikbeschleuniger verfolgt wird, verspricht dabei nicht nur allgemein höhere Performance und einfachere Nutzung des Beschleunigers, weil zum Beispiel explizite Datentransfers wegfallen. Sie kann auch neue, viel engere Formen der Zusammenarbeit zwischen Prozessor und Beschleuniger ermöglichen. Eine weitblickende Entwurfsplanung für solche Architekturen ist dabei herausfordernd, weil das vollständige Performance-Potenzial einer Architektur nur in Kenntnis des am besten passenden Modells zur Programmpartitionierung und -ausführung bestimmt werden kann.

Zur Untersuchung dieser Fragestellung stellen wir daher ein abstraktes Modell zur Abschätzung von Rechenleistung von gekoppelten Prozessor-Beschleuniger Architekturen vor, das die gegenseitige Abhängigkeit zwischen Architekturen und Programmierentscheidungen berücksichtigt, indem für jede Architekturkonfiguration ein passendes Ausführungsmuster für eine Reihe von Benchmarkprogrammen gefunden wird [Ke11]. Die Ab-

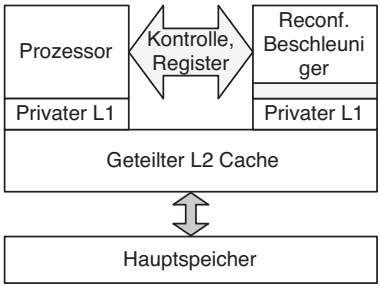
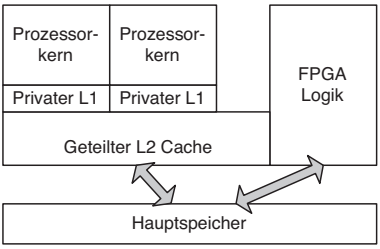


Abb. 3: Beispielarchitektur mit geteiltem L2 Cache und privaten L1 Caches. Die zweiteilige Schnittstelle des Beschleunigers in das System ist gelb hervorgehoben.

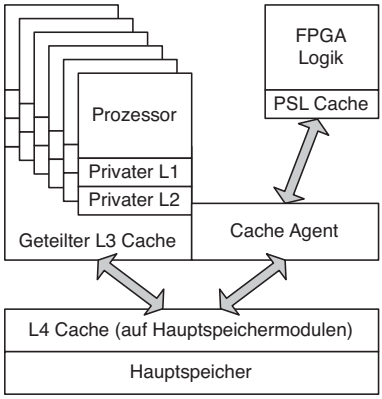
schätzung wird dabei automatisch anhand von Instruktionen und Datenzugriffen vorgenommen. Unser Ansatz ergänzt vorangehende Arbeiten [Sp09] um die Modellierung einer Cachehierarchie und eine bessere Berücksichtigung von Latenzen. Im Gegensatz zu Abschnitt 3 wird hier keine konkrete Codegenerierung vorgenommen. Damit werden Festlegungen auf bestimmte Eigenschaften eines rekonfigurierbaren Beschleunigers vermieden.

Wir erkunden mit dieser Methode den Entwurfsraum für Systeme, in die der Beschleuniger durch eine zweiteilige Schnittstelle integriert ist. Eine direkte Verbindung mit dem Prozessor ermöglicht eine feingranulare Synchronisation und den Austausch von Registerwerten, während weitere Daten über die Einbindung in eine gemeinsame Speicherhierarchie selbständig gelesen und geschrieben werden können. Abbildung 3 stellt eine mögliche Inkarnation dieses Architekturmusters dar. Zur Entwurfsraumexploration variieren wir die Aufteilung der Speicherhierarchie, Latenzen der Kontroll- und Registerschnittstelle, sowie das Potenzial des Beschleunigers selbst. Unsere Ergebnisse zeigen, dass die Speicherintegration mit möglichst enger Kopplung über einen geteilten Cache, sowie zusätzlichem privaten Speicher auf Seiten des Beschleunigers zentral für die Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems ist. Dagegen stellte sich die Latenz der direkten Schnittstelle zum Prozessor als weniger wichtig heraus.

Aktuell scheinen kommerzielle Architekturen diesen Trend zu bestätigen. Beispielhaft illustrieren wir hier in Abbildung 4a die System-on-Chip (SoC) Xilinx Zynq Architektur für eingebettete Systeme, in der eine FPGA-Struktur als Beschleuniger mit einem ARM Cortex-A9 Prozessor gekoppelt wird. Der FPGA hat dabei Zugriff auf den gemeinsamen externen Hauptspeicher durch sogenannte hochperformante Schnittstellen und auf den geteilten L2 Cache durch die Beschleuniger-Kohärenz-Schnittstelle ACP (Accelerator Coherency Port). Ein Zugriff auf Prozessorregister ist dagegen nicht möglich, wohl aber können Interrupts auf dem Prozessor ausgelöst werden. Mit der CAPI (Coherent Accelerator Processor Interface) Schnittstelle bietet nun auch die IBM POWER8 Architektur für hochperformante Server-Prozessoren Unterstützung für Beschleuniger als Teil einer gemeinsamen Speicherhierarchie (Abbildung 4b). Ein Cache-Agent ist dafür im Auftrag des extern durch die PCIe Schnittstelle angeschlossenen Beschleunigers in die Daten- und Koheränzschnittstellen auf dem Prozessorchip integriert. Zum Konzept der Nutzung von FPGA-Beschleunigern mittels CAPI gehört darüber hinaus auch ein privater Cache auf dem FPGA selbst.



(a) Speicherhierarchie der Xilinx Zynq Architektur.



(b) Integration eines Beschleunigers mittels CAPI in die POWER8 Speicherhierarchie.

Abb. 4: Aktuelle Architekturen, die FPGA-Beschleuniger mit Prozessoren koppeln.

5 Fazit

Vielbeachtete aktuelle Entwicklungen und Ankündigungen, wie erstens die milliardenschwere Übernahme[4] von Altera, einem der beiden größten FPGA-Hersteller durch Intel, begleitet von der Ankündigung kombinierter Prozessor-FPGA Produkte, zweitens der großflächige Einbau von FPGAs in Microsofts Rechenzentren[5], und drittens, nach Veröffentlichung dieser Dissertation, die Ankündigung von FPGAs in der Amazon Cloud[6], zeigen mit wie viel Unterstützung rekonfigurierbare Beschleuniger gegenwärtig tatsächlich in Rechenzentren ankommen.

Diese Entwicklung wurde in dieser Dissertation aus architektonischer Sicht, insbesondere aber aus einer Produktivitätsperspektive, eingeordnet und weitere Chancen und Herausforderungen, auch für andere Marktsegmente, dargestellt. Die vorgestellten Ergebnisse zum besseren Verständnis von FPGA-Overlay Architekturen sowie die Werkzeuge und Laufzeitsysteme zur einfacheren Nutzung solcher Overlays und von FPGA-Beschleunigern im allgemeinen können einen entscheidenden Beitrag dazu leisten, dass der Einsatz von FPGAs nicht auf wenige publikumswirksame Erfolgsbeispiele beschränkt bleibt, sondern tatsächlich eine breite Nutzung für allgemeine Rechenaufgaben erfährt.

Eine besondere Qualität dieser Arbeit liegt dabei in der Kombination, auf der einen Seite von Konzepten und Analysen, die den Bereich des Rechnens mit rekonfigurierbaren Beschleunigern insgesamt voran bringen, auf der anderen Seite von konkreten technischen Lösungen, die nicht nur die konzeptuellen Arbeiten validieren, sondern auch für sich genommen im FPGA-Umfeld Anerkennung finden. So wird die Analyse zur Effizienz eines Overlay-Ansatzes begleitet von der bisher genauesten FPGA-gestützten Implementierung

[4] https://newsroom.intel.com/news-releases/intel-completes-acquisition-of-altera/
[5] https://www.wired.com/2016/09/microsoft-bets-future-chip-reprogram-fly/
[6] https://aws.amazon.com/de/ec2/instance-types/f1/

zur Berechnung von Stereokorrespondenz. Eine verbindende Bibliothek zur Speicherverwaltung und austauschbare Implementierungen der laufzeitintensiven Schleifen erlauben es darüber hinaus, die Anwendung auf zwei verschiedenen Beschleunigerplattformen mit unterschiedlichen Laufzeitumgebungen auszuführen. Im Bereich der Übersetzungstechniken für rekonfigurierbare Beschleuniger wird ebenfalls ein konkreter Werkzeugsatz zur automatisierten Auslagerung auf einen FPGA vorgestellt. Gleichzeitig werden aber auch Einflüsse der Daten- und Schleifenanordnung systematisch analysiert. Die Arbeiten zur Systemintegration von FPGA-Beschleunigern schließlich fokussieren sich auf analytische Beiträge. Die Übereinstimmungen mit den aktuellen Entwicklungen bei kommerziellen Produkten unterstreichen aber auch hier die praktische Relevanz.

Wesentliche Ergebnisse, die zu dieser Dissertation geführt haben, wurden in neun Konferenzbeiträgen, einem Workshopbeitrag und zwei Fachzeitschriftenartikeln präsentiert und veröffentlicht. Tobias Kenter ist Hauptbeitragender und erster Autor von sechs dieser zwölf Veröffentlichungen, darunter dem Artikel in einer der beiden wichtigsten Fachzeitschriften im Bereich des rekonfigurierbaren Rechnens [KSP15]. Die Bibliographie dieser Zusammenfassung kombiniert einen Teil dieser Veröffentlichungen mit einigen verwandten Arbeiten in den angesprochenen Teilgebieten.

Literaturverzeichnis

[Bi13] Bispo, João; Paulino, Nuno; Cardoso, João M. P.; Ferreira, João Canas: Transparent Runtime Migration of Loop-Based Traces of Processor Instructions to Reconfigurable Processing Units. Int. Journal of Reconfigurable Computing (IJRC), 2013, 2013.

[CS10] Coole, James; Stitt, Greg: Intermediate fabrics: virtual architectures for circuit portability and fast placement and routing. In: Proc. Int. Conf. on Hardware/Software Codesign and System Synthesis (CODES/ISSS). ACM, New York, NY, USA, S. 13–22, 2010.

[Fe11] Ferreira, R.; Vendramini, J.G.; Mucida, L.; Pereira, M.M.; Carro, L.: An FPGA-based heterogeneous coarse-grained dynamically reconfigurable architecture. In: Proc. Int. Conf. on Compilers, Architecture, and Synthesis for Embedded Systems (CASES). S. 195–204, Oktober 2011.

[He07] Herbordt, M.C.; Van Court, T.; Gu, Yongfeng; Sukhwani, B.; Conti, A; Model, J.; DiSabello, D.: Achieving High Performance with FPGA-Based Computing. IEEE Computer, 40(3):50–57, Marz 2007.

[JM14] Jin, Minxi; Maruyama, Tsutomu: Fast and Accurate Stereo Vision System on FPGA. ACM Transactions on Reconfigurable Technology and Systems (TRETS), 7(1):3:1–3:24, Februar 2014.

[Ke11] Kenter, Tobias; Plessl, Christian; Platzner, Marco; Kauschke, Michael: Performance estimation framework for automated exploration of CPU-accelerator architectures. In: Proc. Int. Symp. on Field-Programmable Gate Arrays (FPGA). ACM, New York, NY, USA, S. 177–180, 2011.

[KSP12] Kenter, Tobias; Schmitz, Henning; Plessl, Christian: Pragma based parallelization – Trading hardware efficiency for ease of use? In: Proc. Int. Conf. on ReConFigurable Computing and FPGAs (ReConFig). IEEE Computer Society, S. 1–6, Dezember 2012.

[KSP15] Kenter, Tobias; Schmitz, Henning; Plessl, Christian: Exploring Trade-Offs between Specialized Dataflow Kernels and a Reusable Overlay in a Stereo Matching Case Study. Int. Journal of Reconfigurable Computing (IJRC), S. 1–24, 2015.

[KVP14] Kenter, Tobias; Vaz, Gavin; Plessl, Christian: Partitioning and Vectorizing Binary Applications for a Reconfigurable Vector Computer. In: Proc. Int. Symp. on Reconfigurable Computing: Architectures, Tools, and Applications (ARC). Springer, April 2014.

[Lö16] Lösch, Achim; Beisel, Tobias; Kenter, Tobias; Plessl, Christian; Platzner, Marco: Performance-centric scheduling with task migration for a heterogeneous compute node in the data center. In: Proc. Design, Automation and Test in Europe Conf. (DATE). 2016.

[Me11] Mei, X.; Sun, X.; Zhou, M.; Jiao, S.; Wang, H.; Zhang, X.: On Building an Accurate Stereo Matching System on Graphics Hardware. In: Proc. ICCV Workshop on GPU in Computer Vision Applications (GPUCV). IEEE, 2011.

[NZ08] Nuzman, Dorit; Zaks, Ayal: Outer-loop vectorization: revisited for short SIMD architectures. In: Proc. Int. Conf. on Parallel Architecture and Compilation Techniques (PACT). PACT '08, ACM, New York, NY, USA, S. 2–11, 2008.

[Sh14] Shan, Yi; Hao, Yuchen; Wang, Wenqiang; Wang, Yu; Chen, Xu; Yang, Huazhong; Luk, Wayne: Hardware Acceleration for an Accurate Stereo Vision System Using Mini-Census Adaptive Support Region. ACM Transactions on Embedded Computing Systems (TECS), 13(4s):132:1–132:24, April 2014.

[Sp09] Spacey, Simon A.; Luk, Wayne; Kelly, Paul H. J.; Kuhn, Daniel: Rapid Design Space Visualization Through Hardware/Software Partitioning. In: Proc. Southern Programmable Logic Conference (SPL). IEEE, S. 159–164, April 2009.

[Ti14] Tippetts, Beau; Lee, Dah Jye; Lillywhite, Kirt; Archibald, James K.: Hardware-Efficient Design of Real-Time Profile Shape Matching Stereo Vision Algorithm on FPGA. Int. Journal of Reconfigurable Computing (IJRC), 2014.

[Va14] Vaz, Gavin; Riebler, Heinrich; Kenter, Tobias; Plessl, Christian: Deferring Accelerator Offloading Decisions to Application Runtime. In: Proc. Int. Conf. on ReConFigurable Computing and FPGAs (ReConFig). IEEE Computer Society, Dezember 2014. Received Best Paper Award.

[Va16] Vaz, Gavin; Riebler, Heinrich; Kenter, Tobias; Plessl, Christian: Potential and Methods for Embedding Dynamic Offloading Decisions into Application Code. Computers & Electrical Engineering, 2016.



Tobias Kenter studierte Informatik an der Universität Paderborn und promovierte ebendort mit Auszeichnung am Lehrstuhl für Hochleistungs-IT-Systeme. In seiner Promotionsarbeit beschäftigte er sich vor allem damit, wie das Effizienzpotenzial rekonfigurierbarer Beschleuniger effektiver für breite Anwendungsfelder erschlossen werden kann. 2014 wurde eine seiner Arbeiten an der ReConFig mit dem Best Paper Award ausgezeichnet. Seit 2016 erforscht Tobias Kenter als Postdoktorand am Paderborn Center for Parallel Computing unter anderem die Skalierbarkeit von parallelen Rechnersystemen mit Beschleunigern. Weiterhin umfassen seine Forschungsinteressen Methoden zur produktiven Nutzung von FPGAs mittels Hochsprachensynthese oder Overlays, Kompromisse zwischen Spezialisierung und Allgemeinheit von Designs, sowie Laufzeitsysteme für Beschleuniger.

HELENA– Handhabung massiver verteilter Systeme mit ELaborierten ENsemble Architekturen [1]

Annabelle Klarl[2]

Abstract: Ensemble-basierte Systeme sind software-intensive Systeme mit einer großen Anzahl an Komponenten, die sich dynamisch zu kleineren, sich möglicherweise überschneidenden zielorientierten Kommunikationsgruppen zusammenschließen. Mit gängigen komponenten-basierten Entwicklungsmethoden können solche Systeme nur durch ein komplexes Modell beschrieben werden, das alle Ensembles und Komponenten gleichzeitig spezifiziert. Die HELENA-Entwicklungsmethodik schlägt vor, ein Ensemble nicht über die teilnehmenden Komponenten zu spezifizieren, sondern über Rollen, die Komponenten im Ensemble annehmen können. Rollen sind die aktiven Teilnehmer eines Ensembles, während Komponenten nur die technischen Ressourcen bereitstellen, um Rollen auszuführen. Die formal fundierte HELENA-Entwicklungsmethodik adressiert die speziellen Herausforderungen von ensemble-basierten Systemen in allen Phasen der Softwareentwicklung.

1 Einführung

Zunehmende Digitalisierung und globale Vernetzung prägen heutige Softwaresysteme. Sie bestehen aus einer großen Anzahl an Softwarekomponenten, die nicht nur auf leistungsstarken Servern, sondern auch auf einfacheren Geräten wie Personal Computern, Laptops oder Smartphones ausgeführt werden. Aufgrund der physischen Verteilung der Komponenten ist verteilte Ausführung eine inhärente Eigenschaft dieser Systeme. Trotzdem ist es oft gewünscht, dass mehrere Komponenten kurzfristig für ein gemeinsames Ziel zusammenarbeiten und sich dynamisch zu Kommunikationsgruppen, *Ensembles*, zusammenschließen. Aus Systemsicht umfasst dabei jedes Ensemble nur einen Teil der Komponenten, die im Gesamtsystem existieren. Im Ensemble selbst übernimmt jede Komponente eine bestimmte Aufgabe; sie spielt eine bestimmte *Rolle* im Ensemble. Sie kann allerdings auch (nacheinander oder gleichzeitig) mehrere Aufgaben bzw. Rollen in einem oder mehreren Ensembles übernehmen.

Die "Science Cloud Platform" (SCP) [KMH14], eine Fallstudie des EU-Projekts ASCENS [Wi15] verdeutlicht die Hauptcharakteristika eines ensemble-basierten Systems (EBS):

(1) Ein EBS baut auf einem großen verteilten, möglicherweise heterogenen komponenten-basierten System auf: Die SCP basiert auf einem Netzwerk aus vielen verteilten, heterogenen und freiwillig zur Verfügung gestellten Rechenknoten (z.B. in München und Berlin, Deutschland, sowie Lucca und Palermo, Italien). Im Gegensatz zu anderen Cloud Computing Plattformen können die Knoten nicht nur leistungsstarke Server, sondern auch Personal Computer, Laptops oder Smartphones sein.

[1] Englischer Titel der Dissertation: "HELENA– Handling massively distributed systems with ELaborate ENsemble Architectures"

[2] Ludwig-Maximilians-Universität-München, klarl@pst.ifi.lmu.de

(2) Komponenten schließen sich dynamisch zu (möglicherweise überlappenden) Ensembles zusammen, in denen sie durch Interaktion ein gemeinsames Ziel erreichen: Als Platform-as-a-Service Lösung ermöglicht die SCP einem Benutzer, Anwendungen bereitzustellen, auszuführen und zu verwenden. Pro Anwendung arbeiten dazu mehrere Knoten des zugrunde liegenden Netzwerks zusammen.

(3) In einem Ensemble müssen verschiedene Aufgaben erledigt werden: In der SCP bedarf die Anwendungsverwaltung vier verschiedener Aufgaben. Die Anwendung muss verfügbar gemacht, gespeichert, ausgeführt und Anfragen verarbeitet werden.

(4) Komponenten übernehmen Aufgaben im Ensemble, indem sie gewisse Rollen spielen. Welche Komponenten welche (möglicherweise mehrere) Rollen spielen, wird dynamisch zur Ausführungszeit bestimmt: Beispielsweise dient ein Laptop in Lucca dazu, die gewünschte Anwendung in der SCP verfügbar zu machen. Ein Münchner Personal Computer mit großen Speicherressourcen legt den Bytecode der Anwendung ab, während ein leistungsstarker Server in Berlin die Rechenressourcen hat, um die Anwendung auszuführen. Ein Wissenschaftler in Palermo stellt mittels seines Smartphones eine Anfrage an die ausgeführte Anwendung. Die Zusammensetzung des Ensembles kann sich pro verwalteter Anwendung ändern. Ein Rechenknoten könnte sogar mehrere Aufgaben gleichzeitig übernehmen, z.B. der Server in Berlin die Datenspeicherung sowie die Ausführung.

1.1 Zielsetzung

Es stellt sich die Frage, wie ensemble-basierte Systeme (EBS) systematisch entwickelt werden können. Eine spezielle Spezifikationstechnik soll es erlauben, Ensembles, Rollen und deren zielorientiertes Verhalten unabhängig von, aber gleichzeitig aufbauend auf der zugrunde liegenden komponenten-basierten Plattform zu beschreiben. Ferner soll sie unterstützen, dass Komponenten dynamisch an Ensembles teilnehmen und daher dynamisch eine oder mehrere Rollen annehmen können. Aufbauend auf der formalen Semantik einer Ensemblespezifikation sollen Ensembleziele präzise formuliert und deren Erfüllbarkeit formal verifiziert werden können. Eine systematische Übersetzung der Spezifikation zu lauffähigem Code soll es ermöglichen, das EBS auszuführen, während die Konzepte von Ensembles und Rollen im generierten Code erhalten bleiben sollen. Zusätzlich soll der Entwickler eines EBS in allen Entwicklungsschritten durch eine ganzheitliche Methodik mit systematischen Übergängen zwischen allen Phasen unterstützt werden. Werkzeuge zur Spezifikation, Verifikation und Implementierung sowie Transformatoren zwischen den jeweiligen Artefakten sollen die Entwicklungsarbeit erleichtern.

1.2 Die HELENA-Entwicklungsmethodik

Die Dissertation [Kl16] präsentiert die HELENA-Entwicklungsmethodik zur systematischen Umsetzung von dynamisch gebildeten Ensembles. Sie bedient sich des Konzepts von Rollen, um die Teilnehmer eines Ensembles unabhängig von den zur Verfügung stehenden Komponenten zu definieren und sie den Komponenten dynamisch zuzuweisen.

Im ersten Schritt der HELENA-Entwicklungsmethodik (siehe Abb. 1) wird das Domänenmodell des EBS als Ensemblestruktur modelliert. Es beschreibt die Eigenschaften und Fähigkeiten aller Teilnehmer bzw. Rollen im Ensemble und deren strukturelle Beziehungen. Basierend auf dem Domänenmodell werden die Ziele des Ensembles als Formeln in linearer temporaler Logik (LTL) angegeben. Das dynamische Verhalten des EBS wird mit Bedacht auf die Ensembleziele als eine Menge von Rollenverhalten entworfen. Zusammen mit der Ensemblestruktur bilden diese Rollenverhalten das HELENA-Entwurfsmodell. Um zu zeigen, dass das Verhalten der Rollen im Kontext der Ensemblestruktur die spezifizierten Ziele erreicht, wird das HELENA-Entwurfsmodell gegen seine Ziele verifiziert. Dafür werden die Ziele und das Entwurfsmodell nach PROMELA übersetzt, der Eingabesprache für den Model-Checker Spin [Ho03]. Die Erfüllbarkeit der Ensembleziele wird in dem erzeugten PROMELA-Verifikationsmodell geprüft. Um eine Ausführung des verifizierten Entwurfsmodell zu ermöglichen, wird die Java-Bibliothek jHELENA zur Verfügung gestellt. Sie setzt alle HELENA-Konzepte in Java um und erlaubt daher die direkte Realisierung eines HELENA-Entwurfsmodells. Beide Übersetzungen, von HELENA zu PROMELA und zu jHELENA, werden durch automatisierte Generatoren unterstützt.

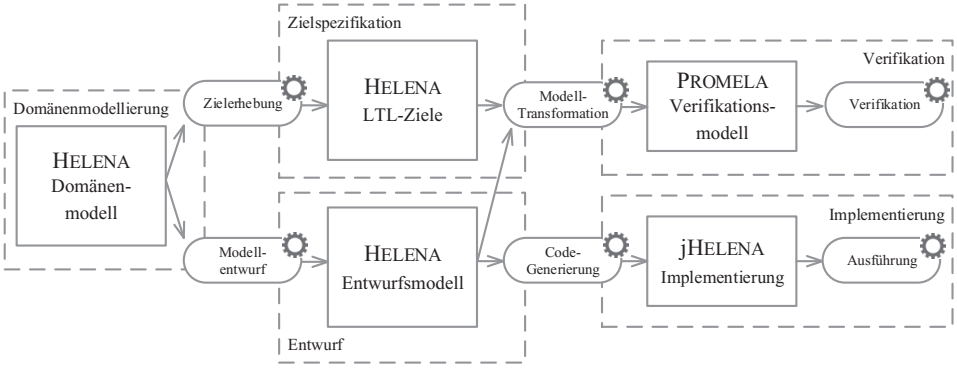


Abb. 1: Die HELENA-Entwicklungsmethodik für ensemble-basierte Systeme

1.3 Verwandte Arbeiten

Die HELENA-Entwicklungsmethodik ergänzt und führt Methoden und Techniken aus drei Wissenschaftsbereichen zusammen. Klassische komponenten-basierte Entwicklungsansätze wie [AG97] oder [MK96] beschreiben Komponenten sowie deren Komposition und Interaktion. Sie sind allerdings nicht ausreichend, um die Dynamik von EBS vollständig auszudrücken. Sie bieten kein explizites Modellierungskonzept für Ensembles und Rollen. Design und Analyse können daher nicht auf eine Gruppe von interagierenden Komponenten fokussiert und die unterschiedlichen Aufgaben in einem Ensemble nicht getrennt von den ausführenden Komponenten beschrieben und dynamisch zugewiesen werden. Ensemble-basierte Ansätze wie SCEL [De14] oder DEECo [Bu13] erweitern komponenten-basierte Ansätze um Zugehörigkeitsprädikate. Ein solches Prädikat bestimmt dynamisch anhand der Eigenschaften von Komponenten, welche Komponenten ein Ensemble bilden. Die Beschreibung der Architektur eines Ensembles ist jedoch nicht mög-

lich. Die HELENA-Entwicklungsmethodik erweitert komponenten-basierte und ensemble-basierte Ansätze um das Konzept von Rollen. Rollen erlauben nicht nur die dynamische Bildung von Ensembles über eine dynamische Zuweisung von Rollen an Komponenten, sondern ermöglichen auch die Beschreibung von Architektur und Teilnehmern eines Ensembles unabhängig von den zugrunde liegenden Komponenten. Im Gegensatz zu anderen Rollenmodellen [St00, Kü14] ist eine Rolle in HELENA eine aktive Entität, die ein zielorientiertes Verhalten hat und nur in einem bestimmten Kontext, dem Ensemble, existiert.

2 HELENA-Ensemblespezifikationen

Zur Modellierung der Domäne eines EBS und dem anschließenden Entwurf einer Lösung verwenden wir HELENA-Ensemblespezifikationen. Sie stellen Konzepte zur Verfügung, um zu beschreiben, welche Rollen von welchen Komponenten übernommen werden können und wie Rollen in einem Ensemble zusammenarbeiten.

Ensemblestrukturen Wir betrachten zunächst den strukturellen Aufbau eines Ensembles, die Ensemblestruktur. Eine Ensemblestruktur baut auf einer Menge von *Komponententypen* auf, z.B. dem Komponententyp `Node` in Abb. 2, der einen Rechenknoten im SCP-Netzwerk repräsentiert. Ein Komponententyp kann Assoziationen zu Komponententypen haben, z.B. die Assoziation `neighbor` des Komponententyps `Node`, die den Nachbar eines SCP-Knotens speichert. Komponentenattribute repräsentieren Kerninformationen, die für alle Rollen, die eine Komponente annehmen kann, von Bedeutung sind, z.B. das Attribut `memSize`, das die zur Verfügung stehende Speicherkapazität des SCP-Knotens angibt. Außerdem stellt ein Komponententyp Operationen zur Verfügung, die von Rollen aufgerufen werden können, z.B. die Operation `printResponse` (nicht gezeigt), die die Antwort auf eine Anfrage an einen SCP-Knoten ausgibt.

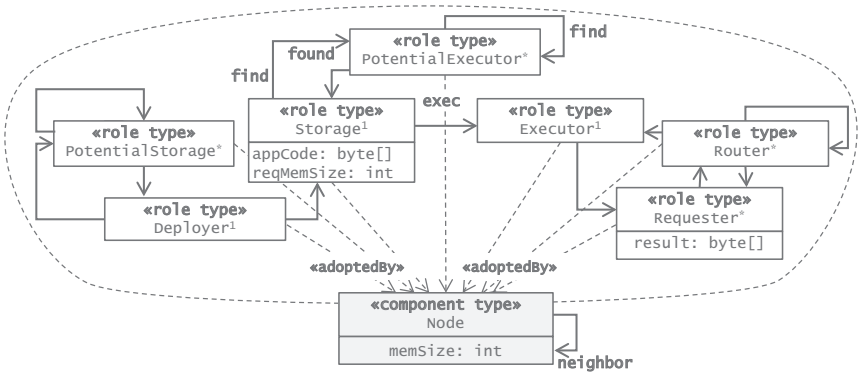


Abb. 2: Ensemblestruktur für SCP Fallstudie

Rollentypen repräsentieren die verschiedenen Arten von Teilnehmern eines Ensembles. Ein Rollentyp ist ein Tupel (*rtnm*, *rtcomptypes*, *rtattrs*, $rtmsgs_{out}$, $rtmsgs_{in}$): *rtnm* ist der Name des Rollentyps; die Menge *rtcomptypes* gibt an, von welchen Komponententypen dieser Rollentyp angenommen werden kann; die Menge *rtattrs* von Rollenattributen er-

möglicht die Speicherung von Informationen, die allein für den Rollentyp relevant sind; die Mengen $rtmsgs_{in}$ und $rtmsgs_{out}$ beschreiben die Nachrichten, die der Rollentyp senden und empfangen kann. Eine *Ensemblestruktur* definiert, welche Rollentypen und wie viele Instanzen jedes Typs zusammenarbeiten müssen. Wir nehmen an, dass zwischen zwei Rollentypen die Nachrichten ausgetauscht werden können, die von einem Rollentyp gesendet und vom anderen empfangen werden können. In der SCP-Fallstudie arbeiten sieben Rollentypen zusammen, die alle von Komponenten vom Typ `Node` gespielt werden können (siehe Abb. 2). Beispielsweise kann eine Rolle vom Typ `Storage` den Byte-Code der auszuführenden Anwendung im Attribut `appCode` und die Speicheranforderungen zur Ausführung der Anwendung im Attribut `reqMemSize` speichern. Sie kann die Nachricht `find` an eine Rolle vom Typ `PotentialExecutor` senden, um einen Knoten zu finden, der die Speicheranforderungen zur Ausführung der Anwendung erfüllt. Von dieser Rolle kann die Rolle vom Typ `Storage` die Nachricht `found` erhalten, sobald ein passender Knoten gefunden wurde. An diesen passenden Knoten in der Rolle `Executor` kann die Rolle vom Typ `Storage` schließlich die Aufforderung `exec` zur Ausführung der Anwendung senden.

Rollenverhalten Das Verhalten für einen Rollentyp geben wir als Prozessausdruck an. Ein Prozessausdruck wird aus Termination `quit`, Aktionspräfix $a.P$, nicht-deterministischer Auswahl $P_1 + P_2$, `if-then-else`-Ausdruck und Prozessaufruf `P` gebildet. Aktionen sind Erzeugung (`create`) und Wiederauffinden (`get`) einer Rolleninstanz, Senden (`!`) und Empfangen (`?`) einer Nachricht, Setzen von Rollen- und Komponentenattributen und Aufrufen einer Operation einer Komponente. Zu Verifikationszwecken können Zustandsmarkierungen eingeführt werden, um einen gewissen Fortschritt im Rollenverhalten zu markieren.

Ensemblespezifikationen Ein komplettes Ensemble mit seiner Struktur und seinem dynamischen Verhalten wird durch eine *Ensemblespezifikation* beschrieben. Sie besteht aus einer Ensemblestruktur und einem Rollenverhalten pro Rollentyp in der Ensemblestruktur.

Semantik Um die Zweiteilung von EBS in Komponenten und Rollen auszudrücken, wird die Semantik von Ensemblespezifikationen durch spezielle markierte Transitionssysteme (LTS) repräsentiert. Ein solches LTS beschreibt den Übergang von einem Ensemblezustand zu einem anderen durch Ausführung einer Aktion. Ein Ensemblezustand gibt einerseits an, welche Komponenten gerade welche Daten speichern, und andererseits, welche Rollen gerade von welchen Komponenten gespielt werden und sich in welchem Kontrollzustand gemäß ihres Verhaltens befinden. Übergänge zwischen Ensemblezuständen werden durch Aktionen von Rollen initiiert. Strukturell-operationelle Semantikregeln legen fest, welche Übergänge zwischen zwei Ensemblezuständen erlaubt sind, z.B. eine Nachricht kann nur zwischen zwei Rollen ausgetauscht werden, wenn die eine Rolle sie senden und die andere sie empfangen kann. Besonderheit der Semantikregeln ist eine erneute Zweiteilung: Die erste Ebene beschreibt, welche Übergänge für eine Rolle in Isolation erlaubt sind, während die zweite Ebene das Zusammenspiel zwischen Rollen festlegt.

3 Spezifikation von Zielen für HELENA-Ensemblespezifikationen

Die Rollen eines Ensembles arbeiten zusammen, um globale Ziele zu erfüllen. Ein Ziel ist eine temporale Eigenschaft, die entweder irgendwann während der Ausführung des

Ensembles erreicht (“achieve goal”) oder während der gesamten Ausführung des Ensembles aufrecht erhalten werden soll (“maintain goal”). Wir drücken Ensembleziele daher durch Formeln in linearer temporaler Logik (LTL) aus. Als atomare Propositionen verwenden wir Kontrollzustand-Propositionen und Attribut-Propositionen. Eine *Kontrollzustand-Proposition* $rt[i]@label$ ist erfüllt, wenn die Rolleninstanz i vom Typ rt einen durch $label$ markierten Zustand in ihrem Rollenverhalten erreicht hat. Eine *Attribut-Proposition* ist ein boolescher Ausdruck und wird aus Ausdrücken der Form $rt[i]{:}attr$ oder $ct[i]{:}attr$, Konstanten und den üblichen arithmetischen und relationalen Operatoren gebildet. Ein Ausdruck $rt[i]{:}attr$ (oder $ct[i]{:}attr$) beschreibt den Wert des Attributs $attr$ für die Rolleninstanz i vom Typ rt (oder für die Komponenteninstanz i vom Typ ct). LTL-Formeln zur Spezifikation von Ensemblezielen werden induktiv aus obigen Propositionen sowie den üblichen propositionalen und temporalen Operatoren gebildet und ihre Semantik wie üblich definiert.

In der SCP-Fallstudie soll ein Ensemble u.A. das Ziel erreichen, dass die Anwendung auf einem Knoten ausgeführt wird, der die nötigen Speicherressourcen hat (falls existent). In LTL formulieren wir das Ziel, wie folgt (da LTL keine Quantoren bietet, müssen alle Knoten im SCP-Netzwerk explizit aufgezählt werden):

$$(Node[1]{:}memSize \geq Storage{:}reqMemSize \vee Node[2]\ldots) \Rightarrow \Diamond(Node[1]{:}isExecuting \vee Node[2]\ldots)$$

4 Verifikation von Zielen für HELENA-Ensemblespezifikationen

Um die Erfüllbarkeit von Ensemblezielen in einer Ensemblespezifikation automatisiert zu verifizieren, verwenden wir den Model-Checker Spin [Ho03]. Wir übersetzen die HELENA-Ensemblespezifikation und deren Ziele nach PROMELA, der Eingabesprache für Spin, und verifizieren die übersetzten Artefakte mit Spin. PROMELA ist insbesondere gut als Zielsprache für die Übersetzung geeignet, da sie dynamische Prozesserzeugung (analog zu dynamischer Rollenerzeugung in HELENA) und asynchronen Nachrichtenaustausch (analog zu asynchronem Nachrichtenaustausch zwischen Rollen in HELENA) unterstützt. Um zu zeigen, dass die Model-Checking-Ergebnisse auf die ursprüngliche HELENA-Ensemblespezifikation übertragen werden können, beweisen wir, dass HELENA und PROMELA die gleiche Menge an LTL-Formeln erfüllen.

Übersetzung In HELENA sind Komponenten lediglich passive Entitäten, die ihre Speicher- und Rechenressourcen zur Verfügung stellen, während Rollen als aktive Entitäten ein zielorientiertes Verhalten ausführen. Um diese zweischichtige Modellierungsidee nach PROMELA zu übersetzen, werden Komponenten und Rollen zwar beide durch Prozesse in PROMELA ausgedrückt, aber haben unterschiedliche Kommunikationsfähigkeiten und Verhalten. Der Prozess für eine Komponente ist ein langlebiger Prozess, der nicht aktiv mit anderen Prozessen kommunizieren kann. Er wartet nur auf Anfragen von seinen angenommen Rollen (z.B. zur Rollenerzeugung oder Operationsaufruf), führt interne Berechnungen aus und antwortet entsprechend. Im Gegensatz dazu ist der Prozess für eine Rolle kurzlebig und repräsentiert das aktive zielorientierte Verhalten einer Rolle. Dabei wird Termination zu `false` übersetzt, Aktionspräfix zu sequentieller Komposition, nicht-deterministische Auswahl zu einer nicht-deterministischen `if`-Anweisung, der `if-then-else`-Ausdruck zu einer deterministischen `if`-Anweisung und Prozessaufruf zu einer `goto`-Anweisung. Senden und Empfangen von Nachrichten zwischen Rollen wird durch Nachrichtenaustausch

auf dedizierten Kanälen der entsprechenden Prozesse in PROMELA ausgedrückt; die Erzeugung und das Wiederauffinden von Rollen sowie Operationsaufruf werden vom entsprechenden Komponentenprozess verarbeitet.

Äquivalenzbeweis Bei der Übersetzung müssen einige HELENA-Prozessausdrücke und -Aktionen durch mehrere Anweisungen in PROMELA ausgedrückt werden. Beispielsweise wird in HELENA in einem einzigen Schritt eine neue Rolle erzeugt und eine Referenz auf die neu erzeugte Rolle in einer lokalen Variable gespeichert. In PROMELA wird hingegen zunächst ein neuer Kanal zum Nachrichtenempfang für die Rolle erzeugt und in einer lokalen Variable gespeichert. Anschließend wird ein neuer Prozess für die Rolle gestartet und ihm die Referenz auf den Kanal übergeben. Daher stellt sich die Frage, ob eine HELENA-Ensemblespezifikation und ihre PROMELA-Übersetzung semantisch äquivalent sind. In [Kl16] beweisen wir Stotterpfad-Äquivalenz für vereinfachte Varianten von HELENA und PROMELA. Diese Stotterpfad-Äquivalenz zeigt, dass zusätzliche Aktionen in PROMELA zwar die möglichen Verzweigungen eines Verhaltens einschränken, aber nicht die Belegung von atomaren Propositionen. Sie garantiert deshalb, dass beide Spezifikationen die gleichen LTL-Formeln erfüllen (falls der *next*-Operator nicht verwendet wird). Somit kann für solche Formeln das Model-Checking-Ergebnis von PROMELA nach HELENA übertragen werden.

Anwendung Für die SCP-Fallstudie können wir u.A. die Erfüllbarkeit des Ziels aus Abs. 3 mit Spin zeigen. Allerdings müssen wir bereits bei drei zugrunde liegenden Knoten im SCP-Netzwerk auf approximative Model-Checking-Methoden zurückgreifen. Die Größe des Suchraums übertrifft schon mit 18 parallelen Prozessen eine Speicherkapazität von 32 GB. Abhilfe könnte eine effizientere Übersetzung oder eine Abstraktion von der zugrunde liegenden komponenten-basierten Plattform schaffen.

5 Implementierung von HELENA-Ensemblespezifikationen

Um eine HELENA-Ensemblespezifikation implementieren und ausführen zu können, wird die prototypische Java-Bibliothek jHELENA zur Verfügung gestellt. jHELENA repräsentiert alle HELENA-Konzepte, wie Komponenten, Rollen und Ensembles, in Java. Dabei werden Rollen als Java Threads umgesetzt. Sie sind an ein bestimmtes Ensemble gebunden, während die darunter liegenden Komponenten mehrere Rollen in verschiedenen, parallel laufenden Ensembles annehmen können.

Die prototypische Implementierung dient zwei Zielen: Zum Einen zeigt jHELENA, wie die strukturellen und dynamischen Regeln der formalen HELENA-Modellierungskonzepte in einer objekt-orientierten Sprache umgesetzt und ausführbar gemacht werden können. Zum Anderen bietet jHELENA eine Programmierschnittstelle für Entwickler, um ensemblebasierte Anwendungen zu implementieren. Diese beiden Ziele werden durch eine zweischichtige Architektur mit einem orthogonalen Systemmanager adressiert (siehe Abb. 3):

Die `metadata`-Schicht erlaubt es dem Entwickler, das Metamodell einer Ensemblespezifikation zu definieren. Instanzen der `metadata`-Klassen repräsentieren die verschieden Arten von Typen (Komponenten- und Rollentypen, Ensemblestrukturen, ...),

die in einer Ensemblespezifikation auftreten. Eine Ensemblestruktur wird somit als Netzwerk von Objekten dargestellt, das gemäß der Regeln für Ensemblestrukturen gebildet wird.

Die `developer interface`-Programmierschnittstelle enthält abstrakte Basisklassen zur Implementierung von Komponenten-, Rollen- und Ensembleinstanzen. Während der Umsetzung einer konkreten ensemble-basierten Anwendung erweitert der Entwickler diese Basisklassen (z.B. mit `C1`, `C2`, `C3`, `R1`, `R2`, `E` in Abb. 3) und implementiert insbesondere das Verhalten jeder teilnehmenden Rolle. Die jHELENA-Bibliothek sorgt dafür, dass das Rollenverhalten gemäß der strukturellen Regeln für HELENA-Prozessterme implementiert und gemäß der HELENA-Semantik ausgeführt wird.

Der Systemmanger `SysManager` ist dafür verantwortlich, eine konkrete ensemble-basierte Anwendung zu konfigurieren und zu starten. Er erzeugt Komponenten, baut Ensemblestrukturen auf und startet konkrete Ensembles gemäß ihrer Struktur auf der zugrunde liegenden komponenten-basierte Plattform.

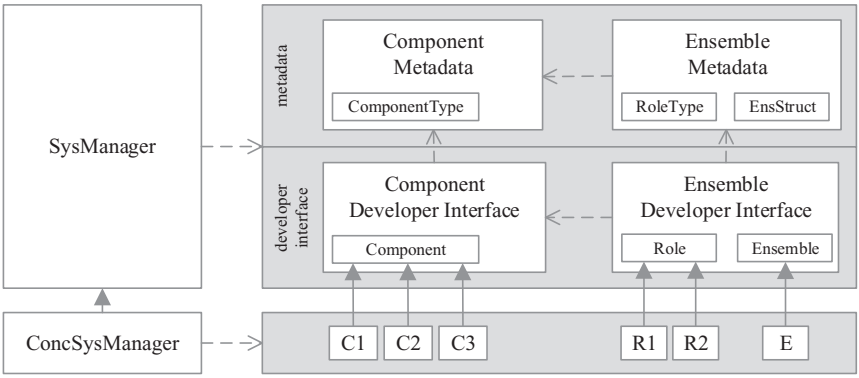


Abb. 3: Architektur der Java-Bibliothek jHELENA

Dank der jHELENA-Bibliothek kann die SCP-Fallstudie folgend ihrer Spezifikation in HELENA modular implementiert werden. Die sieben Rollen der HELENA-Ensemblespezifikation aus Abb. 2 werden durch sieben Klassen mit nur 1200 LOC sowie weiteren 400 LOC in Klassen für Nachrichten umgesetzt. Zusätzlich wird jHELENA um einige SCP Technologien für robusten Nachrichtenaustausch und Datenspeicherung erweitert. Mit dieser modularen Implementierung ist es möglich die SCP-Fallstudie mit 100 verteilten Knoten auszuführen und gleichzeitig mehrere Ensembles auf der SCP zu starten.

6 HELENA-Workbench

Um den Entwickler eines EBS bei der Spezifikation, Verifikation und Implementierung sowie insbesondere bei den Übergängen zwischen den einzelnen Phasen zu unterstützen, bieten wir ein passendes Entwicklungswerkzeug an: die HELENA-Workbench. Sie erweitert die Eclipse-Entwicklungsumgebung um einen HELENA-spezifischen Editor, an den

automatische Code-Generatoren zu PROMELA und Java angeschlossen sind. Der Editor bietet eine umfangreiche Entwicklungsunterstützung mit Syntaxhervorhebung, Autovervollständigung und Validierung gemäß der domänenspezifischen Sprache HELENATEXT, die als konkrete Syntax für HELENA-Ensemblespezifikationen dient. Die systematischen Übersetzungsregeln von HELENA zu PROMELA und Java bilden die Grundlage für zwei regelbasierte Code-Generatoren. Sie garantieren eine korrekte (teilweise bewiesene) Übersetzung einer HELENA-Ensemblespezifikation zu einem PROMELA-Verifikationsmodell und einer ausführbaren Implementierung gemäß der Java-Bibliothek jHELENA.

7 Zusammenfassung und Ausblick

HELENA [Kl16] ist eine Methodik mit Techniken und Werkzeugen zur systematischen Entwicklung von ensemble-basierten Systemen. Ein Ensemble bildet die strukturelle Einheit, in der mehrere Rollen kollaborieren, um ein gemeinsames Ziel zu erreichen. Jede Rolle führt dazu ein zielorientiertes Verhalten aus. Komponenten können dynamisch an einem Ensemble teilnehmen, indem sie eine oder mehrere Rollen im Ensemble annehmen. Alle Spezifikationselemente wurden formal definiert und mit einer rigorosen Semantik versehen. Dies erlaubt die formale Definition von Ensemblezielen und deren Erfüllbarkeit. Zur automatisierten Verifikation von Zielen in einer Ensemblespezifikation wurde eine Übersetzung nach PROMELA und die Verwendung des Model-Checkers Spin vorgeschlagen. Die Korrektheit dieses Ansatzes wurde mit Hilfe von Stotterpfad-Äquivalenz zwischen HELENA und PROMELA bewiesen. Zur Implementierung und Ausführung einer Ensemblespezifikation wurde die prototypische Java-Bibliothek jHELENA entwickelt. Sie stellt alle HELENA-Konzepte als Programmierschnittstelle für einen Entwickler bereit und setzt die HELENA-Semantik der Ausführung eines ensemble-basierten Systems um. Der Entwickler erhält mit der HELENA-Methodik eine Richtlinie zur systematischen Entwicklung von ensemble-basierten Systemen und wird in allen Phasen durch ein einheitliches Entwicklungswerkzeug, der HELENA-Workbench, unterstützt.

Für die Weiterentwicklung von HELENA bieten sich ihre Anwendung auf andere Arten von Systemen sowie die Erweiterung ihrer Ausdrucksmächtigkeit an. Beispielsweise wurde in [Kl16] bereits gezeigt, dass das Konzept von Rollen auf Komponenten angewendet werden kann, die sich an eine dynamische Umgebung anpassen. Eine wünschenswerte Erweiterung wäre die Integration von adaptiven Komponenten in Ensembles, die sich gemeinsam an die Umgebung anpassen. Weiterhin wäre es interessant, HELENA auf Domänen mit unsicheren Effekten von Aktionen auszuweiten. Im Zusammenspiel mit künstlicher Intelligenz könnte Verhalten unter Zuhilfenahme von Rollen generiert werden.

Literaturverzeichnis

[AG97] Allen, Robert; Garlan, David: A Formal Basis for Architectural Connection. ACM Transactions on Software Engingeering and Methodology, 6(3):213–249, 1997.

[Bu13] Bures, Tomas; Gerostathopoulos, Ilias; Hnetynka, Petr; Keznikl, Jaroslav; Kit, Michal; Plasil, Frantisek: DEECO: An Ensemble-based Component System. In: International

ACM SIGSOFT Symposium on Component-based Software Engineering. ACM, S. 81–90, 2013.

[De14] De Nicola, Rocco; Loreti, Michele; Pugliese, Rosario; Tiezzi, Francesco: A Formal Approach to Autonomic Systems Programming: The SCEL Language. ACM Transactions on Autonomous and Adaptive Systems, 9(2):1–7, 2014.

[Ho03] Holzmann, Gerard: The Spin Model Checker: Primer and Reference Manual. Addison-Wesley, 2003.

[Kl16] Klarl, Annabelle: HELENA– Handling massively distributed systems with ELaborate ENsemble Architectures. Dissertation, Ludwig-Maximilians-Universität München, November 2016.

[KMH14] Klarl, Annabelle; Mayer, Philip; Hennicker, Rolf: Helena@Work: Modeling the Science Cloud Platform. In: International Symposium On Leveraging Applications of Formal Methods, Verification and Validation. Jgg. 8373 in Lecture Notes in Computer Science. Springer, S. 99–116, 2014.

[Kü14] Kühn, Thomas; Leuthäuser, Max; Götz, Sebastian; Seidl, Christoph; Aßmann, Uwe: A Metamodel Family for Role-Based Modeling and Programming Languages. In: International Conference on Software Language Engineering. Jgg. 8706 in Lecture Notes in Computer Science. Springer, S. 141–160, 2014.

[MK96] Magee, Jeff; Kramer, Jeff: Dynamic Structure in Software Architectures. In: ACM SIGSOFT Symposium on Foundations of Software Engineering. Jgg. 21. ACM, S. 3–14, 1996.

[St00] Steimann, Friedrich: On the Representation of Roles in Object-Oriented and Conceptual Modelling. Elsevier Data and Knowledge Engineering, 35(1):83–106, 2000.

[Wi15] Wirsing, Martin; Hölzl, Matthias; Koch, Nora; Mayer, Philip: Software Engineering for Collective Autonomic Systems, Jgg. 8998 in Lecture Notes in Computer Science. Springer, 2015.



Annabelle Klarl wurde 1986 in München geboren. Während ihres Bachelorstudiums der Bioinformatik beschäftigte sie sich mit der computergestützten Analyse und Verwaltung von Genomdaten. Für das Masterstudium und ihre anschließende Promotion wechselte sie zum Fachgebiet Software Engineering. In ihrer Dissertation an der Ludwig-Maximilians-Universität München entwickelte sie eine systematische Methodik zur Entwicklung von großen verteilten Systemen, in denen sich autonome Komponenten dynamisch zu zielorientierten Gruppen, so genannten Ensembles, zusammenschließen. Als wissenschaftliche Mitarbeiterin war sie an dem EU-Projekt ASCENS beteiligt, konnte ihre wissenschaftliche Expertise als Keynote-Sprecherin auf der VAO 2015 (Workshop on View-Based, Aspect-Oriented and Orthographic Software Modelling) in L'Aquila, Italien vermitteln und evaluierte als Mitglied des Programm-Komitees für DAS@ICAC 2015, DAS@ICAC 2016 und LASSY 2017 Einreichungen zum Thema Adaptive Systeme. Darüber hinaus stellte sie ihre Lehrbefähigung durch die Betreuung und teilweise Neukonzeption von sechs verschiedenen Lehrveranstaltungen unter Beweis.

Neue Wahrscheinlichkeitsmodelle und Inferenz-Techniken für Kontextinformationen im World Wide Web[1]

Christoph Kling[2]

Abstract: Thema meiner Dissertation ist die Erkennung von Mustern in Web-Dokumenten mit Metadaten. Schwerpunkt der Arbeit sind sogenannte *Topic Models*. Mithilfe von Topic Models können automatisch Themen in großen Dokumentensammlungen erkannt werden. Dokumente aus dem Web sind oft mit Metadaten wie etwa Zeitstempeln versehen, die den *Kontext* beschreiben, in denen diese erstellt wurden. Diese Kontextinformationen können die Themen-Erkennung durch Topic Models verbessern oder sogar erst ermöglichen. Außerdem erlauben sie die Analyse von Zusammenhängen zwischen Kontext und Themen, etwa an welchen Orten welche Themen populär sind.

In meiner Arbeit werden neuartige Topic Models vorgestellt, die die Einbeziehung von (fast) beliebigen Kontextinformationen erlauben, messbar die Qualität der erkannten Themen verbessern und aufgrund ihrer Struktur eine effiziente Inferenz ermöglichen. Zudem sind die Parameter der Modelle interpretierbar und können auch komplexe Zusammenhänge zwischen Kontext und Themen aufdecken, die mit bisherigen Modellen nicht erkannt werden können.

1 Einleitung

Dokumente aus dem Word Wide Web sind in fast allen Fällen mit Metadaten versehen. Seien es Zeitstempel, Ortsinformationen oder Nutzernamen – fast immer finden sich Informationen über den **Kontext** in dem eine Nachricht verfasst, ein Bild aufgenommen oder ein Nutzerprofil angelegt wurde.

Eine der wichtigsten Analysemethoden für Web-Dokumente ist die Erkennung von Themen mit sogenannten **Topic Models**. Diese erkennen häufig zusammen auftretende Wörter, welche als Themen interpretiert werden können. Moderne Topic Models nutzen Kontextinformationen um die Erkennung von Themen zu verbessern oder sogar erst zu ermöglichen. Zudem erlauben sie die Analyse von Zusammenhängen zwischen Kontext und Themen – etwa die Entwicklung der Popularität von Themen über die Zeit.

Mit der Einbeziehung von Kontextinformationen in Topic Models sind mehrere Fragestellungen verbunden: **(i) Generalisierbarkeit.** Wie kann ein Topic Model beliebige Kontextinformationen berücksichtigen (etwa lineare Zeitinformationen, GPS-Koordinaten auf der Erde oder diskrete Informationen – wie das Geschlecht des Verfassers einer Nachricht), ohne dass das Modell dafür speziell angepasst werden muss? **(ii) Flexibilität.** Zusammenhänge zwischen Kontextinformationen und Themen sind oft komplex – Normalverteilungen oder lineare Zusammenhänge sind in der Regel nicht ausreichend, um die

[1] Englischer Titel der Dissertation: "Probabilistic Models for Context in Social Media: Novel Approaches and Inference Schemes"

[2] GESIS – Leibniz-Institut für Sozialwissenschaften, Christoph.Kling@gesis.org

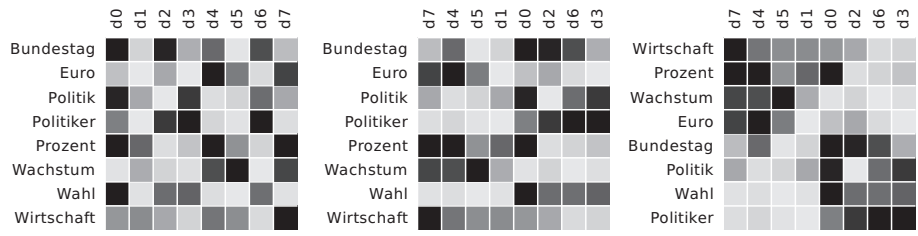


Abb. 1: **Schema der Funktionsweise von Topic Models.** Abb. (a) zeigt eine Dokument-Wort-Matrix (DWM): Zeilen entsprechen Wörtern, Spalten Dokumenten. Zellen zeigen die Häufigkeit der Wörter in Dokumenten, wobei dunklere Felder höhere Worthäufigkeiten bedeuten. Abb. (b) zeigt die Matrix nach Gruppierung ähnlicher Dokument-Wort-Spalten, Abb. (c) nach anschließender Gruppierung ähnlicher Wort-Dokument-Zeilen. Die gefundenen Muster werden von Topic Models genutzt.

Beziehungen zu modellieren. Wie können komplexe Zusammenhänge modelliert werden, ohne etwa unrealistische Unabhängigkeitsannahmen einzuführen? **(iii) Interpretierbarkeit.** Wie kann sichergestellt werden, dass die Modellparameter interpretierbar sind und dass die Funktionsweise der Modelle für Menschen nachvollziehbar und auf Plausibilität überprüfbar ist? **(iv) Skalierbarkeit.** Dokumenten-Sammlungen aus sozialen Medien können erhebliche Ausmaße annehmen. Wie kann die Modellstruktur der Topic Models so gestaltet werden, dass eine effiziente Inferenz möglich ist? **(v) Benutzerfreundlichkeit.** Wie kann die Implementierung gestaltet werden, so dass auch Nicht-Informatiker komplexe Dokumentensammlungen verarbeiten können?

In meiner Arbeit zeige ich, wie Mischungen von Dirichlet-Prozessen für die Modellierung von (fast) beliebigen Kontext-Informationen genutzt werden können. Diese bieten als erste Modelle sowohl eine hohe Generalisierbarkeit und Flexibilität als auch eine direkte Interpretierbarkeit der Modellparameter. Zusätzlich erlaubt die Modellstruktur eine effiziente Inferenz, die in meiner Arbeit vorgestellt wird.

Im Folgenden wird zunächst die grundlegende Funktionsweise von Topic Models und Hierarchischen Dirichlet-Prozessen (HDP) erklärt. Anschließend werden Beiträge aus meiner Dissertation vorgestellt: **Die neuartige Modellierung von Kontextinformationen** in probabilistischen Modellen mittels Kontext-Clustern und nachbarschafts-basiertem Informationsaustausch. Und **eine neue Generalisierung von HDPs, der Hierarchische Multi-Dirichlet Prozess (HMDP)**, der den Informationsaustausch zwischen Clustern ermöglicht. Schließlich werden die Modellierung von Kontexten in HMDP Topic Models und Einsatzmöglichkeiten an Beispielen beschrieben.

2 Verwandte Arbeiten aus dem Berech Topic Modelling

Die Grundidee hinter Topic Models ist die Erkennung von häufig gemeinsam vorkommenden Worten. Beispielsweise könnte eine Analyse von vielen Zeitungsartikeln ergeben, dass die Wortmenge {*Bundestag, Politik, Wahl, Politiker*} und die Wortmenge {*Euro, Prozent,*

Wachstum, Wirtschaft} jeweils häufig gemeinsam in Artikeln vorkommen. Diese Mengen an gemeinsam auftretenden Wörtern werden *Topics* genannt.

Um diese Topics zu erkennen, werden Dokumente meist als ungeordnete Mengen von Wörtern betrachtet. Ein Topic Model versucht nun anhand der Wortmengen Dokumente, die ähnliche Worte enthalten sowie Wörter, die ähnliche Häufigkeiten in den Dokumenten aufweisen, zu denselben Topics zuzuweisen. Abbildung 1 zeigt die Repräsentation einer Dokumentensammlung als Dokument-Wort-Matrix (DWM) und wie eine Neugruppierung die Erkennung von Topics erlaubt.

Frühe Topic Models basierten tatsächlich auf der direkten Mustererkennung in Dokument-Wort-Matrizen.Allerdings sind die Ergebnisse dieser Methoden schwer interpretierbar und erlauben keine Erweiterung des Modells – etwa für Kontextinformationen. Mittlerweile werden hauptsächlich probabilistische Modelle zur Themenerkennung eingesetzt. Diese erkennen für jedes Dokument eine Wahrscheinlichkeitsverteilung über Topics (mit welcher Wahrscheinlichkeit enthält ein Dokument ein gegebenes Topic?) und für jedes Topic eine Wahrscheinlichkeitsverteilung über alle Wörter (mit welcher Wahrscheinlichkeit kommt ein Wort in einem Dokument zu einem Topic vor?). Dokumente können zu mehreren Topics gehören, und eine Wort kann in mehreren Topics eine hohe Wahrscheinlichkeit besitzen (etwa bei Mehrdeutigkeiten).

2.1 Latent Dirichlet Allocation

Das populärste Topic Model ist *Latent Dirichlet Allocation* (LDA) [BNJ03], ein Modell bei dem die Dokument-Topic-Verteilung und die Topic-Wort-Verteilung einer symmetrischen Dirichlet-Verteilung (alle Topics / Wörter sind a-priori gleich wahrscheinlich) mit niedrigen Parametern folgen. Niedrige Dirichlet-Parameter bedeuten, dass Dokumente a-priori jeweils nur wenige Topics enthalten sollen und dass Topics nur wenigen Wörtern eine hohe Wahrscheinlichkeit zuordnen sollen. Praktisch bedeutet das, dass die Trennschärfe bei der Topic-Erkennung besser wird und Mehrdeutigkeiten besser erkannt werden. Das probabilistische Modell von LDA ist wie folgt:

1) Jedes Topic $k \in K$ wird durch eine multinomiale Topic-Wort-Verteilung ϕ_k repräsentiert, welche aus einer symmetrischen Dirichlet-Verteilung mit Parameter β gezogen wird:
$\phi_k \sim Dir(\beta)$

2) Jedes Dokument $m \in M$ wird durch eine multinomiale Dokument-Topic-Verteilung θ_m repräsentiert. Jede Dokument-Wort-Verteilung θ_m wird aus einer symmetrischen Dirichlet-Verteilung mit Parameter α gezogen:
$\theta_m \sim Dir(\alpha)$

3) Für jedes Wort $w_{mi},\ i \in N_m$ in Dokument m (Länge N_m) wird ein Topic-Index z_{mi} aus θ_m gezogen und anschließend das Wort w_{mi} aus dem Topic mit Index z_{mi} gezogen:
$z_{mi} \sim \theta_m; \qquad w_{mi} \sim \phi_{z_{mi}}$

Die Topics können visualisiert werden, indem pro Topic ϕ_k die Wörter mit der höchsten Wahrscheinlichkeit in einer Tabelle dargestellt werden (siehe Tab. 1 auf Seite 8).

2.2 Hierarchische Dirichlet-Prozesse

Eine Einschränkung von LDA ist, dass die Anzahl der Topics K festgelegt werden muss, bevor die Topics gelernt werden. Betrachtet man das Beispiel aus Abb. 1(c), so sieht man, dass in dem Datensatz zwei Topics sinnvoll erkannt werden können. Würde man LDA mit $K = 3$ auf diesen Daten lernen, so würde ein "überflüssiges" Topic erkannt, das kaum zur Erklärung der Dokumente beiträgt.

Um die Anzahl der Topics während der Inferenz zu erkennen, werden Hierarchische Dirichlet-Prozesse (HDP) eingesetzt [Te06]. Dirichlet-Prozesse (DP) sind stochastische Prozesse, deren Realisierungen Verteilungen über Wahrscheinlichkeitsverteilungen sind. Im Fall von Topic Models ergeben Dirichlet-Prozesse Verteilungen über unendlich viele Topics (welche wiederum diskrete Verteilungen über Wörter sind). Formal:

$$G_0 \sim \mathrm{DP}(\gamma, H); \qquad \gamma \in \mathbb{R}^{>0}; \qquad H = Dir(\beta) \tag{1}$$

wobei G_0 die Verteilung über unendlich viele Topics ist, H eine Dirichlet-Verteilung über alle möglichen Topics und γ ein Parameter, der die Ungleichverteilung der Wahrscheinlichkeiten über die Topics beeinflusst. Teilt man die unendlich vielen Topics in Partitionen $A_1, \ldots, A_N$, so folgt die Verteilung über die Topics in den Partitionen einer Dirichlet-Verteilung – eine Eigenschaft, die namensgebend für den Prozess ist:

$$(G_0(A_1), \ldots, G_0(A_N)) \sim Dir(\gamma H(A_1), \ldots, \gamma H(A_N)) \tag{2}$$

Der Dirichlet-Prozess führt typischerweise zu sehr ungleich verteilten Wahrscheinlichkeiten: Wenige Topics bekommen viel Gewicht. Die Intuition hinter dieser Eigenschaft kann durch die Metapher eines Chinese Restaurant-Prozesses dargestellt werden, der in Abb. 2 schematisch abgebildet und beschrieben ist.

Würde man für jedes Dokument Topics aus dem gerade beschriebenen DP ziehen, so würde jedes Dokument eigene Topics verwenden. Um gemeinsame Topics von Dokumen-

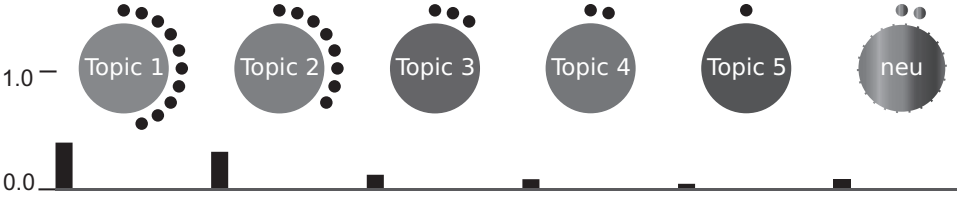


Abb. 2: **Chinese Restaurant-Prozess (CRP).** Der CRP ist eine Metapher für den Dirichlet-Prozess (DP) mit Parametern γ und H. In ein chinesisches Restaurant mit unendlich vielen Tischen kommen Kunden. Jeder neue Kunde setzt sich an einen Tisch, mit einer Wahrscheinlichkeit proportional zu der Anzahl der Kunden, die bereits am jeweiligen Tisch sitzen; Alternativ setzt er sich mit einer Wahrscheinlichkeit proportional zu dem Skalierungs-Parameter γ (hier $\gamma = 2$) an einen neuen Tisch. Jeder Tisch entspricht einer Ziehung aus der Basisverteilung H. Im Fall von Topic Models wird ein neues Topic gezogen. In der Abbildung haben bereits 24 Kunden das Restaurant betreten. Wird dieser Vorgang unendlich oft wiederholt, folgen die Wahrscheinlichkeiten der Tischwahl für neue Kunden (hier dargestellt durch Balken) der Verteilung eines Dirichlet-Prozesses.

ten zu finden, wird eine Ziehung des gerade beschriebenen Dirichlet-Prozesses als Basismaß für einen darunterliegenden, dokument-spezifischen Dirichlet-Prozess verwendet. Jedes Dokument m zieht also für jedes seiner Wörter w_{mi} ein Topic ϕ_{mi} (eine Multinomialverteilung) aus einem eigenen Dirichlet-Prozess mit Skalierungs-Parameter α_0:

$$G_m \sim \mathrm{DP}(\alpha_0, G_0); \qquad \phi_{mi} \sim G_m; \qquad w_{mi} \sim \phi_{mi} \tag{3}$$

Da das Basismaß G_0 eines jeden DP viel Gewicht auf wenige Topics verteilt, wiederholt sich die Wahl des Topics ϕ_{mi}, d.h. unterschiedliche Dokumente verwenden (mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit) gleiche Topics. Die optimale Anzahl an global verfügbaren Topics unter den Modellannahmen wird dann während der Parameter-Inferenz herausgefunden.

2.3 Topic Models mit Kontextinformationen

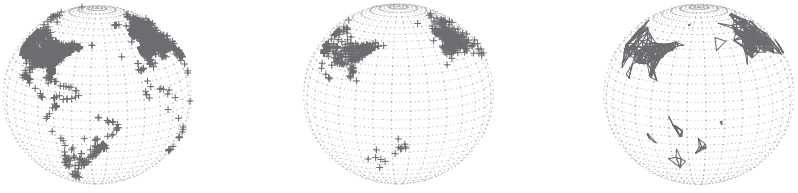
Typische Kontextinformationen für Dokumente aus sozialen Medien sind Zeitstempel, Nutzerinformationen und geographische Koordinaten (etwa die Position, von der aus ein Photo gemacht wurde, oder der Wohnort eines Nutzers). Absolute Zeitstempel beinhalten dabei immer auch Informationen über die Position auf dem Tages- Wochen- und Jahreszyklus. Klassische Kontext-Topic Models werden speziell an den zu bearbeitenden Datensatz angepasst, so dass Wahrscheinlichkeitsverteilungen über die verfügbaren Kontextvariablen (etwa geographische Variablen oder Zeitstempel) hinzugefügt werden. Dieses Vorgehen hat zwei große Nachteile: **i) Die erstellten Modelle sind nur für den gegebenen Datensatz und Datensätze mit identischen Informationen verwendbar** und **ii) Die klassische Modellierung von Kontextvariablen führt unrealistische Annahmen über die Relation zwischen Kontext und Topics ein**. Ein Beispiel für ii) sind Topic Models für geographisch verteilte Dokumente, etwa Fotos mit Tags und GPS-Koordinaten. In [Yi11] werden die Dokumente auf eine zweidimensionale Karte projiziert und mit Topics assoziierte, normalverteilte Regionen über die Daten gelegt. Das Problem ist, dass die Regionen als voneinander unabhängig modelliert werden. Das bedeutet, dass es laut Modell plausibel ist, dass benachbarte Städte völlig unterschiedliche Topicverteilungen haben. In [AHS13] wird daher eine hierarchische Beziehung zwischen den Regionen eingeführt. Dies führt aber auch zu Problemen, da viele geographische Strukturen – etwa Flüsse oder Ländergrenzen – schlecht durch eine Hierarchie aus Normalverteilungen modelliert werden können.

Es existieren bereits Topic Models, die Problem i) behandeln. Diese lernen Regressionen zwischen Kontextinformationen und den beobachteten Topics. Meistzitiertes Beispiel ist [MM08], in dem eine Dirichlet-Multinomiale Regression zwischen Kontext und Topics gelernt wird. Diese Modelle haben zwei Probleme: Erstens können nur Kontextinformationen verwendet werden, die auch Eingabe für eine Regression sein können (also keine geographischen Koordinaten, keine zyklischen Variablen) und zweitens wird ein linearer Zusammenhang zwischen Eingabe und Ausgabe angenommen – eine Annahme, die der Komplexität der Beziehung zwischen Topics und Kontext oft nicht gerecht wird. Erweiterungen wie etwa polynomielle Regressionen führen zu neuen Problemen wie Overfitting oder nicht interpretierbaren Parametern.

3 Hierarchische Multi-Dirichlet-Prozess-Topic Models

Der in meiner Dissertation präsentierte neue Ansatz zur Einbeziehung von Kontext-Informationen *basiert auf einem Clustering der Kontextvariablen und auf Nachbarschaftsbeziehungen*. Die Menge an verfügbaren Daten aus dem Web steigt rasant. Das bedeutet in der Praxis, dass es für viele Kontexte – sprich Orte, Zeitpunkte, usw. – eine große Anzahl von Beobachtungen (Dokumenten) gibt. Daher ist es möglich, Dokumente nach Kontextvariablen zu clustern und dann für jedes Cluster eine cluster-spezifische Topic-Verteilung zu lernen. Wählt man die Anzahl der Cluster hoch genug, können damit auch komplexe Zusammenhänge zwischen Kontext und Topics erkannt werden. Die Anzahl der Cluster wird nur dadurch nach oben beschränkt, dass die Anzahl der enthaltenen Dokumente ausreichen muss, um eine Topic-Verteilung zu bestimmen – wofür in der Praxis ein paar Dutzend Dokumente genügen. Die gefundenen Cluster wären nun unabhängig voneinander. Um Abhängigkeiten zwischen den Clustern herzustellen, werden *Topics zwischen benachbarten Clustern ausgetauscht*. Der Austausch von Topics basiert auf Hierarchischen Multi-Dirichlet-Prozessen und wird im nächsten Abschnitt beschrieben.

Das Clustering von Dokumenten nach Kontextvariablen ist unkompliziert: Für Zeitstempel reicht oft ein einfaches Binning, für geographische Daten können – wie in meiner Dissertation beschrieben – Mises-Fisher-Verteilungen auf der Sphäre [Fi53] auf die Daten angepasst werden, wobei wieder DPs eingesetzt werden können, um die Anzahl der Cluster zu lernen. Und für diskrete Kontexte, wie etwa das Geschlecht eines Nutzers oder eine Nutzer-ID, entsprechen die Cluster direkt den diskreten Ausprägungen der Variablen. Nachbarschaftsbeziehungen zwischen Variablen sind oft leicht zu finden: Existiert eine Ordnung (etwa bei Zeitinformationen oder zyklischen Variablen) so wird jedes Cluster mit dem direkten vorherigen und dem direkt nächsten Cluster in der Ordnung (falls vorhanden) verbunden. Für geographische Cluster kann eine beliebige Nachbarschaftsbeziehung definiert werden, wobei in meiner Arbeit die parameterfreie Delaunay-Triangulierung verwendet wird. Ergebnis ist ein geographisches Netzwerk aus Cluster-Zentroiden. Ein Beispiel für ein Clustering und eine Delaunay-Triangulierung von geographisch verteilten Dokumenten wird in Abb. 3 dargestellt. Um cluster-spezifische Topic-Verteilungen zu lernen, wird der Hierarchische Dirichlet-Prozess um eine Ebene erweitert: Jedes Dokument m zieht seine Verteilung über Topics G_m^d aus einem cluster-spezifischen DP seines zugeordneten Clusters j mit Skalierungsparameter α_1. Dieser DP hat wiederum die globale



(a) Document-Positionen (b) Geographische Cluster (c) Geographisches Netzwerk

Abb. 3: **Erstellung eines geographischen Netzwerks aus Dokument-Clustern.** (a) zeigt die Positionen von 34,707 Fotos, (b) die Cluster-Zentren und (c) die Delaunay-Triangulierung der Cluster.

Topic-Verteilung als Basismaß. Die globale Topic-Verteilung wird aus einem DP mit Basisverteilung $H \sim Dir(\beta)$ gezogen:

$$G_0 \sim \mathrm{DP}(\gamma, H); \quad G_j^c \sim \mathrm{DP}(\alpha_0, G_0); \quad G_m^d \sim \mathrm{DP}(\alpha_1, G_j^c); \quad \phi_{mi} \sim G_m^d; \quad w_{mi} \sim \phi_{mi}. \tag{4}$$

Um die Nachbarschaftsbeziehungen zwischen Clustern zu modellieren und Informationen über die verwendeten Topics zwischen benachbarten Clustern auszutauschen, habe ich eine Generalisierung von Dirichlet-Prozessen eingeführt, den Hierarchischen *Multi-Dirichlet-Prozess* (MDP). Dieser wird ähnlich zum DP definiert (siehe Gleichung 2). Gegeben P Wahrscheinlichkeitsmaße $G_1, \ldots, G_P$ (*"Eltern-Verteilungen"*) mit den Parametern $\alpha_1, \ldots, \alpha_P \in R^{>0}$. Der $MDP(\alpha_1, \ldots, \alpha_P, G_1, \ldots, G_P)$ ist dann ein Wahrscheinlichkeitsmaß G für dessen Realisierung gilt, dass jede Partitionierung $(A_1, \ldots, A_r)$ der (potentiell unendlichen) Menge an Verteilungen Dirichlet-verteilt ist:

$$(G(A_1), \ldots, G(A_r)) \sim \mathrm{Dir}\left(\sum_{p=1}^{P} \alpha_p G_p(A_1), \ldots, \sum_{p=1}^{P} \alpha_p G_p(A_r)\right) \tag{5}$$

In einem HMDP Topic Model wird über die Dokumente eine Abhängigkeit der Topic-Verteilungen benachbarter Cluster eingeführt. Dazu ziehen Dokumente ihre Topics aus einem MDP, dessen Eltern-Verteilungen aus den *Basisverteilungen des eigenen Clusters sowie der benachbarten Cluster mit Gewichtung* η bestehen. Im Falle von mehreren Kontextvariablen werden die *Basisverteilungen der verschiedenen Kontexte mit einer Gewichtung* ζ gemischt. Formal wird die Basisverteilung eines Dokuments dann aus dem folgenden MDP erstellt:

$$G_m^d \sim MDP(\alpha_1 \zeta \eta, G^c); \qquad \zeta \sim \mathrm{Dir}(\varepsilon); \qquad \eta_{fi} \sim \mathrm{Dir}(\delta_f) \tag{6}$$

wobei der Parameter $\alpha_1 \zeta \eta$ eine Abkürzung für die Gewichte der Eltern-Verteilungen ist, α_1 der Skalierungsparameter und G^c die Menge an Eltern-Verteilungen, die wie in Gleichung 4 gezogen werden. Die Gewichtung der Einflüsse von benachbarten Clustern η_{fi} für das $i$te Cluster in Kontext f sowie die Gewichtung der Kontexte ζ werden jeweils aus Dirichlet-Verteilungen mit Parametern ε und δ_f gezogen. Diese Parameter können gelernt werden. Ein Fixpunkt-Schätzer für den Parameter η_{fi} (für wechselnde Anzahlen von Eltern-Verteilungen) wird in meiner Dissertation gegeben.

Für das Lernen der Topics wird eine neue Form der sogenannten *practical stochastic variational inference* [Bl13] für HMDPs hergeleitet. Hierfür zeige ich, wie die dokument- und cluster-spezifischen Topic-Verteilungen G^d und G^c sowie die Mischungsverhältnisse der Kontext-Cluster ζ und η herausintegriert werden können. Hierdurch müssen lediglich die Topic-Zuweisungen der Wörter und die globale Topicverteilung gelernt werden, was die Inferenz deutlich beschleunigt und ein optimiertes verteiltes Berechnen ermöglicht.

4 Anwendungsbeispiele

Dass Topic Models von Kontextinformationen profitieren, lässt sich leicht anhand von sehr kurzen Dokumenten zeigen. Ein Beispiel sind Bilder aus Fotocommunities, die oft

nur einen einzelnen Tag enthalten. *Ohne Kontextinformationen würden hier keine Topics gefunden, mit Kontextmodellen können selbst in Sammlungen von Dokumenten mit jeweils nur einem Wort Topics gefunden werden* [Kl14].

Um die Vorteile des Nachbarschafts-Austauschs von Topics aus Gleichung 6 zu demonstrieren, wurden unter anderem geographisch verteilte, verschlagwortete Fotos von Speisen mit dem HMDP-Topic Model analysiert. Der Datensatz stammt aus dem Paper zu LGTA, dem meistzitierten geographischen Topic Model für regional unterschiedliche Topicverteilungen [Yi11]. In Abb. 1 sieht man am Beispiel der Verteilung des Topics "seafood", dass der *HMDP die komplexe geographische Verteilung von Topics besser erkennt* und dass die *Topics semantisch kohärenter* sind. Diese Beobachtung konnte in mehreren Datensätzen anhand von Vorhersageproblemen gemessen werden.

Zusätzlich wurde eine Nutzerstudie mit 31 Teilnehmern durchgeführt. Um die Qualität der Topics zu messen, wurden pro Topic die fünf Wörter mit der höchsten Wahrscheinlichkeit mit einem fremden Wort vermischt [Ch09]. Aufgabe der Teilnehmer war es, das fremde Wort zu finden. Für Topics von LGTA gelang das in verschiedenen Experimenten bei 57%-67% der Fälle. Bei HMDP-Topics bei 79-82%. Das bedeutet, dass der HMDP besser in der Lage ist, semantisch zusammenhängende Worte als Topics zu identifizieren [Ch09, Kl14].

Die Struktur von HMDP-Topic Models erlaubt nicht nur eine verbesserte Topic-Erkennung, sie ermöglicht auch die *Analyse der Zusammenhänge zwischen Kontextvariablen und Topics*. Dabei können nicht nur komplexe geographische Muster, sondern auch Muster jedes beliebigen Kontextes, etwa über die Zeit beobachtet werden. Dazu können die Topicwahrscheinlichkeiten pro Kontext-Cluster j direkt aus der Verteilung G_j^c abgelesen werden. Als Beispiel wurden in meiner Dissertation alle Emails der Linux-Kernel-Mailingliste seit 1995 analysiert. Dabei wurde herausgefunden, dass es professionelle Topics gibt, die im Wochenzyklus an Werktagen eine höhere Auftretenswahrscheinlichkeit besitzen: Abb. 4 zeigt beispielhaft die Verteilung für das Topic *driver, clock, control, register, device*.

Sind mehrere Kontextvariablen verfügbar, so lernt das HMDP-Topic Model eine *Gewichtung der Kontextvariablen* ζ nach ihrer Vorhersagekraft für die Topics des Modells. Warum

Tab. 1: **Topics von LGTA [Yi11] und dem HMDP [Kl14].** Die Topics des HMDP wurden geordnet, so dass ein Vergleich mit LGTA möglich wird. Die Karte zeigt Dokumentpositionen für Topic 1. LGTA kann im Unterschied zum HMDP den komplexen Verlauf der Küste in Italien nicht modellieren und findet daher dort keine Dokumente zu Topic 1.

	Topic 1	Topic 2	Topic 3	Topic 4	Topic 5	Topic 6	Topic 7	Topic 8	Karte für Topic 1
LGTA	fish	chocolate	japanese	vegetarian	wine	chinese	mexican	sushi	
	seafood	cheese	sushi	vegan	italian	chicken	bbq	thai	
	rice	bread	ramen	chocolate	coffee	noodles	chicken	korean	
	shrimp	fish	fish	baking	french	soup	burger	japanese	
	crab	wine	noodle	bread	pizza	rice	sandwich	salmon	
	lobster	tapas	sashimi	cheese	chocolate	vietnamese	fries	rice	
	chicken	orange	noodles	bacon	bakery	dimsum	hamburger	tuna	
HMDP	seafood	chocolate	japanese	salad	wine	chinese	mexican	bbq	
	fish	icecream	sushi	cheese	pizza	thai	tacos	burger	
	lobster	strawberry	fish	tomato	coffee	chicken	taco	fries	
	shrimp	baking	ramen	bread	italian	rice	salsa	hamburger	
	crab	cream	sashimi	chicken	pasta	soup	burrito	grill	
	wine	coffee	rice	fish	cheese	noodles	chicken	chicken	
	salmon	pie	salmon	vegetarian	french	korean	chips	sandwich	

Data: cc-by-SA OSM.org

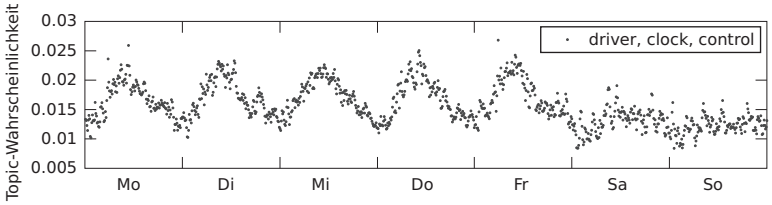


Abb. 4: **Wahrscheinlichkeit eines professionellen Topics in der Linux-Kernel-Mailingliste über den Wochenzyklus.** Die Wahrscheinlichkeit des Topics steigt deutlich zu den Arbeitszeiten.

das eine interessante Information ist, zeige ich anhand von Nutzerprofilen aus einer Online-Community für sexuelle Fetischisten. Die Nutzer der Plattform beschreiben ihre Fetischismen mit frei gewählten Tags, die auch von anderen Profilen kopiert werden können. Insgesamt besteht der Datensatz aus 126.408 Profilen [Fa16], für die Geschlecht, Alter, die Information *ob* der Nutzer in einer Beziehung ist und, falls ja, in welchem Beziehungstyp, die sexuelle Orientierung, Rolle (etwa Herr oder Sklave) und ob der Nutzer Fetish-Events besucht, verfügbar sind. Abb. 5 zeigt, dass Geschlecht, Alter und Sexuelle Orientierung die höchste Vorhersagekraft für die Fetischismen der Nutzer haben. Das ist eine Erkenntnis, die mit herkömmlichen Modellen *nicht* untersucht werden könnte, da eine gegenseitige Abhängigkeit zwischen ζ und den Topics besteht: Wäre ζ anders, würden andere Topics gelernt. Und sähen die Topics anders aus, wäre die Verteilung ζ anders. Nur ein gemeinsames Modell erlaubt eine saubere Analyse.

5 Fazit

Kern meiner Dissertation ist der Hierarchische Multi-Dirichlet-Prozess (HMDP), eine Generalisierung des Hierarchischen Dirichlet-Prozesses. Dieser erlaubt es, beliebige Kontextinformationen (inklusive zyklischer oder geographischer Daten) in probabilistische Modelle zu integrieren, ohne jeweils die Modellstruktur anpassen zu müssen. Alle Parameter des Modells haben eine natürliche Interpretation als Wahrscheinlichkeiten oder Zähler, so dass direkte Visualisierungen und Plausibilitäts-Checks möglich sind. In meiner Arbeit wird eine effiziente Inferenz hergeleitet, mit der auch große Dokumentensammlungen als Datenstrom verarbeitet werden können. Implementierungen aller Modelle mei-

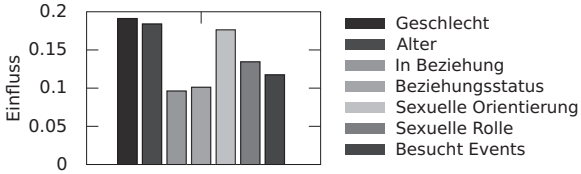


Abb. 5: **Gewichtung demographischer Variablen für den Fetisch-Datensatz.** Dargestellt ist die Wahrscheinlichkeit ζ_f, dass ein Topic aus Cluster-Topic Verteilungen des gegebenen Kontextes f heraus erklärt wird.

ner Dissertation (mit Kommandozeilen-Schnittstelle) sowie Zusatzmaterialien sind unter `http://topicmodels.west.uni-koblenz.de` unter einer freien Lizenz verfübar.

Literaturverzeichnis

[AHS13] Ahmed, Amr; Hong, Liangjie; Smola, Alex: Hierarchical Geographical Modeling of User Locations from Social Media Posts. In: WWW. 2013.

[Bl13] Bleier, A.: Practical Collapsed Stochastic Variational Inference for the HDP. ArXiv e-prints, Dezember 2013.

[BNJ03] Blei, David M.; Ng, Andrew Y.; Jordan, Michael I.: Latent Dirichlet allocation. J. Mach. Learn. Res., 3:993–1022, Marz 2003.

[Ch09] Chang, Jonathan; Boyd-Graber, Jordan; Wang, Chong; Gerrish, Sean; Blei, David M.: Reading Tea Leaves: How Humans Interpret Topic Models. In: Neural Information Processing Systems. 2009.

[Fa16] Fay, D.; Haddadi, H.; Seto, M. C.; Wang, H.; **Kling, C. C.**: An exploration of fetish social networks and communities. In: NetSciX'16. Januar 2016.

[Fi53] Fisher, Ronald: Dispersion on a sphere. Proc. of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences, 217(1130), 1953.

[Kl14] Kling, C. C.; Kunegis, J.; Sizov, S.; Staab, S.: Detecting Non-Gaussian Geographical Topics in Tagged Photo Collections. In: ACM International Conference on Web Search and Data Mining. 2014.

[Kl15] Kling, C. C.; Kunegis, J.; Hartmann, H.; Strohmaier, M.; Staab, S.: Voting Behaviour and Power in Online DemocracyGermany's Pirate Party. In: Proc. Int. Conf. on Weblogs and Social Media. 2015.

[MM08] Mimno, David M.; McCallum, Andrew: Topic Models Conditioned on Arbitrary Features with Dirichlet-multinomial Regression. In: UAI. AUAI Press, S. 411–418, 2008.

[Te06] Teh, Y. W.; Jordan, M. I.; Beal, M. J.; Blei, D. M.: Hierarchical Dirichlet processes. J. of the American Statistical Association, 101:1566–1581, 2006.

[Yi11] Yin, Zhijun; Cao, Liangliang; Han, Jiawei; Zhai, Chengxiang; Huang, Thomas S.: Geographical Topic Discovery and Comparison. In: WWW Conf. S. 247–256, 2011.



Christoph Kling studierte an der Universität Koblenz-Landau Informatik mit Anwendungsfach Wirtschaftsinformatik. Das Diplom-Studium schloss er in Regelstudienzeit mit Note 1.1 ab. Während seiner Promotion war er wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institute for Web Science and Technologies. Für das Papier *Voting Behaviour and Power in Online Democracy* [Kl15], dessen Ergebnisse Teil der Dissertation sind, wurde er 2015 auf der AAAI International Conference on Web and Social Media mit dem *Honorable Mention Award* ausgezeichnet. Neben seiner Promotion war er Gründungsmitglied der Hochschulgruppe *Denkfabrik für Humanismus und Aufklärung* an der Universität Mainz, Gründungsmitglied der *GBS Mainz-Rheinhessen e.V. – Gottlose Humanisten*, Gründungsmitglied bei *Intaktiv e.V. – Eine Stimme für genitale Selbstbestimmung* sowie Kandidat auf Listenplatz 2 für die Piratenpartei bei der Mainzer Stadtratswahl 2014.

Reichweitenoptimierende Fahr- und Betriebsstrategien für Elektrofahrzeuge

Kurzfassung

Stefan Köhler[1]

Abstract: Im Rahmen der Dissertation wurde ein neuartiges, fahrzeugweites Energiemanagement erforscht und realisiert. Dieses Energiemanagement beinhaltet die Berechnung von situationsadaptiven und von den Fahrzeugparametern abhängigen Geschwindigkeitsprofilen, die aus Sicht der Zeit- und Energieeffizienz optimiert werden. Die Profile dienen wahlweise als Eingang für eine automatische Längsführung wie beim Adaptive Cruise Control oder werden durch ein Fahrerassistenzsystem zur Generierung von Fahrhinweisen verwendet. Eine weitere Komponente des Systems, welche zu gesteigerter Energieeffizienz führt, ist die Drehmomentverteilung für einen Antriebsstrang mit zwei separaten Motoren. Diese Strategie wird weiterhin für Fahrzeuge mit radindividuellen Motoren erweitert, um so zusätzlich die Agilität des Fahrzeugs zu erhöhen. Auf öffentlichen Straßen konnten mit diesem System Reichweitensteigerungen im Bereich von 26 % bei einer Verlängerung der Reisezeit um nur 8 % erzielt werden.

1 Einleitung und Motivation

Der sogenannte Treibhauseffekt ist einer der Hauptgründe, der in den letzten Jahren zur Forderung der vermehrten Einführung von elektrisch betriebenen Fahrzeugen beigetragen hat. Forscher argumentieren, dass die vom Menschen verursachte Klimaveränderung und die damit einhergehende Erhöhung der Durchschnittstemperatur auf der Erde nur durch die Reduzierung des Ausstoßes sogenannter Treibhausgase begrenzt werden kann [So07, Co10]. Die EU plant aus diesem Grund im Rahmen des *2030 Framework of Climate & Energy* die Emissionen um 40 % gegenüber dem Referenzjahr 1990 zu senken [Eur14a]. Eine der Stellschrauben ist dabei die Reduktion der CO_2-Emissionen durch Personenkraftfahrzeuge, die in der EU einen Anteil von etwa 12 % der Gesamtemissionen haben [Eur14b]. [Ed14] benennt mit 10,2 % durch Transport von Personen und Gütern auf der Straße einen vergleichbaren Anteil für eine weltweite Betrachtung der Emissionen.

Setzt man voraus, dass der Strom, der zum Laden der Elektrofahrzeuge genutzt wird, aus regenerativen Quellen stammt, können diese in signifikantem Maße zur CO_2-Reduktion beitragen. Selbst wenn die Primärenergie zum Antrieb der Fahrzeuge nicht aus regenerativen Quellen stammt, ist es zumindest möglich, die Emissionsbelastungen in bestimmten Gebieten, wie z. B. in der Innenstadt, zu reduzieren und damit zur Steigerung der Lebensqualität beizutragen. All diese Gründe sprechen für eine frühzeitige Einführung von Fahrzeugen mit Elektroantrieben auf deutschen Straßen und führen zu einer großen Anzahl an Forschungsprojekten, die sich mit der Verbesserung aktueller Technologien im Bereich der Elektromobilität beschäftigen.

[1] Eberhard Karls Universität Tübingen, koehler@fzi.de

Trotz immenser Fortschritte in den Bereichen der Energiespeichertechnologie, der Elektromotoren und deren Leistungselektronik sowie der Regelungs- und Steuerungstechnik sind die hauptsächlich durch die Batterien verursachten hohen Kosten und die begrenzte Reichweite noch immer eine große Hürde für eine umfangreiche Verbreitung des Elektromobilität. Aktuelle Elektrofahrzeuge im Mittelklasse-Segment, die als Energiespeicher nur eine Batterie besitzen (BEV, engl. Battery Electric Vehicle), haben trotz des sehr hohen Tank-to-Wheel-Wirkungsgrads (TTW) von etwa 70 %, gegenüber typischen Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor (ICEV, engl. Internal Combustion Engine Vehicle) mit etwa 15 % [AS03, HY08] eine auf typischerweise 100 km bis 200 km begrenzte Reichweite [Gr11]. Der TTW-Wirkungsgrad beschreibt hierbei das durchschnittliche Verhältnis von an den Rädern genutzter Antriebsenergie zur am Energiespeicher theoretisch physikalisch verfügbaren Energie. Erschwerend kommen hierbei die langen Ladezeiten der Batterien in der Größenordnung von Stunden hinzu, während ein konventionelles Fahrzeug im Gegensatz dazu innerhalb weniger Minuten betankt ist. Zusammen mit den vergleichsweise hohen Anschaffungskosten führt dies dazu, dass noch immer keine breite Marktdurchdringung erreicht werden konnte, obwohl in den letzten Jahren vermehrt BEV-Modelle aufkommen. Der Grund für die stark begrenzte Reichweite – trotz des hohen TTW-Wirkungsgrads – liegt in der vergleichsweise geringen Energiedichte der Batterien des aktuellen Stands der Technik, welche etwa um den Faktor 50 niedriger ist als die von Benzin oder Diesel [Li11, IK12]. Dies führt zu Batteriepacks mit einem typischen Gewicht von bis zu 500 kg, selbst bei moderaten Reichweitenansprüchen.

Ziel der verfassten Arbeit ist es, insbesondere die aufgezeigte geringe Reichweite der Elektrofahrzeuge zu adressieren. Ein möglicher Ansatz zur Steigerung der Reichweite ist wie beim Model S von Tesla der Einsatz größerer Batterien, welcher aus Umwelt- und Kostenaspekten allerdings vermieden werden sollte. Zudem ist eine mechanische Anpassung des Fahrzeugs, wie der Einsatz von Energiesparreifen, Verbesserungen des Windwiderstands und Leichtbauweise zur Reduktion der Fahrzeugmasse möglich. Um die Ansätze generisch zu halten, so dass die Resultate in unterschiedlichen Modellen von Elektrofahrzeugen eingesetzt werden können, wird in dieser Arbeit darauf verzichtet, mechanische Änderungen zu untersuchen. Stattdessen sollen Fahr- und Betriebsstrategien betrachtet werden, die durch Zuhilfenahme aufkommender Technologien wie der Kommunikation mit Infrastruktur oder anderen Verkehrsteilnehmern (Car2X), Informationen aus dem Navigationssystem sowie Videokamera und Radarsensoren gespeist werden. Eine Effizienzsteigerung durch diese Strategien ermöglicht damit eine Erhöhung der Reichweite oder – bei gleichbleibender Reichweite – die Verringerung des Total Cost of Ownership Unterschieds zwischen ICEV und BEV durch die Verwendung kleinerer Batterien [Co14]. Unter Fahrstrategien versteht man hierbei Strategien, welche den Fahrer selbst aktiv involvieren oder eine unmittelbar nachvollziehbare Auswirkung haben. Dies kann unter anderem eine Strategie sein, die einen Abstandsregeltempomat (ACC, engl. Adaptive Cruide Control) nutzt, um vorausfahrenden Fahrzeugen zu folgen. Der Fahrer erlebt die Strategie, die das ACC nutzt, dann unmittelbar anhand der Beschleunigungen bzw. der aus diesen folgenden Geschwindigkeitstrajektorie. Weitere bereits gängige Fahrstrategien umfassen beispielsweise visuelle Schaltempfehlungen bei konventionellen Fahrzeugen, die den Fahrer anleiten möglichst energieeffizient zu fahren. Betriebsstrategien agieren dagegen mehr im Hintergrund und sind deshalb meist transparent für den Fahrer. Sie erfordern keine akti-

ve Reaktion des Fahrers und führen im Idealfall zu keinerlei negativem Einfluss auf das Fahrerlebnis. Beispiele hierfür sind die klimatische Konditionierung der Fahrzeugkomponenten, die Einspritzung bei konventionellen Fahrzeugen oder die Zusammenarbeit von Verbrennungs- und Elektromotor bei einem Hybridfahrzeug.

2 Entwickeltes System

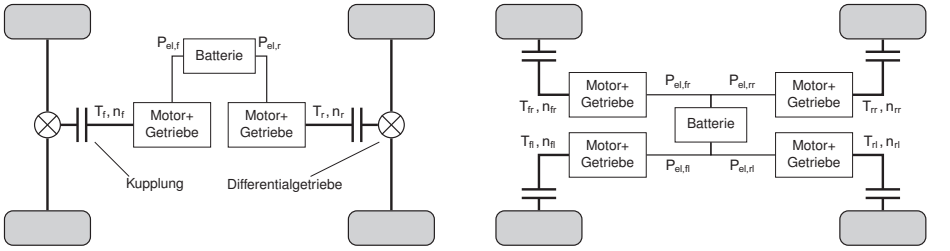
Einführend soll an dieser Stelle erwähnt werden, dass der im weiteren Verlauf des Dokuments verwendete Begriff *Energieverbrauch* aufgrund seiner breiten umgangssprachlichen Durchdringung gewählt wird. Physikalisch korrekt ist jedoch, dass Energie nicht verbraucht, sondern umgewandelt wird. Bei der Umwandlung der Energie in der Wirkkette des Antriebsstrangs über die einzelnen Komponenten wie Inverter, Maschinen, Getriebe etc. bis zur Radnabe wird dabei ein Teil der zur Verfügung gestellten Energie in nicht gewünschte Energie in Form von Wärme oder auch verschleißender Arbeit umgesetzt. Nur ein Teil der dem Antriebsstrang zugeführten Energie wird für die vom Fahrer gewünschte Energiedienstleistung, dem Antrieb des Fahrzeugs, aufgebracht. Mit Energieverbrauch wird in dieser Arbeit also der Einsatz an Energie bezeichnet, die zur Bewältigung einer Strecke aufgewendet wird. Die gewünschte Reichweitenoptimierung wird durch die Minimierung des Energieeinsatzes pro gefahrenen Kilometer definiert.

Anhand der Analyse des Modells eines typischen BEV sowie durch Simulationen wird dessen Energieverbrauch für diverse Szenarien ermittelt, um einen ersten Ausblick auf mögliche Ansätze geben zu können. Die Analyse berücksichtigt hierbei aufgrund einer besseren Repräsentation realer Fahranwendungsfälle gegenüber üblichen Geschwindigkeitsprofilen, wie dem oft gebräuchlichen Neuen Europäischen Fahrzyklus (NEFZ), die ARTEMIS-Zyklen, die aus dem europäischen Projekt *Assessment and Reliability of Transport Emission Models and Inventory Systems* [An06] hervorgegangen sind. Es wird hierbei zwischen drei ARTEMIS-Zyklen unterschieden: Urban, Rural und Motorway.

Durch Simulation der Fahrten eines typischen Elektrofahrzeugs können die für den Energieverbrauch relevanten Anteile für die unterschiedlichen Fahrzszenarien analysiert werden. Primär unterteilen sich diese in *Rollreibung*, *Strömungswiderstand*, *Verluste durch Reibbremsen* und *Verluste im Antriebsstrang*. Bei Kurvenfahrten entstehen zudem Verluste aufgrund der Reifenverformung und eines Teils der Seitenführungskraft, der gegen die Fahrtrichtung wirkt. Da von einer mechanischen Anpassung des Fahrzeugs abgesehen wird, ergeben sich insbesondere die nachfolgend aufgezählten Ansatzpunkte zur Reduzierung des Energieverbrauchs:

- Vermeidung des Einsatzes der Reibbremse,
- Vermeidung von (nur kurzzeitig) hohen Geschwindigkeiten,
- Wählen von Arbeitspunkten hoher Energieeffizienz (insbesondere bei überaktuiertem System),
- Wenn möglich: Auskuppeln der elektrischen Maschinen zur Reduktion der Verluste.

Da die Fahr- und Betriebsstrategien insbesondere auf die Antriebsstrangverluste und den Einsatz der Reibbremse wirken, ergeben sich für Fahrten in der Stadt oder auf unübersichtlichen Überlandrouten gute Aussichten bezüglich des Einsparpotenzials. Bei schnelleren Fahrten mit wenigen Verzögerungsvorgängen zeigt sich vergleichsweise wenig Spielraum. Hier ist zur umfangreichen Einsparung von Energie eine Reduktion der Geschwindigkeit notwendig. Bei entsprechender Berücksichtigung der Nebenbedingung Zeit kan dies jedoch ein Freiheitsgrad für die Optimierung von Geschwindigkeitsprofilen werden.



(a) Achsindividueller Antrieb. (b) Radindividiueller Antrieb.

Abb. 1: Betrachtete Antriebsstrangtopologien.

Zur Erschließung weiterer Freiheitsgrade werden in der Forschung bei Elektrofahrzeugen oft achs- und radindividuelle Antriebstopologien betrachtet. In Abbildung 1 ist auf der linken Seite die Antriebsstrangtopologie mit achsindividuellem Antrieb zu sehen, welche eine energieoptimierte Drehmomentverteilung erlaubt. Auf der rechten Seite ist der radindividuelle Antrieb dargestellt, der neben der Optimierung des Wirkungsgrads der Maschinen zudem eine ein Torque-Vectoring zur Verbesserung der Fahrdynamik bei Kurvenfahrten ermöglicht.

Ein grobes grafisches Konzept zur Aufführung relevanter Ein- und Ausgangsgrößen sowie der funktionalen Blöcke des entwickelten Systems wird in Abbildung 2 als einfaches Blockdiagramm vorgestellt. Als Eingangsgrößen sind dabei insbesondere das Navigationssystem, die Umfeldsensorik mit Radar und Video sowie die Intelligente Infrastruktur zu nennen. Das in der Arbeit realisierte System berücksichtigt hierbei vorerst lediglich gesetzliche Geschwindigkeitsbegrenzungen, die durch Navigationssystem, Intelligente Infrastruktur (variable Geschwindigkeitsbegrenzungen) oder durch die videobasierte Verkehrszeichenerkennung zur Verfügung gestellt werden. Die Optimierung ist dazu auf zeitinvariante Geschwindigkeitsbegrenzungen ausgelegt. Durch eine Erweiterung dieser können jedoch auch die Informationen über Ampelphasen und die Geschwindigkeit vorausfahrender Fahrzeuge miteinbezogen werden. Durch Fusionieren der verfügbaren Informationen (gesetzliche Geschwindigkeitsbegrenzungen und Kurvenkrümmungen) können Geschwindigkeitsbegrenzungen für die vorausliegende Strecke abgeleitet und beeinflussende Nebenbedingungen wie die Straßensteigung berücksichtigt werden. Um die aktuellen Rahmenbedingungen aus Sicht des Arbeitspunkts der Komponenten miteinbeziehen zu können, liefern diverse Fahrzeugsysteme wie die Elektromotoren, Fahrdynamiksensoren und Batterie-Manager zusätzliche Informationen zu ihrem aktuellen Zustand. Schließlich können weitere Informationen wie Umgebungstemperatur, Glättegefahr und grobe

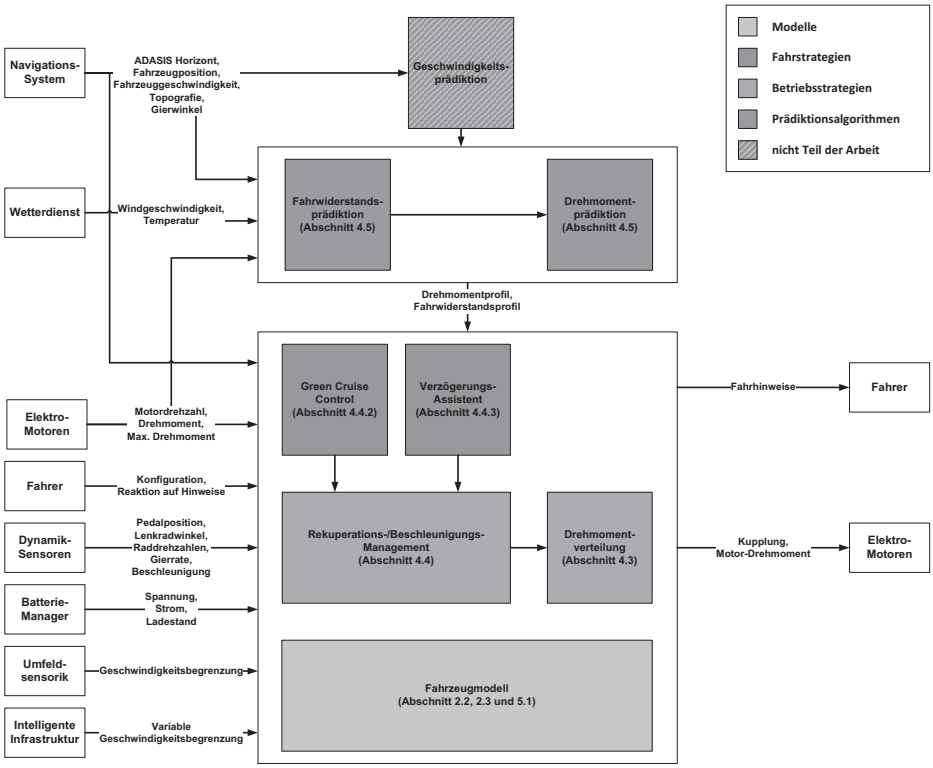


Abb. 2: Skizze des realisierten fahrzeugweiten Energiemanagements.

Abschätzungen des wirkenden Umgebungswinds von Wetterdienstanbietern herangezogen werden. Die Senken des Systems sind der Fahrer und die Elektromotoren samt deren Kupplungen.

Obwohl die Verluste durch die Fahrwiderstände selbst ohne große Zeiteinbußen kaum beinflussbar sind, bietet eine Optimierung von Beschleunigungs- und Verzögerungsvorgängen großes Potenzial, um Verluste durch die Reibbremse oder durch Rekuperation bei niedrigem Maschinenwirkungsgrad zu vermeiden. Während aktuelle Systeme wie der Tempomat bei konstanten Geschwindigkeiten oder das ACC bei Regelung auf vorausfahrende Fahrzeuge lediglich den Komfort berücksichtigen, wird die Aufgabe der Längsregelung bei dem vorgeschlagenen *Green Cruise Contol (GreenCC)* mit dem Fokus auf Energieeffizienz behandelt. Die zuvor vorgestellten Informationen können genutzt werden, um eine energieeffiziente Geschwindigkeitstrajektorie zu planen und im Rahmen eines modellprädiktiven Ansatzes zu stellen. Bei Geschwindigkeitsänderungen wird sowohl beim Verzögerungs- als auch beim Beschleunigungsvorgang darauf geachtet, dass die Elektromotoren in der Nähe eines Arbeitspunkts hohen Wirkungsgrads betrieben werden und dass der Einsatz der Reibbremse wenn möglich vollkommen vermieden wird. Die unterliegende Optimierung berücksichtigt in diesem Fall sowohl die Energieeffizienz als

auch die Reisezeit mit einem vom Nutzer definierten Gewichtungsgrad. Die Längsführung wird bei aktiviertem *GreenCC* vollständig vom Fahrzeug übernommen, während die Seitenführung weiterhin durch die Lenkradvorgabe erfolgt. Als Alternative zum *GreenCC* ist ein sogenannter *Verzögerungsassistent* implementiert, der die Längsführung nur bei Verzögerungsvorgängen übernimmt. Zur Realisierung des Systems wurde ein semi-autonomer Ansatz gewählt, bei dem der Fahrer die Fahrzeuggeschwindigkeit zum Großteil der Zeit über das Gaspedal selbst vorgibt. Der Verzögerungsassistent berechnet anhand eines aus den zuvor genannten Informationen erstellten elektronischen Horizonts optimale Verzögerungsvorgänge. Liegt in der Reichweite des elektronischen Horizonts eine Geschwindigkeitsbegrenzung, die geringer ist als die aktuelle Geschwindigkeit, wird eine auf Energieeffizienz optimierte Verzögerungsstrategie berechnet. Zu gegebenem Zeitpunkt wird der Fahrer dann informiert, den Fuß vom Gaspedal zu nehmen. Reagiert der Fahrer, findet ein autonomer Verzögerungsvorgang statt. In diesem Fall gibt der Fahrer durch die frühere oder spätere Akzeptanz des Hinweises selbst die Gewichtung zwischen Zeit- und Energieeffizienz vor. Beide implementierten Fahrstrategien geben eine gewünschte Geschwindigkeitstrajektorie vor, die durch das von den Elektromotoren gestellte Drehmoment erzeugt wird.

Bei mehr als einem Antriebselement kann das dabei geforderte Drehmoment beim Beschleunigen, beim Aufrechterhalten der Geschwindigkeit oder beim Bremsen durch die regenerative Bremse in unterschiedlichem Verhältnis auf diese verteilt werden. Ziel der *Drehmomentverteilung* ist es, dies so zu gestalten, dass sich alle Antriebselemente in Arbeitspunkten befinden, die zu einem optimalen Gesamtwirkungsgrad des Systems führen. Sind mehr als zwei Motoren vorhanden, kann durch ein *Torque-Vectoring* sowohl die Fahrdynamik verbessert werden, als auch – bei größeren Querbeschleunigungen – die Energieverluste durch den Seitenschlupf reduziert werden. Das *Beschleunigungs- und Rekuperationsmanagement* ist eine zwischen die Strecken Fahrer-Drehmomentverteilung, GreenCC-Drehmomentverteilung und Verzögerungsassistent-Drehmomentverteilung geschaltete Funktion, die den aktuellen Zustand der Maschinen und der Fahrzeugbatterie überwacht. Entsprechende Informationen, wie aktuelle temperaturabhängige Effizienz der Komponenten, werden dann an die vorgeschalteten Systeme geliefert, um die Optimierung anzupassen. Sind die Funktionen GreenCC und Verzögerungsassistent inaktiv, kann dem Fahrer mit dessen Hilfe zudem der entsprechende Hinweis (weniger stark Beschleunigen/Bremsen) über das Armaturenbrett oder direkt über eine aktive Pedalerie mitgeteilt werden.

3 Ergebnisse

Um die im Rahmen der Arbeit entwickelten Systeme zu bewerten sind neben umfangreichen Simulationen und Fahrten auf abgesperrten Testgeländen[3] mehr als 600 Testkilometer auf öffentlichen Straßen unter realen Verkehrsbedingungen absolviert worden, deren Ergebnisse nachfolgend vorgestellt werden.

[3] Aus Umfangsgründen sei hierzu auf die Dissertation [Kö16] verwiesen.

Zur Analyse der Drehmomentverteilung und dem Vergleich mit einer naiven 50:50-Drehmomentverteilung wurde der Versuchsträger auf einer 50 km langen Strecke vom Forschungszentrum Informatik Karlsruhe über die Autobahn A5 via Gernsbach nach Bad Herrenalb gefahren. Die gewählte Route hat eine Länge von ca. 50 km und besteht zu etwa 38 % aus Autobahnfahrt, zu 40 % aus Überlandfahrt sowie zu 22 % aus Stadtdurchfahrten. Insgesamt wurde die Strecke jeweils dreimal mit der optimierten Drehmomentverteilung und dreimal mit der 50:50-Verteilung gefahren, so dass Messdaten für etwa 300 km gesammelt werden konnten.

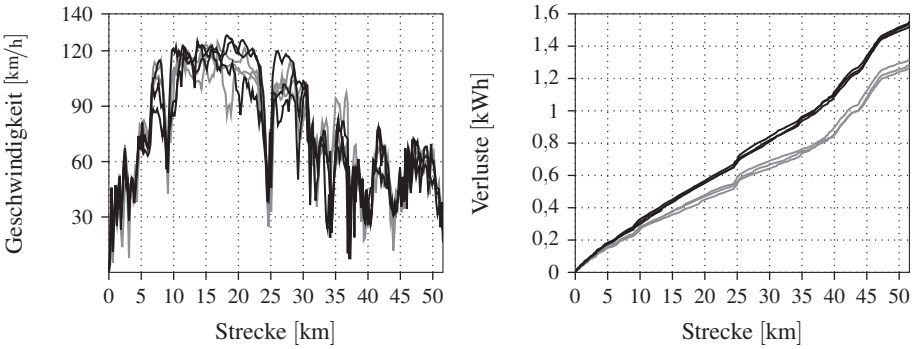


Abb. 3: Geschwindigkeitstrajektorien sowie kumulative Verluste in Maschine und Inverter für die Fahrten mit optimierter (rot) und 50:50 (schwarz) Drehmomentverteilung.

Abbildung 3 zeigt die Geschwindigkeitstrajektorie der Fahrten und die dabei gemessenen Verluste durch Maschine und Inverter. Es ist zu erkennen, dass die Verluste durch Maschine und Inverter bei den drei Fahrten mit der optimierten Drehmomentverteilung um 16,2 % gegenüber den Fahrten mit der 50:50-Drehmomentverteilung reduziert werden konnten. Die Gesamtenergieaufnahme des Antriebsstrangs konnte von 11,63 kWh auf 11,19 kWh reduziert werden, was für die befahrene Strecke einer Reichweitensteigerung um ca. 3,8 % entspricht. Neben der Geschwindigkeitstrajektorie, die für die sechs Fahrten vergleichbar ausfällt, können noch weitere Umgebungsfaktoren Einfluss auf den Energieverbrauch haben. Einer dieser Faktoren ist der Umgebungswind, der sich auf der offenen Autobahnstrecke deutlich auf den Energieverbrauch auswirken kann. Um einen neutraleren Vergleich für die durchgeführten Fahrten zu erhalten, soll deshalb der Antriebsstrangwirkungsgrad betrachtet werden. Da hierbei direkt das Verhältnis der aufgebrachten mechanischen Leistung zur aus der Batterie entnommenen elektrischen Leistung betrachtet wird, ist das Ergebnis repräsentativer als eine reine Betrachtung des Energieverbrauchs. Anhand der Testfahrten kann man eine mittlere Steigerung der Antriebsstrangeffizienz um 1,7 pp erkennen. Betrachtet man ausschließlich jene Abschnitte der Strecke, welche der Autobahn- und Überlandfahrt entsprechen, wird eine Verbesserung der Effizienz um bis zu 3,2 pp erzielt. Eine Teilstrecke der Überlandfahrt, in der eine Geschwindigkeitsbegrenzung von 70 km/h vorliegt, zeigt im Mittel sogar 5,4 pp Effizienzsteigerung. Die Messungen bestätigen damit die Simulationen der Geschwindigkeitszyklen, die im Rahmen der Arbeit durchgeführt wurden. Neben diesen quantitativen Bewertungen der Testfahrt kann zudem qualitativ eine angenehme Fahrt festgestellt werden. Bei Abschnitten hoher Steigungen oder bei Überholvorgängen wird die zweite Maschine sinnvoll eingekuppelt,

womit bei gegebener Anforderung die volle Leistung bereitgestellt werden kann. Bei konstanten Fahrten mit geringer Steigung wird dagegen nur eine Maschine verwendet, so dass sich das Fahrzeug in einem energieeffizienten Betrieb befindet.

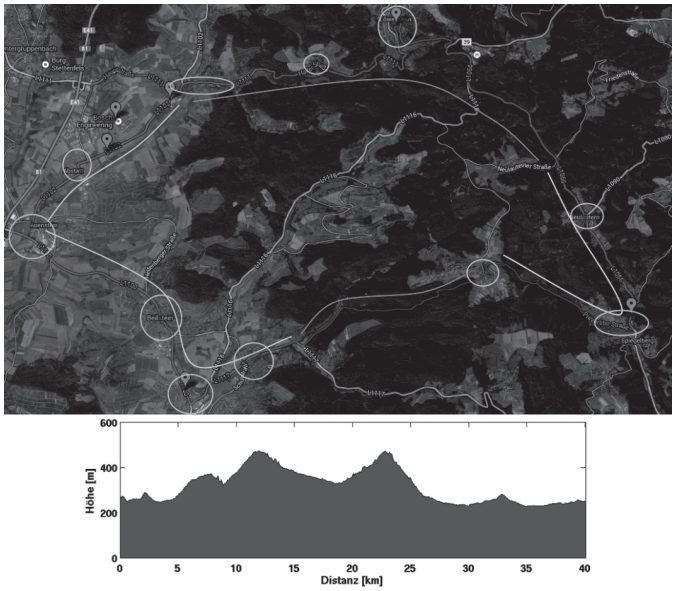


Abb. 4: Route und Höhenprofil für die Teststrecke nahe Abstatt [Im15, GG15].

Um auch die die Funktion des Verzögerungsassistenten in Kombination mit der optimierten Drehmomentverteilung zu validieren, wurden weitere Testfahrten auf der öffentlichen Straße durchgeführt. Der genutzte Versuchsträger ist mit einem parallelen RBS ausgestattet, was bei einem manuellen Bremsvorgang immer zu einem Einsatz der Reibbremse führt. Als Teststrecke wurde eine 42 km lange Rundfahrt mit Start- und Endpunkt beim Versuchsträgerstandort auf dem Gelände der Robert Bosch GmbH in Abstatt ausgewählt. Die gewählte Strecke und ihr Höhenprofil sind in Abbildung 4 visualisiert. In der Grafik ist zusätzlich farblich annotiert, um welche grobe Klassifizierung es sich bei dem jeweiligen Streckenabschnitt handelt. In Gelb sind dabei höherwertige Landstraßen markiert, bei denen Steigung und Straßenkrümmung gemäßigt sind. Rot markierte Abschnitte zeigen weniger hochwertige Straßen, in denen die Höhenunterschiede größer sind und Kurvenabschnitte existieren, in denen der Fahrer mit Geschwindigkeiten deutlich unterhalb der legalen Geschwindigkeitsbegrenzungen fahren sollte. Insgesamt ist die Anzahl der Streckenkilometer des jeweiligen Straßentyps in etwa gleich verteilt. Die elf grün markierten Ortsdurchfahrten fügen ein weiteres typisches Szenario in die Teststrecke ein.

Insgesamt wurde die Strecke sieben Mal gefahren, was zu einer Bewältigung von knapp 300 Testkilometern führt. Zur Validierung des Systemverhaltens ist der Versuchsträger einmal von einem typischen, sportlichen Fahrer ohne Unterstützung des Systems und ohne spezifische Vorgabe gefahren worden. Ein weiteres Mal absolvierte der Fahrer die Strecke ohne Unterstützung des Systems, nun jedoch mit der Vorgabe möglichst energiesparend zu agieren (B). Mit aktiviertem Fahrerassistenzsystem wurde die Strecke von unterschied-

lichen Fahrern zwei Mal unter der Vorgabe die Hinweise des Systems nach eigenem Belieben zu akzeptieren, durchfahren (C). Bei drei weiteren Fahrten wurden die Hinweise des Systems frühestmöglich durch den Fahrer akzeptiert (D).

In Abbildung 5 werden die erzielten Zeitmehrkosten und die Reichweitensteigerung – für (C) und (D) jeweils gemittelt – relativ zum Fahrer ohne Vorgabe dargestellt. Für (D) ist neben einer deutlichen Einsparung an Energie zusätzlich eine deutliche Verlängerung der Fahrtzeit zu verzeichnen. Auch wenn die Energieeinsparung von etwa 37 % beinahe doppelt so groß ist wie die Verlängerung der Fahrtzeit von etwas mehr als 20 %, haben alle drei Fahrer angegeben, dass sie die Fahrt als ungewohnt empfunden haben. Vor allem die Ausrollphasen bei Gefällen oder bei nachfolgendem Fahrzeug wurden dabei als zu lang empfunden. Haben die Fahrer in (C) die Hinweise nach eigenem Belieben akzeptiert und damit Kombinationen von Ausrollphasen und einer Rekuperation mit maximaler Energieeffizienz erzeugt, wurde die Fahrt als angenehmer empfunden. Bei einer verlängerten Fahrtdauer von 8 % ergibt sich dann eine um 26 % gesteigerte Reichweite im Vergleich zum sportlichen Fahrer. Auch der Fahrer, der ohne Unterstützung des Verzögerungsassistenten vorausschauend fährt, erzielt eine deutliche Verringerung des Energieverbrauchs. Es zeigt sich jedoch, dass er trotz einer längeren Fahrtzeit von 9 % weniger Energie einspart als bei Unterstützung durch die Kombination von Drehmomentverteilung und Verzögerungsassistent. Da der Fahrer ohne Unterstützung des Verzögerungsassistenten bei einer Fahrt mit idealem, seriellen RBS einen geringeren Einsatz der Reibbremse erreichen würde, werden für ein Fahrzeug mit diesem System etwa 5 pp schlechtere Ergebnisse als aufgelistet erwartet.

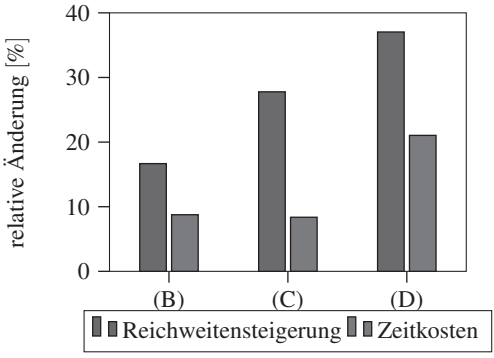


Abb. 5: Erzielte Reichweitensteigerung und Erhöhung der Reisedauer relativ zu Fahrer (A).

4 Zusammenfassung

Zusammenfassend wird der Reichweitengewinn bei Einsatz der vorgeschlagen Strategien durch mehrere Faktoren erzeugt: Außer in Ausnahmefällen muss der Fahrer nicht über das Bremspedal bremsen und die Nutzung der Reibbremse wird vermieden. Weiterhin können durch die bessere Vorausschau mittels Streckendaten effizientere Geschwindigkeitsprofile berechnet und umgesetzt werden, als sie der Fahrer durch eigene Intuition fahren würde. Schließlich nutzt die Drehmomentverteilung die Kenntnisse der Charakteristik des Antriebsstrangs, um die Motoren stets in einem situationsabhängigen, optimierten Arbeitspunkt zu betreiben.

Literaturverzeichnis

[An06] André, Michel; Joumard, Robert; Vidon, Robert; Tassel, Patrick; Perret, Pascal: Real-world European driving cycles, for measuring pollutant emissions from high- and low-powered cars. Atmospheric Environment, 40(31):5944 – 5953, 2006.

[AS03] An, F.; Santini, D.: Accessing Tank-to-Wheel Efficiencies of Advanced Technology Vehicles. In: SAE 2003 World Congress & Exhibition. mar. 2003.

[Co10] Council, National Research: Advancing the Science of Climate Change. The National Academies Press, Washington, DC, 2010.

[Co14] Company, McKinsey &: , A portfolio of power-trains for Europe: a fact-based analysis, 2014. aufgerufen: 09.12.2014.

[Ed14] Edenhofer, O. et al.: Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Cambridge University Press, 2014.

[Eur14a] 2030 framework for climate and energy policies, 2014. aufgerufen: 17.10.2014.

[Eur14b] Reducing CO2 emissions from passenger cars, 2014. aufgerufen: 17.10.2014.

[GG15] Geocontext-GIS: , Geocontext Höhenprofil, 2015. aufgerufen: 02.01.2015.

[Gr11] Grünig, M.; Witte, M.; Marcellino, D.; Selig, J.; van Essen, H.: , An overview of Electric Vehicles on the market and in development (Impacts of Electric Vehicles - Deliverable 1), 2011. aufgerufen: 09.12.2014.

[HY08] Handa, K.; Yoshida, H.: Development of Next-Generation Electric Vehicle - Mitsubishi's i-Mi EV. ATZ 10/2008, 2008.

[IK12] Inderwildi, O.; King, D.: Energy, Transport, & the Environment: Addressing the Sustainable Mobility Paradigm. Springer, 2012.

[Im15] Imagery 2015 AeroWest, DigitalGlobe, GeoBasis-DE/BKG, GeoContent, Landsat, Map data 2015 GeoBasis-DE/BKG (2009), Google: , Google Maps, 2015. aufgerufen: 02.01.2015.

[Kö16] Köhler, Stefan: Reichweitenoptimierende Fahr- und Betriebsstrategien für Elektrofahrzeuge. Dissertation, Eberhard Karls Universität Tübingen, 2016.

[Li11] Liu, Ru-Shi; Zhang, Lei; Sun, Xueliang; Liu, Hansan; Zhang, Jiujun: Electrochemical Technologies for Energy Storage and Conversion. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2011.

[So07] Solomon, S. et al.: , Climate Change 2007: The Physical Science Basis - Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007. aufgerufen: 09.12.2014.



Stefan Köhler ist seit 2011 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Forschungszentrum Informatik am Karlsruher Institut für Technologie. Von der Hochschule Technik und Wirtschaft in Karlsruhe erhielt er 2008 den Abschluss als B.Eng. im Fach Mechatronik und 2011 den Abschluss M.Eng. im Fach Elektrotechnik. Im Rahmen des EAES Promotionskollegs promovierte er am Mai 2016 an der Eberhard Karls Universität Tübingen.

Benutzungsschnittstellen für Kooperation[1]

Alexander Kulik[2]

Abstract:

Benutzungsschnittstellen für Kooperation bieten Nutzerinnen mehr Spielraum für parallele Aktivitäten und deren Kombination. Dadurch werden mehr Flexibilität und Ausdrucksmöglichkeiten realisierbar. Darüber hinaus können interaktive Systeme durch Synergieeffekte kooperativer Eingaben auch effizienter bedient werden. Dieses Interaktionsmuster ist für zweihändige Eingaben und die Nutzung mehrerer Finger, z.B. beim Maschinenschreiben, genauso anwendbar wie für die direkte Zusammenarbeit mehrerer Personen. Kooperation als Gestaltungsparadigma für Benutzungsschnittstellen fördert dadurch auch die Entwicklung sozialer Benutzungsschnittellen – für die direkte und zeitgleiche Zusammenarbeit von Gruppen wechselnder Größe mit gemeinsamen interaktiven Anwendungen.

1 Einleitung

Die meisten Schnittstellen zwischen Mensch und Computer sind im Vergleich zur Diversität ihrer Anwendungen äußerst einheitlich. Sie wurden für einzelne Nutzer gestaltet und sind auf Einfachheit optimiert. Einige wesentliche Funktionen sind nur einen Tastendruck entfernt, doch komplexere Eingaben erfordern lange Sequenzen von Funktionsaufrufen, die kinästhetisch kaum zu unterscheiden sind.

Viele Prozesse ließen sich mit komplexeren und stärker spezialisierten Eingaben effektiver steuern, doch aktuelle Benutzungsschnittstellen limitieren den sinnvollen Einsatz unserer motorischen, kognitiven und sozialen Fähigkeiten. In vielen Forschungsarbeiten lässt sich dagegen ein Trend zu Benutzungsschnittstellen für komplexe motorische Eingaben als auch zur gleichzeitigen Interaktion mehrerer Personen beobachten. Diese Entwicklungen fasse ich unter dem Titel “Benutzungsschnittstellen für Kooperation” zusammen.

Der Begriff der Kooperation verweist meist auf zwischenmenschliche Zusammenarbeit. Er wird jedoch auch verwendet zur Beschreibung des Zusammenspiels verschiedener Körpergliedmaßen [Gu88, HRHM96, Wi96, Hi97] oder auch verschiedener Modalitäten wie Stimme und Gestik [Ma98, ZMI99]. In meiner Arbeit steht Kooperation allgemein für die gleichzeitige Bedienung (Ko-Operation) einer Schnittstelle durch mehrere Entitäten.

Auf Grundlage einer umfassenden Literaturrecherche identifizierte ich *Kohärenz*, *Komplementarität* und *Territorialität* als die grundlegenden Themen der Gestaltung effektiver Benutzungsschnittstellen für Kooperation. Im Rahmen iterativer Schnittstellenentwicklungen leitete ich davon Gestaltungsprinzipien ab, deren Tragfähigkeit durch Experimente und Fallstudien bestätigt wurde (siehe Abschnitt 4 und 5).

[1] Englischer Titel der Dissertation: “User Interfaces for Cooperation”

[2] Bauhaus-Universität Weimar, Systeme der Virtuellen Realität, kulik@uni-weimar.de

Die Effekte kooperativer Interaktion lassen sich am Beispiel vieler früherer Schnittstellenentwicklungen zeigen. Ich betrachte vor allem solche für Bewegungseingaben. Obgleich die jeweiligen Bewegungen selten vergleichbar sind, lässt sich deren Effektivität im Sinne von Fitts' Gesetz annähern [Fi54]. Aus einer Reihe verwandter Arbeiten leite ich Referenzmaße für zweidimensionale und dreidimensionale Translation, Rotation sowie deren Kombination in realen und virtuellen Umgebungen ab. Dabei fällt unter anderem auf, dass reale Umgebungen offenbar höhere Leistungen erlauben und diese kaum abhängig von Bewegungsarten und den involvierten Freiheitsgraden sind. Die Effektivität digitaler Schnittstellen dagegen, scheint mit steigender Anzahl der Freiheitsgrade zu sinken.

Die Strukturierung der involvierten Freiheitsgrade kann einen wesentlichen Einfluss darauf haben. Jacob et al. schlugen vor, diesen Aspekt der Schnittstellengestaltung von der wahrgenommenen Integralität und Separabilität der betroffenen Dimensionen abhängig zu machen, so dass nur integral wahrgenommene Attribute auch simultan manipuliert werden [Ja94]. Die Idee geht zurück auf Garner, der sich mit den mentalen Prozessen unwillkürlicher Wahrnehmung beschäftigte, nicht jedoch mit Manipulation [Ga74]. In meiner Arbeit zeige ich dass die populäre Übertragung von Garners Theorie auf die Gestaltung von Schnittstellen für deren Manipulation [Ja94] nicht tragfähig ist und schlage alternative Herangehensweisen vor.

2 Kooperation

Kooperation ermöglicht in vielen Situationen höhere Effizienz, Ausdruckskraft und Flexibilität. Die hochgradig koordinierte Kooperation unserer Gliedmaßen bei der Bedienung komplexer Instrumente, beim Modellieren mit Ton oder beim Laufen sind beeindruckende Beispiele dafür. Orchester und Tanzgruppen zeigen, dass auch mehreren Personen ihre Aktivitäten vergleichbar eng aufeinander abstimmen können. Die erforderliche Koordination ist dabei sicher schwieriger, aber auch in vielen alltäglichen Situationen, gelingt uns effektive zwischenmenschliche Kooperation.

Unser Bewegungsapparat basiert auf Gelenken. Jede geradlinige Bewegung ist daher eine Kooperation von mindestens zwei Gliedmaßen, doch meist sind noch wesentlich mehr Freiheitsgrade involviert als unbedingt nötig. Die scheinbare Redundanz ermöglicht wechselseitige Fehlerkompensation [Be67, La12]. Solche Synergieeffekte lassen sich nicht nur in den Bewegungsabläufen zusammenhängender Gliedmaßen beobachten sondern genauso zwischen Aktivitäten der linken und rechten Körperhälfte als auch zwischen verschiedenen Personen [Mo01, Ri11]. Zudem scheint die Koordination kooperativer Aktivitäten in allen Fällen hierarchischen Kontrollstrukturen zu unterliegen [Be67, Wi96, LC11].

Die Koordination zwischen zusammenhängenden Gliedmaßen und zwischen mehreren kooperierenden Menschen folgen teilweise sehr ähnlichen Mustern. Dies gilt vor allem für die zeitliche Synchronisation der Aktivitäten [Wi96, Sc98, Mo01, Ri11, Fr01, Me01]. Daher müssen unterschiedliche Fälle von Benutzungsschnittstellen für Kooperation nicht völlig unabhängig betrachtet werden. Ein Arbeitsplatz, der mehrere Interaktionsmöglichkeiten parallel für mehrere Personen anbietet, kann zumindest teilweise auch von einer Person mit mehreren Händen und/oder anderen Eingabemodalitäten bedient werden.

3 Verwandte Arbeiten und weitere Anforderungen

Viele etablierte Benutzungsschnittstellen und Forschungsprototypen unterstützen kooperative Eingaben mit zwei Händen, von mehreren Personen oder auch durch verschiedene Modalitäten. Gemeinsam ist diesen teilweise sehr unterschiedlichen Schnittstellen das Versprechen erweiterter Ausdrucksmöglichkeiten durch die Kombination simultaner Ein- und Ausgaben.

Im Bereich der zweihändigen Interaktion finden sich besonders viele Beispiele, die das Potential kooperativer Interaktion eindrucksvoll belegen (z.B. [Hi98, Hi10]). Maschinenschreiben im Zehnfingersystem ist sicher eine der leistungsstärksten Interaktionsmethoden [Ro10]. Der Erfolg anderer zweihändiger Schnittstellen basiert oft auf Guiards Modell einer asymmetrischen Arbeitsteilung zwischen beiden Händen [Gu87]. Voraussetzung dafür ist die technische Unterscheidbarkeit der beiden Hände in ihren Rollen. Ich konnte zeigen, dass dies auf Grundlage der Messung zeitlicher Abfolgen möglich ist [KDF12]

Schnittstellen für die Kollaboration mehrerer Personen sind weniger etabliert. Konkrete Vorteile konnten nur selten formal nachgewiesen werden (z.B. [Is12]). Statt dessen scheint der Mehraufwand zur gegenseitigen Wahrnehmung und Koordination die potentiellen Vorteile der Zusammenarbeit häufig zu überwiegen [RSJ02, PBF02, Mo04]Grund dafür ist sicher auch die kurze Einarbeitungszeit im Rahmen formaler Studien. Häufig werden aber auch wichtige Anforderungen kollaborativer Systeme (z.B. [BGG01, GG02]) vernachlässigt. Dies gilt vor allem für die gegenseitige Wahrnehmbarkeit in einem kohärenten Interaktionsraum und die Unterstützung wechselnder Phasen unterschiedlich enger Zusammenarbeit. Neben der Kohärenz des Interaktionsraumes bedarf es zudem struktureller Flexibilität zur dynamischen Aufteilung gemeinsamer Arbeitsräume in private und gemeinsam genutzte Teilbereiche (Territorialität [Sc04]) sowie ein Set komplementärer Werkzeuge deren Funktionalitäten sich ergänzen statt behindern [Be00].

Die Vorteile multimodaler Interaktion erscheinen auf den ersten Blick offensichtlich [Ov00]. Bisher konnten die prototypischen Systeme diese Erwartungen jedoch kaum überzeugend einlösen. Gründe dafür liegen zum Teil im Lernaufwand der vorgeschlagenen multimodalen Eingabekombinationen. Bei der Gestaltung multimodaler Schnittstellen, vor allem bei Kombinationen mit Spracheingabe, wird darüber hinaus deren Anwendbarkeit in sozialen Kontexten nicht ausreichend berücksichtigt.

Die potentiellen Anwendungen multimodaler Schnittstellen wurden von Martin nach Kooperationsmustern klassifiziert [Ma98]. Die von ihm vorgeschlagenen Kategorien *Spezialisierung, Äquivalenz, Redundanz, Komplementarität,* und *Transfer* finden ihre Entsprechung auch in Fällen zweihändiger Kooperation und bei der Zusammenarbeit mehrerer Personen. Ich schlage etsprechende Erweiterungen ihrer Definitionen vor und stelle sie in Beziehung zu anderen etablierten Kooperationsmustern wie Arbeitsteilung und Guiards kinematischer Kette [Gu87].

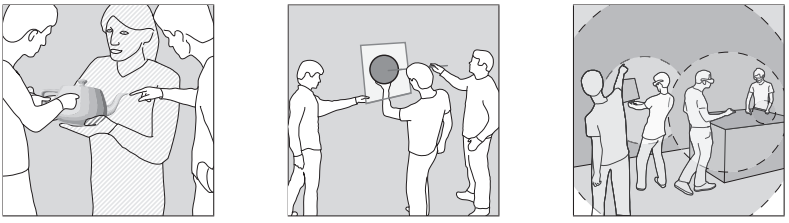
3.1 Gestaltungsprinzipien

Aus den oben beschriebenen Anforderungen leite ich folgende Gestaltungsprinzipen ab:

Kohärenter Interaktionsraum: In einem kohärenten Interaktionsraum stehen die Eingaben aller Beteiligten und ihre Effekte in klar definierten räumlichen, zeitlichen und logischen Zusammenhängen. Dadurch sind Status und Verhalten aller Beteiligten und aller Anwendungselemente zu jedem Zeitpunkt nachvollziehbar. Vollständige Konsistenz und Transparenz ist im Detail nicht immer realisierbar. Daher müssen Prioritäten auf Grundlage der gemeinsamen Aufgaben und Ziele definiert werden. Die direkte Beobachtbarkeit und Nachvollziehbarkeit der wesentlichen Zusammenhänge gemeinsamer Aktivitäten ist ein Grundbaustein kooperativer Zusammenarbeit.

Komplementäre Möglichkeiten: Ergänzende Funktionen und Fähigkeiten reduzieren das Konfliktpotential durch mehrere alternative Formen der Beteiligung und fördern gegenseitige Unterstützung in Form kombinierter und dadurch erweiterter Interaktionsmöglichkeiten.

Unterstützung dynamischer Territorialität: Kooperationsprozesse variieren beständig zwischen Phasen enger und loser Kopplung. Wenn möglich, strukturieren Menschen ihre gemeinsamen Arbeitsräume entsprechend der jeweiligen Phasen. Benutzungsschnittstellen für Kooperation unterstützen daher die dynamische und nutzerspezifizierte Aufteilung des gemeinsamen Interaktionsraums in getrennte Bereiche für verschiedene Stufen des individuellen Rückzugs und des gegenseitigem Austauschs.



Kohärenz *Komplementarität* *Territorialität*

Abb. 1: Kernthemen der Gestaltung von Benutzungsschnittstellen für Kooperation

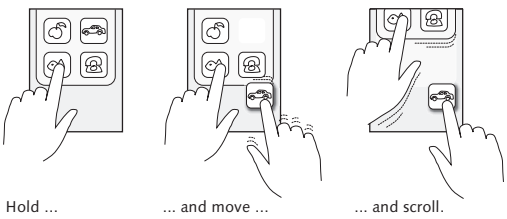
4 Experimente und elementare Technologien

Drei konkrete Schnittstellenentwicklungen und deren formale Evaluierung repräsentieren die Diversität möglicher Ansätze zur Erforschung und Gestaltung von Benutzungsschnittstellen für Kooperation. Das erste Beispiel ist der Vergleich drei verschiedener Kombinationen tischbasierter Eingabegeräte für zweihändige 3D Interaktion [Ku09]. In der Arbeit fokussiere ich stark auf die ökologische Validität der Evaluierung von Schnittstellenentwicklungen. Messbare Leistungsunterschiede mit verschiedenen Schnittstellen sind

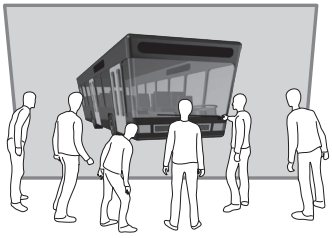
weniger ausgeprägt, wenn diese im Kontext eines vollständigen kooperativen Interaktionsprozesses untersucht werden. Trotzdem konnten kleine, aber signifikante Unterschiede nachgewiesen werden.

Das zweite Beispiel beschreibt die Entwicklung und Evaluierung einer neuen zweihändigen Interaktionstechnik zur Unterscheidung symmetrischer und asymmetrischer Eingaben auf Multitouch-Geräten [KDF12] (Abbildung 2(a)). Der Fokus dieser Arbeit liegt auf der Erfindung der patentierten Technik (EP2795451B1) und der empirischen Forschung im Entwicklungsprozess. Die Gestaltung der neuen Eingabegeste Hold and Move basiert auf Guiards Modell asymmetrischer zweihändiger Interaktion [Gu87]. Die genaue Spezifikation der Unterscheidungsparameter basiert auf einer detaillierten Analyse zweihändiger Eingabesequenzen mit unterschiedlichen Zielen. Im Vergleich zum Status quo wurden klare Vorteile deutlich, die sich durch Unterschiede in der kognitiven Verarbeitung beider Interaktionsmuster erklären lassen.

Das dritte Beispiel meiner Arbeit zu kooperativen Benutzungsschnittstellen ist das weltweit erste 3D Projektionssystem, das bis zu sechs Personen eine eigenständige stereoskopische Perspektive bietet [Ku11]. Im Gegensatz zur Nutzung von Head-Mounted Displays (HMDs) bleibt mit diesem System die Wahrnehmung anderer Personen, der physischen Umgebung und des eigenen Körpers erhalten. Man erlebt also eine gemeinsame virtuelle Realität in Relation zu realen Referenzen. Durch individuelle perspektivisch korrekte Darstellung für alle Beteiligten sind diese auch in der Lage sich mit Zeigegesten über Details der dargestellten 3D Modelle auszutauschen (Abbildung 2(b)).



(a) Hold and Move ermöglicht die Manipulation von Vordergrundobjekten während ein anderer Finger den Hintergrund hält oder gleichzeitig verschiebt. Die Zweifingergeste ist als asymmetrische Eingabe vom symmetrischen Pinch Zoom durch unterschiedliches zeitliches Verhalten unterscheidbar.



(b) Das neue Mehrbenutzer 3D Projektionssystem bietet bis zu sechs Personen eine individuelle 3D Perspektive auf gemeinsam erlebte virtuelle 3D Modelle.

5 Fallstudien

Der dritte Teil meiner Promotion illustriert die Relevanz und Anwendbarkeit der vorgeschlagenen Gestaltungsprinzipien mit Beispielen kooperativer Benutzungsschnittstellen in kollaborativer virtueller Realität. Alle vorgestellten Beispiele basieren auf der Mehrbenutzer-3D-Projektionstechnologie, die im Rahmen meiner Promotion entwickelt wurde [Ku11].

Das Prinzip eines kohärenten Interaktionsraumes wurde im Kontext eines Telepräsenzsystems untersucht [Be13]. Unsere Beobachtungen und formalen Studien mit dem weltweit ersten bidirektionalen 3D Telepräsenzsystem für Nutzergruppen unterstreichen den Stellenwert gegenseitiger Wahrnehmung in einem geometrisch konsistenten Raum. Die Ergebnisse belegen die unmittelbare Lesbarkeit von Körpersprache und Zeigegesten (Abbildung 2).



Abb. 2: Gruppen-Navigation in einer gemeinsamen virtuellen Umgebung mit Telepräsenz.

Zum Prinzip der Unterstützung dynamischer Territorialität wurden zwei Fallstudien durchgeführt. Eine widmete sich Konflikten zwischen sozialen Normen und gemeinsamen Zielen. In dichten räumlichen Strukturen wie dem Motorraum eines Fahrzeugs sind viele Details nur aus wenigen Perspektiven sichtbar. Es ist daher teilweise nötig "einander über die Schulter zu schauen", um gezeigte Objekte zu erkennen. Die körperliche Nähe ist jedoch nicht immer akzeptabel (vgl. Proxemics [Ha66]). In virtueller Realität können gezeigte Objekte von jeder Perspektive aus sichtbar sein, indem sie durch verdeckende Geometrie hindurchscheinen (Abbildung 3(a)). Unsere Studien zeigten, dass dadurch präferierte Abstände eingehalten werden können, ohne dass die Informationsvermittlung leidet [Ar10].

Eine andere Serie von Experimenten widmete sich der Integration zusätzlicher 3D Sichtfenster im gemeinsamen Interaktionsraum [Ku14]. Diese können sowohl durch physische Bildschirme als auch durch virtuelle Fenster realisiert werden (Abbildung 3(b)). Die resultierenden Systeme unterstützten dynamische Territorialität im Sinne der spontanen Strukturierung und der kontinuierlichen Anpassung des Arbeitsraumes in dedizierte Räume für private Interaktion, zur Aufbewahrung digitaler Objekte und für den gemeinsamen Austausch (vgl. [Sc04]).

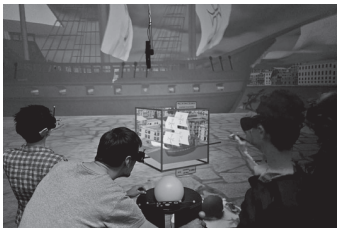


(a) Gezeigte Objekte werden durch das verdeckende Geometrien hindurch sichtbar.

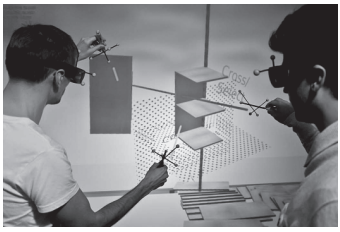
(b) Reale und Virtuelle 3D Sichtfenster als Interaktionsterritorien in Mehrbenutzeranwendungen.

Abb. 3: Proxemics und Territorialität in Sozialer Virtueller Realität

Das Prinzip komplementärer Möglichkeiten wurde auch in zwei Fallstudien erprobt. In einem der Experimente unterstützten sich Nutzerinnen durch gegenseitige Bereitstellung räumlicher Referenzen und Vergleichsperspektiven, als auch durch den Austausch virtueller Objekte und die abwechselnde Navigation der Gruppe durch den virtuellen Raum (Abbildung 4(a) [Ku14]). Die zweite Fallstudie zu diesem Thema untersuchte das Potential gemeinsamer 3D Objektplatzierung. Ein Set komplementärer Werkzeuge zur direkten 3D Manipulation und zur Definition geometrischer Bedingungen ermöglichte sehr schnelle virtuelle Montageprozesse durch effektive Zusammenarbeit (Abbildung 4(b)).



(a) Kombination eines stationären Navigationsgerätes mit 3D Portalen und einem 3D Zeigegerät zur effektiven Manipulation von Szeneninhalten.



(b) Zweihändige 3D Objektplatzierung und gleichzeitige Definition geometrischer Bedingungen.

Abb. 4: Komplementäre Werkzeugfunktionalitäten in kollaborativer virtueller Realität

6 Fazit und Ausblick

Ich schlage vor, bei der Gestaltung von Benutzungsschnittstellen und Interaktionstechniken stärker die Möglichkeiten von Synergien durch Kooperation zu berücksichtigen. Die zentrale Rolle dieses universellen Gestaltungsparadigmas ist auch in früheren Entwicklungen multimodaler, zweihändiger und kollaborativer Benutzungsschnittstellen erkennbar.

Verwandte Forschung in der Psychologie, den Arbeitswissenschaften und im Interaktionsdesign bietet einen Überblick über die Voraussetzungen und Potentiale von Benutzungsschnittstellen für Kooperation. Darüber hinaus präsentiere ich Kooperationsmuster mit weitreichender Anwendbarkeit und grundlegende Gestaltungsprinzipien.

Die Identifikation von *Kohärenz*, *Komplementarität* und *Territorialität* als entscheidende Faktoren kooperativer Benutzungsschnittstellen ist ein wesentlicher Beitrag meiner Arbeit. Eine Reihe von Experimenten und Fallstudien bestätigte die Relevanz und Anwendbarkeit der davon abgeleiteten Prinzipien im Kontext zweihändiger Interaktionssysteme und kollaborativer virtueller Realität.

Meine Vision ist ein Paradigmenwechsel von privaten Schnittstellen für asynchronen Austausch über soziale Netzwerke zu sozialen Benutzungsschnittstellen für die gleichzeitige gemeinsame Arbeit an komplexen Aufgaben. Die vorgestellten Systeme kollaborativer virtueller Realität stellen eine umfangreiche Realisierung solcher sozialer Benutzungsschnittellen dar – insbesondere in Kombination mit Telepräsenztechnologien, wie in den Fallstudien dargestellt [Be13].

Literaturverzeichnis

[Ar10] Argelaguet, F.; Kunert, A.; Kulik, A.; Froehlich, B.: Improving co-located collaboration with show-through techniques. In: 3D User Interfaces (3DUI), 2010 IEEE Symposium on. S. 55 –62, march 2010.

[Be67] Bernstein, N. A.: The Co-ordination and regulation of movements. Pergamon Press Ltd., first english edition. Auflage, 1967.

[Be00] Benford, Steve; Bederson, Benjamin B.; Åkesson, Karl-Petter; Bayon, Victor; Druin, Allison; Hansson, Pär; Hourcade, Juan Pablo; Ingram, Rob; Neale, Helen; O'Malley, Claire; Simsarian, Kristian T.; Stanton, Danaë; Sundblad, Yngve; Taxén, Gustav: Designing storytelling technologies to encouraging collaboration between young children. In: Proc. of CHI 2000. ACM Press, S. 556–563, 2000.

[Be13] Beck, Stephan; Kunert, Andre; Kulik, Alexander; Fröhlich, Bernd: Immersive group-to-group telepresence. Visualization and Computer Graphics, IEEE Transactions on, 19(4):616–625, 2013.

[BGG01] Baker, Kevin; Greenberg, Saul; Gutwin, Carl: Heuristic Evaluation of Groupware Based on the Mechanics of Collaboration. In: Proceedings of the 8th IFIP International Conference on Engineering for Human-Computer Interaction. EHCI '01, Springer-Verlag, London, UK, UK, S. 123–140, 2001.

[Fi54] Fitts, PM.: The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement. In: Journal of Experimental Psychology 47. S. 381–391, 1954.

[Fr01] Franz, Elizabeth A; Zelaznik, Howard N; Swinnen, Stephan; Walter, Charles: Spatial conceptual influences on the coordination of bimanual actions: when a dual task becomes a single task. Journal of motor behavior, 33(1):103–112, 2001.

[Ga74] Garner, Wendell R.: The processing of information and structure. Lawrence Erlbaum, Oxford, 1974.

[GG02] Gutwin, Carl; Greenberg, Saul: A Descriptive Framework of Workspace Awareness for Real-Time Groupware. Comput. Supported Coop. Work, 11(3):411–446, November 2002.

[Gu87] Guiard, Yves: Asymmetric Division of Labor in Human Skilled Bimanual Action: The Kinematic Chain as a Model. In: Journal of Motor Behavior. Jgg. 19, S. 486–517, 1987.

[Gu88] Guiard, Yves: The kinematic chain as a model for human asymmetrical bimanual cooperation. Advances in Psychology, 55:205–228, 1988.

[Ha66] Hall, Edward T.: The Hidden Dimension. Doubleday, 1966.

[Hi97] Hinckley, Ken; Pausch, Randy; Proffitt, Dennis; Patten, James; Kassell, Neal: Cooperative Bimanual Action. In: Proceedings of the ACM SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems. CHI '97, ACM, New York, NY, USA, S. 27–34, 1997.

[Hi98] Hinckley, Ken; Pausch, Randy; Proffitt, Dennis; Kassell, Neal F.: Two-handed Virtual Manipulation. ACM Trans. Comput.-Hum. Interact., 5(3):260–302, September 1998.

[Hi10] Hinckley, Ken; Yatani, Koji; Pahud, Michel; Coddington, Nicole; Rodenhouse, Jenny; Wilson, Andy; Benko, Hrvoje; Buxton, Bill: Pen + Touch = New Tools. In: Proceedings of the 23Nd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology. UIST '10, ACM, New York, NY, USA, S. 27–36, 2010.

[HRHM96] Hepp-Reymond, MC; Huesler, EJ; Maier, MA: Precision grip in humans: temporal and spatial synergies. Hand and brain, S. 33–68, 1996.

[Is12] Isenberg, P.; Fisher, D.; Paul, S. A.; Morris, M. R.; Inkpen, K.; Czerwinski, M.: Co-Located Collaborative Visual Analytics around a Tabletop Display. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 18(5):689–702, May 2012.

[Ja94] Jacob, R.; Silbert, R.; Preston, M.; FARLANE, D. MC: Integrality and Separability of Input Devices. In: Proc. of CHI '94. S. 3–26, 1994.

[KDF12] Kulik, Alexander; Dittrich, Jan; Froehlich, Bernd: The Hold-and-move Gesture for Multi-touch Interfaces. In: Proceedings of the 14th International Conference on Human-computer Interaction with Mobile Devices and Services. MobileHCI '12, ACM, New York, NY, USA, S. 49–58, 2012.

[Ku09] Kulik, Alexander; Hochstrate, Jan; Kunert, André; Fröhlich, Bernd: The influence of input device characteristics on spatial perception in desktop-based 3D applications. In: 3D User Interfaces, 2009. 3DUI 2009. IEEE Symposium on. S. 59–66, March 2009.

[Ku11] Kulik, Alexander; Kunert, André; Beck, Stephan; Reichel, Roman; Blach, Roland; Zink, Armin; Fröhlich, Bernd: C1x6: a stereoscopic six-user display for co-located collaboration in shared virtual environments. ACM Trans. Graph., 30(6):188:1–188:12, Dezember 2011.

[Ku14] Kunert, André; Kulik, Alexander; Beck, Stephan; Fröhlich, Bernd: Photoportals: Shared References in Space and Time. In: Proceedings of the 17th ACM Conference on Computer Supported Cooperative Work & Social Computing. CSCW '14, ACM, New York, NY, USA, S. 1388–1399, 2014.

[La12] Latash, Mark L.: 9 - Coordination. In (Latash, Mark L., Hrsg.): Fundamentals of Motor Control, S. 149 – 170. Academic Press, San Diego, 2012.

[LC11] Logan, Gordon D; Crump, Matthew JC: Hierarchical Control of Cognitive Processes: The Case for Skilled Typewriting. Psychology of Learning and Motivation-Advances in Research and Theory, 54:1, 2011.

[Ma98] Martin, Jean-Claude: TYCOON: Theoretical framework and software tools for multimodal interfaces. In: John Lee (Ed.), Intelligence and Multimodality in Multimedia Interfaces. AAAI Press, 1998.

[Me01] Mechsner, Franz; Kerzel, Dirk; Knoblich, GuÈnther; Prinz, Wolfgang: Perceptual basis of bimanual coordination. Nature, 414(6859):69–73, 2001.

[Mo01] Mottet, Denis; Guiard, Yves; Ferrand, Thierry; Bootsma, Reinoud J: Two-handed performance of a rhythmical fitts task by individuals and dyads. Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 27(6):1275, 2001.

[Mo04] Morris, Meredith Ringel; Ryall, Kathy; Shen, Chia; Forlines, Clifton; Vernier, Frederic: Beyond ßocial protocols": multi-user coordination policies for co-located groupware. In: Proceedings of the 2004 ACM conference on Computer supported cooperative work. CSCW '04, ACM, New York, NY, USA, S. 262–265, 2004.

[Ov00] Oviatt, Sharon; Cohen, Phil; Wu, Lizhong; Vergo, John; Duncan, Lisbeth; Suhm, Bernhard; Bers, Josh; Holzman, Thomas; Winograd, Terry; Landay, James; Larson, Jim; Ferro, David: Designing the User Interface for Multimodal Speech and Pen-based Gesture Applications: State-of-the-art Systems and Future Research Directions. Hum.-Comput. Interact., 15(4):263–322, Dezember 2000.

[PBF02] Pinho, Márcio S.; Bowman, Doug A.; Freitas, Carla M.D.S.: Cooperative object manipulation in immersive virtual environments: framework and techniques. In: Proc. of VRST 2002. VRST '02. ACM Press, S. 171–178, 2002.

[Ri11] Riley, Michael A; Richardson, Michael J; Shockley, Kevin; Ramenzoni, Verónica C: Interpersonal synergies. Frontiers in psychology, 2, 2011.

[Ro10] Rosenbaum, David A.: Chapter 9 - Keyboarding. In (Rosenbaum, David A., Hrsg.): Human Motor Control (Second Edition), S. 277 – 321. Academic Press, San Diego, second edition. Auflage, 2010.

[RSJ02] Ruddle, Roy A.; Savage, Justin C. D.; Jones, Dylan M.: Symmetric and asymmetric action integration during cooperative object manipulation in virtual environments. ACM Trans. Comput.-Hum. Interact., 9(4):285–308, Dezember 2002.

[Sc98] Schmidt, RC; Bienvenu, Michelle; Fitzpatrick, PA; Amazeen, PG: A comparison of intra-and interpersonal interlimb coordination: coordination breakdowns and coupling strength. Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 24(3):884, 1998.

[Sc04] Scott, Stacey D.; Sheelagh, M.; Carpendale, T.; Inkpen, Kori M.: Territoriality in collaborative tabletop workspaces. In: Proc. of CSCW 2004. CSCW '04. ACM Press, S. 294–303, 2004.

[Wi96] Wiesendanger, Mario; Kazennikov, Oleg; Perrig, Stephen; Kaluzny, Pawel: Two hands – one action: The problem of bimanual coordination. Academic Press, San Diego, CA, US, S. 283–300, 1996.

[ZMI99] Zhai, Shumin; Morimoto, Carlos; Ihde, Steven: Manual and Gaze Input Cascaded (MAGIC) Pointing. In: Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems. CHI '99, ACM, New York, NY, USA, S. 246–253, 1999.



Alexander Kulik wurde 1979 in Dresden geboren. Sein akademischer Werdegang zeigt die Interdisziplinarität der Forschung zu Mensch-Maschine Schnittstellen. Während seines Designstudiums widmete er sich bereits der Gestaltung und Entwicklung interaktiver Systeme. Im Rahmen seiner Diplomarbeit im Jahr 2005 entwickelte er am Fraunhofer Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation in Stuttgart 3D Eingabegeräte für Virtuelle Realität. Seit 2006 arbeitet Alexander Kulik als wissenschaftlicher Mitarbeiter der Forschungsgruppe *Virtual Reality and Visualization Research* unter Prof. Fröhlich im Bereich Medieninformatik der Bauhaus-Universität Weimar. Seine Forschung und Lehre in Weimar waren unterbrochen von Auslandsaufenthalten am Laboratoire Bordelais de Recherche en Informatique (LaBRI) in Bordeaux, Frankreich sowie am Information Science Department der Cornell Universität in Ithaca, USA.

Eine Architektur für Programmsynthese aus natürlicher Sprache

Mathias Landhäußer[1]

Abstract: Diese Dissertation entwirft eine Architektur namens Natural Language Command Interpreter (NLCI), mit der natürlichsprachliche Programme in Quelltext übersetzt werden können. Die Textanalysen sind in einem Fließband angeordnet, wurden jedoch – anders als bei bisherigen Ansätzen – von der gewählten Domäne und der zugehörigen API entkoppelt. Daher sind sie wiederverwendbar. Das nötige Wissen über die API wird in Form eines Modells bereitgestellt. Soll die Domäne (oder die anzusprechende API) gewechselt werden, muss lediglich ein neues Modell bereitgestellt werden.

NLCI wurde in zwei Fallstudien evaluiert: Animationserzeugung und Heimautomation. Die Ergebnisse zeigen, dass NLCI flexibel genug ist, um in beiden Szenarien verwendet zu werden. NLCI erzeugt in vielen Fällen die richtigen Methodenaufrufe (F_1=78%) und ermittelt die gewünschte Reihenfolge der Aktionen. Kontrollstrukturen werden mit einer Genauigkeit von 89% synthetisiert.

Keywords: Sprachverarbeitung, Programmiersystem, Programmsynthese, Softwaretechnik

„The only way a person can truly concentrate on his problem and solve it without constraints imposed on him by the communication problem are if he is able to communicate directly with the computer without having to learn some specialized intermediate language." Jean E. Sammet, 1966

1 Einleitung

Im Jahr 2014 verlautbarte US-Präsident Obama in einem Interview: „Everybody's got to learn how to code early." Ein Jahr zuvor appelierte er an jugendliche US-Amerikaner, sich mit Informatik zu beschäftigen – bereits Grundschulen bieten mittlerweile Programmierkurse an [Pr13]. Obama verschwieg hierbei, dass sich seine eigenen Töchter mit dem Programmieren beschäftigt haben, es aber nicht mögen. Und genau hier liegt der Knackpunkt: Nicht jeder möchte programmieren (lernen). Aktuelle Statistiken besagen, dass lediglich einer von 100 Amerikanern über Programmierkenntnisse verfügt – und das obwohl die USA eines der Länder mit den höchsten Programmiererdichten der Welt sind [MKB06].

Gleichzeitig sind wir von immer mehr programmierbaren Geräten umgeben: Alleine die Zahl der Mobiltelefone wurde bereits 2013 auf 6,8 Mrd. geschätzt – fast eins auf jeden Menschen [In14]. Hinzu kommen Laptops, Fahrzeuge, Haushaltsgeräte usw. Es ist anzunehmen, dass dieser Trend durch das Internet der Dinge noch verstärkt wird. Neue Anwendungen werden die programmierbaren Geräte auf ungeahnte Weise miteinander verbinden – man stelle sich bspw. vor, man befehle einem automatischen Staubsauger „Hör auf zu

[1] Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Programmstrukturen und Datenorganisation, Am Fasanengarten 5, 76131 Karlsruhe, mathias.landhaeusser@kit.edu

saugen, wenn ich Musik höre!“ Derartige Befehle sind eine Art Programmierung – selbst wenn es sich in diesem Beispiel nur um ein einzelnes Kommando handelt.

Heutige Programmiertechnologien erlauben es uns nicht, jeden zum Programmierer auszubilden. Die benötigten Kenntnisse und Fähigkeiten sind zu umfangreich und/oder kompliziert für Laien. Die wichtigste Eigenschaft der Computer – ihre Programmierbarkeit – bleibt damit den meisten Menschen verschlossen. Daher schließt sich diese Arbeit der Forderung von Jean E. Sammet an: Um die Programmierbarkeit von Rechnern für Laien zu erschließen, entwirft diese Arbeit ein Programmiersystem, das mit natürlicher englischer Sprache angesteuert wird und das die semantische Lücke zwischen der natürlichen Sprache und Programmiersprachen verringert. Benutzer werden hierdurch in die Lage versetzt, mit geschriebenem Text zu programmieren, ohne die Syntax und Schlüsselwörter von Programmiersprachen vorher erlernen zu müssen.

Die Arbeit zielt darauf ab, Geräte und Anwendungen für Laien programmierbar zu machen [La16]. Sie erschließt so – zu einem gewissen Grad – die Programmierbarkeit von Rechnern für jedermann. Komplexe Systeme, Algorithmik u. Ä. sollen nicht vom Endanwender entwickelt, sondern benutzt werden. Große Systeme werden auch weiterhin von Experten mit den üblichen Programmierkonstrukten entwickelt werden.

Die Arbeit orientiert sich an fünf Thesen, die in ihrem Verlauf beleuchtet werden:

1. Die vorgestellte Architektur kann genutzt werden, um natürlichsprachlich ausgedrückte, imperative Programme in Quelltext zu übersetzen. Endanwender ohne Programmierkenntnisse bilden die Zielgruppe, weswegen der Fokus auf skriptartige Ablaufbeschreibungen und nicht auf komplexe Algorithmen gelegt wird.
2. Es ist dafür nicht notwendig, die zulässige Eingabesprache stark einzuschränken; die Ergebnisse heutiger NLP-Werkzeuge sind als Grundlage gut genug.
3. Das in der Architektur vorgesehene Modell für das Domänenwissen kann ausgetauscht und so die Domäne gewechselt werden. Das Modell kann einfach erzeugt werden (bei geeigneten Quellen automatisch).
4. Unchronologische Beschreibungen können korrekt übersetzt werden: Die Reihenfolge der Beschreibung spielt eine untergeordnete Rolle, solange die zeitlichen Beziehungen zwischen den Aktionen genannt werden. Dann kann die chronologisch korrekte Reihenfolge der Aktionen rekonstruiert werden.
5. Kontrollstrukturen (bspw. einfache Wiederholungen oder Parallelität) können aus natürlichsprachlichen Beschreibungen synthetisiert werden.

2 Herangehensweise

Ziel dieser Arbeit ist es, eine domänenunabhängige Architektur zu schaffen, mit der wir der Vision der Programmierung in natürlicher Sprache einen Schritt näher kommen. Kern und Namensgeber der hier vorgestellten und implementierten Architektur ist der Natural Language Command Interpreter, kurz NLCI [LWT16]. Er ist eine sprachliche Schnittstelle für Computersysteme und dafür zuständig, die vom Benutzer ausgedrückten Anweisungen auf Befehle abzubilden, die der darunter liegende Rechner ausführen kann.

Frühere Ansätze des Programmierens in natürlicher Sprache beschränkten sich auf bestimmte Domänen und ermöglichten es so bereits beim Entwurf des Systems die notwendigen Prüfungen zu hinterlegen. Die Erkenntnisse aus den verwandten Arbeiten zeigen, dass eine Programmsynthese aus natürlicher Sprache mit zwei Einschränkungen erreicht werden kann: Man kann 1. den Umfang der erlaubten Eingabesprache einschränken, d.h. die Grammatik und das Vokabular (im Extremfall erhält man so eine „klassische“ Programmiersprache). Man kann 2. das anzusprechende System so stark einschränken, dass damit die sprachliche Komplexität automatisch geringer wird. Frühere Ansätze verweben, unabhängig vom Vorgehen, meist die Analyse der Eingabe mit der Code-Erzeugung bzw. Steuerung derart, dass sie untrennbar oder getrennt voneinander nicht nutzbar sind. Domäneninformationen (d.h. Funktionalität, Daten u. Ä. des anzusprechenden Systems) werden dabei häufig in die Textanalyse mit einbezogen, wodurch die Ergebnisse nicht verallgemeinerbar sind: Ein Domänenwechsel ist gleichbedeutend mit einer Neuentwicklung.

2.1 Uneingeschränkte Sprache und Entkopplung von Textanalyse und Ziel-API

Um die Anwendbarkeit von NLCI durch Laien möglichst einfach zu gestalten, schränkt die vorgestellte Arbeit die Eingabesprache nicht ein – weder die Grammatik noch die Wortwahl. Zur Verarbeitung der textuellen Eingabe greift NLCI auf bewährte Werkzeuge der Computerlinguistik zurück, z.B. Stanford CoreNLP zum Zerteilen der Eingabe [Ma14] und WordNet der Universität Princeton für die Erschließung von Synonymen sowie Ober- und Unterbegriffen [Mi95]. Unsere Fragestellung ist keine der Computerlinguistik, z.B. „Wie kann man in einem Satz Subjekt, Prädikat und Objekt bestimmen?“, sondern eine der Softwaretechnik: „Wie können die verfügbaren Ergebnisse der Computerlinguistik so integriert werden, dass Sprachverstehen für das Programmieren ohne Spracheinschränkung möglich ist?“

Neuartig an der vorgestellten Architektur ist die Entkopplung der Textanalyse von den Informationen über das anzusprechende System: Um letztendlich ein Programm erzeugen zu können, benötigt man zwingend Informationen über die zugrundeliegenden Programmierschnittstellen, bspw. die Namen der Methoden. Diese Informationen werden der Textanalyse und der Programmsynthese als Software-Modell (SW-Modell) zugänglich gemacht. So wird die Analyse mit dem SW-Modell konfiguriert und von der anzusteuernden Anwendung unabhängig gemacht. Das Wechseln der anzusprechenden Anwendung erfordert lediglich eine Modellierung der Software (Schritt 1 in Abb. 1). Für die Programmsynthese werden neben der Abbildung von Textelementen auf Programmelemente außerdem Kontrollstrukturen (Wiederholungen u. Ä.) erkannt [LH15] und die Reihenfolge von Aktionen geprüft und korrigiert [LHT14]. Aufgrund der modularen Architektur von NLCI können zudem weitere (ggf. auch domänenabhängige) Analysen eingebunden werden.

Für den Benutzer soll diese Maschinerie möglichst transparent sein – er interagiert textuell in natürlicher Sprache mit der Maschine: Er formuliert sein Programm in natürlicher Sprache (A in Abb. 1), wird in natürlicher Sprache zum Ergänzen und Korrigieren aufgefordert und erhält am Ende das ausführbare Programm bzw. dessen Ergebnis (B in Abb. 1).

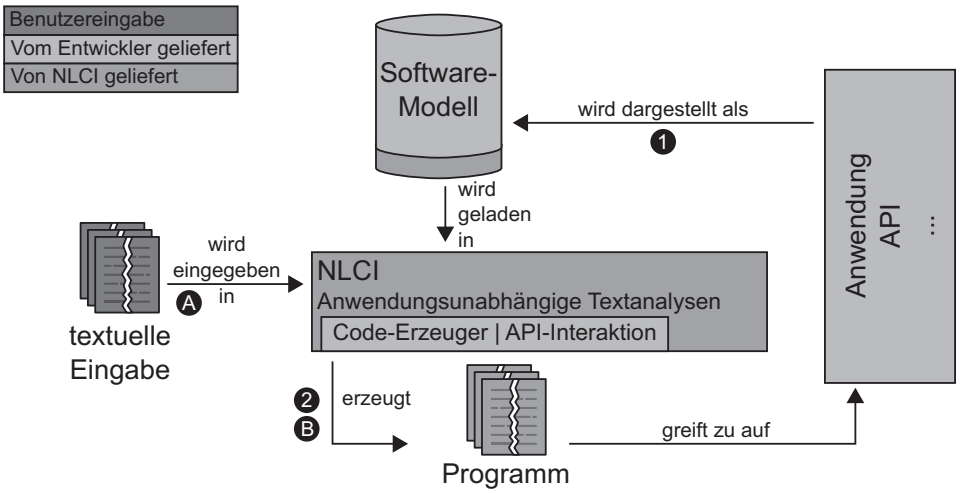


Abb. 1: Überblick über die NLCI-Architektur. Die Verarbeitung soll für den Benutzer transparent geschehen: Er interagiert textuell in natürlicher Sprache mit der Maschine. Für den Entwickler ist Vieles in der Architektur vorgegeben: Er steuert neben der API nur noch eine Beschreibung der API in Form eines SW-Modells und ggf. einen Quelltext-Erzeuger bei; die Struktur des SW-Modells ist dabei von NLCI vorgegeben.

2.2 Anbinden von Anwendungen an NLCI

Dem Entwickler wird mit NLCI ein Rahmen gegeben, mit dem sich Anwendungen einfach sprachlich erschließen lassen: NLCI ist eine Architektur, mithilfe derer er Anwendungen um Sprachkompetenz erweitern kann, ohne dass er selbst über Kenntnisse im Bereich der Sprachverarbeitung verfügen muss. Wie Abb. 1 verdeutlicht, muss er lediglich eine Modellierung der Software sowie eine Quelltexterzeugung beisteuern wenn er (s)eine Software an NLCI anbinden und damit sprachlich ansteuerbar machen möchte. An dieser Stelle reicht es aus, sich dieses Modell als Telefonbuch für die Ziel-API vorzustellen. Die dahinter liegende Idee ist der Wunsch, die Ziel-Plattform, also die Domäne, austauschbar zu machen ohne NLCI anpassen zu müssen; das erlaubt letztlich die einfache Anpassung von NLCI auf andere Domänen. Die Erstellung des Modells (Schritt 1 in Abb. 1) kann manuell erfolgen; bei großen APIs ist jedoch eine Automatisierung hilfreich. Eine automatische Modellerzeugung kann einfach implementiert werden, wenn sich die API an gängige Regeln zur Namensvergabe hält (z.B. Substantive für Klassennamen, Verben für Methoden, Verwendung von *CamelCase* usw.). NLCI liefert zudem eine Modell-Schablone, die nur noch mit den Details zur Software gefüllt werden muss: Der Entwickler muss nur beschreiben, welche Elemente seine API bereitstellt.

Die zweite Schnittstelle zwischen NLCI und der Ziel-API (neben dem SW-Modell) ist die Quelltext-Erzeugung: Nach der Verarbeitung des Eingabetextes innerhalb von NLCI werden die Analyseergebnisse ausgewertet und der gewünschte Quelltext ausgegeben (Schritt 2 in Abb. 1). Der Quelltext-Erzeuger muss – ähnlich wie ein Frontend eines Übersetzers – auf die gewünschte Programmiersprache zugeschnitten werden. Er ist un-

abhängig von der anzusteuernden Software und den Textanalysen und folglich ebenfalls wiederverwendbar: Sofern die anzusteuernde API in einer unterstützten Programmiersprache vorliegt, ist nichts weiter zu tun. Existiert keine vorbereitete Anbindung, so muss der Entwickler eine Komponente liefern, die Quelltext in der gewünschten Programmiersprache erzeugen kann. Hierbei kann die Komponente auf die Informationen der Analysestufen zugreifen, ohne dass diese bekannt bzw. verstanden sein müssen. Ein Domänenwechsel und damit das Erschließen neuer Anwendungen und Anwendungsfälle wird somit stark vereinfacht und benötigt keine Anpassungen an NLCI selbst.

2.3 Von NLCI bereitgestellte Analysen

Um das von NLCI benötigte SW-Modell auf die Verwendung vorzubereiten, muss die technische API-Beschreibung aufbereitet werden. Überführt man eine objektorientierte API direkt in ein Modell, so fehlen die für die Analysen nötigen sprachlichen Informationen. Daher kann NLCI das Modell automatisch aufbereiten und mit sprachlichen Informationen anreichern. So werden bspw. Bezeichner aufgetrennt, wenn sie aus mehreren Wörtern bestehen und Synonyme aus WordNet hinzugefügt [LWT16]. Diese zusätzlichen Informationen können später in der Textanalyse verwendet werden.

Anschließend wird das Eingabedokument von verschiedenen Analysemodulen verarbeitet und gewonnene Informationen (z.B. welche API-Methoden aufzurufen sind und in welcher Reihenfolge) als Annotation im Dokument hinterlegt. Das letzte Modul wertet diese Annotationen aus und erzeugt den gewünschten Quelltext. In der prototypischen Implementierung von NLCI sind die folgenden Module zur Textanalyse enthalten:

1. Vorverarbeitung des Eingabetextes mit computerlinguistischen Standardwerkzeugen: Eingesetzt werden der Wortartmarkierer und der Zerteiler aus dem Paket CoreNLP der Universität Stanford.
2. Verknüpfung von Text und API: Zu den Textelementen (z.B. Subjekte, Objekte, Prädikate usw.) werden entsprechende API-Elemente ermittelt und mithilfe einer Bewertungsfunktion sortiert [LWT16].
3. Auswahl der Methodenargumente: Basierend auf der zweiten Analyse wählt NLCI Argumente für Methodenaufrufe in den Sätzen aus und bestimmt, welche Methodenaufrufe im Kontext des gesamten Textes generiert werden sollen [LWT16].
4. Korrektur der Reihenfolge: Ist die Beschreibung einer Aktionsfolge nicht chronologisch, so ermittelt NLCI die gewünschte Reihenfolge aus dem Text [LHT14].
5. Erkennung von Kontrollstrukturen: Beschreibungen von Aktionsfolgen enthalten selten explizite Kontrollstrukturen wie Schleifen oder Ähnliches. NLCI leitet daher Kontrollstrukturen aus den sprachlichen Entsprechungen ab [LH15].

Die Analysen sind in einer Fließbandarchitektur zusammengefasst, sodass nachgelagerte Analyseschritte auf die Ergebnisse von vorangegangenen zugreifen können. Zudem ist es möglich, domänenspezifische Analysen hinzuzufügen und so die Qualität des Gesamtergebnisses zu steigern. Für die Evaluation wurden lediglich die oben vorgestellten und keine domänenspezifischen Analysen eingesetzt.

3 Evaluation

Die empirische Überprüfbarkeit der entwickelten Werkzeuge ist eine zentrale Anforderung. Daher wurde bereits vor und während der Entwicklung ein Textkorpus aufgebaut. Es sollte die Entwicklung lenken und am Ende zur Evaluation genutzt werden können. Die Texte beschreiben Aktionsfolgen, die von NLCI in ausführbare Programme übersetzt werden sollen. Um möglichst realitätsnahe Eingabetexte zu erhalten, wurden sie von 66 Probanden verfasst, die über unterschiedliche technische Vorkenntnisse verfügen. Die Auswahl der Probanden sollte möglichst breit gestreut sein, ist jedoch pragmatisch gehalten: Doktoranden unseres Lehrstuhls stellen einen Teil der Probanden, Studenten einen weiteren. Sie verfügen über teilweise umfangreiche Programmierkenntnisse und ihre Englischkenntnisse sind recht hoch. Den Rest der Probanden stellen Nicht-Informatiker verschiedener Herkunft. Sie vertreten die Zielgruppe von NLCI. Der überwiegende Teil der Probanden ist Deutsch-Muttersprachler.

Das Vorgehen, NLCI mit realistischen Eingabetexten zu testen, ist methodisch sehr wichtig: Die Problemstellung wurde vor Projektbeginn (möglichst) realitätsnah festgelegt. Während der Forschung und der Implementierungsphase konnte mit echten Problemen gearbeitet werden, anstatt sich künstliche (möglicherweise leichtere oder realitätsferne) Beispiele selbst zu formulieren. Darüber hinaus ermöglicht das Korpus verschiedene Ansätze zur Lösung eines Problems objektiv miteinander zu vergleichen; so können vielversprechende Ansätze schnell identifiziert und schwächere aussortiert werden.

3.1 Fallstudien

Der Prototyp von NLCI wurde mit zwei Anwendungen evaluiert. Die erste Anwendung ist openHAB[2], das intelligente Häuser steuert. Es ist ein vergleichsweise einfaches System und der betrachtete Haushalt verfügt über 114 Elemente (Klassen) und lediglich 9 Funktionen (Methoden). Die sprachliche Erschließung einer Haussteuerung ist dennoch ein interessanter Einsatzzweck: NLCI erzeugt aus Befehlen Steuerkommandos, z.B. zum Einschalten eines Lichts. Das benötigte SW-Modell konnte automatisch erzeugt werden und die Erkennung der Befehle funktioniert zufriedenstellend (F_1: 71,8%). Diese Fallstudie zeigt, dass NLCI dazu verwendet werden kann, kurze Befehle umzusetzen.

Die zweite Fallstudie betrachtet Alice, eine Animationssoftware mit der man kurze Trickfilme erzeugen kann [Co97]; Alice verfügt über 914 3D-Objekte mit etwa 400 verschiedenen Funktionen und ist damit deutlich umfangreicher als openHAB. NLCI erzeugt hier aus Drehbüchern die Befehle zur Erzeugung von Animationen. Um die Güte der erzeugten Programme zu bestimmen, wurden Drehbücher aus dem NLCI-Korpus verarbeitet und anschließend geprüft, ob korrekte Aufrufe erzeugt wurden. Diese Fallstudie zeigt, dass NLCI auch dazu geeignet ist, skriptartige Programme als Aktionsfolgen zu beschreiben (F_1: 72,1%). Die Eingaben der Benutzer können nicht nur auf Methodenaufrufe abgebildet werden, sondern auch auf Kontrollstrukturen [LH15]. Zudem kann die beabsichtigte Reihenfolge der Aktionen in den überwiegenden Fällen rekonstruiert werden [LHT14].

[2] Siehe `http://www.openhab.org/`, zuletzt besucht am 14.02.2017.

3.2 Aufbau des Software-Modells

Die in beiden Fallstudien benötigten SW-Modelle sind einfach zu erstellen. Die Modelle wurden in beiden Fällen mit einem Generator aufgebaut, für dessen Implementierung die jeweilige Ziel-API analysiert werden musste. Im Fall von openHAB war dies sehr einfach möglich, da die API eine einfache Struktur aufweist: Der Generator umfasst 370 Codezeilen und konnte in weniger als einem Tag implementiert werden. Die verfügbaren Klassen konnten einfach aus der openHAB-Konfigurationsdatei eingelesen werden. Alice verfügt über eine komplizierte Struktur, weswegen der Generator mit 2700 Codezeilen umfangreicher ausfällt; er konnte in vier Wochen implementiert werden.

3.3 Zusammenfassung der Evaluation

Die Ergebnisse der Programmsynthese sind auch ohne Einschränkung der Eingabesprache zufriedenstellend. NLCI kann Imperative und Aussagesätze verarbeiten, solange diese richtig von den verwendeten NLP-Werkzeugen verarbeitet werden. Dabei kommt es NLCI nicht darauf an, ob die Sätze im Aktiv oder Passiv geschrieben sind und ob sie Nebensätze enthalten. Da viele Analysen auf typisierten Abhängigkeitsgraphen basieren, ist die Reihenfolge der Wörter im Satz ebenfalls unerheblich (bspw. kann vom Standardmuster „Subjekt, Prädikat, Objekt“ abgewichen und Nebensätze eingeflochten werden).

Da die Ergebnisse der Analysen von den Ergebnissen der computerlinguistischen Werkzeuge abhängen, sind sie empfindlich gegenüber falschen Zwischenergebnissen. Die meisten Fehler in den erzeugten Programmen sind jedoch keine falsch übersetzte Aktionen, sondern welche, die nicht übersetzt werden konnten. Bei der Interpretation der Ergebnisse muss berücksichtigt werden, dass die computerlinguistischen Werkzeuge nicht speziell auf diesen Einsatzzweck vorbereitet wurden. Insofern sind die Ergebnisse als untere Schranke zu betrachten. Insbesondere das Fehlen von Aktionen aufgrund einer mangelhaften Verb-Erkennung scheint einfach durch ein Training der verwendeten Werkzeuge lösbar zu sein.

4 Zusammenfassung

Die vorgestellte Architektur entkoppelt das Wissen über die anzusteuernde API, d.h. das Domänenwissen, von der Textanalyse mithilfe eines Modells. So kann erreicht werden, dass die Textanalysen wiederverwendbar sind, auch wenn sich die Ziel-API oder die Ziel-Programmiersprache ändert. Die prototypische Implementierung von NLCI gibt eine Struktur für das benötigte SW-Modell vor, die auf objektorientierte Systeme zugeschnitten ist und einfach gefüllt und erweitert werden kann. (Ein SW-Modell kann für kleine Systeme sogar manuell aufgebaut werden.)

Die Textanalysen sind durch eine Fließbandarchitektur ebenfalls voneinander entkoppelt. Die Ergebnisse der (Vor-)Verarbeitung stehen allen folgenden Analysestufen zur Verfügung. Eine Stufe kann die Ergebnisse einer vorangehenden Stufe verwenden, interpretieren und sogar korrigieren oder erweitern. Die vorgestellten Analysen wurden

als domänenunabhängige Module entworfen. Es ist jedoch möglich, domänenspezifische Analysen in das Fließband einzuhängen, um so die Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems zu verbessern.

Die Fallstudien mit NLCI haben gezeigt, dass die vorgestellte Architektur und die entworfenen Analysen dazu geeignet sind, aus natürlichsprachlichen Beschreibungen oder Befehlen Skripte bzw. API-Aufrufe zu erzeugen. Die Auswertung der Ergebnisse hat aber auch gezeigt, wo die größte Schwäche von NLCI liegt: Fehler, die von den computerlinguistischen Analysen in der Vorverarbeitung gemacht werden, können nur bedingt entdeckt und nicht automatisch ausgeglichen werden.

Die vorliegende Arbeit suchte anhand der Fallstudien mit NLCI nach Belegen für die eingangs formulierten Thesen: Die beiden Fallstudien belegen, dass NLCI sowohl für openHAB als auch für Alice in der Lage ist, die natürlichsprachlichen Beschreibungen in Quelltext zu übersetzen (These 1). NLCI ermittelt in vielen Fällen die gewünschten Methodenaufrufe ($F_1 = 78,3\%$).

NLCI kann Imperative und Aussagesätze verarbeiten, solange diese richtig von den verwendeten NLP-Werkzeugen verarbeitet werden (These 2). Zur Evaluation von NLCI wurden Eingabetexte verwendet, die von Probanden geschrieben wurden. Der überwiegende Teil der Eingabesätze kann mit den verfügbaren NLP-Werkzeugen korrekt verarbeitet werden; treten Fehler auf, ließen sie sich häufig darauf zurückführen, dass die verwendeten NLP-Werkzeuge nicht speziell für den Anwendungsfall trainiert wurden und nicht auf systematische oder konzeptionelle Unmöglichkeit.

Das in der Architektur vorgesehene SW-Modell für das Domänenwissen kann ausgetauscht und so die Domäne gewechselt werden (These 3). Die Fallstudien zeigen, dass die entworfenen Analysen mit Beschreibungen für beide Szenarien umgehen können. Die nötigen Modelle konnten ohne Anpassungen an der Vorlage von NLCI erstellt und automatisch aufgebaut werden. Das Modell kann einfach erzeugt werden (bei geeigneten Quellen, wie denen in den Fallstudien, sogar automatisch).

Die Evaluation der Reihenfolgenkorrektur hat gezeigt, dass chronologisch nicht in der richtigen Reihenfolge genannte Aktionen erkannt werden können, wenn die Beschreibung Temporalausdrücke enthält. NLCI ist häufig in der Lage, die gewünschte Reihenfolge zu rekonstruieren und so eine korrekte Aktionsfolge zu erstellen (These 4): 86% der Temporalausdrücke können korrekt ausgewertet werden und ein großer Teil der übrigen führt nicht zu Fehlern bei der Feststellung der gewünschten Reihenfolge.

Die Evaluation der Kontrollstrukturanalyse hat gezeigt, dass man den Benutzern eines natürlichsprachlichen Programmiersystems nicht vorschreiben muss, wie Kontrollstrukturen diktiert werden müssen (These 5). Wie einige verwandte Arbeiten nahelegten, lassen sich viele Kontrollstrukturen aus natürlichsprachlichen Formulierungen ableiten und entsprechend umsetzen. Die Synthese der betrachteten Kontrollstrukturen rundet die Fähigkeiten von NLCI ab, die in 89% der Fälle funktioniert; geht man von einer korrekten computerlinguistischen Vorverarbeitung aus, kann die Erkennungsrate sogar auf 97% gesteigert werden.

Die Erkenntnisse aus der Forschungsarbeit und die Ergebnisse der Evaluation zeigen, dass heute Programmierung in natürlicher Sprache möglich ist und die Eingabesprache nicht künstlich eingeschränkt werden muss. Dem übergeordneten Ziel, Benutzern zu ermöglichen in natürlicher Sprache zu programmieren, ist NLCI ein großes Stück näher gekommen. Die obigen Belege für die Thesen zeigen, dass das angestrebte Ziel in den betrachteten Einsatz-Szenarien erreicht werden konnte. Die Evaluation des Prototyps hat gezeigt, dass NLCI flexibel genug ist, um in diesen stark unterschiedlichen Einsatz-Szenarien verwendet zu werden. Die nötige Einschränkung der Domäne ist kein Nachteil, da die Akquise neuer Domänen einfach vonstatten geht. Auch wenn es auf dem Gebiet der natürlichsprachlichen Programmierung noch viele offene Fragen gibt, eröffnet diese Arbeit viele neue Perspektiven.

5 Ausblick

Trotz – oder gerade: aufgrund – der erfreulichen Ergebnisse von NLCI in dieser Arbeit ergeben sich weitere Forschungsfragen, die untersucht werden müssen. Die folgenden Abschnitte skizzieren mögliche nächste Schritte auf dem Weg zu einem noch besseren, und vor allem interaktiven natürlichsprachlichen Programmiersystem:

Die Arbeiten zur Korrektur der Reihenfolge und der Erkennung der Kontrollstrukturen haben gezeigt, dass es kein (gut funktionierendes) Verfahren gibt, das Korreferenzketten für Aktionen aufbauen kann. Ansätze aus dem Bereich der Auflösung von Personalpronomina könnten weiterentwickelt werden, um tatsächlich identische (nicht gleiche) Aktionen in einer Aktionsfolge zu ermitteln. Da das SW-Modell hilft, verschiedene Paraphrasierungen derselben Aktion auf einen Methodenaufruf abzubilden, solle es auch helfen, Aktionsreferenzen auszuwerten.

Das SW-Modell enthält derzeit weder Vor- oder Nachbedingungen noch Invarianten. Wären diese Informationen verfügbar, könnten sie für die Sicherstellung der korrekten Reihenfolge genutzt werden. Zudem könnte aus einer unterbrochenen Kette von Vor- und Nachbedingungen zu einer Aktionsfolge geschlossen werden, dass eine Aktion fehlt und an welcher Stelle. Ob dieses zusätzliche Wissen in der Praxis verfügbar und nutzbar ist, muss untersucht werden.

NLCI beschränkt sich auf die Analyse geschriebener Sprache. Tichy und Weigelt entwerfen ein vielversprechendes System, das gesprochene Sprache verarbeiten können soll [WT15]. Ihr System ist nicht als Fließband aufgebaut, sondern als Agentensystem, wobei die Agenten den Verarbeitungsstufen von NLCI entsprechen.

Anwendungsgebiete für NLCI ergeben sich in vielen Bereichen. Mit den Analysen könnten Arbeitsanweisungen für (Haushalts-)Roboter formuliert werden und die Analyse paralleler Aktionsfolgen könnte für die Modellierung von Arbeitsabläufen genutzt werden. Zudem ist es denkbar, dass alle Programme, die derzeit über eine grafische Oberfläche gesteuert werden, sprachliche Befehle empfangen. Eine weitere aussichtsreiche Anwendung ist das Erzeugen von Testfällen durch Mitarbeiter von Fachabteilungen.

Literaturverzeichnis

[Co97] Conway, Matthew J.: Alice: Easy-to-Learn 3D Scripting for Novices. Phd thesis, Faculty of the School of Engineering and Applied Science, University of Virginia, 1997.

[In14] International Telecommunication Union (ITU): The World in 2014: ICT Facts and Figures. Mai 2014.

[La16] Landhäußer, Mathias: Eine Architektur Für Programmsynthese Aus Natürlicher Sprache. KIT Scientific Publishing, Karlsruhe, 2016.

[LH15] Landhäußer, Mathias; Hug, Ronny: Text Understanding for Programming in Natural Language: Control Structures. In: Proceedings of the 4th International Workshop on Realizing Artificial Intelligence Synergies in Software Engineering. Mai 2015.

[LHT14] Landhäußer, Mathias; Hey, Tobias; Tichy, Walter F.: Deriving Timelines from Texts. In: Proceedings of the 3rd International Workshop on Realizing Artificial Intelligence Synergies in Software Engineering. S. 45–51, Juni 2014.

[LWT16] Landhäußer, Mathias; Weigelt, Sebastian; Tichy, Walter F.: NLCI: A Natural Language Command Interpreter. Automated Software Engineering, August 2016.

[Ma14] Manning, Christopher D.; Surdeanu, Mihai; Bauer, John; Finkel, Jenny; Bethard, Steven J.; McClosky, David: The Stanford CoreNLP Natural Language Processing Toolkit. In: Proceedings of 52nd Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics: System Demonstrations. Association for Computational Linguistics, Baltimore, Maryland, S. 55–60, Juni 2014.

[Mi95] Miller, George A.: WordNet: A Lexical Database for English. Commun. ACM, 38(11):39–41, November 1995.

[MKB06] Myers, Brad A.; Ko, Andrew J.; Burnett, Margaret M.: Invited Research Overview: End-User Programming. In: CHI '06 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems. CHI EA '06, ACM, New York, NY, USA, S. 75–80, 2006.

[Pr13] President Obama Asks America to Learn Computer Science, Dezember 2013. `https://www.youtube.com/watch?v=6XvmhE1J9PY`.

[WT15] Weigelt, Sebastian; Tichy, Walter F.: Poster: ProNat: An Agent-Based System Design for Programming in Spoken Natural Language. In: 2015 IEEE/ACM 37th IEEE International Conference on Software Engineering (ICSE). Jgg. 2, S. 819–820, Mai 2015.



Mathias Landhäußer wurde am 02. Juni 1983 geboren. In seiner Forschung beschäftigt er sich damit, wie computerlinguistische Werkzeuge im Softwareentwicklungsprozess eingesetzt werden können, insbesondere wenn es um kreative Aufgaben wie Programmierung geht. Zudem interessiert er sich für empirische Forschungsmethoden in der Softwaretechnik. Er promovierte im Jahr 2016 am Karlsruher Institut für Technologie (ehemals Universität Karlsruhe (TH)). Zuvor studierte er – ebenfalls am KIT – Informationswirtschaft. Er ist Mitglied der ACM und der GI. Mehr über Mathias erfahren Sie auf seinem LinkedIn-Profil unter `https://www.linkedin.com/in/mathiaslandhaeusser`.

Energieeffiziente Verarbeitung fein granular verteilbarer Lasten auf heterogenen Rechnerverbünden

Jörg Lenhardt[1]

Abstract: Der Energiebedarf moderner Rechenzentren steigt stetig an und hat mit mehr als 1,5 % einen signifikanten Anteil an der insgesamt benötigten elektrischen Energie. Dies verursacht steigende Kosten zum Betrieb der Hardware-Infrastruktur und deren Kühlung. Zudem führt die immer dichtere räumliche Packung leistungsfähiger Rechner aufgrund von Hitzeentwicklung, die direkt abhängig von der Energiezufuhr ist, zu Problemen bei Zuverlässigkeit und Lebensdauer. Umweltbelastungen verursacht durch die Erzeugung elektrischer Energie sind ein weiteres Problem. Im Bereich von großen Rechenzentren, die üblicherweise über Jahre gewachsene Hardware-Strukturen in Form heterogener Rechnerverbünde vorweisen, kann der Energiebedarf durch intelligentes Verteilen von Lasten reduziert werden. Auf diese Weise können Rechenknoten in energieeffizienten Bereichen der Auslastung betrieben werden, um bei gleicher oder nahezu gleicher Leistungsfähigkeit Energie einzusparen. Hier werden Strategien zur Lastverteilung für die energieeffiziente Nutzung heterogener Rechnerverbünde kurz vorgestellt und untersucht.

1 Einleitung

Der Bedarf an elektrischer Energie für Rechenzentren steigt kontinuierlich an. Dies ist sowohl aus ökonomischer als auch ökologischer Sicht problematisch. Zudem führt die hohe Energieaufnahme zu Problemen bei der Zuverlässigkeit und zu einer Verkürzung der Lebenszeit der Rechner [BB10]. Beim Betrieb von Rechenzentren steigen die Kosten, die durch den Einsatz der Rechner- und Netzwerkinfrastruktur-Hardware und durch die notwendige Kühlung dieser Systeme verursacht werden. Durch den erhöhten Verbrauch elektrischer Energie steigt der Ausstoß von klimaschädlichem Kohlenstoffdioxid CO_2, da ein großer Teil der elektrischen Energie weiterhin durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe gewonnen wird [Arb14; Arb15].

Die Nutzung der Atomkraft zur Erzeugung elektrischer Energie bringt hingegen das immer noch ungelöste Problem der Lagerung der atomaren Abfälle mit sich. Insbesondere die Lagerung bzw. Endlagerung von Atommüll im Lager Asse wurde in den Medien kritisch diskutiert. Die teilweise sehr langen Strahlungszeiten der radioaktiven Elemente sind als äußerst problematisch einzustufen. Die Problematik des Atommülls wird auf nachfolgende Generationen verlagert. Zudem zeigt sich auch bei der erdgeschichtlich betrachtet sehr kurzen Nutzung der Atomkraft von einigen Jahrzehnten schon heute das Problem der Lagerung durch verrostende Castor-Behälter und das Eindringen von Grundwasser in die Lagerstätten.

Der Anteil umweltfreundlicherer Energiequellen, wie z. B. Wasserkraft, Windkraft oder Photovoltaik, steigt in Deutschland zwar kontinuierlich an, allerdings wurde auch 2014

[1] FernUniversität in Hagen, Joerg.Lenhardt@FernUni-Hagen.de

der wesentliche Anteil der elektrischen Energie aus fossilen Brennstoffen gewonnen, vgl. Abbildung 1.

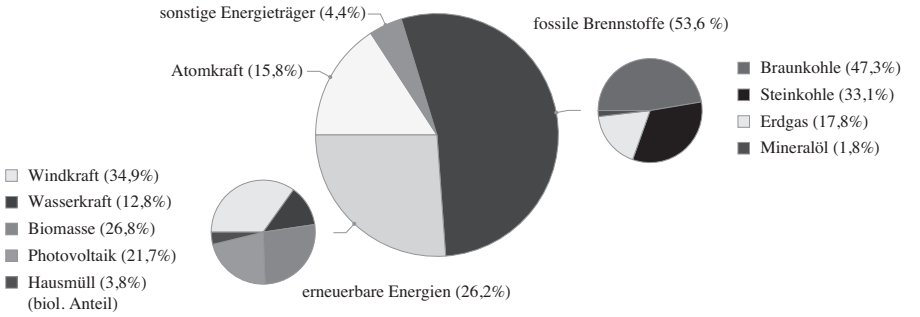


Abb. 1: Energieträger im Jahr 2014[3]

Die Prognose für das Jahr 2014 macht deutlich, dass die fossilen Brennstoffe mit 53,6 % weiterhin den größten Anteil an den Energieträgern zur Erzeugung elektrischen Stroms ausmachen. Dies ist insbesondere im Hinblick auf die Auswirkungen auf die Umwelt enttäuschend. Der Anteil erneuerbarer Energien liegt bei 26,2 %. Der Anteil der Atomkraft ist mit 15,8 % im Vergleich zu den Vorjahren zwar deutlich zurückgegangen, aber immer noch sehr hoch.

Beschränkt man sich auf Computersysteme, so sind die Anteile am gesamten Energieverbrauch für Rechenzentren und bestimmte breit genutzte Dienstleistungen wie Cloud Computing von Interesse. In den Vereinigten Staaten von Amerika betrug der Energiebedarf von Rechenzentren 2006 etwa 61 TWh, was einem Anteil von 1,5 % der insgesamt erzeugten elektrischen Energie entsprach. Der Energiebedarf für Rechenzentren verdoppelt sich etwa alle fünf Jahre [BBA10]. Die Rechnerinfrastruktur trägt etwa zu 2 % zu dem CO_2-Ausstoß bei [KGB13]. Trotz der Entwicklung von energieeffizienten Technologien und Algorithmen wird davon ausgegangen, dass der auf die IT-Infrastruktur zurückzuführende Anteil des CO_2-Ausstoßes weiterhin stark ansteigen wird. Innerhalb eines Rechenzentrums tragen die Rechner und die Netzwerkinfrastruktur zusammen zu etwa 50 % zum Energieverbrauch bei. Die andere Hälfte des Energiebedarfs resultiert aus Notsystemen, Kühlung, Gebäudeelektrik, Sicherheitskomponenten und weiteren Einrichtungen [BLM10].

Die Motivation liegt somit in der Problematik des ständig steigenden Energiebedarfs und der daraus resultierenden Schädigung der Umwelt. Entsprechend lautet die in der Dissertation verfolgte erste Forschungsfrage [Len16]:

> *„Kann durch geschickte Verteilung von Lasten auf unterschiedlich energieeffizienten und leistungsstarken Rechnern eines heterogenen Verbunds der Energiebedarf bei einer wechselnden Rechenlast reduziert werden?“*

[3] Daten aus [Arb15]

Die zweite Forschungsfrage, die sich insbesondere aus untergeordneten Fragestellungen der ersten Forschungsfrage ergibt, lautet:

> *„Wie soll mit ungenutzten oder sehr gering genutzten Rechnern innerhalb eines Verbunds umgegangen werden?“*

Wie im Verlauf der Dissertation gezeigt wird, kann die erste Forschungsfrage positiv beantwortet werden. Ein wesentlicher Teil der Dissertation beschäftigt sich mit der Beantwortung dieser Frage und der Umsetzung in Form unterschiedlicher Strategien. Strategien der energieeffizienten Lastverteilung sowie die Erhaltung der Rechenleistung der Rechnerverbünde werden untersucht. Ein Einsparpotenzial durch reine Lastverteilung ist zwar vorhanden, allerdings ist die Einsparung noch recht gering. Entsprechend werden Folgemaßnahmen untersucht, die auf der initialen Lastverteilung aufsetzen können.

Dies führt zur Beantwortung der zweiten Forschungsfrage. Ungenutzte oder wenig genutzte Rechenknoten können je nach Leerlaufzeiten in einem Energiesparmodus betrieben werden. Auf diese Weise kann in Abhängigkeit von der Auslastung der Rechner unterschiedlich viel an elektrischer Energie eingespart werden. Aufgrund des zeitlichen und energetischen Mehraufwands für den Wechsel in den einen oder anderen Modus müssen Informationen über die Länge der Zeiträume, in denen sich ein Rechner im Leerlauf befindet, bekannt oder vorhersagbar sein.

2 Modelle

Im Rahmen der Arbeit werden Modelle zur Darstellung der Leistungsaufnahme in Bezug zu der aktuellen Auslastung eines Rechners oder eines Rechnerverbunds eingesetzt, die auf kubischen Polynomen basieren. Das Modell der Leistungsaufnahme eines einzelnen Rechners (MLR) ist in Abbildung 2 dargestellt.

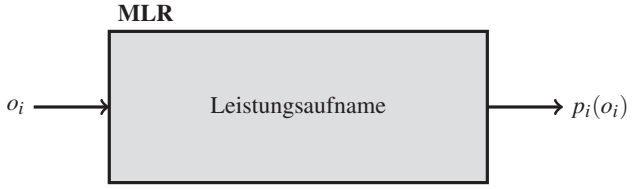


Abb. 2: Modell der Leistungsaufnahme eines einzelnen Rechners

Ein Rechner S_i wird mit einer Leistungsfunktion p_i modelliert, die für eine bestimmte Auslastung o_i die Leistungsaufnahme $p_i(o_i)$ berechnet. Dabei sind Randbedingungen zu beachten wie z. B. die maximal zulässige Auslastung eines Rechners. Verbünde von Rechnern werden mit Leistungskurven modelliert, die aus Benchmark-Informationen des SPECpower-Benchmarks gewonnen werden. Alternativ können auch andere Benchmarks verwendet werden. Wichtig ist nur, dass eine Zuordnung der Leistungsfähigkeit in Operationen pro Zeiteinheit zu einer Leistungsaufnahme in Watt erfolgt. Das Modell der Leistungsaufnahme eines Rechnerverbunds (MLRV) ist in Abbildung 3 dargestellt, wobei hier nur die Leistungsaufnahme bei Anwendung einer Lastverteilung berücksichtigt wird.

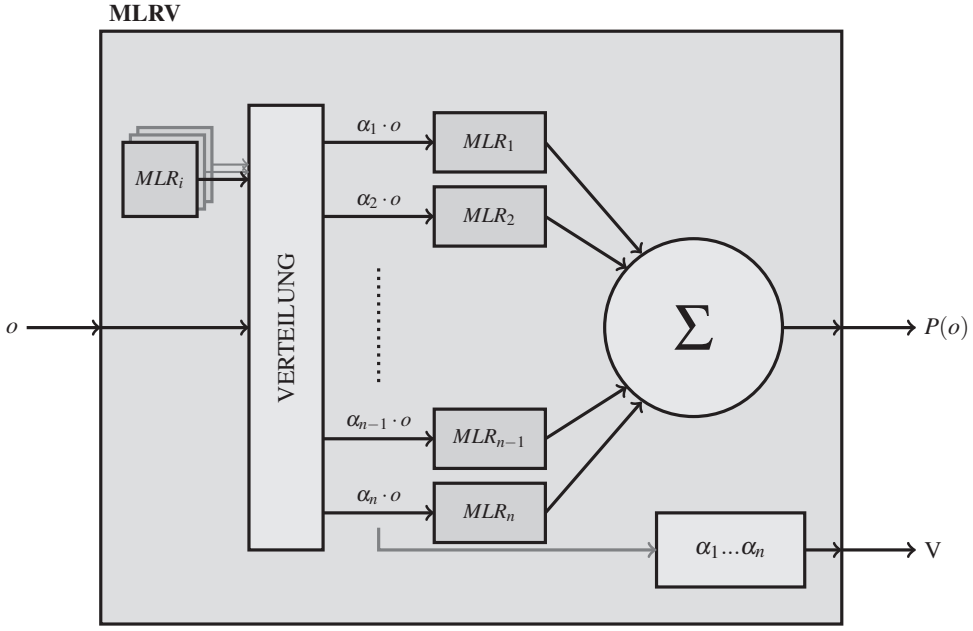


Abb. 3: Modell der Leistungsaufnahme eines Rechnerverbunds

Die Eingabe dieses Modells ist die Gesamtauslastung o eines Rechnerverbunds. Eine Verteilungsstrategie, die auf die Leistungsmodelle für einzelne Rechner zurückgreift (in der Abbildung 3 oben links dargestellt), berechnet Skalierungsfaktoren α_i, die Teilmengen der Gesamtlast einem Rechner des Verbunds zuordnen. Diese Skalierungsfaktoren, multipliziert mit der Gesamtauslastung o, ergeben die Eingabewerte für das Leistungsmodell. Die Leistungsaufnahmen der einzelnen Rechner bei entsprechender Auslastung wird aufsummiert und ergeben schlussendlich eine Gesamtleistungsaufnahme $P(o)$, die Ausgabe dieses Modells ist. Daneben wird mit den berechneten α-Werten eine Verteilung ausgegeben. Das Modell der Berechnung des Energiebedarfs eines Rechners (MER) in Leerlaufzeiten bei Nutzung von Energiesparmodi ist in Abbildung 4 dargestellt.

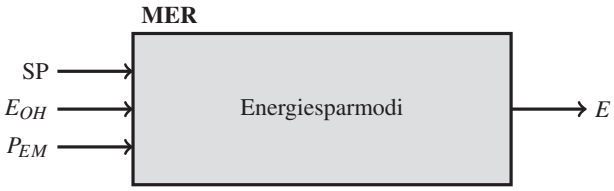


Abb. 4: Modell der Berechnung des Energiebedarfs in Leerlaufzeiten bei Nutzung von Energiesparmodi

Als Eingabe für dieses Modell dient ein Schaltplan, der angibt, ob der betrachtete Rechner zu einem bestimmten Zeitpunkt im Leerlauf ist (0) oder nicht (1). Dieser Schaltplan wird dazu verwendet, die zeitlichen Lücken zu finden, in denen der Rechner in einem Energie-

sparmodus betrieben werden kann. Als weitere Eingabe dient der energetische Mehraufwand für den Rechner, um in einen oder aus einem Energiesparmodus zu wechseln (E_{OH}), sowie die Leistungsaufnahme des Rechners in den entsprechenden Modi (P_{EM}). Als Ergebnis wird der Energiebedarf des Rechners für alle Leerlauflücken zurückgegeben (E). Das Modell der Gesamtenergieaufnahme eines Rechnerverbunds unter Verwendung der Verteilung und Nutzung von Energiesparmodi (MERV) bei Anwendung eines Lastprofils ist in Abbildung 5 dargestellt.

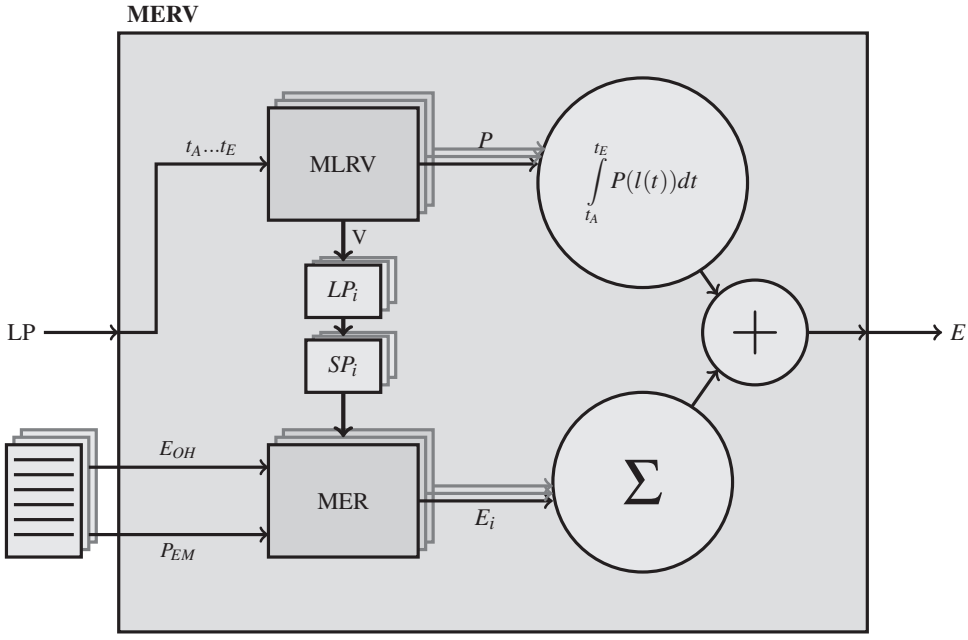
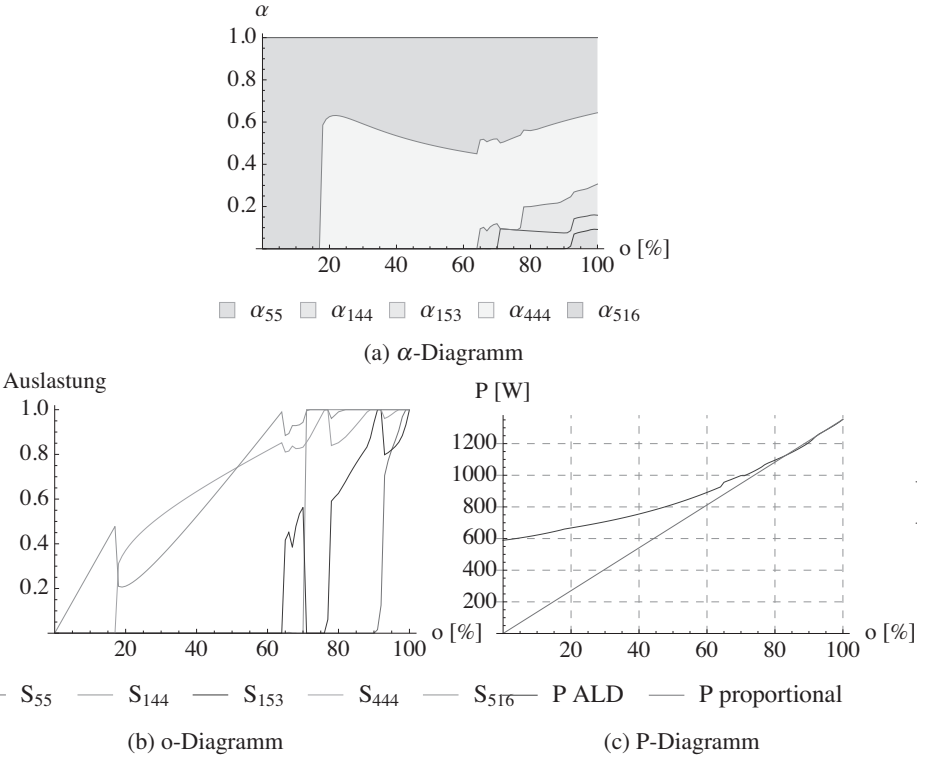


Abb. 5: Energiemodell für einen Rechnerverbund bei Abarbeitung eines Lastprofils

Als Eingabe für dieses Modell dient ein Lastprofil, welches über einen Zeitraum die Last beschreibt, die einem Rechnerverbund zugeordnet wird. Zudem werden die Informationen zu Mehraufwand bzw. Leistungsaufnahme bei der Nutzung von Energiesparmodi als Eingabe übergeben. Als Ergebnis erhält man den Gesamtenergiebedarf E zur Bearbeitung des Lastprofils unter Nutzung der Lastverteilung und Nutzung von Energiesparmodi. Für jeden Zeitpunkt des Lastprofils t_A bis t_E berechnet eine Instanz des Modells MLRV die Leistungsaufnahme P. Das Integral über diese Leistungsaufnahme ergibt den Energiebedarf zu aktiven Zeiten.

Die weitere Ausgabe V (Verteilung) des Modells MLRV wird dazu verwendet, individuelle Lastprofile LP_i des beteiligten Rechner des Verbunds zu erzeugen. Aus diesen werden im Anschluss die Schaltprofile SP_i gewonnen, die als Eingabe für Instanzen des Modells MER dienen. Dieses Modell berechnet für die Leerlauflücken den Energiebedarf jeweils pro Rechner. Die Summe daraus ergibt die zweite Komponente des Gesamtenergiebedarfs. Die Summe der beiden Energiekomponenten ergibt den Gesamtenergiebedarf E.

Im Rahmen der Dissertation wurde das α-o-P-Schema entworfen. Enthalten sind dabei ein α-Diagramm, ein o-Diagramm und ein P-Diagramm zur Darstellung der Verteilung (α), Auslastung (o) und Leistungsaufnahme (P). Das Schema bzw. die einzelnen Diagramme ermöglichen es, sowohl Rückschlüsse auf die Zusammenstellung des Rechnerverbunds als auch die Leistungsfähigkeit von Verteilungsstrategien zu ziehen. Zudem ermöglicht die Darstellung, die Anwendbarkeit von Energiesparmodi in Kombination mit der jeweiligen Verteilungsstrategie vorab abzuschätzen. Ein Beispiel des Schemas unter Verwendung der später vorgestellten ALD-Strategie ist in Abbildung 6 dargestellt.



(a) α-Diagramm

(b) o-Diagramm

(c) P-Diagramm

Abb. 6: α-o-P-Schema unter Verwendung der ALD-Strategie

Das α-Diagramm zeigt, wie die Last in Abhängigkeit der Gesamtauslastung des Verbunds verteilt wird. Das o-Diagramm stellt die Auslastung der einzelnen Rechner in Relation zur Gesamtauslastung des Verbunds dar. Hierbei ist gut zu erkennen, dass die ALD-Strategie in Abhängigkeit der Gesamtlast individuelle Verteilungen vorsieht. Schließlich zeigt das P-Diagramm die Leistungsaufnahme in Abhängigkeit der Gesamtlast an. Dieses Diagramm ist insbesondere zum Vergleich mit P-Diagrammen anderer Strategien und/oder Rechnerverbünden von Interesse.

3 Energieeinsparung

Der erste Schritt, einen Rechnerverbund energieeffizient zu nutzen, ist die Verteilung der Last auf die verschiedenen beteiligten Knoten. Dabei wird im Kontext dieser Arbeit grundsätzlich gefordert, dass die Gesamtleistung nicht beliebig herabgesetzt wird. Dies ist der Fall, wenn der Durchsatz nicht abgesenkt wird, um die Energieaufnahme zu reduzieren. Die Verarbeitungszeit mag bei einzelnen Elementen einer fein granularen Last (z. B. einem Web-Zugriff) steigen, für den Großteil der Zugriffe bleibt die Verarbeitungszeit allerdings ähnlich lang. Dies bedeutet, dass ein einzelner Web-Zugriff möglicherweise nicht auf dem schnellsten Knoten ausgeführt wird. In der Gesamtheit der Zugriffe wird die gleiche Leistung, wiederum in ausgeführten Operationen pro Sekunde, erbracht.

Die Verteilung sieht vor, unter Zuhilfenahme von Heuristiken, eine Last in der Art den Rechnern eines Rechnerverbunds zuzuordnen, dass die Energieaufnahme reduziert wird. Die Gesamtlast, die durch einen Rechnerverbund verarbeitet werden soll, wird somit im Hinblick auf eine möglichst energieeffiziente Ausführung auf die beteiligten Knoten verteilt.

Nach der Verteilung kann entschieden werden, ob es energetisch sinnvoll ist, bestimmte Rechner in einen Energiesparmodus zu überführen. Dies ist für die Rechner zu prüfen, die aufgrund der Verteilungsstrategie für einen bestimmten Zeitraum keinerlei Arbeit zugewiesen bekommen. Darüber hinaus kann für wenig ausgelastete Knoten festgelegt werden, ob es nicht energetisch sinnvoll ist, deren Last auf andere Rechner zu verteilen und den Rechner selbst in einem anderen Energiesparmodus zu betreiben. In einigen Fällen kann es auch energetisch vorteilhaft sein, die Last von stark ausgelasteten Rechnern umzuverteilen. Unabhängig davon, warum einem Rechner keine Last zugewiesen ist (z. B. wegen der Entscheidung der ursprünglichen Heuristik zur Lastverteilung oder aufgrund eines nachträglichen Umverteilens) wird ein solcher Rechner als *inaktiv* bezeichnet. Inaktive Rechner können in verschiedenen Energiesparmodi bzw. im Leerlauf betrieben werden.

Für den Wechsel in die verschiedenen Energiesparmodi ist ein gewisser Mehraufwand an Zeit und Energie notwendig. Der Wechsel in bzw. aus dem Energiesparmodus *Bereitschaft* hat üblicherweise den geringsten Zeit- und Energiebedarf, während es beim Ruhezustand stark darauf ankommt, wie der Rechner vor den Wechsel verwendet wurde. Sehr gute Vorhersagen bzgl. des zeitlichen und energetischen Mehraufwands lassen sich i. A. nur für *Bereitschaft* und *Abschaltung* machen. Zudem unterscheidet sich die Leistungsaufnahme in den verschiedenen Energiesparmodi.

3.1 Verteilungsstrategien für fein granulare Lasten

In der Dissertation werden mehrere Verfahren vorgestellt, die sich in drei Kategorien einteilen lassen. Unter *lastunabhängige* Strategien werden diejenigen verstanden, die die Last verteilen, ohne die energetischen Eigenschaften der Zielrechner zu berücksichtigen. Im Wesentlichen bedeutet dies, dass die Funktionen für die Berechnung der Leistungsaufnahme eines Rechners unter einer bestimmten Last nicht als Maßstab für die Verteilung

herangezogen werden. Zwei dieser Strategien, nämliche die absolute und relative Lastbalancierung (ALB und RLB), werden in der Arbeit beschrieben.

Die *Adaptive Lastverteilung* (ALD) ist eine anspruchsvollere Strategie. Sie berechnet für diskrete Lastniveaus jeweils einen Verteilungsschlüssel.

Werden moderne Rechner bzgl. des Quotienten aus Leistungsfähigkeit und Leistungsaufnahme (*Performance-to-Power Ratio* – PPR) untersucht, stellt man fest, dass der Punkt der höchsten Effizienz bei neueren Rechnern häufig nicht mehr bei einer Auslastung von 100 % liegt, wie dies bei früheren Rechnern der Fall war. Diese Beobachtung motiviert die Strategien der Kategorie *Effizienzpunktverteilung*. Die wesentliche Strategie aus diesem Bereich ist *Best Performance to Power First* (BPPF).

Vergleicht man die Ergebnisse im Sinne der Reduzierung der Leistungsaufnahme (und damit über die Zeit die Energieeinsparung), so stellt sich heraus, dass insbesondere ALD sehr gute Ergebnisse liefert. Aber auch die sehr einfache Strategie BPPF erreicht gut Resultate.

3.2 Ausnutzung von Energiesparmodi

Die energieeffiziente Lastverteilung auf einem Rechnerverbund reduziert die Energieaufnahme bereits. Eine weitere deutliche Reduktion ist dadurch möglich, dass Rechner, die sich im Leerlauf befinden, in einen Energiesparmodus überführt werden. Für die unterstützten Modi werden Übergangszeitpunkte berechnet. Mit deren Hilfe kann dann für jede Leerlauflücke entschieden werden, in welchem Modus ein Rechner überführt wird, um die maximale Energieeinsparung zu erreichen.

Anschließend müssen für eine gegebene Lastkurve die zeitlichen Phasen ermittelt werden, in denen ein Rechner in einen anderen Modus überführt wird. In Abbildung 7 ist beispielhaft ein Lastprofil unter Verwendung der BPPF-Strategie für einen Beispielrechnerverbund dargestellt.

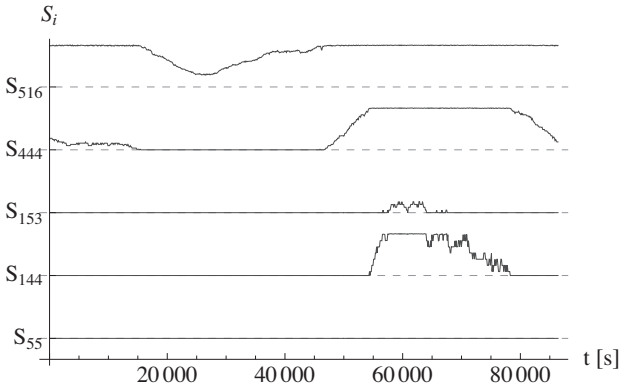


Abb. 7: 24-Stunden-Lastprofil der Beispielkonfiguration unter Verwendung der BPPF-Strategie

Der nächste Schritt besteht darin, die zeitlichen Bereiche zu ermitteln, in denen die einzelnen Rechner im Leerlauf betrieben werden, vgl. Abbildung 8.

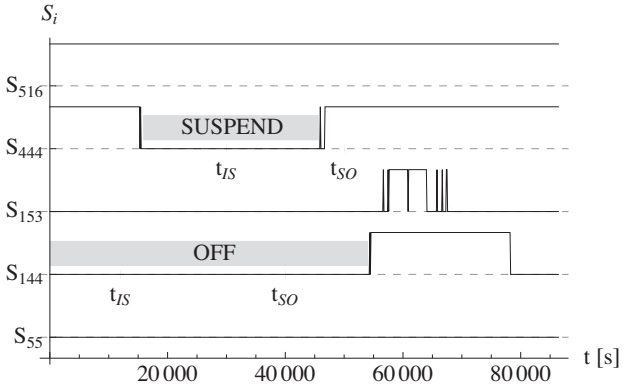


Abb. 8: 24-Stunden-Schaltprofil der BPPF-Strategie

4 Ergebnisse

Der Energiebedarf für die aktiven Abschnitte eines Rechners zuzüglich des Energiebedarfs für die Leerlauflücken ergibt den Energiebedarf über ein festgelegtes Zeitintervall. Anschließend wird der Energiebedarf aller Rechner des Verbunds akkumuliert und damit der Gesamtenergiebedarf des Rechnerverbunds berechnet. Der Energiebedarf unter Verwendung der vier Strategien ALB, RLB, BPPF und ALD bei einem in der Dissertation verwendeten Rechnerverbund und unter Anwendung des dort beschriebenen 24-Stunden-Lastprofils ist in Tabelle 1 dargestellt. Die erste Zeile zeigt den Energiebedarf aller vier Strategien ohne Nutzung von Energiesparmodi (Verteilung). Die zweite Zeile zeigt den Energiebedarf bei einer für die Abschaltung aufbereiteten ALD-Tabelle (Leerlauf). Die drei letzten Zeilen stellen den Energiebedarf dar, wenn die Energiesparmodi Bereitschaft und/oder Abschaltung verwendet werden.

Tab. 1: Energiebedarf gerundet in MJ

	ALB	**RLB**	**BPPF**	**ALD**
Verteilung	83	79	73	71
Leerlauf (optimierte ALD-Tabelle)	–	–	73	72
nur Bereitschaft	–	–	40	36
nur Abschaltung	–	–	39	36
Bereitschaft + Abschaltung	–	–	39	36

Im Rahmen einer intensiven Analyse auf Basis von Wikipedia-Zugriffsprotokollen konnten durchschnittliche Einsparungen in der Größenordnung von 25 % erreicht werden.

Literaturverzeichnis

[Arb14] Arbeitsgemeinschaft Energiebilanz e.V.: Auswertungstabellen zur Energiebilanz Deutschland – 1990 bis 2013, Berlin, 2014.

[Arb15] Arbeitsgemeinschaft Energiebilanz e.V.: Energieverbrauch in Deutschland – Daten für das 1. bis 4. Quartal 2014, Berlin, 2015.

[BB10] Beloglazov, A.; Buyya, R.: Energy Efficient Allocation of Virtual Machines in Cloud Data Centers. In: 10th Int. Conf. on Cluster, Cloud and Grid Computing. IEEE, S. 577–578, 2010.

[BBA10] Buyya, R.; Beloglazov, A.; Abawajy, J.: Energy-Efficient Management of Data Center Resources for Cloud Computing: A Vision, Architectural Elements, and Open Challenges. In: Int. Conf. on Parallel and Distributed Processing Techniques and Applications. S. 12, 2010, eprint: 1006.0308.

[BLM10] Bertini, L.; Leite, J. C. B.; Mossé, D.: Power Optimization for Dynamic Configuration in Heterogeneous Web Server Clusters. Journal of Systems and Software 83/4, S. 585–598, 2010.

[KGB13] Khosravi, A.; Garg, S.; Buyya, R.: Energy and Carbon-Efficient Placement of Virtual Machines in Distributed Cloud Data Centers. In: 19th Int. Conf. on Parallel Processing. Springer, S. 317–328, 2013.

[Len16] Lenhardt, J.: Energieeffiziente Verarbeitung fein granular verteilbarer Lasten auf heterogenen Rechnerverbünden, Diss., Hagen, 2016, URL: https://ub-deposit.fernuni-hagen.de/receive/mir_mods_00000548.



Jörg Lenhardt wurde am 16. Dezember 1978 in Marburg geboren. Nach Abschluss seiner Schulausbildung begann er eine Tätigkeit als Beamter bei der Bayerischen Polizei und studierte nebenberuflich ab dem Jahr 2004 Informatik an der FernUniversität in Hagen. Er schloss das Studium 2009 als Bachelor of Science und 2011 als Master of Science ab. Anschließend nahm er eine Position als Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrgebiet Rechnerarchitektur der FernUniversität an. Dort wurde er bei Professor Dr.-Ing. habil. Wolfram Schiffmann 2016 mit Auszeichnung über Energieeffizienz in heterogenen Rechnerumgebungen zum Doktor-Ingenieur promoviert. Die Arbeit wurde im Rahmen des Dies Academicus 2016 als beste Promotion ausgezeichnet. Seit Ende 2016 ist er Wissenschaftlicher Leiter der Zentraleinheit „Praktikum und Werkstatt Technischen Informatik“ und hier für die Lehre, Forschung und Forschungsunterstützung an der Fakultät Mathematik und Informatik zuständig.

Implizites Feedback in Empfehlungssystemen: Eigenschaften, Anwendungen und Herausforderungen[1]

Lukas Lerche[2]

Abstract: *Empfehlungssysteme* (engl. recommender systems) werden zur Vermeidung der *Informationsüberflutung* auf digitalen Plattformen eingesetzt, indem sie *Nutzern* helfen, relevante *Artikel* aus einer unüberschaubaren Menge zu identifizieren. Die Erzeugung solch *personalisierter Empfehlungen* erfolgt auf Basis von Nutzerfeedback. In dieser Arbeit wird sogenanntes *implizites Feedback* untersucht, typische Anwendungsszenarien beschrieben und aktuelle algorithmische Ansätze vorgestellt. Im Detail werden (i) ein neuartiger *"learning-to-rank"-Algorithmus* eingeführt, der verschiedene Granularitäten von implizitem Feedback differenzieren kann, (ii) kontextualisierte Empfehlungstechniken für die E-Commerce-Domäne präsentiert, welche Empfehlungen an die *kurzfristigen Ziele* der Nutzer anpassen können, (iii) intelligente *Erinnerungsempfehlungen* zur Wiederentdeckung von bekannten Artikeln vorgeschlagen, und (iv) eine tiefgreifende Analyse verschiedener Empfehlungsalgorithmen hinsichtlich ihres *Popularitätsbias* (engl. popularity bias) durchgeführt und Gegenmaßnahmen gezeigt, die dieser Tendenz effektiv entgegenwirken können.

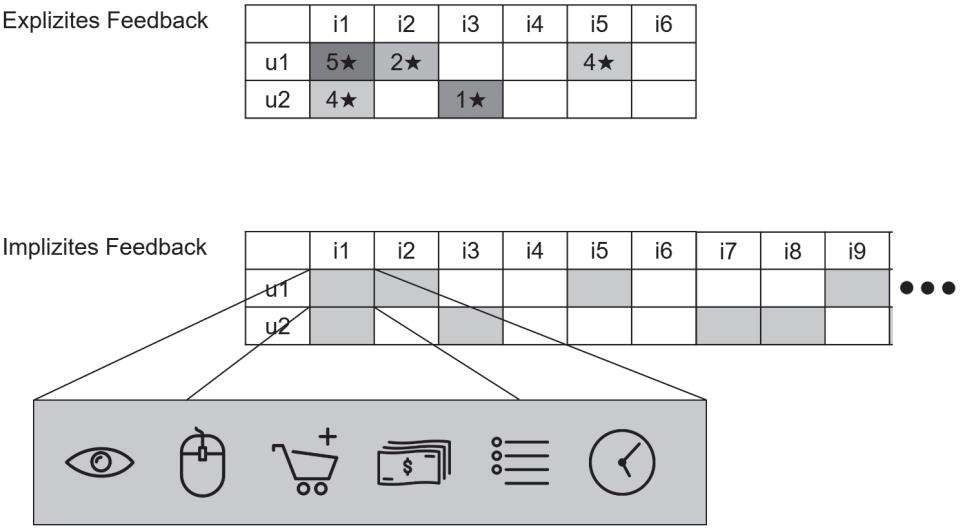


Abb. 1: Explizites und implizites Feedback im Vergleich. Das Feedback ist als Matrix zwischen Nutzern *u* und Artikeln *i* dargestellt. Implizites Feedback kann verschiedene Ausprägungen haben.

[1] Englischer Titel der Dissertation: "Using Implicit Feedback for Recommender Systems: Characteristics, Applications, and Challenges"

[2] TU Dortmund, lukas.lerche@tu-dortmund.de

1 Einleitung

Die Personalisierung der Nutzererfahrung ist im digitalen Zeitalter allgegenwärtig geworden. Im Netz sind Nachrichten, Suchergebnisse und auch Werbung keine statischen, für jeden Nutzer identischen Inhalte mehr, sondern werden dynamisch an die jeweiligen Interessen des Einzelnen angepasst. Hinter dieser persönlichen Informationsaufbereitung stecken zumeist sogenannte Empfehlungssystemen. Ziel eines Empfehlungssystems ist die Bestimmung von passenden Artikeln für einen Nutzer. Die Relevanz der Artikel wird hierbei durch ein sogenanntes *Relevanzmaß* (engl. relevance score) modelliert, welches das jeweilige Interesse eines Nutzers für jeden Artikel quantifizieren soll, etwa basierend auf den persönlichen Präferenzen oder dem aktuellen (zeitlichen, örtlichen, ...) Kontext des Nutzers. Schlussendlich wird eine geordnete Liste der relevantesten Artikel erzeugt, die dem Nutzer in passender Weise mitgeteilt wird, etwa als "Dies könnte ihnen auch gefallen..." oder "Andere Kunden kauften auch...".

Heutzutage sind solch personalisierte Empfehlungen auf vielen Webseiten und in mobilen Anwendungen anzutreffen, beispielsweise in Domänen wie E-Commerce und Multimedia oder in sozialen Netzwerken. Dabei werden verschiedenste Arten von "Artikeln" empfohlen, etwa Produkte in Online-Shops, Filme und Musik auf Streaming-Portalen oder gar Personen im Sinne von möglichen Freundesbeziehungen in Netzwerken. Auch gewinnen Empfehlungssysteme aufgrund der zunehmenden Nutzung von Online-Angeboten auf mobilen Geräten an Bedeutung, da sie den Interaktionsprozess des Nutzers mit dem System vereinfachen und beschleunigen können.

1.1 Historische Entwicklung von Empfehlungssystemen

Historisch werden Empfehlungssysteme in die Gruppen des *kollaborativen Filterns* (engl. collaborative filtering, CF) und des *inhaltsbasierten Filterns* (engl. content-based filtering, CB) eingeteilt, wobei auch feingranularere Einteilungen existieren [Ri11]. Kollaboratives Filtern hat das im Allgemeinen das Ziel, Gruppen von Nutzern mit ähnlichem Verhalten, auch *Nachbarn* (engl. neighbors) genannt, zu finden. Dies können beispielsweise Nutzer sein, die gleiche Artikel positiv bewertet haben. Sollen nun Empfehlungen für einen Nutzer generiert werden, so werden die Artikel vorgeschlagen, die auch von den Nachbarn des Nutzers gemocht wurden. Inhaltsbasiertes Filtern dagegen nutzt zur Erstellung von Empfehlungen die Charakteristika der Artikel, etwa deren Klassifikation, Metadaten oder textuelle Beschreibung, um jene Artikel zu identifizieren, die inhaltlich möglichst ähnlich sind zu den Artikeln, die ein aktuell Nutzer präferiert. In der Praxis werden beide Ansätze oft kombiniert und es entsteht ein sogenanntes *hybrides Empfehlungssystem* [Ja11].

Um überhaupt personalisierte Empfehlungen erzeugen zu können, müssen dem Empfehlungssystem bestimmte Informationen über die Nutzer bekannt sein. Dieses sogenannte *Nutzerprofil* enthält normalerweise die vergangenen Interaktionen eines Nutzers mit einer Plattform, beispielsweise die Browsing-Historie in einem Online-Shop oder die Bewertungen, die der Nutzer bestimmten Artikeln gab. Klassischerweise konzentrierte sich die

Forschung im Bereich Empfehlungssysteme auf Fragestellungen, in denen das Nutzerprofil vollständig aus *explizitem Feedback* (auch: explizite Signale, engl. explicit feedback) besteht, also bewusst abgegebenen *Bewertungen* (engl. ratings, vgl. Sterne-Bewertung bei Amazon) oder "Like/Dislike"-Angaben (vgl. Facebook) [JWK14]. Abbildung 1 zeigt solch explizite (Sterne-)Bewertungen in einer Bewertungsmatrix. Basierend auf diesen Signalen kann ein Empfehlungssystem die Relevanz der für einen Nutzer noch nicht bekannten Artikel ermitteln. In der Praxis zeigt sich jedoch, dass in vielen Anwendungsdomänen kein oder wenig explizites Feedback von Nutzern vorkommt. Selbst in Domänen, in denen explizite Bewertungen durch Nutzer möglich sind, geben meist nur wenige Nutzer Bewertungen ab und diese konzentrieren sich oftmals auf eine kleine Menge populärer Artikel. Die Nutzerprofile sind daher im Allgemeinen spärlich bestückt und für Empfehlungen eines breiten Produktspektrums wenig hilfreich [JH09, JKG12].

1.2 Herausforderungen

Anstatt sich nur auf explizites, von den Nutzern bewusst abgegebenes Feedback zu verlassen, kann auch das Verhalten von Nutzern beobachtet und analysiert werden, um indirekt auf die Nutzerinteressen zu schließen. Empfehlungssysteme müssen hierfür dazu übergehen, dieses sogenannte *implizite Feedback* (auch: implizite Signale, engl. implicit feedback) zu nutzen, welches indirekt aus dem Verhalten der Nutzer und ihrer Interaktion mit der entsprechenden Plattform abgeleitet wird. Aus diesem Grund ist implizites Feedback in vielen Domänen vorhanden, sei es Online-Shopping, soziale Netzwerke oder Multimedia, da es etwa aus Navigations- oder Transaktionslogs der Webseiten extrahiert werden kann.

Obwohl implizite Signale deutlich besser und häufiger verfügbar sind als explizites Feedback, führt ihr Einsatz nichtsdestotrotz zu weiteren Herausforderungen und offenen Fragestellungen. Beispielsweise kann implizites Feedback mehrdeutig sein, d.h. es können verschiedene Signale (etwa "Ansehen", "Anklicken", "In den Warenkorb legen", "Kaufen", "Auf die Wunschliste setzten") existieren, siehe Abbildung 1. Daher ist nicht immer klar, wie eine Interaktion eines Nutzers mit einem Artikel interpretiert werden muss, d.h. ob sie positiv, negativ oder irrelevant war. Auch kann der zeitliche Kontext bei impliziten Signalen eine wichtige Rolle spielen und es müssen oft große Datenmengen verarbeitet werden, in denen auch ein gewisses Rauschen auftritt. In den vergangenen Jahren wurden viele Ansätze zur Nutzung von implizitem Feedback für Empfehlungssysteme in der Forschung vorgestellt und auch einige der klassischen Techniken für explizites Feedback wurden angepasst, um mit impliziten Signalen umgehen zu können.

1.3 Ziele

Dieser Artikel basiert auf der kumulativen Dissertation [Le16]. In dieser untersucht der Autor verschiedene offene Fragestellungen und Herausforderungen, die in der Forschung von implizitem Feedback für Empfehlungssysteme bisher noch nicht abgedeckt wurden. Die Dissertation ist in zwei Teile gegliedert.

Im ersten Teil werden vorhandene Forschungsarbeiten untersucht, die sich mit implizitem Feedback und Empfehlungssystemen, die diese Signale verarbeiten, befassen. Ein besonderer Schwerpunkt wird auf Arbeiten aus der Forschungsdomäne des *Social Information Access* gelegt, in der die Schwarmintelligenz" in sozialen Netzwerken zur Erzeugung von Empfehlungen genutzt wird. Im Verlauf der Arbeit werden verschiedene Anwendungsszenarien für implizites Feedback diskutiert und eine Kategorisierung von verschiedenen Typen von Nutzerverhalten für implizites Feedback vorgenommen. Außerdem werden aktuelle algorithmische Ansätze für die Nutzung von implizitem Feedback vorgestellt, etwa um implizite Signale direkt für Empfehlungen zu interpretieren und weiterzuverarbeiten, oder um implizites Feedback zu explizitem Feedback zu konvertieren, sodass etablierte Empfehlungstechniken für explizite Signale angewendet werden können.

Der zweite Teil der Dissertation umfasst einige der Publikationen des Autors, welche sich ausgewählten Herausforderungen von Empfehlungen basierend auf implizitem Feedback widmen. Hierzu zählen (i) ein spezialisierter "learning-to-rank"-Algorithmus, der verschiedene Granularitäten von impliziten Signalen differenzieren kann, (ii) kontextualisierte Empfehlungstechniken für die E-Commerce-Domäne, welche Empfehlungen an die *kurzfristigen Ziele* (engl. short-term shopping goals) und langfristigen Nutzerinteressen anpassen können, und (iii) intelligente *Erinnerungen* (engl. reminders), deren Ziel die Wiederentdeckung von relevanten Produkten in der Shopping-Historie von Nutzern ist. Schließlich wird in einer weiteren Publikation, die in der Dissertation enthalten ist, eine tiefgreifende Analyse verschiedener Empfehlungsalgorithmen hinsichtlich Tendenzen bestimmte Artikel zu empfehlen durchgeführt. Insbesondere das sogenannte *Popularitätsbias* (engl. popularity bias), also die Tendenz zumeist populäre Artikel vorzuschlagen, kann in praktischen Einsatzszenarien problematisch sein und es werden Gegenmaßnahmen vorgestellt, die dieser Tendenz entgegenwirken können.

Diese Arbeit fasst die Erkenntnisse der kumulativen Dissertation [Le16] zusammen. Sie enthält einen Überblick über Empfehlungen basierend auf implizitem Feedback (Kapitel 2), betrachtet E-Commerce-Empfehlungssysteme (Kapitel 3) und diskutierte die Evaluation und spezielle Bias von Empfehlungssystemen (Kapitel 4).

2 Empfehlungen basierend auf implizitem Feedback

Wie in der Einleitung bereits erwähnt, führt die Nutzung von implizitem Feedback für Empfehlungssysteme zu neuen Herausforderungen. Insbesondere in der Forschungsdomäne des *Social Information Access*, die sich auf die Informationsgewinnung mithilfe der "Schwarmintelligenz" des *Social Web* fokussiert [Br08], sind Empfehlungssysteme zu wichtigen Werkzeugen geworden. In dieser Domäne ist explizites Feedback, etwa Bewertungen, eher spärlich vorhanden verglichen mit der Menge an impliziten Signalen, die auf Nutzerinteraktionen wie dem Browsen, Teilen, Taggen und Kommentieren in sozialen Netzwerken basieren.

Dieser Teil der Arbeit basiert auf einem Kapitel [JLZ17] des Buches *Social Information Access* [BH17], an dem der Autor mitgewirkt hat. Es führt in die Thematik und Unterscheidung des expliziten und impliziten Feedbacks ein und zeigt, dass die beiden Arten von

Signalen sich oftmals nicht eindeutig trennen lassen. Vielmehr gibt es verschiedene Abstufungen, etwa, wenn sich aus explizitem Feedback auch implizite Präferenzen ableiten lassen. Ebenfalls wird eine historische Kategorisierung verschiedener Typen von implizitem Feedback aus der Literatur aufgegriffen und Herausforderungen bei der Nutzung von impliziten Signalen für Empfehlungen diskutiert, beispielsweise die schon erwähnte Ambiguität der impliziten Signale. Das Kapitel gibt weiterhin eine Literaturübersicht über aktuelle Forschungsergebnisse zu implizitem Feedback und betrachtet im Kontext von aktuellen Trends einzelne Domänen, in denen implizite Signale präsent sind, etwa soziale Netzwerke, neue E-Commerce-Ent-wicklungen und allgegenwärtige digitale Services, sowie mobile Geräte. Die vorher aufgegriffene Kategorisierung von implizitem Feedback wird anhand der neuen Erkenntnisse erweitert, um den technologischen Fortschritt der letzten Jahre adäquat abzubilden. Im Anschluss werden aktuelle algorithmische Ansätze vorgestellt, die zur Erzeugung von Empfehlungen aus implizitem Feedback eingesetzt werden können. Neben grundlegenden Techniken um implizites zu explizitem Feedback zu konvertieren, werden auch Ansätze des *Association Rule Mining* und spezialisierte *one-class* Algorithmen des kollaborativen Filterns aus der aktuellen Literatur diskutiert. Schließlich befasst sich das Kapitel mit hybriden Ansätzen, die explizite und implizite Signale intelligent kombinieren können.

In diesem Zusammengang wird der BPR+ Algorithmus vertieft, den der Autor erstmals in [LJ14] als Erweiterung des bekannten *Bayesian Personalized Ranking* Algorithmus (BPR) [Re09] vorstellte. BPR ist ein im Kontext von Empfehlungssystemen sehr bekannter Ansatz zur Nutzung von unärem impliziten Feedback bei der Erzeugung von Empfehlungen. Dies sind implizite Signale, die nur anzeigen, ob ein Nutzer mit einem Artikel interagiert hat oder nicht. Die neue Erweiterung BPR+ unterstützt im Vergleich zu BPR sogenanntes *abgestuftes* implizites Feedback (engl. graded implicit feedback). Somit können im Algorithmus implizite Signale verschiedener Stärken unterschieden werden, etwa, wenn Nutzerinteraktionen häufiger oder zeitnaher aufgetreten sind. Durch diese genauere Interpretation des impliziten Feedbacks und den dadurch gewonnenen Informationen ermöglicht es BPR+ Empfehlungen zu erzeugen, die deutlich genauer sind als die Vorschläge von BPR.

3 E-Commerce-Empfehlungssysteme

E-Commerce ist eine typische Anwendungsdomäne, in der implizites Feedback anzutreffen ist. Mit dem Aufkommen des Online-Handels fingen Unternehmen an, Empfehlungssysteme einzusetzen, um das Einkaufserlebnis für ihre Kunden zu personalisieren ähnlich einer persönlichen Beratung im Ladenlokal. Welche Artikel in der Praxis empfohlen (oder beworben) werden sollen hängt stark vom jeweiligen Geschäftsziel des Unternehmens ab [Sa13, Sa14]. Ein Empfehlungssystem könnte beispielsweise dazu dienen, besonders neue Artikel hervorzuheben oder Artikel aus bestimmten Produktkategorien [Di08] zu präsentieren. Ebenfalls könnte es dazu eingesetzt werden, möglichst die Dinge zu empfehlen, die sehr homogen zu den jeweiligen Nutzerinteressen passen [JLJ15] oder den Nutzer an Produkte erinnern, die er vor kurzem betrachtet hat [LJL16]. Diese letzten beiden Publikationen sind auch ein Teil der kumulativen Dissertation des Autors und werden im Folgenden kurz vertieft.

3.1 Empfehlungen für kurzfristige Ziele

In [JLJ15] werden hybride Strategien für E-Commerce-Empfehlungssysteme vorgestellt, welche Empfehlungen an den aktuellen Kontext des Nutzers an anpassen, beispielsweise anhand seiner Navigationshistorie im Online-Shop. Dahinter steht die Annahme, dass Kunden zwar generelle Präferenzen hinsichtlich bestimmter Produkte, Marken oder Produktcharakteristika haben, aber trotzdem oftmals ein *kurzfristiges Ziel* im Sinn haben, wenn sie den Online-Shop besuchen. Dies geschieht durch die Kombination gewisser Basisalgorithmen, die die langfristigen Interessen der Nutzer modellieren, mit *kurzfristigen* Modellen, die die aktuellen Ziele der Einkaufs-Session des Nutzers erkennen. Die in der Publikation vorgestellten Techniken werden auf zwei Datensätzen aus echten E-Commerce-Umgebungen evaluiert, wobei ein neuartiges Evaluationsverfahren genutzt wird, um die zeitlichen Aspekte des Empfehlungsprozesses zu simulieren. Die Ergebnisse zeigen, dass die Wahl des langfristig agierenden Basisalgorithmus besonders am Anfang von neuen Einkaufs-Sessions wichtig ist. Außerdem weisen die untersuchten neuheits- und inhaltsbasierten kurzfristigen Modelle eine hohe Vorhersagegenauigkeit in den untersuchten Domänen auf und können zuverlässig das aktuelle Ziel der Nutzer erkennen.

3.2 Erinnerungen als Empfehlungen

Die zweite Publikation [LJL16] führt die Arbeit aus dem vorher diskutierten Werk [JLJ15] fort und erhielt den *James Chen Best Student Paper Award* der Konferenz *UMAP 2016*. Die Konferenzserie *User Modeling, Adaptation and Personalization*[2] zählt zu den führenden internationalen Veranstaltungen im Bereich der Personalisierung.

Der Artikel thematisiert *Erinnerungen* als Empfehlungen in der E-Commerce-Domäne. Klassischerweise schlagen Empfehlungssysteme in Forschungsszenarien immer nur Artikel vor, die einem Nutzer noch unbekannt sind. In der Praxis ist dies allerdings nicht in jedem Fall die sinnvollste Vorgehensweise. Die intelligenten Erinnerungen (*Erinnerungsempfehlungen*), die in dieser Publikation thematisiert werden, haben daher nicht das Ziel, dem Nutzer neue Bereiche des Produktspektrums nahezulegen, sondern sollen bewusst schon bekannte, aber nun wieder relevante Artikel vorschlagen. Im Vergleich zu den schon in [JLJ15] gezeigten Erinnerungsstrategien, werden nun komplexere Techniken vorgeschlagen, die etwa die Ähnlichkeit zwischen Artikeln und Sessions in der Historie des Nutzers auswerten oder die Intensität der Interaktion von Nutzern mit Artikeln bewerten. Außerdem wird das in der vorangegangenen Arbeit vorgestellte Evaluationsverfahren erweitert, um die Anzahl der offensichtlichen Erinnerungsempfehlungen zu modellieren und variieren zu können. Die Ergebnisse zeigen, dass sich Erinnerungsempfehlungen in einem Offline-Evaluationsszenario gut eigenen, um Käufe der Nutzer vorherzusagen. Normalerweise ist es schwierig den tatsächlichen Nutzen von Empfehlungen und speziell Erinnerungen in der Praxis zu messen. Durch den Einsatz einer Feldstudie und die Untersuchung der Transaktionslogs zweier E-Commerce-Plattformen konnte jedoch gezeigt

[2] `http://www.um.org/umap2016`

werden, dass auch in der Praxis solche Erinnerungsempfehlungen durchaus von großem wirtschaftlichen Nutzen sind.

4 Evaluation und Bias von Empfehlungsalgorithmen

Der wirtschaftliche Erfolg in der E-Commerce-Domäne wird normalerweise mit bestimmten Geschäftsmetriken quantifiziert, etwa die Einnahmen oder die Click-Through-Rate (CTR). In der Forschung allerdings werden solche Metriken häufig nicht angewendet und der Fokus liegt eher auf Offline-Experimenten und der Optimierung der Vorhersagegenauigkeit der eingesetzten Modelle. Auf der ACM RecSys Konferenz, einer wichtigen Konferenz im Forschungsbereich Empfehlungssysteme, haben beispielsweise 85% der 63 publizierten *full papers* aus 2014 und 2015 ausschließlich Offline-Experimente eingesetzt [JA16a]. Nur fünf Arbeiten haben Nutzerstudien mit echten Probanden oder Experimenten auf *crowd-sourcing*-Plattformen durchgeführt und gerade einmal drei Publikationen nutzten einen A/B-Test in einer echten Live-Umgebung. Dieser Fokus auf die Optimierung der Vorhersagegenauigkeit in Offline-Szenarien ist dadurch begründet, dass das Forschungsfeld der Empfehlungssysteme ursprünglich aus dem Bereich des *Information Retrieval* hervorging [He04].

4.1 Nachteile der Offline-Evaluation

Obwohl die Vorhersagegenauigkeit eines Algorithmus ein Indikator für seine Leistung in der Praxis sein kann [GUH15], zeigt sie jedoch eigentlich nur, wie gut der Algorithmus die versteckten Signale oder Bewertungen in einem statischen Datensatz vorhersagen sagen kann. Dies entspricht allerdings nur dem "Status Quo" der Daten zum Zeitpunkt ihrer Aufnahme in den Datensatz und somit oftmals nicht der Realität [Zh10, CKT10, St11, Ja16b]. Des Weiteren kann die Relevanz von neuen Artikeln nicht beurteilt werden, da sie dem System zur Zeit der Erstellung des Datensatzes noch nicht bekannt waren. Eine weitere Einschränkung tritt in sehr popularitäts- oder neuheitsorientierten Domänen auf, etwa bei Filmen, Nachrichten oder blog-ähnlichen Webseiten: Algorithmen, die eher populäre oder neue Artikel vorschlagen, weisen hier eine sehr hohe Vorhersagegenauigkeit auf, da sie die Trends in den Ausgangsdaten direkt nachbilden. In der Praxis kann dies allerdings nicht erwünscht sein. Im Folgenden wird genau diese Eigenschaft genauer diskutiert.

4.2 Das Popularitätsbias und mögliche Gegenmaßnahmen

Das *Popularitätsbias* und mögliche Gegenmaßnahmen wurden in [Ja15] untersucht, einer der Publikationen der kumulativen Dissertation des Autors. Der Artikel wurde mit dem *2015 James Chen Award for UMUAI Best Paper* im renommierten Journal *User Modeling and User-Adapted Interaction*[3] ausgezeichnet.

[3] `http://www.umuai.org`

Der Text umfasst eine multidimensionale Evaluation von bekannten und populären Empfehlungsalgorithmen aus der Forschung hinsichtlich verschiedener Eigenschaften, etwa ihrer Genauigkeit, Katalogabdeckung oder Tendenz, populäre Artikel zu empfehlen (Popularitätsbias). Die Untersuchungen zeigen unter anderem, dass die gemessene Empfehlungsgenauigkeit vieler Empfehlungsstrategien ähnlich ist, die eigentlich vorgeschlagenen Artikel sich aber stark voneinander unterscheiden. Weitere durchgeführte Simulationen und Parametervariationen zeigen außerdem, dass viele der sehr akkuraten Algorithmen eine starke Tendenz haben, vor allem populäre Artikel vorzuschlagen. Da dieses Bias in der Praxis unerwünscht sein kann, stellt die Publikation zwei neuartige Techniken vor, die als Gegenmaßnahmen gegen das Popularitätsbias dienen. Einer dieser Ansätze ist eine Erweiterung des BPR-Algorithmus, der schon in Kapitel 2 angesprochen wurde, und ermöglicht die Reduzierung des Popularitätsbias bei nur kleinen Einbußen in der ursprünglichen Vorhersagegenauigkeit des Algorithmus.

5 Zusammenfassung

Lange Zeit fokussierte sich die Forschung im Bereich Empfehlungssystem vor allem auf explizites Feedback. Dies lag vor allem an groß angelegten Wettbewerben wie dem *Netflix Prize*[4] und den dadurch frei verfügbaren Datensätzen mit Nutzerbewertungen. Allerdings ignorierten diese Forschungsarbeiten einige Probleme, die in der Praxis auftreten können. Mit der Verbreitung von sozialen Netzwerken und E-Commerce hat sich dieser Trend in den letzten Jahren teilweise gewendet und der Forschungsfokus verschob sich in Richtung der Herausforderungen von praxisnahen Systemen, für die implizite Signale allgegenwärtig sind. Nach Konstan und Riedl [KR12] gilt es, hier in der Zukunft vor allem die folgenden drei Herausforderungen anzugehen: *Skalierbarkeit*, die bessere *Nutzung von nutzergenerierten Inhalten* und schließlich die Optimierung der *Forschungsinfrastruktur*. Vor allem der letzte Aspekt ist essenziell, denn die Probleme der Evaluation und Vergleichbarkeit von Forschungsergebnissen bestehen weiterhin, wie in Kapitel 4 angesprochen.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass die Forschung im Bereich Empfehlungssysteme und speziell für implizites Feedback viele Fortschritte gemacht hat, aber noch lange nicht am Ziel angekommen ist. Die Dissertation [Le16] hilft hierbei, einige der offenen Herausforderungen und Probleme anzugehen und zu lösen.

Literaturverzeichnis

[BH17] Brusilovsky, Peter; He, Daqing: Social Information Access, Jgg. 10100 in LNCS. Springer, Heidelberg, 2017.

[Br08] Brusilovsky, Peter: Social information access: the other side of the social web. In: International Conference on Current Trends in Theory and Practice of Computer Science. Springer, S. 5–22, 2008.

[4] `http://www.netflixprize.com`

[CKT10] Cremonesi, Paolo; Koren, Yehuda; Turrin, Roberto: Performance of Recommender Algorithms on Top-n Recommendation Tasks. In: Proceedings of the 2010 ACM Conference on Recommender Systems. RecSys '10, S. 39–46, 2010.

[Di08] Dias, M. Benjamin; Locher, Dominique; Li, Ming; El-Deredy, Wael; Lisboa, Paulo J.G.: The Value of Personalised Recommender Systems to E-business: A Case Study. In: Proceedings of the 2008 ACM Conference on Recommender Systems. RecSys '08, S. 291–294, 2008.

[GUH15] Gomez-Uribe, Carlos A; Hunt, Neil: The Netflix Recommender System: Algorithms, Business Value, and Innovation. ACM Transactions on Management Information Systems (TMIS), 6(4):13, 2015.

[He04] Herlocker, Jonathan L.; Konstan, Joseph A.; Terveen, Loren G.; Riedl, John T.: Evaluating Collaborative Filtering Recommender Systems. ACM Transactions on Information Systems, 22(1):5–53, Januar 2004.

[Ja11] Jannach, Dietmar; Zanker, Markus; Felfernig, Alexander; Friedrich, Gerhard: Recommender Systems – An Introduction. Cambridge University Press, 2011.

[Ja15] Jannach, Dietmar; Lerche, Lukas; Kamehkhosh, Iman; Jugovac, Michael: What Recommenders Recommend: An Analysis of Recommendation Biases and Possible Countermeasures. User Modeling and User-Adapted Interaction, 25(5):427–491, Dezember 2015.

[JA16a] Jannach, Dietmar; Adomavicius, Gediminas: Recommendations With A Purpose. In: RecSys 2016. 2016.

[Ja16b] Jannach, Dietmar; Resnick, Paul; Tuzhilin, Alexander; Zanker, Markus: Recommender Systems – Beyond Matrix Completion. Communications of the ACM, 2016.

[JH09] Jannach, Dietmar; Hegelich, Kolja: A Case study on the Effectiveness of Recommendations in the Mobile Internet. In: Proceedings of the 2009 ACM Conference on Recommender Systems. RecSys '09, S. 205–208, 2009.

[JKG12] Jannach, Dietmar; Karakaya, Zeynep; Gedikli, Fatih: Accuracy Improvements for Multicriteria Recommender Systems. In: Proceedings of the 13th ACM Conference on Electronic Commerce. EC '12, S. 674–689, 2012.

[JLJ15] Jannach, Dietmar; Lerche, Lukas; Jugovac, Michael: Adaptation and Evaluation of Recommendations for Short-term Shopping Goals. In: Proceedings of the 2015 ACM Conference on Recommender Systems. RecSys '15. ACM, S. 211–218, 2015.

[JLZ17] Jannach, Dietmar; Lerche, Lukas; Zanker, Markus: Recommending Based on Implicit Feedback. In (Brusilovsky, Peter; He, Daqing, Hrsg.): Social Information Access, Jgg. 10100 in LNCS. Springer, Heidelberg, Kapitel 14, 2017.

[JWK14] Jawaheer, Gawesh; Weller, Peter; Kostkova, Patty: Modeling User Preferences in Recommender Systems: A Classification Framework for Explicit and Implicit User Feedback. ACM Transactions on Interactive Intelligent Systems, 4(2):8:1–8:26, 2014.

[KR12] Konstan, Joseph A.; Riedl, John: Recommender Systems: From Algorithms to User Experience. User Modeling and User-Adapted Interaction, 22(1-2):101–123, 2012.

[Le16] Lerche, Lukas: Using Implicit Feedback for Recommender Systems: Characteristics, Applications, and Challenges. Dissertation, TU Dortmund University, 2016.

[LJ14] Lerche, Lukas; Jannach, Dietmar: Using Graded Implicit Feedback for Bayesian Personalized Ranking. In: Proceedings of the 2014 ACM Conference on Recommender Systems. RecSys '14, S. 353–356, 2014.

[LJL16] Lerche, Lukas; Jannach, Dietmar; Ludewig, Malte: On the Value of Reminders within E-Commerce Recommendations. In: Proceedings of the 24st International Conference on User Modeling, Adaptation and Personalization. UMAP '16. ACM, 2016.

[Re09] Rendle, Steffen; Freudenthaler, Christoph; Gantner, Zeno; Schmidt-Thieme, Lars: BPR: Bayesian Personalized Ranking from Implicit Feedback. In: Proceedings of the Twenty-Fifth Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence. UAI '09, S. 452–461, 2009.

[Ri11] Ricci, F.; Rokach, L.; Shapira, B.; Kantor, P. B.: Recommender Systems Handbook. Springer, 2011.

[Sa13] Said, Alan; Lin, Jimmy; Bellogín, Alejandro; de Vries, Arjen: A Month in the Life of a Production News Recommender System. In: Proceedings of the 2013 Workshop on Living Labs for Information Retrieval Evaluation. LivingLab '13, ACM, New York, NY, USA, S. 7–10, 2013.

[Sa14] Said, Alan; Bellogín, Alejandro; Lin, Jimmy; de Vries, Arjen: Do Recommendations Matter?: News Recommendation in Real Life. In: Proceedings of the Companion Publication of the 17th ACM Conference on Computer Supported Cooperative Work & Social Computing. CSCW Companion '14, ACM, New York, NY, USA, S. 237–240, 2014.

[St11] Steck, Harald: Item Popularity and Recommendation Accuracy. In: Proceedings of the 2011 ACM Conference on Recommender Systems. RecSys '11, S. 125–132, 2011.

[Zh10] Zheng, Hua; Wang, Dong; Zhang, Qi; Li, Hang; Yang, Tinghao: Do Clicks Measure Recommendation Relevancy?: An Empirical User Study. In: Proceedings of the Fourth ACM Conference on Recommender Systems. RecSys '10, ACM, New York, NY, USA, S. 249–252, 2010.



Lukas Lerche erlangte 2008 sein Abitur an der *Leibniz-Gymnasium – Dortmund International School* und wurde im gleichen Jahr als einer der besten Schulabsolventen NRWs geehrt. Im Anschluss studierte er Angewandte Informatik mit Schwerpunkt Dienstleistungsinformatik an der *TU Dortmund*. Nebenbei arbeitete er als MCPD- und MCTS-zertifizierter Softwareentwickler bei der *MATERNA GmbH* im Bereich Dokumentenmanagement und verfasste auch zu diesem Thema 2011 seine Bachelorarbeit. Seine Masterarbeit, die sich mit hybriden Empfehlungssystemen beschäftigt, entstand 2012 am *Lehrstuhl XIII* der *Fakultät Informatik* der *TU Dortmund*. Im Anschluss arbeitete Lukas an diesem Lehrstuhl unter Prof. Dr. Dietmar Jannach als wissenschaftlicher Mitarbeiter und vertiefte seine Forschung im Bereich Empfehlungssysteme. Nebenbei sammelte er Erfahrung in Forschung und Lehre, unter anderem durch die Entwicklung von wissenschaftlichen Softwaresystemen, einige Veröffentlichungen und Vorträge auf internationalen Konferenzen, und die Konzeption von Workshops und Lehrveranstaltungen. Er promovierte 2016 mit Auszeichnung zu den Themen *Implicit Feedback Recommendations*, *Learning-to-Rank* und *E-Commerce*. Seit 2016 arbeitet Lukas als IT-Projektleiter, Data Scientist und Fachreferent an der *UB Dortmund*.

Interaktionskonzepte für Personal Fabrication Geräte[1]

Stefanie Mueller[2]

Abstract: Während ein 3D Drucker im Jahr 2007 noch 15.000 Euro kostete, kosten 3D Drucker heute im Schnitt nur noch 500 Euro. Auf diesem Preislevel sind die Geräte so erschwinglich, dass eine Zukunft in der jeder selbst Objekte produzieren kann in greifbare Nähe rückt. In meiner Dissertation untersuche ich die Fragestellung: Nun da die Hardware verfügbar ist, wie muss die Mensch-Maschine Interaktion gestaltet werden, damit jeder eigene Objekte erstellen kann? Um diese Frage zu beantworten, stelle ich in eine Analogie zu Personal Computing her. In der Geschichte von Personal Computing trug eine verkürzte Rücklaufzeit zwischen Benutzereingabe und Systemausgabe so stark zur Vereinfachung der Interaktion bei, dass heutzutage jeder einen Computer bedienen kann. In meiner Dissertation zeige ich, wie die gleiche Entwicklung auf 3D Drucker angewendet werden kann mit dem Ziel, dass in Zukunft nicht nur jeder einen Personal Computer zuhause hat sondern auch ein Personal Fabrication Gerät.

1 Einführung

Personal Fabrication Geräte, wie zum Beispiel 3D Drucker, weisen in eine Zukunft, in der jeder selbst zuhause eigene Objekte herstellen kann. Während ein durchschnittlicher 3D Drucker im Jahr 2007 noch 15.000 Euro kostete, kosten 3D Drucker heute im Schnitt nur noch 500 Euro (Abbildung 1b). Auf diesem Preislevel sind die Geräte so erschwinglich für Endkonsumenten, dass eine Zukunft in der jeder selbst zuhause eigene Objekte produziert in greifbare Nähe rückt. In meiner Dissertation untersuche ich die Fragestellung: Nun da die Hardware verfügbar ist, wie muss die Mensch-Maschine Interaktion gestaltet werden, damit jeder mit diesen Geräten eigene Objekte erstellen kann?

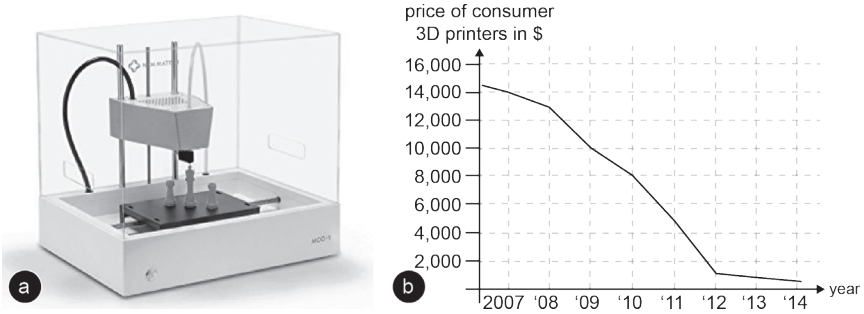


Abb. 1: (a) Preisgünstiger 3D Drucker für Endkonsumenten (New Matter, 300 Euro). (b) Sinkende Kosten für 3D Drucker machen die Hardware nun für jedermann verfügbar.

[1] Englischer Titel der Dissertation: 'Interacting with Personal Fabrication Devices'

[2] Stefanie Mueller, Massachusetts Institute of Technology (MIT), stefanie.mueller@mit.edu

1.1 Analogie: Personal Fabrication und Personal Computing

Um diese Frage zu beantworten, stelle ich in meiner Dissertation eine Analogie zur Geschichte des Personal Computing her.

Als Computer in den 60er Jahren langsam Verbreitung fanden, war die Rücklaufzeit zwischen Benutzereingabe und Maschinenausgabe sehr lang: Nachdem Benutzer eine Eingabe mittels einer Lochkarte erstellt hatten, mussten Benutzer bis zum nächsten Morgen warten um zu sehen, ob die Eingabe korrekt oder fehlerhaft war. War ein Fehler in der Eingabe, mussten Benutzer eine weitere Nacht warten. Gegebenfalls zog sich so die Erstellung einer funktionierenden Lösung über mehrere Tage oder gar Wochen hin. Da die Rücklaufzeit so lang war konnten Computer nur von Experten bedient werden, welche genug Erfahrung mitbrachten um Fehler von Anfang an zu vermeiden.

In genau der gleichen Art und Weise bedienen wir heutzutage 3D Drucker (Abbildung 2): Nachdem Benutzer eine Eingabe mittels eines 3D Models erstellt haben, müssen Benutzer bis zum nächsten Morgen warten um zu sehen, ob das Objekt, das der 3D Drucker über Nacht gedruckt hat, funktioniert oder fehlerhaft ist. Haben Benutzer bei der Erstellung des Objektes einen Fehler gemacht, müssen Benutzer erneut eine Nacht warten. Genau wie bei Computern früher verursacht die lange Rücklaufzeit zwischen Benutzereingabe und Maschinenausgabe, dass derzeit nur Experten mit jahrelangem Training 3D Drucker erfolgreich benutzen können.

Wenn wir uns jedoch die Entwicklung des Computers ansehen, sind wir heute an einem Punkt, an dem jeder einen Computer benutzen kann. Was hat sich seit den ersten Tagen des Computers geändert, das diese Zukunft ermöglicht hat?

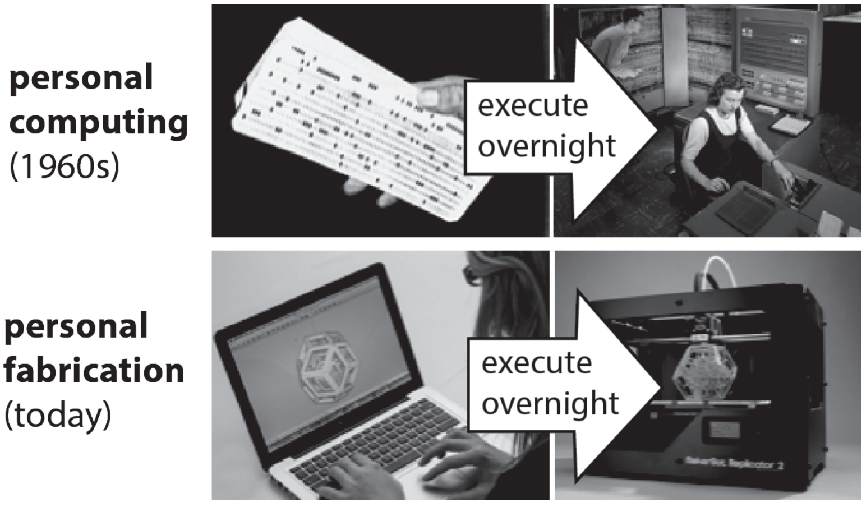


Abb. 2: Mit Personal Fabrication Geräten sind wir heute an dem Punkt, wo wir mit Personal Computern in den 60ern waren. Die Rücklaufzeit zwischen Benutzereingabe und Maschinenausgabe ist derart lang, dass 3D Drucker nur von Experten benutzt werden können, die genug Erfahrung mitbringen um Fehler von Anfang an zu vermeiden.

1.2 Schnellere Rücklaufzeiten zwischen Eingabe und Ausgabe

In den letzten Jahrzehnten wurden die Rücklaufzeiten zwischen Benutzereingabe und Maschinenausgabe immer kürzer (Abbildung 3):

In der ersten Phase, wie oben beschrieben, wurde eine Maschinenausgabe nur **ganz am Ende** produziert. Das heißt, Benutzer mussten zuerst die komplette Schrittfolge definieren (z.B. in Form einer Lochkarte), bevor Benutzer das Programm testen konnten.

In der zweiten Phase wurde eine Maschinenausgabe nicht erst am Ende, sondern bereits **nach jeder einzelnen Benutzereingabe** generiert (z.B. ein einzelnes Kommando in der Kommandozeile). Dieser schnelle Rücklaufzyklus vereinfachte die Interaktion wesentlich, da Benutzer nun schnell ausprobieren und bei potentiellen Fehlern gegensteuern konnten.

In der dritten Phase, heutzutage, wird die Maschinenausgabe **in Echtzeit** produziert: Während Benutzer mit den Fingern auf einem Touchscreen Bilder hin und her verschieben bewegen sich die Bilder unter den Fingern in Echtzeit mit. Es gibt keine zeitliche Verzögerung mehr. Benutzer können sehr schnell ausprobieren, welche Lösung sich am besten eignet, ohne dass sich das Ausprobieren einer Option über einen ganzen Tag hinzieht.

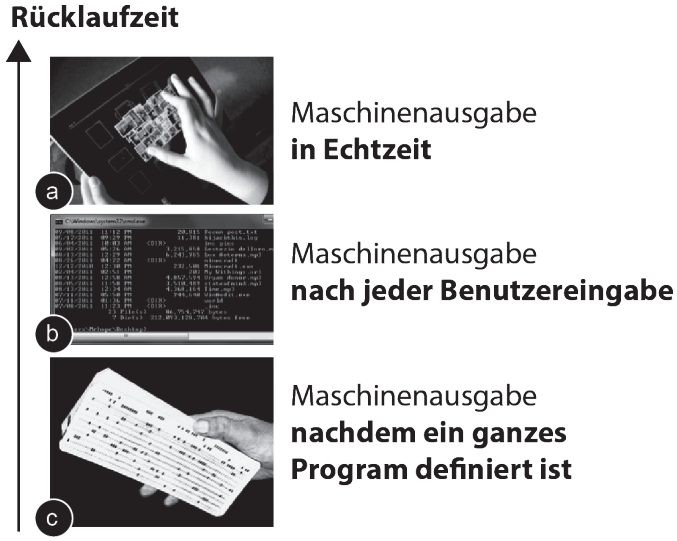


Abb. 3: Schnellere Rücklaufzeit: (a) Touchscreens, (b) Kommandozeile, (c) Lochkarten.

In meiner Dissertation argumentiere ich, dass wir genau diese drei Schritte der Entwicklung des Benutzerinterfaces von Personal Computern auf Personal Fabrication Geräte anwenden müssen, damit diese Geräte für jedermann benutzbar werden. Wenn wir diese Entwicklung erfolgreich durchlaufen, argumentiere ich wird **in Zukunft jeder zuhause ein Personal Fabrication Gerät besitzen**, genau wie heutzutage jeder einen Personal Computer besitzt.

Bis diese Zukunftsvision vollständig real wird, wird es noch mehrere Jahrzehnte dauern. Vielen Menschen fällt es schwer sich heute vorzustellen, dass sie einmal ein Personal Fabrication Gerät wie zum Beispiel einen 3D Drucker zuhause haben werden und damit eigene Objekte ganz einfach erstellen können. Jedoch wurde genau das in der Vergangenheit auch über Personal Computer gesagt. Bis heute werden diese Aussagen als die größten Irrtümer in der Technologiegeschichte zitiert:

> *'I think there is a world market for maybe five computers.'*
>
> (Thomas Watson, president of IBM, 1943)

> *'There is no reason for any individual to have a computer in his home.'*
>
> (Ken Olsen, founder of Digital Equipment Corporation, 1977)

In den nächsten drei Kapiteln dieser Kurzfassung beschreibe ich wie ich durch die **Entwicklung neuer interaktiver Hardware/Software Systeme** die oben beschriebenen drei Phasen systematisch abbilde. Ich beginne mit Phase 1 und untersuche wie sich die **Rücklaufzeit für das Drucken ganzer Objekte** verkürzen lässt. In Phase 2 demonstriere ich die erste 'Kommandozeile' für physische Objekte, ein System, das eine **physische Ausgabe nach jeder Benutzereingabe** erstellt. Schließlich zeige ich in Phase 3 ein von mir entwickeltes System, mit dem Benutzer **Objekte in Echtzeit verändern** können.

2 Schnellere Rücklaufzeiten für ganze Objekte

Die erste Forschungsfrage die ich beantworte ist: Wie kann man ganze Objekte schneller herstellen, sodass sie nicht mehr über Nacht gedruckt werden müssen?

Um diese Frage zu beantworten, habe ich das Konzept des Low-Fidelity Fabrication [MB] entwickelt. Dem Konzept liegt die Beobachtung zugrunde, dass Objekte in der Testphase nicht immer in voller Auflösung gedruckt werden müssen, was sehr langsam ist, sondern in bestimmten Phasen auch als niedrig auflösende, dafür jedoch schnelle Vorschaudrucke erstellt werden können.

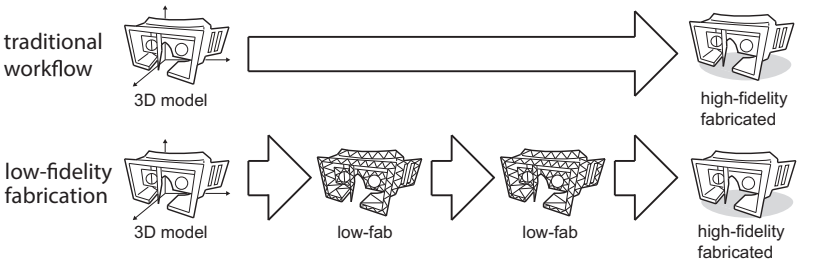


Abb. 4: Anstatt immer voll aufgelöste Objekte zu drucken, was viel Zeit kostet, druckt Low-Fidelity Fabrication Zwischenversionen als schnelle Vorschauobjekte.

Das Konzept des Low-Fidelity Fabrication lässt sich in verschiedenen Techniken für verschiedene Anwendungszwecke abbilden.

Abbildung 5a zeigt eine Low-fidelity Fabrication Technique für das Testen von Form [SMBe]: Der Benutzer möchte eine Flasche erstellen, die sich ergonomisch genau an seine Hand einpasst (jede Hand ist anders geformt) und daher verschiedene Gröen der Flasche ausprobieren. Anstatt mehr als 2 Stunden pro Flaschendruck zu verwenden, verwendet der Benutzer die von mir entwickelte Low-fidelity Fabrication Software um das 3D Model der Flasche in ein Wireframe zu konvertieren. Mittels einer speziellen 3D Druck Technik, die ich entwickelt habe, kann diese Flasche nun in nur 14 Minuten gedruckt und ausprobiert werden. Der Benutzer kann also in der gleichen Zeit 8-mal so viele Varianten ausprobieren.

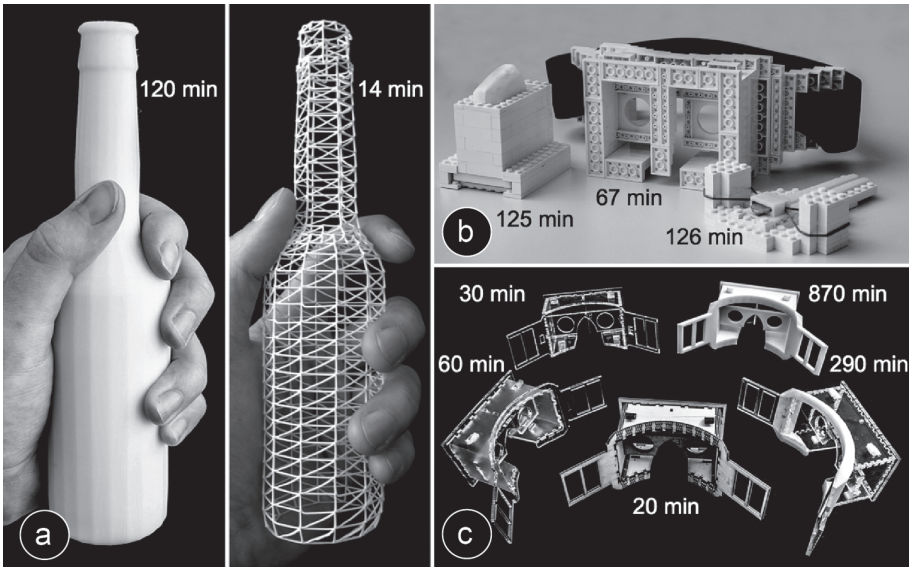


Abb. 5: Verschiedene Low-Fidelity Fabrication Techniken: (a) für Form, (b) für Modularität, (c) für Stabilität.

Die von mir entwickelte Technologie funktioniert auf 3D Druckern, die derzeit im Handel erhältlich sind, und kann damit direkt angewendet werden. Inzwischen ist Wireframe Printing in den meist verbreiteten 3D Drucker für Endkonsumenten, den Ultimaker, integriert. Mehrere Forschungsgruppen haben nach der Veröffentlichung meines Papiers auf der Idee aufgebaut und Folgepublikationen veröffentlich (siehe [RWM] [HPG] [YHL]).

Abbildung 5b und c zeigen weitere Low-fidelity Fabrication Techniken: (b) eine Low-Fidelity Fabrication Technik für modulares Austauschen von Komponenten [SMBc] (Best Paper Award Nominee) und (c) eine Low-Fidelity Technik, die auf Stabilität fokussiert [DBB] (Best Paper Award Nominee).

Für alle drei Low-Fidelity Techniken habe ich mit der Unterstützung meiner Co-Autoren eine Konvertierungssoftware entwickelt, die Algorithmen aus der Computergraphik verwendet um die 3D Modelle automatisch in ihre neuen Repräsentationen zu zerlegen.

3 Physische Ausgabe nach jeder Benutzereingabe

Während Low-Fidelity Fabrication die Ausgabe des 3D Druckers bis zu 90 % beschleunigt, so müssen Benutzer dennoch zunächst das gesamte 3D Model erstellen und erst ganz am Ende können sie die gedruckte Version testen. Im nächsten Schritt habe ich daher untersucht, wie sich eine physische Ausgabe nach jeder Benutzereingabe realisieren lassen kann.

Um das Konzept zunächst in 2D zu evaluieren, habe ich als Grundlage meines Systems einen 2D Laserschneider verwendet. Im meinem System [SMBd] verwenden Benutzer einen Laserpointer um direkt auf das Stück Holz im Laserschneider zu zeichnen. Während der Benutzer eine Linie mit dem Laserpointer zeichnet, nimmt eine Kamera oberhalb des Laserschneiders den Zeichenpfad auf, begradigt ihn, und nachdem der Benutzer die gerade gezeichnete Linie beendet hat, schneidet der Laserschneider sie direkt aus. Der Benutzer erhält so eine physische Ausgabe nach jeder Eingabe.

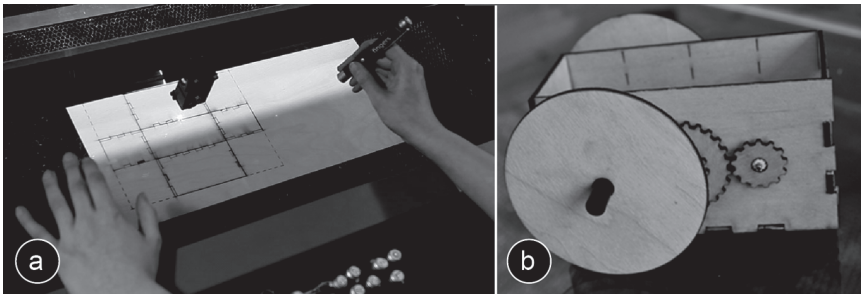


Abb. 6: (a) Benutzer zeichnen direkt auf das Holz im Laserschneider mit Hilfe von Laserpointern. Der Zeichenpfad wird von einer Kamera aufgenommen, automatisch begradigt, und anschließend vom Laserschneider direkt ausgeschnitten. (b) Ein Beispielobjekt.

Der Benutzer kann das bereits geschnittene Objekt jederzeit aus dem Laserschneider herausnehmen, testen, und es anschließend wieder zurücklegen um weiter daran zu arbeiten. Die benötigte Präzision kommt von einer Reihe verschiedener Arbeitswerkzeuge, die in verschiedene Laserpointer encodiert sind. Zum Beispiel gibt es einen Laserpointer, der immer gerade Linien erstellt, auch wenn der Benutzer mit der Hand wackelt.

Um das oben gezeigte System auf 3D zu erweitern, entwickelte ich eine neuartige Laserschneide-Technologie, die aus einer 2D Platte ein dreidimensionales Objekt faltet [SMBa] (Best Paper Award).

Ein Laserschneider fokussiert normalerweise den Laserstrahl auf die Oberfläche der Platte. Durch den fokussierten Strahl ist die Energie so hoch, dass ein Schnitt entsteht (Abbildung

7a). Um den Laserschneider auch zum Biegen verwenden zu können, benutze ich einen Trick: Ich defokussiere den Laser indem ich die Platte weiter nach unten bewege. Der defokussierte Strahl hat nicht mehr genug Energie um zu schneiden, sondern wärmt die Platte nur noch auf. Da es sich bei der Platte um ein Thermoplastik handelt, führt die Erwärmung dazu, dass sich die Platte mittels der Schwerkraft an der erwärmten Kante nach unten biegt und ein 3D Objekt bildet.

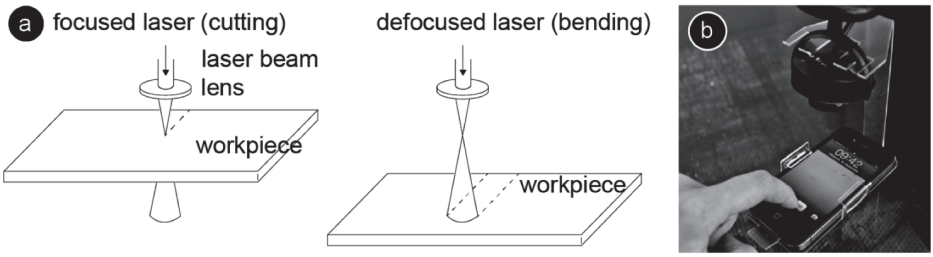


Abb. 7: (a) Zum Schneiden ist der Laser auf das Werkstück fokussiert, zum Biegen de-fokussiere ich den Laser automatisch. (b) Ein Beispielobjekt aus 5 Faltungen.

4 Physisches Ausgabe in Echtzeit

Die beiden zuvor beschriebenen Systeme sind Beispiele für eine physische Kommandozeile. Nachdem Benutzer ihre Eingabe beendet haben, wird eine physische Ausgabe produziert. Jedoch ist bei einer physischen Kommandozeile die Rücklaufzeit immer noch zu lang: Erst nachdem Benutzer eine Linie vollständig gezeichnet haben wird sie ausgeschnitten und nicht während Benutzer die Linie zeichnen.

Im letzten Schritt meiner Dissertation habe ich daher untersucht, wie ein System aussehen kann, dass dem Benutzer in Echtzeit eine physische Ausgabe erzeugt. Abbildung 8 zeigt ein Beispiel: Während der Benutzer die Hand bewegt und damit die gewünschte Veränderung anzeigt, ändert sich das Objekt sofort, es gibt keine Verzögerung mehr [SMBb].

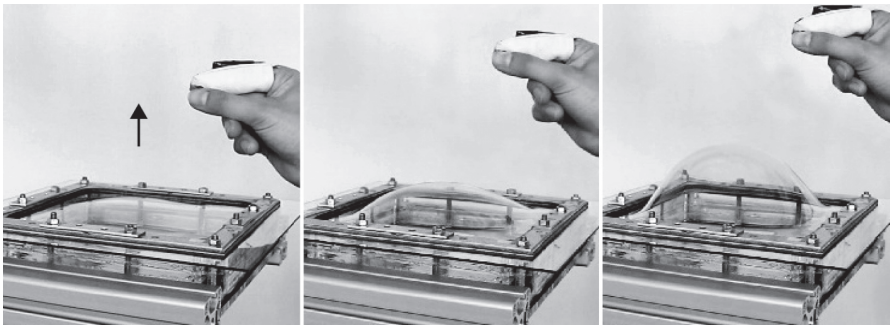


Abb. 8: Echtzeit-Veränderung: Die Form des Objektes folgt der Hand des Benutzers.

Die Interaktion wird durch das in Abbildung 9 dargestellte System ermöglicht: Eine Heißluftpistole an einem Roboterarm wärmt das Objekt an der Stelle auf, an welcher der Benutzer es verändern möchte. Sobald die Stelle warm genug ist, schaltet sich ein pneumatisches System ein, das entweder Druck oder Vakuum erzeugt. Dies drückt die aufgewärmte Stelle entweder nach außen oder zieht sie nach innen. Der Benutzer definiert wie weit die Stelle verformt wird indem der Benutzer die Hand entweder in Richtung des Objektes oder vom Objekt wegbewegt. Die Bewegung wird mit einem Motion Capture System aufgenommen und die Koordinaten an das System weitergegeben. Durch die Echtzeitveränderung kann der Benutzer schnell viele verschiedene Optionen ausprobieren um zu einer funktionierenden Lösung zu kommen.

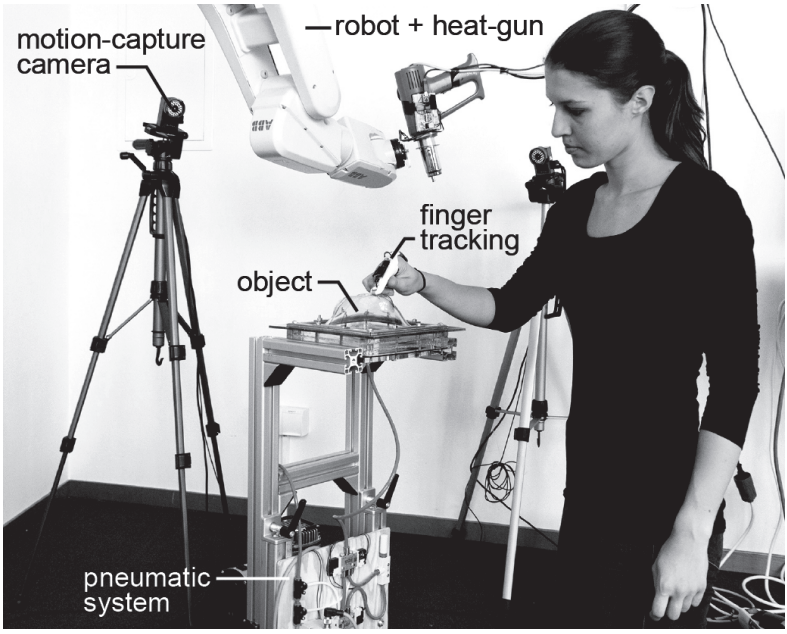


Abb. 9: Systemkomponenten fr die interaktive Echtzeitverformung.

5 Zusammenfassung

Durch eine Reihe neuer interaktiver Software/Hardware Systeme habe ich in meiner Dissertation gezeigt, wie sich die Rücklaufzeiten zwischen Benutzereingabe und Maschinenausgabe für die Erstellung physischer Objekte reduzieren lassen. Die von mir entwickelten Systeme illustrieren wie sich das gleiche Interaktionsmodell, welches Personal Computing erfolgreich gemacht hat, auch auf Personal Fabrication anwenden lässt (Abbildung 10).

Genau wie in Personal Computing, hat dieses Interaktionsmodel jedoch auch seine Grenzen: Obwohl es sich sehr gut für Anfänger und einfache Objekte eignet, ist es weniger geeignet für komplexe Objekte die langfristige Planung benötigen. Solche Objekte fallen jedoch typischerweise in den Aufgabenbereich von Experten, die mit den bisher verwende-

ten 3D Editoren umgehen können. Mit den Händen Objekte zu formen bedeutet auch, dass es keine Zoom-Funktion gibt und alles auf einer 1:1 Skala beruht. Und schließlich ist es weiterhin eine offene Forschungsfrage, wie sich eine Rückgängig-Taste in der physischen Welt realisieren lässt. Mit weiteren Entwicklungen im Bereich Materialwissenschaften, glaube ich jedoch, dass sich in Zukunft Materialien für genau diesen Zweck herstellen lassen werden.



Abb. 10: Zusammenfassung: Durch eine Reihe neuer interaktiver Software/Hardware Systeme habe ich in meiner Dissertation gezeigt, wie sich das gleiche Interaktionsmodell, das Personal Computing erfolgreich gemacht hat, auch auf Personal Fabrication anwenden lässt.

6 Biografie



Stefanie Mueller ist Assistant Professorin in Electrical Engineering und Computer Science sowie Mechanical Engineering am Massachusetts Institute of Technology (MIT). Ihre Forschungsgruppe HCI Engineering arbeitet an neuartigen Techniken für Personal Fabrication mit dem Ziel, dass in Zukunft jeder überall zu jeder Zeit eigene Objekte herstellen kann. Stefanie erhielt für ihre Forschungsarbeit mehrere Best Paper und Honorable Mention Awards von der ACM CHI Konferenz. Als Gastredner hielt Stefanie unter anderem Vorträge an Universitäten wie Harvard, Stanford, Berkeley, und Industrieforschungslaboren wie Adobe Research, Disney Research, und Microsoft Research. **Website:** http://people.csail.mit.edu/stefaniemueller

Literaturverzeichnis

[DBB] Dustin Beyer, Serafima Gurevich, Stefanie Mueller Hsiang-Ting Chen; Baudisch, Patrick: Platener: Low-Fidelity Fabrication of 3D Objects by Substituting 3D Print with Laser-Cut Plates. In: Proc. ACM CHI 2015. S. 1799–1806.

[HPG] Huaishu Peng, Rundong Wu, Steve Marschner; Guimbretiere, Francois: On-The-Fly Print: Incremental Printing While Modelling. In: Proc. ACM CHI 2016. S. 887–896.

[MB] Mueller, Stefanie; Baudisch, Patrick: Low-Fidelity Fabrication: Speeding up Design Iteration of 3D Objects. In: Proc. CHI EA 2015. S. 327–330.

[RWM] Rundong Wu, Huaishu Peng, Franois Guimbretire; Marschner, Steve: Printing Arbitrary Meshes with a 5DOF Wireframe Printer. In: ACM Trans. Graph. 2016. Jgg. 35, 4, Article 101.

[SMBa] Stefanie Mueller, Bastian Kruck; Baudisch, Patrick: LaserOrigami: Laser-Cutting 3D Objects. In: Proc. ACM CHI 2013. S. 2585–2592.

[SMBb] Stefanie Mueller, Anna Seufert, Huaishu Peng Robert Kovacs Kevin Reuss Tobias Wollowski Francois Guimbretiere; Baudisch, Patrick: Continuous Interactive Fabrication. In: submitted to ACM UIST 2017.

[SMBc] Stefanie Mueller, Tobias Mohr, Kerstin Guenther Johannes Frohnhofen; Baudisch, Patrick: faBrickation: Fast 3D Printing of Functional Objects by Integrating Construction Kit Building Blocks. In: Proc. ACM CHI 2014. S. 3827–3834.

[SMBd] Stefanie Mueller, Pedro Lopes; Baudisch, Patrick: Interactive Construction: Interactive Fabrication of Functional Mechanical Devices. In: Proc. ACM UIST 2012. S. 599–606.

[SMBe] Stefanie Mueller, Sangha Im, Serafima Gurevich Alexander Teibrich Lisa Pfisterer Francois Guimbretiere; Baudisch, Patrick: WirePrint: 3D Printed Previews for Fast Prototyping. In: Proc. ACM UIST 2014. S. 273–280.

[YHL] Yijiang Huang, Juyong Zhang, Xin Hu Lei Yu; Liu, Ligang: FrameFab: Robotic Fabrication of Frame Shapes. In: Proc. ACM Trans. Graph. 2016. Jgg. 35, 6, Article 224.

Rekonstruktion, Analyse und Editierung dynamisch deformierter 3D-Oberflächen

Thomas Neumann[1]

Abstract:

Dynamisch deformierte 3D-Oberflächen spielen in der Computergrafik eine zentrale Rolle und können beispielsweise mittels 3D-Rekonstruktionsverfahren digitalisiert werden. Diese Verfahren habe ich im Rahmen meiner Forschung weiterentwickelt, sodass sie besonders verlässlich und präzise arbeiten. Auf diese Weise können detaillierte Oberflächenmodelle von Phänomenen wie sich anspannender Muskeln der menschlichen Hautoberfläche digitalisiert werden. Für viele Anwendungsgebiete ist eine Wiederverwendung, Bearbeitung und Analyse von derlei gewonnenen 3D-Oberflächendaten von großer Bedeutung. Um dies zu ermöglichen habe ich neuartige Werkzeuge auf Basis der datengetriebenen Modellierung und des maschinellen Lernens konzipiert und realisiert. Durch sie kann eine vielfältige Menge an Eingabedaten verarbeitet werden, von aufgenommenen Gesichtsanimationen über Ganzkörperbewegungen bis hin zu Muskel- und Kleidungsdeformationen.

1 Einführung

Beispiele für dynamisch deformierte Oberflächen finden sich überall um uns herum: von flatternder Kleidung bis hin zu sich biegenden Schuhsohlen, von sich ausbeulenden Bizeps-Muskeln bis hin zu den Bewegungen der Gesichtsmuskeln während wir lächeln. Sich deformierende Oberflächen sind räumlich-zeitliche Phänomene. Erst wenn nicht nur die Position im Raum, sondern auch die Bewegung einer ausreichend großen Zahl von 3D-Punkten auf der Oberfläche bekannt sind, kann die 3D-Oberfläche glaubhaft in Bewegung dargestellt bzw. detailliert analysiert werden. Heutzutage erlaubt es die Computergrafik, derlei Phänomene auf der Basis von Simulationen realitätsnah nachzustellen und über das Rendering glaubhaft visuell abzubilden. Digitale Nachstellungen komplexer dynamischer Oberflächenphänomene von Grund auf mit digitalen 3D-Modellierwerkzeugen zu erschaffen ist allerdings äußerst zeit- und kostenaufwendig. Ein Kleidungsstück im virtuellen Wind wehen zu lassen oder die Bewegung eines Gesichtes glaubhaft nachzustellen kann in der Praxis nur mittels langwieriger Handarbeit von erfahrenen Computer-Animatoren sowie durch rechenintensive physikalische Simulationen bewerkstelligt werden. Ein anderer Ansatz besteht darin, 3D-Oberflächen direkt aus Bilddaten der „echten Welt“ aufzunehmen [Th10], die Oberflächen also in 3D zu rekonstruieren. In meiner Arbeit stelle ich neue Rekonstruktionsverfahren vor, die besonders verlässlich und akkurat arbeiten. In dieser Zusammenfassung zeige ich, dass damit detaillierte Oberflächenmodelle von sich anspannenden Muskeln erfasst werden können. Meine Dissertation [Ne16] untersucht weitere Anwendungsgebiete, z.B. die Erfassung von sich deformierender Kleidung.

[1] Technische Universität Braunschweig, Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden, tneumann@htw-dresden.de

Auch die Wiederverwendung, Bearbeitung und Analyse gewonnener 3D-Oberflächendaten ist aktuell noch nicht auf eine einfache Art und Weise möglich. Ein möglicher Ansatz um diese Lücke zu schließen stellt die datengetriebene Modellierung dar. Die Idee ist, aufgenommene und damit besonders realistische 3D-Daten in einem generalisierten Modell zu lernen, welches dann in neuen Szenarien eingesetzt werden kann. Dies ist vor allem für das Darstellen komplexer Oberflächendeformationseffekte des menschlichen Körpers interessant, denn diese in Bewegung zu analysieren und virtuell sehr realitätsnah zu simulieren hat eine Vielzahl von Anwendungsgebieten, sowohl für den Unterhaltungsbereich (Virtual Reality, virtuelle Charaktere in Spielen und Filmen), der Ergonomie (z.B. Fitting von Kleidung) als auch für den medizinischen Bereich (z.B. in der Biomechanik). Motiviert durch diese Anwendungsbeispiele habe ich einen neuen Ansatz für das datengetriebene Modellieren menschlicher Muskel-Deformationen entwickelt. Dieses neuartige Verfahren ermöglicht eine datengetriebene Modellierung mit besonders umfangreichen Datensätzen und liefert anatomisch-realistische Deformationseffekte. Es übertrifft damit die Genauigkeit früherer Methoden. Allerdings handelt es sich bei diesem Ansatz um ein überwachtes Lernverfahren, es fordert sowohl eine große Datenmenge (sehr viele gemessene 3D-Oberflächen) als auch eine Definition der zu lernenden Parameter (also die *Label*). Dies schränkt die Anwendungsgebiete des Modells ein. Deswegen beschäftige ich mich in meiner Arbeit darüber hinaus mit dem unüberwachten Lernen aus 3D-Oberflächendaten. Meine Dissertation stellt neuartige Werkzeuge vor, welche eine weitreichende Menge an Eingabedaten verarbeiten können, von aufgenommenen Gesichtsanimationen über Ganzkörperbewegungen bis hin zu Muskel- und Kleidungsdeformationen. Um diese Anwendungsbreite zu erreichen stütze ich mich auf die allgemeinen Konzepte der *sparsity* (engl. für dünn besetzt) und Lokalität und bette diese in einen mathematischen Optimierungsansatz ein. Abschließend zeige ich in meiner Arbeit, wie diese Konzepte auch für die Konstruktion von oberflächen-adaptiven Basisfunktionen übertragen werden können. Dadurch können weitere Anwendungsfelder für die Verarbeitung, Registrierung und Bearbeitung statischer Oberflächenmodelle erschlossen werden.

2 Rekonstruktion und datengetriebene Modellierung sich deformierender Muskeln

Die menschliche Bewegung wird durch ein komplexes biologisches System aus Muskeln, Knochen und Sehnen gesteuert. Der Schulter-Arm-Komplex allein besteht aus über 20 Muskeln, mit den zwei prominentesten Muskeln *biceps brachii* und *triceps brachii*, welche starke Muskelauswölbungen und Deformationen während intensiver Bewegungen zeigen. Muskeln können bewusst oder unterbewusst durch neuronale Signale aktiviert werden, und sie reagieren auf extern einwirkende Kräfte und Momente. Als Folge verändern die Muskeln ihre Form, das Gewebe und die Haut deformiert sich. Die Form und Deformation der Muskeln hängen zudem von Faktoren wie der Konstitution der Person und der Zusammensetzung ihrer Muskelstränge ab.

Dieses komplexe System mit allen Einflussgrößen über eine physikbasierte Vorwärtssimulation zu modellieren ist äußerst schwierig. Eine Alternative stellen datengetriebene Modelle dar, welche ursprünglich für das statistische Modellieren statischer 3D-Scans

entwickelt wurden [An05]. Sie *lernen* die Form der 3D-Oberfläche anhand von aufgenommenen 3D-Daten. Auf diesem Ansatz aufbauend entwickle ich zunächst Methoden für die 3D-Rekonstruktion dynamisch deformierter Hautoberflächen in Bewegung. Die damit messbaren 3D-Daten digitalisieren das komplexe Zusammenspiel verschiedener Muskeln echter Probanden in Abhängigkeit ihrer Konstitution, extern einwirkender Kräfte und bei unterschiedlichen Sportbewegungen. Diese Phänomene können dann mittels eines datengetriebenen Ansatzes modelliert und in neuen Szenarien, bspw. für neue Bewegungen, resynthetisiert werden. Die Arbeit beschränkt sich dabei auf den Schulter-Arm-Komplex des menschlichen Körpers. Die zugrundeliegende Methodik kann aber als Blaupause und als *proof-of-concept* verstanden werden, welcher in Zukunft auf andere Körperteile oder sogar den kompletten Körper adaptiert werden kann.

Ein Nutzer des anhand dieser Daten konstruierten Muskel-Modells kann als Eingabe standardisierte Bewegungsparameter (bspw. Gelenkwinkel des Ellenbogens), biometrische Parameter (BMI, Muskularität, Körpergröße), sowie eine an der Hand wirkende externe Kraft bestimmen. In Abhängigkeit dieser frei wählbaren Parameter produziert das Modell die realistische Oberflächenform der Muskeln des Schulter-Arm-Bereiches. Da dazu auf detaillierte, von Probanden gewonnenen Oberflächendaten zurückgegriffen wird, sind die synthetisierten Oberflächen sehr realitätsnah. Dies erlaubt es beispielsweise, realistische Bewegungen und Oberflächendeformationen virtueller Charaktere zu synthetisieren.

In dieser Studie wurden 10 männliche Personen (im Alter von 20-34 Jahre und in unterschiedlicher sportlicher Verfassung) zur Aufnahme von Muskeldeformationen rekrutiert. Jeder Proband führte 30 - 40 Bewegungen mit verschieden schweren Hanteln bis zu 17 kg durch. Die Bewegungen wurden durch ein synchronisiertes und kalibriertes Mehrkamerasystem aufgenommen (16 Videokameras, 1600×1200 Pixel Auflösung, 30 Hz), siehe Abb. 1a. Zur 3D-Rekonstruktion der Hautoberfläche müssen in jedem Einzelbild zunächst Punkte aus verschiedenen Kameras aufeinander gematcht werden. In [Ne16, Abschnitt 2.3] zeige ich, wie man dazu einen Graph-Matching Algorithmus erweitern kann, so dass dieser alle Punkte konsistent über alle Kameras aufeinander abbildet. Anhand dieser Korrespondenzen zwischen Punkten aus Bildern verschiedener Kameras kann eine dreidimensionale Punktwolke für jedes aufgenommene Einzelbild aus der Videosequenz rekonstruiert werden. Wohin die Punkte sich bewegen und verformen ist damit allerdings noch unbekannt, die Daten sind nicht zueinander *registriert*.

Zur Registrierung wird zunächst ein generisches Arm-Modell (*Template Mesh*) mit Hilfe weniger, per Hand gesetzter Markierungen grob an die 3D-Rekonstruktion angepasst, worauf eine feine Anpassung per nicht-rigider Registrierung folgt, vgl. Abb. 1d. Nach dieser Initialisierung wird das *Template Mesh* über einen neuen Matching-Algorithmus an alle anderen Posen und Bewegungen des Probanden angepasst. Abb. 1e demonstriert, dass dies selbst bei großen Posenunterschieden und schnellen Bewegungen funktioniert. Nach der Initialisierung kann so der komplette Datensatz automatisch für alle Probanden registriert werden (die Berechnung aller 32 000 3D-Oberflächen dauert allerdings mehrere Tage). Da das gleiche *Template Mesh* für alle Probanden benutzt wird, sind die 3D-Oberflächen untereinander vergleichbar, trotz unterschiedlichem Punktemuster pro Proband.

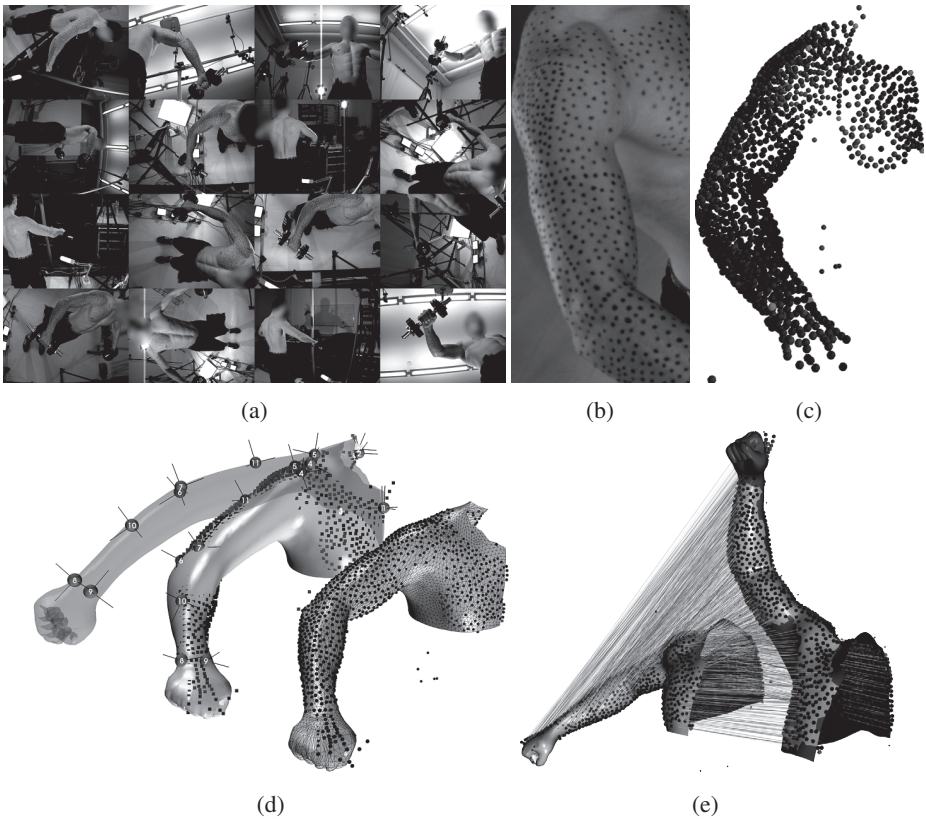
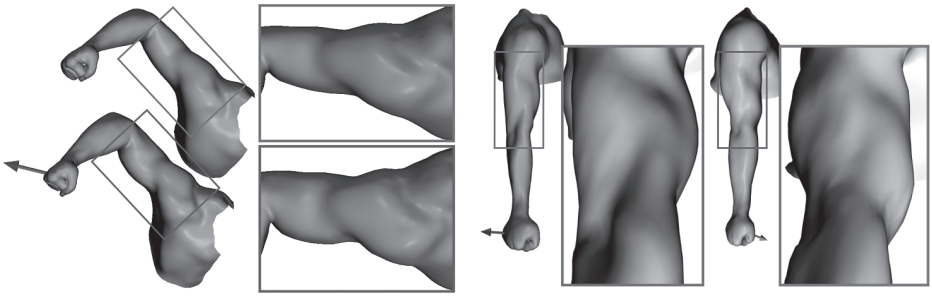


Abb. 1: 3D-Rekonstruktion von Muskeldeformationen in Bewegung: (a) Probanden werden mit 16 synchronisierten Videokameras erfasst. (b) Ein Zufallsmuster wird auf den Arm aufgebracht. (c) zeigt die 3D-rekonstruierten Punkte des Schulter-Arm-Bereiches des Probanden. (d) Ein *Template Mesh* wird an die Punkte der Initialisierungspose angebracht und in (e) werden Punkt-zu-Punkt Korrespondenzen gezeigt, welche der Registrierung der 3D-Oberfläche auf die komplette Bewegung dienen.

Indem ich die gemessene Deformationen der Oberfläche dann auf eine neue Art und Weise parametrisiere, kann diese Muskeldeformationen besonders effizient im Muskel-Modell gelernt werden. Ich zeige außerdem, dass es durch eine Approximation der *Kernel Ridge Regression* möglich wird, nichtlinearer Deformationseffekte selbst aus solch großen Datensätzen (hier über 30 000 3D-Oberflächen) datengetrieben zu modellieren.

Nach diesem Trainingsschritt kann das Muskel-Modell interaktiv von Anwendern, z.B. Animatoren, genutzt werden, um komplexe Muskeleffekte in Echtzeit zu synthetisieren[3]. Die Pose, Körperform und externe Kraft kann frei gewählt werden, um physiologisch plausible Muskeleffekte zu erzielen. Abb. 2 zeigt vom Muskel-Modell synthetisierte 3D-Oberflächen für Posen und externe Kräfte, welche nicht Teil des Trainingsdatensatzes

[3] Das Demonstrationsvideo zeigt die Ergebnisse in Bewegung, `https://youtu.be/L4T4t2_qkDk`



(a) (b)

Abb. 2: Vom Muskel-Modell synthetisierte Muskel-Deformationen für neue Posen und verschiedene externe Kräfte (roter Pfeil). Umrahmter Bereich jeweils rechts vergrößert dargestellt.

sind. Das Muskel-Modell interpoliert also nicht nur aus den Eingabedaten, sondern kann auch für neue Bewegungen extrapolieren. In Abb. 2a zeichnen sich deutlich die Muskeln *deltoideus* und *biceps brachii* als Reaktion auf eine externe Kraft ab. In Abb. 2b beulen sich, biomechanisch plausibel, der *biceps brachii* und sein Antagonist *triceps brachii* aus, je nachdem in welche Richtung die Kraft in der Hand wirkt.

3 Lokale Deformationskomponenten für 3D-Oberflächen

Zwar können datengetriebene Modelle sehr realistische 3D-Oberflächen generieren, ihre praktische Anwendbarkeit ist dennoch begrenzt. Denn um ein datengetriebenes Modell zu lernen muss eine große Menge an 3D-Oberflächen gemessen werden, um Trainingsdaten zur Verfügung zu stellen. Außerdem müssen semantische und tatsächlich relevante Einflussfaktoren (z.B. Größe der Person, Bewegungsparameter wie Ellenbogengelenkwinkel) zu jeder gemessenen 3D-Oberfläche verfügbar sein. Ein Nutzer des datengetriebenen Modells kann dann auch nur diese vordefinierten Parameter variieren um einen Einfluss bspw. auf eine Muskelauswölbung auf der 3D-Oberfläche zu nehmen. Die verwendeten Parameter sind aber in vielen Datensätzen gar nicht verfügbar, sind eventuell nicht erschöpfend, oder nicht messbar: will man bspw. einer aufgenommenen 3D-Oberfläche eines Gesichtes nachträglich ein Lächeln hinzufügen, so müsste der Datensatz einen Parameter „Stärke des Lächelns“ beinhalten. In der Praxis ist eine solche Größe unmöglich objektiv messbar, daher sind Anwendungsfälle wie dieser mit einem klassischen datengetriebenen Modell nicht umsetzbar. Aus dieser Problematik heraus ist die Idee entstanden, einen Satz von Parametern direkt aus den 3D-Oberflächendaten zu erlernen, mit anderen Worten, sowohl die Modellfunktion als auch eine niedrigdimensionale Parametrisierung direkt aus den 3D-rekonstruierten Daten zu extrahieren.

Bisherige Methoden zur automatischen Generierung niedrigdimensionaler Parametrisierungen stellen Bedingungen an die genutzten 3D-Daten oder arbeiten nur für eine bestimmte Art von 3D-Oberflächen, sind bspw. spezialisiert für Gesichter [TDM11]. Techniken der Dimensionsreduktion, vor allem die Hauptkomponentenanalyse (PCA - Principal Components



(a) 5 Hauptkomponenten (PCA) (b) 5 SPLOCS-Komponenten

Abb. 3: Vergleich von Faktoren aus der Hauptkomponentenanalyse (PCA) in (a) mit den hier vorgestellten lokalen Deformationskomponenten (SPLOCS) in (b). Die Stärke der Deformation wird von grau (keine) bis blau (stark) visualisiert.

Analysis), stellen dagegen kaum Annahmen an die Art und Beschaffenheit der Daten. Im Wesentlichen sind dies Verfahren zur Zerlegung von (Daten-)Matrizen, welche in unserem Fall gemessene Deformationen auf eine lineare Kombination von Faktoren (Komponenten) zurückführen würde. Mit anderen Worten konstruiert die Hauptkomponentenanalyse eine Basis an Deformationskomponenten. In der Praxis zeigt sich allerdings, dass den individuellen Dimensionen und den dazugehörigen Komponenten eine Semantik fehlt. Einzelne Komponenten korrespondieren typischerweise zu Deformationen auf der kompletten 3D-Oberfläche, sie sind global. Dies macht die PCA-Komponenten für eine intuitive Steuerung durch einen Animator nutzlos, denn effektive Animation benötigt gezielte Kontrolle über lokale Deformationseffekte.

In meiner Arbeit stelle ich eine effiziente, leicht zu implementierende und vielseitig anwendbare Technik vor, welche sich deformierende Oberflächen in intuitiv verständliche, lokale Deformationskomponten zerlegt. Ich taufe diese Komponenten SPLOCS (engl. Abkürzung für *Sparse Localized Deformation Components*). Die SPLOCS-Komponenten kann man als „Vokabular an Einzelbewegungen“ verstehen, welche automatisch aus dynamischen 3D-Oberflächendaten extrahiert werden können. Abb. 3 zeigt beispielhaft die Hauptkomponenten aus der PCA im Vergleich zu den neu entwickelten SPLOCS-Komponenten: Während sich bei den PCA-Komponenten die Deformationen auf der kompletten Oberfläche ausprägt (blaue Areale), sind die Deformationen der SPLOCS-Komponenten lokal begrenzt und korrespondieren zu natürlichen Bewegungen aus den Eingabedaten, bspw. das Heben einer Augenbraue oder das Bewegen des Mundwinkels. Als Eingabedaten wurden hier mittels eines Performance-Capture System gewonnene 3D-Oberflächendaten eines Gesichts von Zhang et al. [Zh04] genutzt. Mittels der PCA können nur globale, also auf der kompletten Oberfläche agierende Modifikationen vorgenommen werden, welche beispielsweise gleichzeitig den Mund und die Augenbrauen eines Gesichtes deformieren. Da die SPLOCS-Komponenten lokal begrenzt sind, sind auch Modifikationen auf der SPLOCS-Basis lokal begrenzt, was eine deutlich intuitivere und gezieltere Modifikation der Eingabedaten erlaubt.

Methodisch ist SPLOCS an Matrix-Zerlegungsmethoden wie der Nichtnegativen Matrixfaktorisierung, der robusten PCA und der *Sparse PCA* angelehnt, welche hauptsächlich aus dem Forschungsgebiet des Machine Learning entstammen [ZHT06]. Ich entwickle diese Ideen weiter und stelle eine neue Regularisierungsnorm auf, welche *sparse* (engl. dünn besetzt) und *lokale* Hauptkomponenten findet. In [Ne16, Kapitel 4] beschreibe ich einen Algorithmus, welcher die SPLOCS-Komponenten effektiv auch aus großen Datensätzen

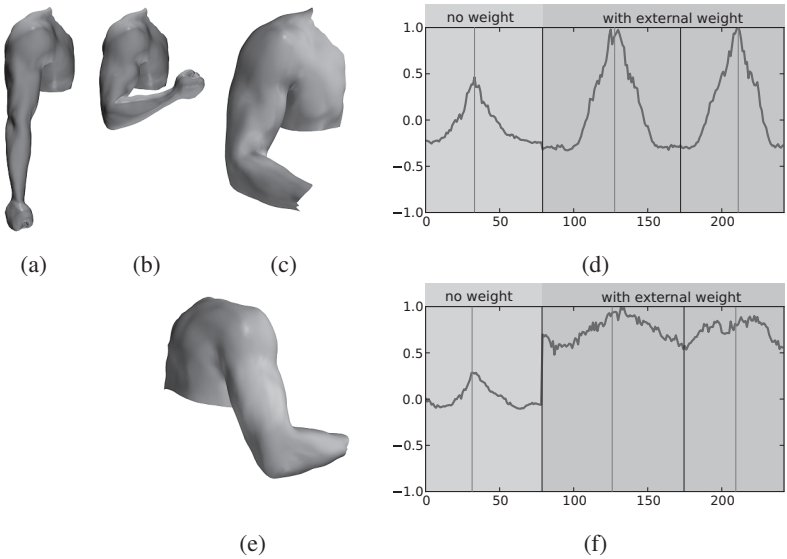


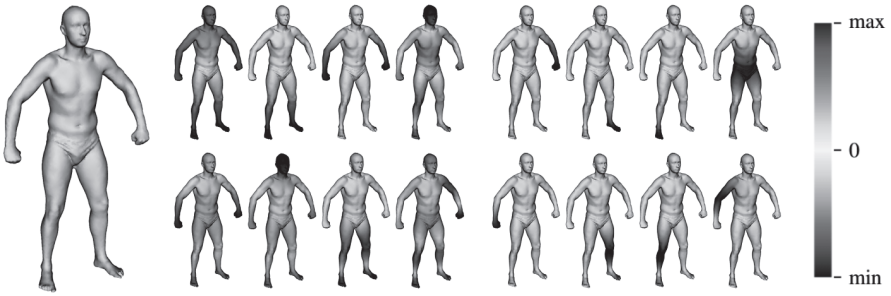
Abb. 4: Automatisch gefundene, zu Muskeldeformationen korrespondierende SPLOCS-Komponenten und deren Aktivierungsstärke, während ein Proband seinen Ellenbogen von (a) nach (b) beugt. Abbildungen (c) und (e) zeigen zwei der automatisch gefundenen SPLOCS Komponenten, welche im Bereich der Bizeps-Sehne sowie im Bereich des Trizeps-Muskels extrahiert wurden. Die zugehörigen Verläufe der extrahierten Parameter in (d) und (f) zeigen, dass der Aktivierungsverlauf des Parameters der zugehörigen Komponenten der Bewegung folgt, und dass diese Aktivierung verstärkt wird, wenn der Proband ein hohes Gewicht in der Hand hält (roter Bereich).

von 3D-Oberflächen extrahieren kann. Um möglichst gute Lösungen zu garantieren stelle ich außerdem einen Initialisierungsalgorithmus vor, welcher lokalisierte Initialkomponenten findet.

Indem ich SPLOCS an zahlreichen verschiedenen Oberflächendaten (Gesichter, 3D-Scans des Körpers, deformierte Muskeln, Textilien) und in verschiedenen Einsatzsszenarien evaluiere, zeige ich die hohe Flexibilität dieses neuen Werkzeuges. Da es sich meist um bewegte 3D-Oberflächen handeln, kann das Demonstrationsvideo[4] die zahlreichen Ergebnisse am Besten illustrieren. Eine systematische, quantitative Evaluation stützt die Hypothese, dass die von SPLOCS extrahierten Dimensionen ausgezeichnet generalisieren und darin bisherige Techniken wie die PCA, ICA (*Independent Component Analysis*), *Clustered PCA*, sowie *Sparse PCA* übertrifft.

Abb. 4 demonstriert, dass SPLOCS auch bei der Analyse von 3D-Oberflächendeformation helfen kann, z.B. im Kontext der Biomechanik. Hier wird SPLOCS benutzt, um die 3D-Oberfläche des Schulter-Arm-Bereiches während einer Hebe-Bewegung mit und ohne Gewicht in der Hand des Probanden aus den Muskeldeformationsdaten (vgl. Abschnitt Abschnitt 2) zu zerlegen. Die automatisch gefundenen Komponenten bilden lokal begrenzte Auswölbungen tatsächlicher Muskelgruppen (Deltoid, Trizeps, Bizeps). Die in Abb. 4

[4] `https://youtu.be/ZsbCKHpJe70`



(a) (b) (c)

Abb. 5: Vergleich der 8 Eigenfunktionen des Laplace-Operators der in (a) gezeigten triangulierten 3D-Oberfläche. (b) zeigt die *Manifold Harmonics*, welche globale Unterstützung auf der kompletten Oberfläche aufweisen. (c) zeigt die neuen *Compressed Manifold Modes*, welche lokal definiert sind und auf bestimmte wichtige Körperareale begrenzt sind.

abgebildeten Verläufe der gefundenen Parameter reflektieren die Änderungen der Körperpose während sich der Arm drei Mal hebt und senkt. Während der zweiten und dritten Hebebewegung hatte der Proband ein hohes Gewicht in der Hand, was sich in der Höhe der Aktivierungsgraphen widerspiegelt. Mit anderen Worten erlaubt es SPLOCS offenbar, biomechanische Informationen zu extrahieren ohne dass explizit ein biomechanisches Simulations-Modell an die Daten angepasst werden muss.

Die Möglichkeit, einen latenten Deformationsraum aus gemessenen 3D-Oberflächendaten zu extrahieren und zu analysieren, könnte also in der Biomechanik, aber auch in weiteren Gebieten der statistischen Oberflächenanalyse Anwendung finden. Durch meine Veröffentlichung des Quellcodes des SPLOCS-Algorithmus[5] wurden bereits einige dieser Möglichkeiten von Forschern verschiedener Forschergruppen exploriert und neue Erweiterungen entwickelt.

4 Eine lokale Basis für 3D-Oberflächenverarbeitung

Im vorigen Abschnitt habe ich gezeigt, wie man dynamische 3D-Oberflächendaten in ein „Vokabular an Einzelbewegungen“ (in SPLOCS-Komponenten) zerlegen kann. Dabei bin ich von einer etablierten Theorie, der Hauptkomponentenanalyse (PCA), ausgegangen, und habe diese Theorie erweitert um lokale Deformationskomponenten zu extrahieren. Diese Idee, statt globale lokale Funktionen zu ermitteln und zu nutzen, übertrage ich im letzten Teil meiner Arbeit für ein neues Szenario: die Verarbeitung statischer 3D-Oberflächen.

Jede 3D-Oberfläche, also jede im 3D-Raum eingebettete zweidimensionale Mannigfaltigkeit, erzeugt eine Eigenbasis des Laplace-Beltrami-Operators. Die Eigenfunktionen dieser Basis werden in der Computergrafik auch *Manifold Harmonics* genannt. Als Beispiel werden in Abb. 5b acht Manifold Harmonics für die statische 3D-Oberfläche aus Abb. 5a

[5] `http://github.com/tneumann/splocs`

farblich auf der Oberfläche visualisiert. Die Manifold Harmonics stellen eine Generalisierung der Fourier-Basis für 3D-Oberflächen dar. Sie sind dadurch zu einem essentiellen Werkzeug bei der Verarbeitung von 3D-Oberflächen im Frequenzbereich geworden, mit zahlreichen wichtigen Anwendungen wie der Filterung, Kompression und Editierung von 3D-Oberflächen. Allerdings sind die Manifold Harmonics globale Funktionen, also haben Werte $\neq 0$ fast überall auf der Oberfläche, Abb. 5b. Das macht die Eigenfunktionen nicht einfach interpretierbar und sehr sensibel für topologisches Rauschen, welches bei 3D-rekonstruierten Oberflächen häufig durch Löcher und Verdeckungen auftreten kann. Dies schränkt wiederum die Nutzbarkeit für Manifold Harmonics im Kontext der Verarbeitung 3D-rekonstruierter Daten stark ein.

In meiner Arbeit zeige ich, wie man eine lokal begrenzte Eigenbasis des Laplace-Beltrami-Operators einer 3D-Oberfläche konstruieren kann, und nenne diese Basis die *Compressed Manifold Modes* (CMM). Dazu erweitere ich die Theorie der *Compressed Eigenfunctions* von Differentialoperatoren, welche kürzlich im Kontext der Computerphysik für den eindimensionalen Fall vorgestellt wurde [Oz13]. In meiner Arbeit leite ich zudem einen numerischen Algorithmus her, welcher die CMMs für eine gegebene 3D-Oberfläche und eine gegebene Diskretisierung des Laplace-Beltrami-Operators berechnet.

Die CMMs sind für die 3D-Oberfläche in Abb. 5a beispielhaft in Abb. 5c abgebildet. In zahlreichen Experimenten zeigt sich, dass die Basisfunktionen wichtige Punkte der Oberfläche in separate lokale Regionen gruppiert, wie beispielsweise die Hand, das Knie, den Kopf einer Person. Zudem sind die CMMs deutlich weniger sensitiv gegenüber starkem topologischen Rauschen, wodurch sie sich als robuste Basis beispielsweise für die Registrierung verschiedener 3D-Oberflächen eignen. Neben der Registrierung von Oberflächen kann die neue Basis auch für die Approximation und Veränderung von 3D-Oberflächen und zur Detektion von Oberflächen-Features benutzt werden. Eine Referenzimplementierung des numerischen Algorithmus zur Errechnung der CMMs aus einer 3D-Oberfläche, sowie alle Skripte zur Reproduktion der Ergebnisabbildungen in [Ne16, Kapitel 5] sind als Open Source verfügbar[6]. Somit sind meine Ergebnisse für zukünftige Forschung komplett nachvollziehbar und können problemlos erweitert werden.

5 Ausblick

Meine Dissertation [Ne16] stellt neuartige Ansätze für die Verarbeitung dynamisch deformierter, dreidimensionaler Oberflächen vor - von der Erfassung und Registrierung bis zur datengetriebenen Modellierung und Editierung. Die 3D-Rekonstruktionsmethoden bilden eine solide und flexible Basis sowohl für zukünftige Erweiterungen als auch für die Praxis. Sie werden aktiv in der Industrie, bspw. von der adidas AG zur Analyse der Deformation von Kleidung, und könnten bald für die anwendende Forschung, beispielsweise zur Untersuchung der Haltungsstabilität beim Einbeinstand (einem wichtigen klinischen Test in der Geriatrie) genutzt werden [Po16]. Zum aktuellen Zeitpunkt sind außerdem bereits Forschungsergebnisse erschienen, welche auf den hier vorgestellten Ansätzen und

[6] `http://github.com/tneumann/cmm`

Algorithmen zur datengetriebenen Modellierung aufbauen. Die Beiträge meiner Arbeit ebnen also den Weg für spannende Erweiterungen und inspirieren neuartige Innovationen und Anwendungen, bspw. im Bereich der Biomechanik. Die Forschungsergebnisse liefern neue Werkzeuge für die Computergrafik und geben Forschungsimpulse für die Bereiche Computer Vision und Machine Learning.

Literaturverzeichnis

[An05] Anguelov, Dragomir; Srinivasan, Praveen; Koller, Daphne; Thrun, Sebastian; Rodgers, Jim; Davis, James: SCAPE: shape completion and animation of people. ACM Transactions on Graphics (Proc. SIGGRAPH), 24(3):408–416, jul 2005.

[Ne16] Neumann, Thomas: , Reconstruction, Analysis, and Editing of Dynamically Deforming 3D Surfaces, 2016. Dissertation, Carl-Friedrich-Gauß Fakultät der TU Braunschweig.

[Oz13] Ozoliņš, V; Lai, R; Caflisch, R; Osher, S: Compressed Modes for Variational Problems in Mathematics and Physics. Proc. National Academy of Sciences, 110(46):18368–18373, 2013.

[Po16] Pogrzeba, Loreen; Gassel, Stefanie; Friedrich, Jens; Klingner, Mathias; Lischke, Falko; Hellbach, Sven; Neumann, Thomas; Böhme, Hans-Joachim; Wacker, Markus: Towards estimation of muscle activity patterns for balance assessment from surface deformations in motion. In: Poster at International Symposium on the Neuromechanics of Human Movement. 2016.

[TDM11] Tena, J Rafael; De la Torre, Fernando; Matthews, Iain: Interactive region-based linear 3D face models. ACM Transactions on Graphics (Proc. SIGGRAPH), 30(4):76:1—-76:10, 2011.

[Th10] Theobalt, Christian; de Aguiar, Edilson; Stoll, Carsten; Seidel, Hans-Peter; Thrun, Sebastian: Performance Capture from Multi-View Video. In (Ronfard, R; Taubin, G, Hrsg.): Image and geometry processing for 3D Cinematography. Springer, S. 127—-150, 2010.

[Zh04] Zhang, L; Snavely, Noah; Curless, Brian; Seitz, S: Spacetime Faces: High-Resolution Capture for Modeling and Animation. ACM Transactions on Graphics (Proc. SIGGRAPH), 23(3):548–558, 2004.

[ZHT06] Zou, Hui; Hastie, Trevor; Tibshirani, Robert: Sparse Principal Component Analysis. Journal of Computational and Graphical Statistics, 15(2):265–286, jun 2006.



Thomas Neumann ist Postdoc in der Nachwuchsforschergruppe „TISRA“ an der Hochschule für Technik und Wirtschaft (HTW) Dresden. Seine Forschungsinteressen umfassen insbesondere die 3D-Rekonstruktion dynamischer 3D-Oberflächen, Machine Learning für Computer Vision, sowie statistische Methoden zur 3D-Oberflächenmodellierung. Er promovierte am Institut für Comptuergrafik der TU Braunschweig. Seine Dissertation mit dem Titel "Reconstruction, Analysis, and Editing of dynamically deforming 3D-Surfaces"verteidigte er im Herbst 2016. Während seiner Zeit als Doktorand beteiligte er sich an mehreren Forschungsprojekten an der HTW Dresden sowie mit der Firma adidas AG.

Analyse und Verbesserung von Routingprotokollen für Friend-to-Friend Overlays [1]

Stefanie Roos[2]

Abstract: Friend-to-Friend (F2F) Overlays beschützen Meinungsfreiheit und private Kommunikation im Angesicht Internet-weiter Überwachung und Zensur. Um Eingriffe in die digitale Kommunikation von Nutzer und deren Überwachung zu erschweren, geben Teilnehmer von F2F Overlays ihre Kontaktdaten nur an Teilnehmer weiter, mit denen sie eine wechselseitige in der physischen Welt begründete Vertrauensbeziehung verbindet. Diese restriktiven Verbindungsmöglichkeiten haben Auswirkungen auf die Flexibilität beim Aufrufen von Diensten. Das potentielle Ergebnis sind lange Wartezeiten und hoher Kommunikationsaufwand. Momentan existierte Friend-to-Friend Overlays werden auf Grund von langen Wartezeiten momentan nur wenig genutzt.

In dieser Arbeit untersuchen wir, ob dieser Mangel an Effizienz tatsächlich ein inhärentes Problem dieser Systeme ist oder ob lediglich die konzeptionellen Entscheidungen, die in den existierenden Systemen getroffen wurden, das Potential dieser Systeme nicht optimal nutzen. Insbesondere betrachten wir den Zusammenhang zwischen Vertraulichkeit, Verfügbarkeit, und Effizienz.

In der diesem Beitrag zu Grunde liegenden Dissertation analysieren wir zum einen existierende Systeme und identifizieren im Zuge dessen die konkreten Gründe für ihren Mangel an Performance. In diesem Zusammenhang spielt auch die Entwicklung von geeigneten Nutzermodellen und Evaluationsmethoden eine wichtige Rolle, da diese Methoden zukünftige Arbeiten erleichtern und eine bisher fehlende Basis zum Vergleich verschiedenere Ansätze schaffen. Zum anderen entwickeln wir VOUTE, Virtual Overlays Using Tree Embeddings, ein effizientes Friend-to-Friend Overlay, dass die Stärken zweier Ansätze, Virtual Overlays und Greedy Embeddings, kombiniert, während Effizienznachteile durch die Kombination weitgehend überwunden werden. Wir erreichen Verfügbarkeit und Vertraulichkeit durch weitere Schutzmaßnahmen, insbesondere eine Konstruktion für ausfall- und angriffsresistente Greedy Embeddings sowie ein Protokoll zur beweisbar anonymen Adressierung von Teilnehmern. Wir zeigen, dass die Kommunikationskosten zum Senden von Nachrichten sowie zum Erhalt der notwendigen lokalen Informationen (poly-)logarithmisch in der Anzahl an Teilnehmern ansteigen. Unsere praktische Evaluation bezeugt, dass VOUTE die Wartezeiten um mehr als einen Faktor 2 verringert und zusätzlich einen deutlich geringeren Kommunikationsaufwand aufweist. Gleichzeitig wird eine vergleichbare oder höhere Widerstandsfähigkeit gegen Zensur erreicht.

1 Hintergrund

Globale Kommunikationsnetze erlauben es weltweit zu publizieren und kommunizieren. Sie ermöglichen uns, Ideen und Einblicke mit potentiell Millionen oder gar Milliarden an Menschen zu teilen, ohne dafür einen hohen Aufwand an Zeit und finanziellen Mitteln aufbringen zu müssen. Insbesondere geben soziale Medien Minderheiten, Verfolgten, Aktivisten und Whistleblowern die Chance, auf kritische Situationen und Missachtung von Menschenrechten aufmerksam zu machen. Im Anschluss an solche Enthüllungen ermöglicht

[1] Originaltitel: Analyzing and Enhancing Routing Protocols for Friend-to-Friend Overlays, Doktorarbeit, Technische Universität Dresden, 2016

[2] University of Waterloo, sroos@uwaterloo.ca

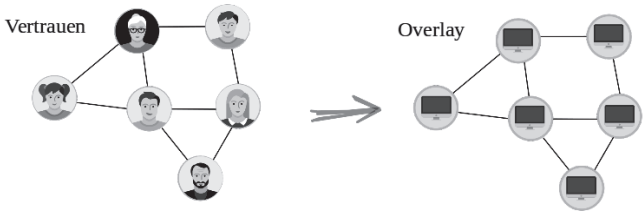


Abb. 1: Friend-to-Friend Overlay: Verbindungen auf Anwendungsebene spiegeln Vertrauensbeziehungen wieder

digitale Kommunikation die Organisation von lokalen oder globalen Hilfsaktionen und Protesten. Weitreichende digitale Überwachung durch Geheimdienste wie die NSA[3]und Zensur durch Regierungen wie im 'Arabischen Frühling'[4] untergraben diese wichtigen Möglichkeiten der freien Meinungsäußerungen.

Das grundlegende Problem im momentanen Internet ist die zentrale Kontrolle über angebotene Dienste. Die Existenz von wenigen globalen Dienstanbietern ermöglicht Überwachung und Zensur im großen Maße durch datenschutzrechtlich kritisch zu bewertende Gesetze[5], Hacking[6] oder den versehentlichen Verlust an sensitiven Nutzerdaten[7].

Als Alternative zu zentral kontrollierten Diensten gibt es eine Reihe an dezentralen Systemen wie Tor [DMS04], I2P [CS14], BitTorrent [Po05] und Diaspora[8], die es entweder erlauben, die existierenden Dienste anonym zu nutzen, oder alternative Dienste dezentral zur Verfügung stellen. Allerdings erlauben diese Systeme es, eine Vielzahl an scheinbar unabhängig aber in Wahrheit zentral kontrollierten Dienstanbietern in das System einzuschleusen. Diese kommunizieren dann mit echten Teilnehmern des Systems und beobachten oder zensieren deren Kommunikation. Sobald die Menge solcher zentral kontrollierten Teilnehmern die Teilnehmermenge dominiert, hat eine einzelne Partei wieder die Fähigkeit zur großflächigen Überwachung und Zensur. Des weiteren verlangt jedes dieser Systeme die Kommunikationen mit anderen unbekannten Teilnehmern, die kompromittiert sein können.

Friend-to-Friend Overlays (F2F Overlays) sind ein viel versprechender Ansatz, globale Kommunikation ohne Zensur und Überwachung zu realisieren. F2F Overlays, bildlich dargestellt in Abb. 1, sind Peer-to-Peer (P2P) Systeme, in denen Teilnehmer nur die Kontaktdaten, im Allgemeinen die IP Adresse, von anderen Teilnehmern nur erhalten, wenn sie mit diesen Teilnehmern eine wechselseitige Vertrauensbeziehung haben, die auf Interaktion in der physischen Welt beruht. Auf diese Art verbergen sie die Kontaktdaten eines Nutzer im

[3] http://www.theguardian.com/world/2013/jun/23/edward-snowden-nsa-files-timeline
[4] https://www.journalism.co.uk/news-features/citizen-journalism-cyber-censorship-arab-spring/s5/a548289/
[5] http://www.spiegel.de/netzwelt/netzpolitik/vorratsdatenspeicherung-die-wichtigsten-texte-zum-comeback-der-vds-a-1068480.html
[6] https://www.nytimes.com/2016/12/14/technology/yahoo-hack.html?_r=0
[7] http://www.reuters.com/article/2013/06/21/us-facebook-security-idUSBRE95K18Y20130621
[8] https://diasporafoundation.org/

System vor nicht vertrauenswürdigen Teilnehmern und erschweren das Einschleusen von Teilnehmern deutlich.

Um tatsächlich eine nutzbare Alternative zu existierenden Systemen darzustellen, müssen F2F Overlays eine Vielzahl an Anforderungen erfüllen. Vertraulichkeit ist das grundlegende Ziel von F2F Overlays. Hier ist nicht nur die Vertraulichkeit von Inhalten ein Ziel, sondern vor allem der Schutz von Metadata. Es soll verborgen werden, wer wann mit wem kommuniziert und welche Inhalte publiziert oder aufruft. Auch die Teilnahme am Netzwerk und die Struktur des sozialen Graphen ist zu verbergen. Des weiteren müssen F2F Overlays resistent gegen Angriffen auf die Verfügbarkeit des Dienstes sein. Das Ziel ist, den Anteil an erfolgreichen Anfragen an einen Dienst zu maximieren. Ferner ist Effizienz und Skalierbarkeit von enormer Bedeutung, um Nutzer zu überzeugen, diese Dienste zu benutzen. Im Bereich von P2P Systemen haben sich polylogarithmische Schranken an Anfragedauer und -aufwand als realisierbar und angemessen schnell erwiesen, beispielsweise in BitTorrents verteilten Hashtabellen [CW07]. Zudem sollten Dienste gleichmäßig auf Nutzer verteilt werden, um Überbelastung und folglich Stau und Verzögerungen zu vermeiden. Nur wenn alle Anforderungen erfüllt sind, kann ein F2F Overlay ein sinnvolle Alternative zu momentanen Diensten anbieten.

Unser Beitrag liegt in der Entwicklung eines F2F Overlays, das die obigen Anforderungen an Vertraulichkeit, Verfügbarkeit und Effizienz erfüllt. Unser Vorgehen ist in drei Schritte gegliedert. Zunächst erarbeiten wir sinnvolle Annahmen an Nutzer und Angreifer sowie Methoden zur Evaluation von Lösungsvorschlägen. Auf Basis dieser beurteilen wir im zweiten Schritt existierende Ansätze, insbesondere Virtual Overlays und Greedy Embeddings, ein allgemeiner Ansatz für das effiziente Finden von Routen in Netzen mit Konnektivitätseinschränkungen. Wir zeigen, dass keiner der Ansätze unseren Anforderungen genügt und identifizieren die exakten Gründe. Der dritten Schritt ist die Entwicklung und Evaluation von VOUTE, Virtual Overlays Using Tree Embeddings. VOUTE kombiniert die Vorteile von Virtual Overlays und Greedy Embeddings mit erweiternden Schutzmaßnahmen zur Erhöhung von Vertraulichkeit und Verfügbarkeit. Eine besondere Stärke der Arbeit liegt in der multi-dimensionalen Auswertung. Wir erarbeiten realistische Nutzermodelle durch automatisierte Messungen von mehreren tausend Nutzern in Freenet [Cl10], einem anonymen Kommunikationsnetzwerk. Im Zuge dessen erarbeiten wir Verbesserungen für Freenets momentane Algorithmen und integrieren sie in das System. Basierend auf den Ergebnissen evaluieren wir existierende und eigene Ansätze in weit reichenden Simulationsstudien. Wir beweisen die Skalierbarkeit unserer Ansätze durch asymptotische Schranken beruhend auf graph-theoretischen und stochastischen Überlegungen. Des weiteren evaluieren wir die Anonymität und Angriffsresistenz theoretisch. In den folgenden Abschnitten fassen wir unsere Ergebnisse zusammen und betonen bedeutende Erkenntnisse. Für die Details der entwickelten Algorithmen und ihrer Evaluation, verweisen wir auf eine Vielzahl an Publikationen in angesehenen Konferenzen wie INFOCOM und PETs sowie Journalen [HRS13, Ro14a, Ro14b, RNS15, RS15, RBS16, RS16, Ro17].

2 Annahmen und Methoden

Unser erster Beitrag besteht in der Erarbeitung von Nutzermodelle und Methoden. Wir beginnen mit einer allgemeinen Definition der notwendigen Algorithmen. F2F Overlays realisieren eine Vielzahl an Anwendungen, die alle auf zwei fundamentalen Funktionalitäten basieren. Erstens schicken Nutzer Nachrichten zu anderen Nutzern, mit denen sie nicht notwendigerweise eine Vertrauensbeziehung haben. Typische Beispiele sind ein Aktivist und ein Journalist oder zwei Nutzer eines Gesundheitsforums. Die zweite Funktionalität ist das Veröffentlichen und Aufrufen von Inhalten. Knoten und Inhalte werden anhand ihrer Adresse gefunden. Eine weitere wichtige Eigenschaft eines P2P Systems ist der Umgang mit dynamischen Nutzermengen. Teilnehmer, im Folgenden als Knoten in einem Netzwerk repräsentiert, sind im Allgemeinen nicht konstant online. Das Netzwerk muss sich stabilisieren, sobald ein Knoten online oder offline geht. Dadurch ergeben sich 6 Algorithmen, aufgeführt in Tab. 1.

$\mathbf{AdGen}_{node}(e)$	Adressengenerierung für Knoten e
$\mathbf{R}_{node}(s, \mathbf{AdGen}_{node}(e))$	Routing von s zu e
$\mathbf{AdGen}_{content}(c)$	Adressengenerierung für Inhalt c
$\mathbf{R}_{content}(s, \mathbf{AdGen}_{content}(c))$	Routing s zu einem Knoten der c speichert
$\mathbf{S}_J(v)$	Stabilisierung nachdem v beitritt
$\mathbf{S}_D(v)$	Stabilisierung nachdem v austritt

Tab. 1: Algorithmen für grundlegende Funktionalitäten

Wir gehen davon aus, dass Adressen lokal generiert werden und daher keinen Kommunikationsaufwand verursachen. Für die Routing- und Stabilisierungsalgorithmen fordern wir polylogarithmische Kommunikationskomplexität. Wir modellieren einen Angreifer, der versucht durch Manipulation dieser Algorithmen die Identität von Nutzer zu ermitteln oder die Verfügbarkeit zu unterwandern. Wir gehen von einem lokalen, internen, und aktiven Angreifer aus, der Algorithmen durch Verwerfen, Fälschen, Wiedereinspielen und Verändern von Nachrichten manipuliert. Der Angreifer kann eine beliebige Menge an Knoten in das System integrieren, aber die Anzahl an Verbindungen zu ehrlichen Teilnehmern ist gering. Diese Bedingung spiegelt die Schwierigkeit Vertrauensbeziehungen aufzubauen wieder und die Stärke des Angreifers ist durch die Anzahl an Kanten zu ehrlichen Knoten definiert. Dieses Angreifermodell ist stärker als externe oder honest-but-curious Angreifer, die das System nur beobachten oder dem Protokoll folgen.

Unsere Methodenentwicklung bedenkt zwei Aspekte. Zum einen passen wir Methoden aus P2P Systemen an die restriktive Natur von Verbindungen in F2F Overlays an. Des weiteren sind die Komplexitäten der Routing- und Stabilisierungsalgorithmen im Allgemeinen abhängig und verändern sich potentiell über die Zeit. Wir modellieren die verschiedenen Kommunikationskomplexitäten als korrelierte stochastische zeitliche Prozesse.

Unsere Nutzermodelle beschäftigen sich vordergründig mit der Struktur des sozialen Graphen der Vertrauensbeziehungen und der typischen Sitzungslänge. Hier bezeichnet Sitzungslänge die Zeit zwischen einem Eintritt und folgenden Austritt aus dem Netzwerk. Wir gehen von verbundenen sozialen Graphen aus, da sonst kein Nachrichtenfluss möglich ist. Ferner ist der Durchmesser von sozialen Graphen meist gering. Wir gehen davon aus,

dass der längste kürzeste Pfad zwischen zwei Knoten höchstens logarithmisch mit der Knotenanzahl skaliert. Modelle für Sitzungslängen lassen sich mit großer Genauigkeit in Freenet [Cl01] gewinnen, wie im folgenden skizziert. Freenetteilnehmer haben persistente Pseudonyme und Teilnehmer können Pseudonyme anderer zufällig gewählter Teilnehmer anfragen. Eine große Anzahl an solcher Anfragen von verschiedenen instrumentierten Freenetknoten, die wir in das Netzwerk eingebunden haben, erlauben mit hoher Genauigkeit festzustellen, ob ein Nutzer online ist. Durch Abstraktion der konkreten Daten zu Verteilungen lassen sich verallgemeinerte Modelle erstellen. Wir beobachteten in einem Zeitrahmen von 9 Tagen mehr als 10,000 Nutzer, von denen im Schnitt 3500 parallel Freenet nutzten. Je nachdem wie hoch wir unsere Sicherheit in die Hypothese, dass ein Knoten nicht online ist, wählen, ergeben sich Sitzungslängen zwischen 49 und 110 Minuten. Die empirischen Verteilungen der Sitzungslänge lassen sich gut durch Lognormal- oder Weibullverteilungen modellieren.

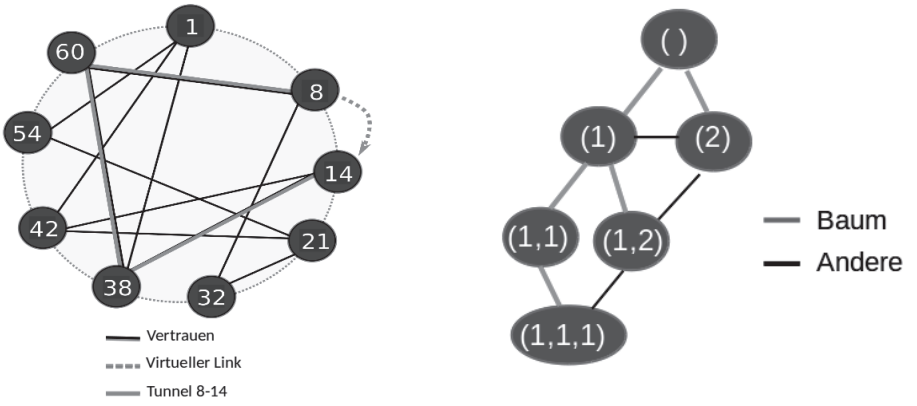
Diese Nutzermodelle und Methoden bilden die Grundlage für die praktischen und theoretische Evaluation in den folgenden Sektionen.

3 Evaluation existierender Ansätze

Im zweiten Beitrag beurteilen wir existierende Ansätze auf der Basis der entwickelten Methoden und Modelle. Insbesondere betrachten wir die Ansätze Virtual Overlays und Greedy Embeddings. Abb. 2 illustriert die zwei Konzepte.

Außer diesen Konzepten existieren es auch verschiedene F2F Overlays, die sich auf Filesharing konzentrieren. Unstrukturierte Ansätze wie Turtle [Po06] und OneSwarm [Is10] eignen sich für das Teilen von Inhalten, die von einer Vielzahl an Teilnehmer gespeichert werden, aber sie sind zu ineffizient für andere Anwendungen wie Chats. GnuNet's 2-Phasen-Routing [EG11], das Inhalte vielfach replizieren muss, um diese verlässlich finden zu können, ist ebenso eingeschränkt. Der F2F Modus des bekannten zensurresistenten anonymen Kommunikationssystem Freenet [Cl10] hat sich in der Praxis und durch theoretische Evaluation als ineffizient erwiesen [Va09, RS13].

Virtual Overlays orientieren sich an strukturieren P2P Systemen wie Chord [St01]. Strukturierte Systeme ordnen ihre Knoten in Topologien wie Ringen oder Bäumen an, die einfache und effiziente Protokolle zur Routenfindung erlauben. Diese Anordnung beruht auf dem Anpassen von Verbindungen auf der Anwendungsebene und ist nicht ohne die Preisgabe von IP Adressen nicht in dieser Form möglich. Virtual Overlays ersetzen daher eine einzelne Verbindung auf der Anwendungsebene durch einen Tunnel bestehend aus mehreren Verbindungen im F2F Overlay, wie in Abb. 2a dargestellt. Dies ermöglicht die Anwendung von Routingalgorithmen, die diese Tunnel wie Kanten in einem strukturierten System benutzen. Eine besondere Herausforderung ist das Aufrechterhalten dieser Tunnel bei Knoteneintritten -und austritten. MCON [Va09] flutet das Netzwerk für die Tunnelkonstruktion, das heißt Nachrichten werden zu allen Nachbarn weitergeleitet bis Knoten mit geeigneten zufällig gewählten Adressen gefunden wurden. X-Vine [MCB12] basiert auf einem effizienteren Stabilisierungsprotokoll: Knoten nutzen das Routingprotokoll um



(a) Virtual Overlays (b) Greedy Embeddings

Abb. 2: Existierende Ansätze: Virtual Overlays ersetzen benötigte Verbindungen zwischen Teilnehmern ohne Vertrauensbeziehung durch Pfad aus sich wechselseitig vertrauenden Teilnehmern. Greedy Embeddings weisen Teilnehmern Adressen auf Basis ihrer Position in einem Spannbaum zu.

neue virtuelle Nachbarn zu finden. Der neue Tunnel entspricht der Konkatenation der Tunneln auf dem gefundenen Pfad. Es ist unklar wie sich das über einen längeren Zeitraum auf die Länge der Tunnel auswirkt.
Unser Beitrag liegt zunächst in der Entwicklung eines allgemeinen Modells für Virtual Overlay. Im Rahmen dieses Modells beweisen wir, dass jedes Virtual Overlay, das auf Tunneln basiert, entweder einen hohen Stabilisierungsaufwand hat oder über die Zeit die Tunnellänge und damit die Routinglänge ansteigt. Die Idee des Beweises ist, zunächst von im Mittel polylogarithmisch skalierenden Stabilisierungskomplexität auszugehen. Dann betrachten wir Routingkomplexität und Stabilisierungskomplexität als stochastische zeitliche Prozesse. Es lässt sich zeigen, dass die Routingkomplexität über die Zeit tendenziell zunimmt, bis sie nicht mehr polylogarithmisch in der Anzahl an Knoten ist. Demnach können Virtual Overlays nicht langfristig effizient sein [RS15].

Greedy Embeddings dagegen sind vordergründig für effizientes Routing in Netzwerken mit unabänderlichen Verbindungen wie Sensornetze konstruiert [PR04, Kl07]. Wie in Abb. 2b für Prefix Embedding [HRS13] dargestellt, wird zunächst ein Spannbaum konstruiert. Dann wird die Position der Knoten im Spannbaum durch eine Adresse widergespiegelt, in unserem Beispiel ist diese Adresse ein Vektor, der aus der Adresse des Elternknotens und eines Enumerationsindex besteht. Knoten veröffentlichen diese Adressen und können über sie kontaktiert werden. Jeder Knoten auf dem Pfad leitet die Nachricht an den Nachbarn weiter, der den kürzesten Pfad im Spannbaum zum Zielknoten aufweist. Die Kommunikationskomplexität skaliert demnach linear in der Baumtiefe, die im Allgemeinen logarithmisch in der Knotenanzahl skaliert. Im Mittel ist effiziente Stabilisierung erreichbar, da der Spannbaum lokal repariert werden kann und eine komplette Neuberechnung nur bei Austritt der Wurzel nötig ist. Demnach sind Routing und Stabilisierung effizient möglich.
Wir untersuchen, ob Inhalte in Greedy Embeddings gleichmäßig über Knoten verteilt werden können. Wir zeigen, dass dies im Allgemeinen nur möglich ist, wenn die Anzahl an

Knoten in einen Unterbaum gut approximiert werden kann [Ro17]. Selbst wenn diese Angaben sich nicht negativ auf die Vertraulichkeit auswirken würden, muss der Algorithmus zur Ermittlung dieser Zahlen resistent gegen Manipulation sein and damit Byzantine Agreement [LSP82] garantieren. Die regelmäßige Ausführung eines Algorithmus zum Byzantine Agreement lässt sich nicht mit unseren Anforderungen an die Effizienz vereinbaren. Demnach sind Greedy Embeddings nicht fähig, Inhalte angemessen zu verteilen, und jegliche Anpassung der momentanen Ansätze würde entweder Schwachstellen oder ineffiziente Schutzmaßnahmen nach sich ziehen.

System	Routinglänge
Freenet	$\approx 10.000,0$
MCON	$14,0$
Prefix	$6,2$
Shortest Paths	$4,3$

Tab. 2: Vergleich der Länge der gefundene Pfade zwischen Start- und Endpunkten für diverse Ansätze

System	Stabilisierungsaufwand
Freenet	NA
MCON	$> 600000,0$
Prefix	$4,5$

Tab. 3: Vergleich Stabilisierungskosten für Ein- und Austritte für diverse Ansätze

Simulation-basierte Ergebnisse bezüglich Virtual Overlays und Greedy Embeddings sind in Tab. 2 und 3 zu finden. Die Ergebnisse beruhen auf einen Untergraphen von Facebook mit ungefähr 64.000 Knoten und über 600.000 Kanten. Die Mittelwerte wurden über 20 Experimente mit je 10.000 zufälligen gewählten Start- und Endpunkten beziehungsweise ausfallenden Knoten ermittelt. Auf Grund der periodischen Stabilisierung in Freenet ist ein Vergleich mit MCON und Prefix, die auf Eintritte und Austritte direkt reagieren, nicht direkt möglich. Jedoch ist die Ineffizienz von Freenet allein auf Grund der langen Pfade gegeben, wie Tab. 2 zeigt. Greedy Embeddings wie Prefix Embedding erreichen geringe Pfadlängen und Stabilisierungskosten, jedoch zeigen andere Arbeiten ihre schlechten Lastverteilung beim Speichern von Inhalten [Ro14b, Ro17].

Zusammenfassend zeigen unsere Ergebnisse, dass Virtual Overlays inhärent ineffizient sind. Dagegen weisen Greedy Embeddings drastische Schwächen in der Lastverteilung auf.

4 VOUTE: Virtual Overlays Using Tree Embeddings

Unser dritter und bedeutendster Beitrag liegt in der Entwicklungen von VOUTE [RBS16], Virtual Overlays Using Tree Embeddings, einem F2F Overlay, das die Schwächen der vorherigen Ansätze durch eine Kombination der beiden Ansätze überwindet. VOUTE ist vor allem durch die folgenden 3 Beiträge gekennzeichnet:

- ein resistenten Routingprotokoll $\mathbf{R}_{node}$ basierend auf parallelen Greedy Embeddings sowie dessen theoretische und praktische Evaluierung
- ein Protokoll zur Generierung von anonymen Adressen, welche die Identität des Empfängers und die Topologie verbergen, sowie der entsprechenden Anonymitätsbeweis, und

- ein Algorithmus $\mathbf{R}_{content}$ zum Speichern und Aufrufen von Inhalten, der strukturierte Overlays auf Basis von Adressen im Greedy Embedding realisiert

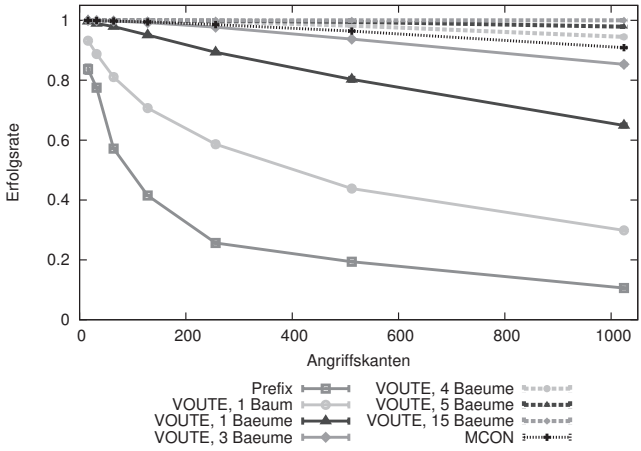


Abb. 3: Verschiedene Parameterwahlen für $\mathbf{R}_{node}$ und ihr Einfluss auf die Erfolgsrate

Unser erster Beitrag besteht in der Konstruktion des Routingalgorithmus $\mathbf{R}_{node}$. Wir nutzen Prefix Embedding, um den Knoten Adressen zuzuweisen. Jedoch ist Prefix Embedding nicht auf Ausfall- und Angriffsresistenz ausgelegt. Wir erhöhen diese indem wir dem Routingalgorithmus einen Backtracking Modus hinzufügen, der alternative Pfade bedenkt. Ferner modifizieren wir den Routingalgorithmen, sodass er bevorzugt nicht über die Wurzel des Baums weiterleitet und dadurch den Einfluss dieses einzelnen ausgewählten Teilnehmers reduziert. Unsere einflussreichster Neuerung hier ist die Entwicklung eines rundenbasierten probabilistischen Spannbaumprotokolls, das parallel mehrere Spannbäume mit möglichst diverser Elternwahl aufbaut. Knoten wählen Elternknoten, die sich nicht zuvor in anderen Bäumen gewählt haben. Wenn sie keinen solchen Elternknoten zur Wahl haben, entscheiden sie probabilistisch, ob sie auf weitere Einladungen warten oder einen bereits zuvor gewählten Elternknoten mehrfach auswählen. Wir zeigen, dass die Tiefe der Bäume maximal linear in der Anzahl an Bäumen ansteigt. Daraus folgt, dass die Routinglänge maximal linear in der Anzahl der Bäume wächst während Routing- und -Stabilisierungskosten quadratisch in der Anzahl an Bäumen ansteigen. Abb. 3 zeigt die erhöhte Verfügbarkeit im Vergleich zu der Anzahl der vom Angreifer kontrollierten Kanten beispielhaft. In diesem Fall brauchen wir vier parallele Spannbäume, um eine höhere Erfolgsrate als Virtual Overlays wie MCON zu erreichen. Tab. 2 deutet an, dass die vierfachen Routingkosten für Greedy Embeddings die Kosten in MCON übersteigen. Jedoch bleibt die Stabilisierung um ein Vielfaches effizienter. Demnach erreicht unser neuer Algorithmus eine hohe Verfügbarkeit und Effizienz.

Die Adressen in Prefix Embedding erlauben jedoch die Rekonstuktion der Spannbäume und damit großer Teile des sozialen Graphen. Ferner geben sie die Identität des Empfängers preis. Um dies zu verhindern, randomisieren wir zum einen die Elemente des Adressvektors. Zum anderen geben Knoten statt ihrer Adresse nur eine anonyme Rückadresse preis.

Diese wird durch Auffüllen des Vektors auf eine konstante Länge und das Hashen der Vektorelemente gebildet. Knoten behalten die Möglichkeit zu routen, da sie durch Hashen der Nachbaradressen gemeinsame Adressprefixe feststellen können. Jedoch werden weitere Informationen über die Adresse verborgen und Sender und Empfänger werden beweisbar anonymisiert. So erreichen wir Vertraulichkeit zusätzlich zu Effizienz und Verfügbarkeit.

Des Routingalgorithmus $\mathbf{R}_{content}$ nutzt die (anonyme) Adressen als Grundlage für ein strukturiertes Overlay. Nachbarn in diesem Overlay können über ihre Adressen in den unterliegenden Greedy Embeddings kommunizieren. Dadurch wird der Tunnelaufbau vermieden und die uniforme Lastenverteilung des strukturierten Overlays kann zum Speichern und Aufrufen von Inhalten genutzt werden. Auf diese Art erreichen wir Effizienz im Sinne von geringer Kommunikationkomplexität und fairer Lastverteilung.

Gemeinsam ermöglichen die obigen Beiträge den Nachrichtenaustausch und das Teilen von Inhalten in einem F2F Overlay. VOUTE ist effizient, resistent gegenüber Denial-of-Service-Angriffen und schützt die Kommunikationsdaten von Teilnehmern.

Literaturverzeichnis

[Cl01] Clarke, Ian; Sandberg, Oskar; Wiley, Brandon; Hong, Theodore: Freenet: A Distributed Anonymous Information Storage and Retrieval System. In: Designing Privacy Enhancing Technologies. 2001.

[Cl10] Clarke, Ian; Sandberg, Oskar; Toseland, Matthew; Verendel, Vilhelm: Private Communication through a Network of Trusted Connections: The Dark Freenet. Network, 2010.

[CS14] Conrad, Bernd; Shirazi, Fatemeh: A Survey on Tor and I2P. In: ICIMP. 2014.

[CW07] Crosby, Scott A; Wallach, Dan S: An Analysis of BitTorrent's Two Kademlia-based DHTs. Bericht, Technical Report TR07-04, Rice University, 2007.

[DMS04] Dingledine, Roger; Mathewson, Nick; Syverson, Paul: Tor: The Second-generation Onion Router. Bericht, DTIC Document, 2004.

[EG11] Evans, Nathan S; Grothoff, Christian: R5N: Randomized Recursive Routing for Restricted-route Networks. In: NSS. 2011.

[HRS13] Hoefer, Andreas; Roos, Stefanie; Strufe, Thorsten: Greedy Embedding, Routing and Content Addressing for Darknets. In: NetSys. 2013.

[Is10] Isdal, Tomas; Piatek, Michael; Krishnamurthy, Arvind; Anderson, Thomas: Privacy-preserving P2P Data Sharing with ONESWARM. In: ACM SIGCOMM Computer Communication Review. Jgg. 40, 2010.

[Kl07] Kleinberg, Robert: Geographic Routing using Hyperbolic Space. In: INFOCOM. 2007.

[LSP82] Lamport, Leslie; Shostak, Robert; Pease, Marshall: The Byzantine Generals Problem. TOPLAS, 4(3), 1982.

[MCB12] Mittal, Prateek; Caesar, Matthew; Borisov, Nikita: X-Vine: Secure and Pseudonymous Routing in DHTs Using Social Networks. In: NDSS. 2012.

[Po05] Pouwelse, Johan A.; Garbacki, Pawel; Epema, Dick H. J.; Sips, Henk J.: The BitTorrent P2P File-Sharing System: Measurements and Analysis. In: IPTPS. 2005.

[Po06] Popescu, Bogdan: Safe and Private Data Sharing with Turtle: Friends Team-up and Beat the System. In: Security Protocols. 2006.

[PR04] Papadimitriou, Christos H; Ratajczak, David: On a Conjecture Related to Geometric Routing. In: Algorithmic Aspects of Wireless Sensor Networks. 2004.

[RBS16] Roos, Stefanie; Beck, Martin; Strufe, Thorsten: Anonymous Addresses for Efficient and Resilient Routing in F2F Overlays. In: INFOCOM. 2016.

[Rh03] Rhea, Sean; Geels, Dennis; Roscoe, Timothy; Kubiatowicz, John: Handling Churn in a DHT. Computer Science, 2003.

[RNS15] Roos, Stefanie; Nguyen, Giang T; Strufe, Thorsten: Integrating Churn into the Formal Analysis of Routing Algorithms. In: NetSys. 2015.

[Ro14a] Roos, Stefanie; Schiller, Benjamin; Hacker, Stefan; Strufe, Thorsten: Measuring Freenet in the Wild: Censorship-resilience under Observation. In: PETS. 2014.

[Ro14b] Roos, Stefanie; Wang, Liang; Strufe, Thorsten; Kangasharju, Jussi: Enhancing Compact Routing in CCN with Prefix Embedding and Topology-aware Hashing. In: MobiArch. 2014.

[Ro17] Roos, Stefanie; Byrenheid, Martin; Deusser, Clemens; Strufe, Thorsten: BD-CAT: Balanced Dynamic Content Addressing in Trees. In: INFOCOM. 2017.

[RS13] Roos, Stefanie; Strufe, Thorsten: A Contribution to Analyzing and Enhancing Darknet Routing. In: INFOCOM. 2013.

[RS15] Roos, Stefanie; Strufe, Thorsten: On the Impossibility of Efficient Self-Stabilization in Virtual Overlays with Churn. In: INFOCOM. 2015.

[RS16] Roos, Stefanie; Strufe, Thorsten: Dealing with Dead Ends-Efficient Routing in Darknets. TOMPECS, 1(1), 2016.

[St01] Stoica, Ion; Morris, Robert; Karger, David; Kaashoek, M Frans; Balakrishnan, Hari: Chord: A Scalable Peer-to-Peer Lookup Service for Internet Applications. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 31(4), 2001.

[Va09] Vasserman, Eugene; Jansen, Rob; Tyra, James; Hopper, Nicholas; Kim, Yongdae: Membership-concealing Overlay Networks. In: CCS. 2009.



Stefanie Roos forscht im Bereich Datenschutz und verteilte Systeme, bevorzugt sogar Datenschutz in oder durch verteilten Systeme. Insbesondere beschäftigt sie sich mit dem Zusammenhang zwischen Datenschutz, Verfügbarkeit und Performance. Sie ist bekannt für ihre Arbeit an Friend-to-Friend Overlays. Der Einfluss ihrer Arbeit zeigt sich in zahlreichen Veröffentlichungen in Konferenzen wie INFOCOM und PETS sowie der praktischen Umsetzung der von ihr erdachten Protokolle in reellen Systemen wie Freenet. Momentan ist Stefanie ein Post-doctoral Fellow an der University of Waterloo, Kanada, wo sie zusammen mit Ian Goldberg an Performancesteigerungen des Anonymisierungdienstes Tor sowie des verteilten Transaktionsnetzwerk Ripple arbeitet. Im Juli 2016 erhielt sie ihren Doktortitel (Dr. rer. nat., Note: summa cum laude) von der Technischen Universität Dresden für die Arbeit ‘Analyzing and Enhancing Routing Protocols for Friend-to-Friend Overlays’, betreut von Thorsten Strufe.

Modell-basierte Leistungsbewertung und Optimierung von Multi-Core-Architekturen zur Paketverarbeitung in Kommunikationsnetzen

Torsten M. Runge[1]

Abstract: Software-basierte Paketverarbeitung mit Multi-Core-Prozessoren kann in vielen Bereichen spezialisierte Netzwerkhardware ersetzen. Um die relevanten Leistungsengpässe in solchen komplexen Systemen zu verstehen und durch entsprechende Modifikationen optimieren zu können, wird in dieser Arbeit ein Modellierungsansatz für die Datenverarbeitung und Ressourcenverwaltung in Rechnersystemen vorgeschlagen, welcher für den Netzwerksimulator ns-3 implementiert wurde. Es werden verschiedene Fallstudien mit unterschiedlichem Verkehrsaufkommen (z.B. Traces), Datenverarbeitungsfunktionalitäten (z.B. IPsec-Verschlüsselung) und Systemkonfigurationen (z.B. Treiber) durchgeführt, welche mit Hilfe von realen Testbed-Messungen kalibriert und validiert werden. Darauf basierend wird ein neues Konzept zur QoS-sensitiven Paketverarbeitung entwickelt, wodurch insbesondere die Latenz von QoS-sensitivem Verkehr in Linux-Routern verbessert wird.

1 Einleitung

Aktuelle auf Standard-Hardware basierende Rechnersysteme (z.B. PC) kommen heutzutage nicht nur als Arbeitsplatzrechner, sondern immer häufiger auch als Netzwerkknoten (u.a. Router, Firewall) zum Einsatz. Grund hierfür sind die neuesten technischen Entwicklungen bei Multi-Core-Prozessorsystemen. Diese werden immer attraktiver für den Einsatz in Kommunikationsnetzen, da die Paketverarbeitung sehr gut parallelisierbar ist. Außerdem ist Standard-Hardware weitaus kostengünstiger im Vergleich zu spezialisierten Netzwerkkomponenten und erlaubt eine flexible Erweiterung der Funktionalitäten durch Software-Anpassungen. Durch den Einsatz von Virtualisierungstechniken können die Kostenvorteile und die Flexibilität zusätzlich verstärkt werden, indem mehrere virtuelle Systeme gleichzeitig auf ein und derselben Hardware betrieben werden. Im Rahmen von *Software-Defined Networking* (SDN) und *Network Functions Virtualization* (NFV) beschäftigt sich die Forschung nicht nur damit Endsysteme (z.B. Server), sondern auch Netzwerkknoten (z.B. Router, Firewalls) zu virtualisieren, um neuartige Dienste, die eine besondere Netzfunktionalität erfordern, schnell und einfach realisieren zu können.

Um Standard-Hardware in Kommunikationsnetzen bei hohem Verkehrsaufkommen einzusetzen und neben dem Senden und Empfangen auch erweiterte Datenverarbeitung (z.B. IPsec-Verschlüsselung, Deep Packet Inspection) vornehmen zu können, müssen Treiber, Netzwerkprotokollstapel und Anwendungen besser an die Hardware-Architektur und deren Parallelisierungsmöglichkeiten angepasst werden, um eine optimale Systemleistung zu erreichen. Moderne Multi-Core-Rechner sind komplexe Systeme, deren Arbeitsabläufe und die dazu benötigten, begrenzten Systemressourcen zu nicht trivial vorhersehbarem

[1] Universität Hamburg, FB Informatik, Telekommunikation und Rechnernetze,
runge@informatik.uni-hamburg.de

Leistungsverhalten führen. Die Identifizierung von Leistungsengpässen und die Untersuchung von Auswirkungen spezieller Verarbeitungsoptimierungen sind daher eine wichtige Voraussetzung zur Leistungssteigerung dieser Systeme und stellen als solches ein bedeutendes Forschungsvorhaben dar. Dabei leistet diese Arbeit die folgenden Beiträge.

- Die Arbeit erklärt das komplexe Zusammenspiel zwischen Hardware und Software, insbesondere für die Paketverarbeitung mit Standard-Hardware.
- Es wird ein neuer, allgemeiner Modellierungsansatz für die Datenverarbeitung und Ressourcenverwaltung in Rechnersystemen vorgeschlagen.
- Der Modellierungsansatz wird exemplarisch für den weitverbreiteten Netzwerksimulator ns-3 als Erweiterungsmodul `resource-management` implementiert, welches als Open Source Software unter der Lizenz GNU GPLv2 für den nichtkommerziellen Gebrauch in Forschung und Entwicklung frei zur Verfügung steht.
- Es werden mit Hilfe des Modellierungsansatzes sowie mit Messungen am Realsystem verschiedene Fallstudien zur Analyse und Evaluierung der Leistungsfähigkeit von Standard-Hardware in Hinsicht auf Leistungsengpässe bei der Paketverarbeitung durchgeführt.
- Es wird ein neues QoS-Konzept für die Paketverarbeitung mit Standard-Hardware vorgeschlagen, wodurch die Wartezeit von QoS-sensitivem Verkehr reduziert wird.

2 Modellierung von Rechnersystemen

2.1 Konzept des Modellierungsansatzes

Ein Modell stellt eine vereinfachte Abbildung eines realen Systems dar. Ziel der Modellierung ist es, die Komplexität des Realsystems zu reduzieren, um es untersuchen und verstehen zu können. Prinzipiell existieren in der Modellierung die Ansätze *Top-Down* und *Bottom-Up*. Beim Top-Down-Ansatz wird vom allgemeinen Übergeordneten schrittweise zum speziellen Untergeordneten modelliert, wohingegen beim Bottom-Up-Ansatz in umgekehrter Richtung vorgegangen wird. In dieser Dissertation wird ein Konzept für einen universell anwendbaren Modellierungsansatz zur Berücksichtigung der rechnerinternen Datenverarbeitung und Ressourcenverwaltung vorgeschlagen [Ru15b]. Dabei wird nach dem Top-Down-Ansatz vorgegangen, wodurch ein Modell beliebig erweitert und detailliert werden kann, um weitere Eigenschaften des Realsystems präziser abzubilden.

In dem Modellierungsansatz wird die Datenverarbeitung eines Rechnersystems aus einer Menge von verschiedenen Datenverarbeitungsschritten, den sogenannten Aufträgen, abgebildet. Dabei generiert ein Ereignis (z.B. Tastatureingabe, Paketempfang) einen *Auftrag* bzw. *Task* zur Datenverarbeitung in einem Rechnersystem. Die Bedienung eines Auftrags wird durch eine *Task Unit (TU)* modelliert, welche eine spezifische Funktionalität F der Datenverarbeitung (z.B. IP-Routing-Tabellen-Lookup) repräsentiert, für dessen Erledigung bestimmte Ressourcen R (z.B. CPU, Hauptspeicher) benötigt werden. Durch die Bedienung eines Auftrags können ein oder mehrere Folgeaufträge für nachfolgende Task

Units generiert werden. Außerdem kann ein Auftrag aus mehreren Teilaufträgen bestehen, welche in Abhängigkeit zueinander stehen können. Wenn einzelne Aufträge bzw. Teilaufträge unabhängig voneinander sind, dann können diese parallel ausgeführt werden.

Die Ressourcen, welche von einer Task Unit zur Auftragsbearbeitung benötigt werden, sind typischerweise Hardwarekomponenten (z.B. CPU, Speicher), können aber auch Softwarekomponenten (z.B. Semaphore, Locks) zugeordnet werden. Die Verwaltung der begrenzten Ressourcen, das sogenannte *Resource Management*, wird als fundamentale Aufgabe durch das Betriebssystem übernommen. Diese Betriebssystemfunktionalität wird unter anderem durch den sogenannten *Resource Manager* modelliert (vgl. Abb. 1). Der Resource Manager greift dazu auf einen sogenannten *Resource Pool* zu, in welchem sich alle Ressourcen eines Ressourcentyps befinden. Der Modellierungsansatz ist in die folgenden drei Schichten bzw. Ebenen, den sogenannten *Planes*, unterteilt.

- Die *Processing Plane* stellt die Verarbeitungsschicht dar, in welcher die Datenverarbeitung modelliert wird. Sie besteht aus der Zusammenschaltung von mehreren Task Units mit spezifischen Funktionalitäten (F) zu gerichteten Graphen.
- Der *Resource Plane* sind die begrenzten Ressourcen des Rechnersystems zugeordnet. Jede Ressource (R) besitzt genau einen Ressourcentyp. Für jeden Ressourcentyp existiert genau ein *Resource Pool*, welcher nur Ressourcen dieses Typs enthält.
- In der *Resource Management Plane* wird die Ressourcenverwaltung modelliert. Dabei wird jeder Resource Pool durch genau einen *Local Resource Manager* verwaltet. Zur Vermeidung von Deadlocks bei der Ressourcenvergabe der verschiedenen Local Resource Manager existiert zusätzlich ein *Global Resource Manager*.

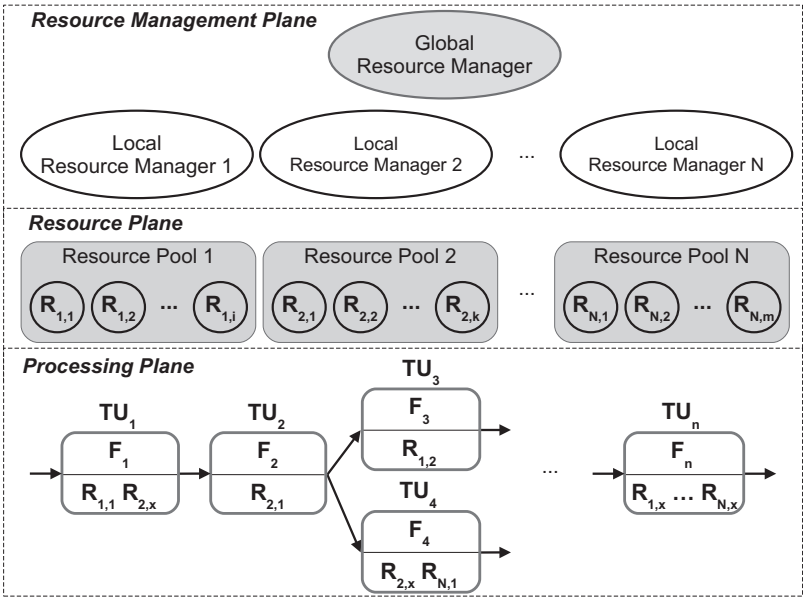


Abb. 1: Überblick zum Modellierungsansatz

2.2 Anwendung des Modellierungsansatzes für SDN und NFV

Der Modellierungsansatz für die Datenverarbeitung und das Ressource Management kann beispielsweise für die aktuellen Forschungsgebiete SDN und NFV angewendet werden (vgl. Abb. 2). In diesem Fall repräsentieren die Task Units die *virtuellen Netzwerkfunktionen* (VNF). Die modellierten physikalischen Ressourcen (z.B. CPU, Cache, Hauptspeicher) stellen die *Network Functions Virtualization Infrastructure* (NFVI) dar. Mit den Verbindungen zwischen den einzelnen Task Units wird ein gerichteter Graph gebildet, welcher in der NFV-Architektur das VNF Service Chaining abbildet. Die NFV-Managementkomponenten Orchestrator, VNF Manager und Virtual Infrastucture Manager werden durch den Global Resource Manager sowie die Local Resource Manager modelliert. Damit ermöglicht der vorgeschlagene Modellierungsansatz die umfangreiche Untersuchung komplexer Szenarien in virtuellen Netzumgebungen, um beispielsweise Fragestellungen wie ein effizientes VNF Placement, Migration, Leistungsfähigkeit, Skalierbarkeit oder Energieverbrauch zu analysieren.

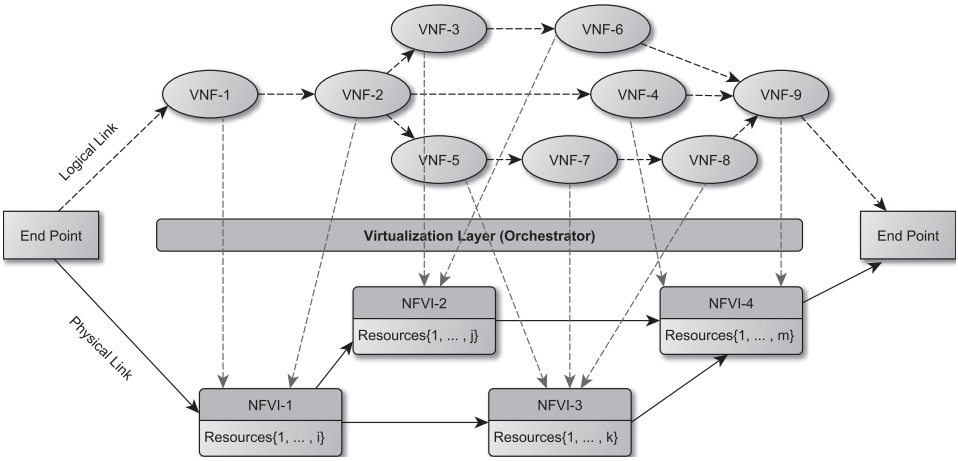


Abb. 2: Abbildung von VNFs zu physikalischen Ressourcen

3 QoS-sensitive Paketverarbeitung mit Standard-Hardware

Mit Hilfe des vorgeschlagenen Modellierungsansatzes wurde ein neues Konzept für die QoS-sensitive Paketverarbeitung mit Standard-Hardware entwickelt [Ru15a]. In der klassischen Linux NAPI mit lediglich einer Empfangswarteschlange (Rx-Ring) pro CPU-Kern und Netzwerkkarteneingangsport wird nicht zwischen Verkehrsklassen unterschieden (Single Queue, SQ). Jedoch ist dies für die differenzierte Behandlung von QoS-sensitivem Verkehr wichtig, um ein vorhersagbares Leistungsverhalten und garantierte Dienstqualität zu gewährleisten. Dazu müssen die Pakete beim Empfang entsprechend ihrer QoS-Anforderungen klassifiziert und in dedizierte Empfangswarteschlangen einsortiert werden. Anschließend erfolgt eine Priorisierung der jeweiligen Rx-Ringe mit QoS-sensitivem Verkehr entsprechend einer Scheduling-Strategie wie beispielsweise Round-Robin (RR) oder Weighted Fair Queueing (WFQ).

3.1 Konzept der QoS-NAPI

Verkehrsklassifizierung Moderne Netzwerkkarten verfügen über verschiedenste Funktionen, um einzelne Paketverarbeitungsaufgaben von der CPU auf die Netzwerkkarte (Network Interface Card, NIC) auszulagern. Zum Beispiel unterstützt der Intel 82599 NIC Controller Multi-Queueing und Receive-Side Scaling (RSS), um die zu bearbeitenden Pakete effizient auf die verfügbaren CPU-Kerne aufzuteilen. Spezielle Hardware-Filter der Netzwerkkarte erlauben die Klassifizierung auf Basis von MAC- oder IP-Header (z.B Port, ToS, VLAN). Im Fall der Paketverarbeitung mit Standard-Hardware können diese Funktionen der Netzwerkkarte genutzt werden, indem der zu bearbeitende Netzverkehr entsprechend der QoS-Anforderungen des jeweiligen Flows durch NIC-Filter klassifiziert und in einen speziellen Rx-Ring einsortiert wird. Dabei sollten für jeden NIC-Port, jeden CPU-Kern und für jede Verkehrsklasse dedizierte Rx-Ringe vorgehalten werden. Wenn ein empfangenes Paket mit keinem NIC-Filter übereinstimmt, dann wird es mittels RSS in die Verkehrsklasse mit der niedrigsten Priorität einsortiert (z.B. Best Effort).

In Abb. 3 sind die Erweiterungen für einen QoS-sensitiven Software-Router für die Verkehrsklassen Real-Time (RT) und Best Effort (BE) hervorgehoben. Somit wird eine Verkehrsklassifizierung ohne CPU-Belastung mit Hilfe der Netzwerkkarte durchgeführt (Classifier) und empfangene Pakete werden entsprechend ihrer Paketattribute in spezielle Rx-Ringe einsortiert. Danach werden die Pakete ebenfalls ohne CPU-Beteiligung durch Direct Memory Access (DMA) über Peripheral Component Interconnect Express (PCIe) in den Hauptspeicher transferiert. Anschließend wird ein Hardware-Interrupt (IRQ) am zuständigen CPU-Kern ausgelöst, sofern der Rx-Ring nicht leer gewesen ist. Danach erfolgt die Bearbeitung der Rx-Ringe entsprechend der Priorität ihrer Verkehrsklasse durch die *QoS-NAPI*, welche im nächsten Abschnitt beschrieben wird.

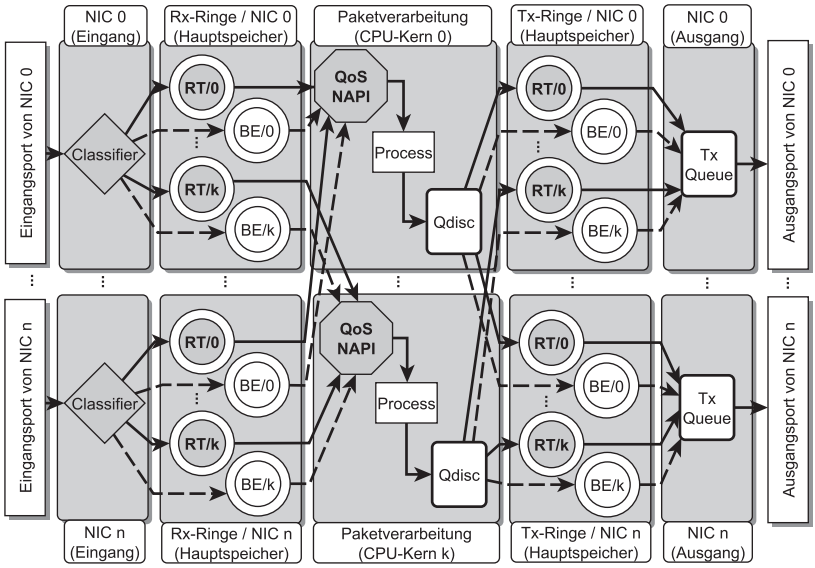


Abb. 3: Software-Router mit Rx/Tx-Ringen für QoS-sensitiven Verkehr

Verkehrspriorisierung Herkömmliche Scheduling-Mechanismen wie Qdisc zur differenzierten Paketbehandlung werden nur am NIC-Ausgangsport unterstützt. Am NIC-Eingangsport werden mehrere Rx-Ringe, die demselben CPU-Kern zugeordnet sind, lediglich im Round-Robin-Verfahren bedient. Eine Verkehrsklassifizierung und Priorisierung ist mit der klassischen Linux NAPI am NIC-Eingangsport nicht möglich. Für eine QoS-sensitive Paketverarbeitung müssen jedoch die Rx-Ringe der NIC-Eingangsports mit QoS-sensitivem Verkehr von der CPU bevorzugt bedient werden. Für eine solche Behandlung von QoS-sensitivem Verkehr mit beliebig vielen Verkehrsklassen muss die Linux NAPI zur *QoS-NAPI* erweitert werden.

In den Abb. 3 und 4 sind die dafür notwendigen NAPI-Erweiterungen hervorgehoben. Anstatt einer Poll-Liste für alle Rx-Ringe wird pro Verkehrsklasse (und pro CPU-Kern) eine dedizierte Poll-Liste verwendet. Demnach befinden sich alle Rx-Ringe mit der gleichen Verkehrsklasse in derselben Poll-Liste, sofern sie vom gleichen CPU-Kern bedient werden. Am Anfang prüft die QoS-NAPI die Poll-Listen, ob Rx-Ringe zur Bearbeitung hinzugefügt wurden, beginnend bei der Poll-Liste für die Verkehrsklasse mit der höchsten Priorität. Wenn sich mindestens ein Rx-Ring in einer Poll-Liste befindet, dann wird der erste Rx-Ring dieser Poll-Liste zur Bearbeitung ausgewählt. Nach der Bearbeitung eines Pakets des Rx-Ringes wird geprüft, ob in einer Poll-Liste einer Verkehrsklasse mit höherer Priorität Rx-Ringe hinzugefügt und somit Pakete empfangen wurden. Wenn dies der Fall ist, dann wird die Bearbeitung der aktuellen Poll-Liste unterbrochen und wechselt zu der nichtleeren Poll-Liste mit der höchstprioren Verkehrsklasse. Schließlich werden die Rx-Ringe entsprechend ihrer Priorität auf Basis einer Scheduling-Strategie vom jeweils zugewiesenen CPU-Kern bevorzugt bedient. Durch die damit verbundene differenzierte Paketbehandlung am NIC-Eingangsport wird die Paketverarbeitungszeit, insbesondere für latenz-sensitive Applikationen, deutlich reduziert.

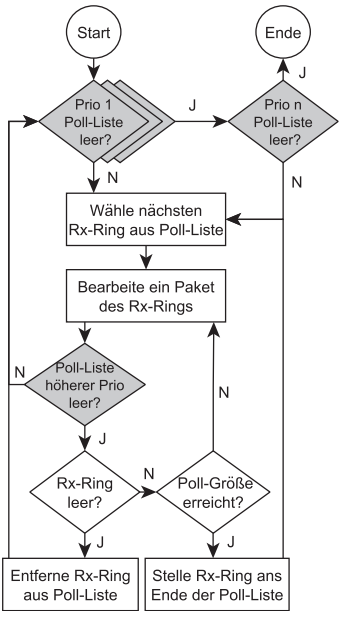


Abb. 4: UML-Aktivitätsdiagramm der Linux QoS-NAPI

3.2 Modellierung der QoS-NAPI

Zur Analyse eines Linux-Software-Routers wird der vorgeschlagene Modellierungsansatz zur Modellierung der Linux NAPI angewendet (vgl. Abschitt 2.1). Das Modell besteht aus $(n+1)$ NIC-Ports ($NIC_0, \ldots, NIC_n$) und einem CPU-Kern C_0 (vgl. Abb. 5). Im Netzwerksimulator ns-3 wird jede Netzwerkkarte durch ein dediziertes *NetDevice* repräsentiert. Jedem NetDevice ist eine *TU NIC* zugeordnet. Somit übergibt jedes NetDevice dessen empfangene Pakete in die Eingangswarteschlange (Rx Queue) einer dedizierten *TU NIC*.

Die *TU NIC* modelliert das Verhalten der NIC, indem die empfangenen Pakete basierend auf den Paketattributen in verschiedene Eingangswarteschlangen der Nachfolger-TUs (*TU NAPI*) einsortiert werden. Dadurch können Pakete mit QoS-Anforderungen klassifiziert und in eine spezielle Eingangswarteschlange einer Nachfolger-TU weitergeleitet werden. Diese Eingangswarteschlange repräsentiert einen Rx-Ring des Realsystems. Nach der Bearbeitung durch eine *TU NAPI* wird das Paket zum Versand in die entsprechende Ausgangswarteschlange (Tx Queue) des NIC-Ausgangsports (NetDevice) einsortiert.

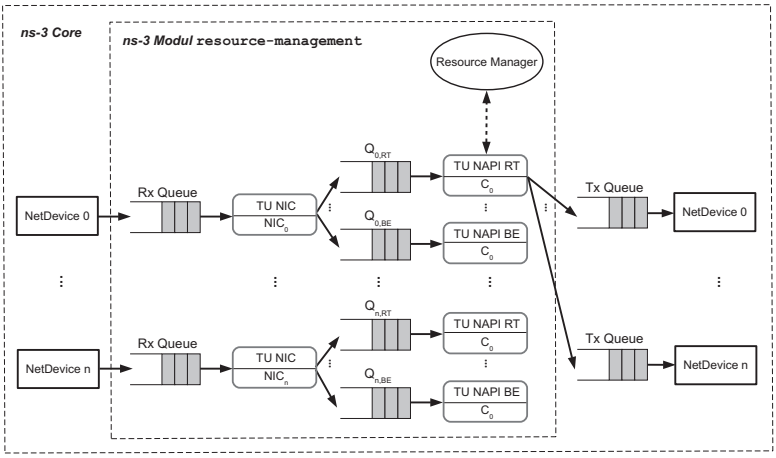


Abb. 5: ns-3-Simulationsmodell eines Linux-Routers mit Rx/Tx-Ringen für QoS-sensitiven Verkehr

Der Interrupt-Moderation-Mechanismus der Linux NAPI wird ebenfalls mit Hilfe des Modellierungsansatzes (vgl. Abschnitt 2.1) abgebildet. Dies beinhaltet die Aktivierung und Deaktivierung von Interrupts (IRQs) sowie die Paketverarbeitung durch Polling. In einem Linux-Software-Router mit Multi-Queueing-Unterstützung existiert für jeden CPU-Kern pro NIC-Port ein dedizierter Rx/Tx-Ring. Im Fall der QoS-NAPI wird zusätzlich für jede Verkehrsklasse ein dedizierter Rx-Ring angelegt, sodass für jede Kombination aus CPU-Kern, NIC-Port und Verkehrsklasse ein dedizierter Rx-Ring vorhanden ist. Ein NAPI-Thread ist an einen bestimmten CPU-Kern gebunden, welcher die zugewiesenen Rx/Tx-Ringe abwechselnd bedient.

Im Software-Router-Modell wird ein NAPI-Thread durch mehrere NAPI Task Units repräsentiert. Dabei korreliert die Anzahl der NAPI Task Units (*TU NAPI*) mit der Anzahl der Rx-Ringe, welche der NAPI-Thread bedient. Jede *TU NAPI* besitzt genau eine Eingangswarteschlange, welche einen bestimmten Rx-Ring abbildet. Zur Modellierung eines Software-Routers mit m Verkehrsklassen, n NIC-Ports und k CPU-Kernen werden demzufolge $m \cdot n \cdot k$ NAPI Task Units benötigt (klassische NAPI: $m = 1$). Im QoS-Software-Router-Modell mit dedizierten Rx-Ringen für RT- und BE-Verkehr wird zwischen den NAPI Task Units *TU NAPI RT* und *TU NAPI BE* unterschieden (vgl. Abb. 5).

Die NAPI Task Units konkurrieren um dieselbe geteilte CPU-Kern-Ressource. Daher können NAPI Task Units, welche dieselbe CPU-Kern-Ressource benötigen, nicht gleichzeitig ausgeführt werden. Diese Tatsache entspricht genau dem Fakt, dass ein NAPI-Thread im Realsystem nur einen Rx-Ring zu einem bestimmten Zeitpunkt bedienen kann.

3.3 Anwendung der QoS-NAPI in der Praxis

Auf Grundlage des im vorherigen Abschnittes beschriebenen Simulationsmodells wurde die Linux NAPI mit den vorgeschlagenen Optimierungen zur QoS-NAPI analysiert.

In Abb. 6 und 7 beschreibt der Echtzeit-Anteil den prozentualen Beitrag von RT-Verkehr am Gesamtverkehr (BE- und RT-Verkehr). Für WFQ wird das Bedienzeitverhältnis RT:BE bezüglich des jeweiligen Rx-Ringes angegeben. Die Resultate zeigen, dass insbesondere mit der Prioritätsstrategie (Prio) die mittlere Paketlatenz des RT-Verkehrs, auch bei hohen Paketankunftsraten von 1,3 Mpps (Millionen Pakete pro Sekunde) und hohem Echtzeit-Anteil von 30 %, von 2,4 μs auf 1,1 μs reduziert wird.

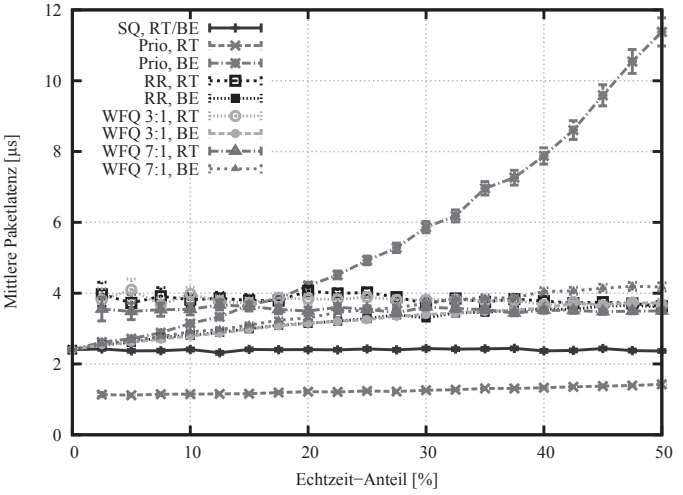


Abb. 6: Mittlere Paketlatenz in Abhängigkeit vom Echtzeit-Anteil für verschiedene Scheduling-Strategien bei 1,3 Mpps Paketankunftsrate

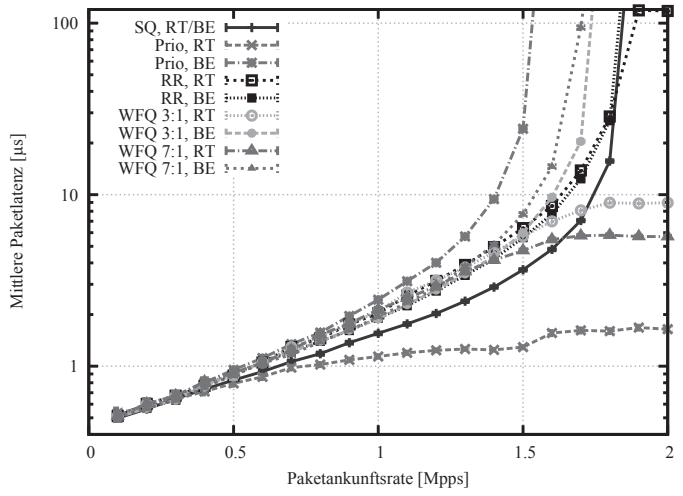


Abb. 7: Mittlere Paketlatenz in Abhängigkeit von der Paketankunftsrate für verschiedene Scheduling-Strategien bei 30 % Echtzeit-Anteil

Auf Basis der Simulationsmodelle wurde schließlich eine prototypische Implementierung der QoS-NAPI entwickelt [Be16]. Mit umfangreichen Testbed-Messungen konnten die Leistungssteigerungen der QoS-NAPI durch einen realen Linux-Software-Router bestätigt werden. Somit wird im Vergleich zum Stand der Technik (SQ, RR) durch die QoS-NAPI (mit Prio) die Paketverarbeitung von latenz-sensitivem Verkehr deutlich verbessert. QoS-NAPI ist außerdem als reine Softwarelösung kostengünstig realisierbar.

4 Zusammenfassung

Das Ziel, mit Software-basierter Paketverarbeitung auf Basis von Standard-Hardware die Leistungsfähigkeit von spezialisierter Netzwerkhardware mit Hunderten von 10 Gbps Netzwerkports zu erreichen, ist anspruchsvoll. In diesem Zusammenhang beschäftigt sich diese Dissertation [Ru16] mit der Leistungsbewertung und Optimierung von Multi-Core-Architekturen zur Paketverarbeitung in Kommunikationsnetzen. Dazu geht die Arbeit auf bestehende Betriebssysteme, insbesondere Linux, und Softwareoptimierungen für die Paketverarbeitung ein. Außerdem werden alternative Networking Frameworks wie Click [Ko00], DPDK [Int15], Netmap [Ri12] und RouteBricks [Fa11, DAR12] diskutiert.

Schließlich wird ein neuer, universeller Modellierungsansatz für die Leistungsanalyse und Optimierung der Datenverarbeitung in ressourcenbeschränkten Rechnersystemen vorgeschlagen [Ru15b], welcher als Open Source Software für den Netzwerksimulator ns-3 verfügbar ist.

Es werden verschiedene Fallstudien zur Leistungsbewertung und Optimierung der Paketverarbeitung durchgeführt. Zur QoS-sensitiven Paketverarbeitung wird ein neues Konzept für die Erweiterung der Linux NAPI zur QoS-NAPI vorgeschlagen [Ru15a, Be15]. Dazu wird QoS-sensitiver Verkehr bereits am NIC-Eingangsport klassifiziert und entsprechend einer Scheduling-Strategie bevorzugt durch die CPU bedient, da diese üblicherweise den Engpass in der Paketverarbeitung mit Standard-Hardware darstellt. Im Gegensatz dazu wird bei den herkömmlichen QoS-Techniken wie DiffServ oder IntServ eine QoS-differenzierte Paketbehandlung nur für den NIC-Ausgangsport berücksichtigt. Damit erfolgt eine QoS-differenzierte Paketbehandlung bereits vor der eigentlichen Paketverarbeitung durch die CPU.

Zur Bewertung des QoS-Konzepts wird mit Hilfe des vorgeschlagenen Modellierungsansatzes ein Simulationsmodell eines Linux-Software-Routers entworfen. Die Resultate zeigen, dass mit der Prioritätsstrategie die Paketlatenz für QoS-sensitive Netzapplikationen deutlich reduziert wird und QoS-Garantien gewährleistet werden.

Schließlich erfolgte auf Basis des vorgeschlagenen QoS-NAPI-Konzeptes eine prototypische Implementierung für einen Linux-Software-Router als Proof-of-Concept [Be16]. Dazu wurden ausführliche Testbed-Messungen durchgeführt, welche die Leistungssteigerungen und Robustheit der Implementierung für unterschiedlichste Szenarien belegen. Damit wird durch die QoS-NAPI eine Optimierung der Paketverarbeitung innerhalb des Linux-Betriebssystems ermöglicht, welche als Softwarelösung kostengünstig implementierbar ist. Die Implementierung der QoS-NAPI steht als Open Source Software der Linux-Community frei zur Verfügung.

Die aufgeführten Aspekte dieser Arbeit zeigen deutlich, dass das Potential von Software-basierter Paketverarbeitung mit Standard-Hardware sehr vielversprechend ist, welches unter anderem in den aktuellen Forschungsgebieten SDN und NFV aufgegriffen wird.

Literaturverzeichnis

[Be15] Beifuß, A.; Raumer, D.; Emmerich, P.; Runge, T. M.; Wohlfart, F.; Wolfinger, B. E.; Carle, G.: A Study of Networking Software Induced Latency. In: International Conference on Networked Systems (NetSys). S. 1–8, März 2015.

[Be16] Beifuß, A.; Runge, T. M.; Raumer, D.; Emmerich, P.; Wolfinger, B. E.; Carle, G.: Building a Low Latency Linux Software Router. In: International Teletraffic Congress (ITC). S. 1–9, September 2016.

[DAR12] Dobrescu, M.; Argyraki, K.; Ratnasamy, S.: Toward Predictable Performance in Software Packet-Processing Platforms. In: USENIX Conference on Networked Systems Design and Implementation (NSDI). S. 141–154, April 2012.

[Fa11] Fall, K.; Iannaccone, G.; Manesh, M.; Ratnasamy, S.; Argyraki, K.; Dobrescu, M.; Egi, N.: RouteBricks: Enabling General Purpose Network Infrastructure. ACM SIGOPS Operating Systems Review, 45(1):112–125, 2011.

[Int15] Intel Corporation. Data Plane Development Kit: Programmer's Guide, April 2015.

[Ko00] Kohler, E.; Morris, R.; Chen, B.; Jannotti, J.; Kaashoek, M. F.: The Click Modular Router. ACM Transactions on Computer Systems (TOCS), 18(3):263–297, August 2000.

[Ri12] Rizzo, L.: Revisiting Network I/O APIs: The Netmap Framework. Communications of the ACM, 55(3):45–51, 2012.

[Ru15a] Runge, T. M.; Raumer, D.; Wohlfart, F.; Wolfinger, B. E.; Carle, G.: Towards Low Latency Software Routers. Journal of Networks, 10(4):188–200, 2015.

[Ru15b] Runge, T. M.; Wolfinger, B. E.; Heckmüller, S.; Abdollahpouri, A.: A Modeling Approach for Resource Management in Resource-Constrained Nodes. Journal of Networks, 10(01):39–50, 2015.

[Ru16] Runge, T. M.: Modell-basierte Leistungsbewertung und Optimierung von Multi-Core-Architekturen zur Paketverarbeitung in Kommunikationsnetzen. Berichte aus dem Forschungsschwerpunkt Telekommunikation und Rechnernetze. Shaker-Verlag, 2016.



Torsten M. Runge absolvierte das Studium der Informationstechnik/Technischen Informatik an der Universität Rostock (2001-2006). Anschließend arbeitete er als Forschungs- und Entwicklungsingenieur für die Siemens AG und die Deutsche Telekom AG (2007-2012), wo er in mehreren internationalen Forschungsprojekten involviert war und viele Patentanmeldungen sowie Publikationen hervorgingen. Danach promovierte er mit Auszeichnung an der Universität Hamburg im Bereich der Software-basierten Paketverarbeitung mit Multi-Core-Prozessoren (2012-2016). Seine Veröffentlichungen wurden bereits mehrfach mit Best Paper Awards ausgezeichnet. Seit 2017 forscht Dr. Runge am International Computer Science Institute (ICSI) der University of California, Berkeley (USA) in den Bereichen Software-Defined Networking und Network Functions Virtualization.

Richtig Herausfordernd: Anpassbarkeit und Adaptivität in bewegungsbasierten Gesundheitsspielen[1]

Jan D. Smeddinck[2]

Abstract: Der demografische Wandel und die Verbreitung einer bewegungsarmen Lebensweise fördern die Prävalenz von physiotherapeutischen Behandlungsmaßnahmen, deren Erfolg von der Durchführung repetitiver Übungen abhängt. Häufig kommt es dabei zu Motivationsproblemen. Spiele können uns in ihre Welt ziehen und im Spielfluss gebannt halten. Sie motivieren dadurch ungemein. Aber können sie auch dabei helfen, ernsthafte Gesundheitsziele zu erreichen? Anhand einer Auswahl von Studien und praktischen Umsetzungen, die entlang der Betrachtungsperspektiven Umsetzung, Akzeptanz und Wirksamkeit gegliedert sind, liefert die Dissertation dazu Erkenntnisse und erweitert die bestehende Theorie zur Mensch-Computer-Interaktion mit anpassbaren und selbstanpassenden Systemen im Kontext bewegungsbasierter spielerischer Bewegungsprogramme für Gesundheitsanwendungen. Sie untermauert die Notwendigkeit, die Fähigkeiten und Bedürfnisse individueller Nutzer über eine manuelle oder automatische Anpassung zu berücksichtigen.

1 Einführung

Computer- und Videospiele sind heute ein relevantes Kulturgut. Sie sind in vielen Ländern zum umsatzstärksten Unterhaltungsmedium avanciert [RRP06], werden von allen Altersgruppen genutzt und erfahren zusehends wissenschaftliche Aufmerksamkeit. Ein besonderes Augenmerk gilt den *Serious Games*, also Spielen mit dem ausdrücklichen Ziel einer über das Spielen hinausgehenden positiven Wirkung. Bewegungsbasierte Spiele für Gesundheitsanwendungen (Engl. Motion-based Games for Health; kurz MGH) spielen dabei eine wichtige Rolle. Ihr Potenzial zur Anwendung bei gesamtgesellschaftlichen Herausforderungen wie Bewegungsmangel, Übergewicht oder vermehrten altersbedingten physiologischen Beschwerden im Zuge des demographischen Wandels, ist wissenschaftlich von besonderem Interesse. So können MGH zum Beispiel in der Physiotherapie, der Rehabilitation und der Prävention (zusammen PRP) eingesetzt werden, um die Motivation für die Durchführung repetitiver Übungen zu erhöhen, sowie um Rückmeldungen zur Übungsdurchführung zu geben und auch um über eine längere Anwendungsdauer hinweg objektive Messdaten zu gewinnen.

Explorative Untersuchungen mit existierenden kommerziellen Spielen für den breiten Unterhaltungsmarkt haben allerdings gezeigt, dass diese PRP-Anwendungsfälle meist spezifisch gestaltete Programme benötigen, die den Anforderungen und Bedürfnissen der Zielgruppe entsprechend nutzerzentriert entwickelt werden. Zudem ist für eine fortlaufende und möglichst optimale Anwendung auch ein starkes Maß an Flexibilität in der Einstellung

[1] Englischer Titel der Dissertation:
"Human-Computer Interaction with Adaptable & Adaptive Motion-based Games for Health"

[2] Digital Media Lab, TZI, Universität Bremen, smeddinck@tzi.de

der MGH nötig, um individuellen Unterschieden und Entwicklungen im zeitlichen Verlauf ihrer Anwendung gerecht werden zu können. Manuelle Einstellungsmöglichkeiten müssen dabei für Endnutzer*innen und involvierte Gesundheitsexpert*innen effizient nutzbar sein. Da meist nur wenig Zeit für manuelle Einstellungen zur Verfügung steht gibt es auch einen deutlichen Bedarf für automatische Anpassungsmethoden.

Die vorgestellte Dissertation beschäftigt sich daher mit der zentralen Fragestellung, wie Anpassbarkeit und automatische Anpassung in MGH in effizienter, effektiver und angenehm nutzbarer Form umgesetzt werden können. In der Arbeit werden unterschiedliche Erkenntnisse zu Aspekten der Mensch-Maschine-Interaktion mit Anpassung in MGH zusammengefasst und diskutiert. Studien zur Gestaltung und Implementierung, zur Akzeptanz und zur Wirksamkeit von MGH werden mit einem generalisierenden Prozessmodell für die Analyse, Umsetzung und Evaluation anpassbarer und adaptiver Systeme als Beitrag zur Theorieentwicklung zusammengeführt.

Neben Umsetzungsstrategien, sowie positiven Erkenntnissen zur Akzeptanz und Wirksamkeit heuristischer adaptiver Systeme im Anwendungsbereich der MGH in Zusammenwirkung mit manuellen Einstellungsinterfaces trägt die Dissertation so auch eine Vereinigung und Erweiterung bestehender Umsetzungsmodelle für anpassbare und adaptive Systeme, sowie eine umfassende Diskussion der damit einhergehenden Berücksichtigung psychophysiologischer Aspekte durch eine nutzerzentrierte, iterative Vorgehensweise unter Zusammenführung motivationspsychologischer Ansätze aus der Flowtheorie und aus der Selbstbestimmungstheorie bei.

2 Verwandte Arbeiten und Hintergrund

Fortschritte in Medizin und Technik haben eine deutliche Erhöhung der Lebensqualität und der Lebenserwartung ermöglicht. Allerdings werden diese positiven Entwicklungen von beachtlichen Herausforderungen begleitet. Eine bewegungsarme Lebensweise, sowie durch den Lebensstil begünstigte Krankheiten und Beschwerden, die gerade mit zunehmendem Alter verbreitet sind, belasten die betroffenen Individuen und die Gesundheitssysteme [Bl12]. Neben primären Heilbehandlungen spielt körperliche Aktivität eine große Rolle in der Vorbeugung und in der längerfristigen Behandlung vieler solcher Leiden. Eine zentrale Herausforderung stellen bei der Aufnahme und Einhaltung von sportlicher Aktivität die insbesondere Kontext von PRP typischen repetitiven Übungen dar. MGH können hier eine wichtige unterstützende Rolle einnehmen. Als eine spezielle Form von Exergames, also Spiele bei denen Spieler körperliche Aktivitäten oder Übungen ausführen müssen, um Spielziele erreichen zu können [YG07], liefern sie *Motivation*. Sie bieten zudem das Potenzial, objektive Erkenntnisse zum Status und zur *Entwicklung* von individuellen Patienten und von Patientengruppen beizutragen und Patienten während laufenden Behandlungen, auch in Abwesenheit von betreuendem Personal, *anzuleiten*.

Während einige Versuche zeigen, dass Massenmarktproduktionen unter besonderen Umständen teilweise für Gesundheitsanwendungen eingesetzt werden können [CK09], ist bedingt durch die intra- und interindividuell sowie zeitabhängig vielseitigen und wechselnden Fähigkeiten und Anforderungen meist eine dedizierte anwendungsfallbezogene

Produktion von MGH mit weitreichen Konfigurations- und Anpassungsmöglichkeiten erforderlich. Dabei können nicht nur die Patienten, sondern auch medizinisches Personal und andere Dritte, z. B. Familienmitglieder, involviert sein [Sm16b]. Wird den Anforderungen und Fähigkeiten der Nutzer*innen nicht hinreichend entsprochen, so drohen neben schlechter Spielerfahrung auch ein Verfehlen der erwünschten positiven Aspekte oder sogar Verletzungen. MGH müssen also auf die individuellen Fähigkeiten und Bedürfnisse der Patienten eingestellt werden, wenn bestmögliche Ergebnisse erreicht werden sollen. Dafür ist eine Einstellung anhand eines einzelnen Parameters mit wenigen diskreten Stufen, wie "einfach", "mittel" und "schwer" im Regelfall nicht ausreichend. Bei manuellen Einstellungsmöglichkeiten (*Adaptierbarkeit*) ist eine Auswahl verständlicher Einstellungsparameter, die später in technische Spielvariablen übersetzt werden, notwendig. Da ein solches Mapping aber trotzdem insbesondere in Bezug auf die Frequenz und den Detailgrad von Einstellungen nur begrenzt skalieren kann und die zeitlichen Ressourcen von betreuendem Personal in der PRP für Einstellungsprozesse begrenzt sind, wird in der Regel auch eine Automatisierung von Anpassungen (*Adaptivität*) notwendig.

3 Gestaltung und Implementierung von MGH

Zur Aufarbeitung der Anforderungen an eine bedürfnisgerechte Gestaltung und Entwicklung von adaptierbaren und adaptiven MGH legt die Dissertation eine Reihe von Erkenntnissen und theoretischen Konzepten am Beispiel der Umsetzung und Evaluation des drittmittelgeförderten Projektes *Spiel Dich fit* (SDF) dar. Das Projekt hat sich der Erforschung und der Entwicklung einer Sammlung spielerischer Bewegungsprogramme zur Unterstützung von PRP mit Senioren mittels aktivierender Übungen gewidmet.

Motivation wurde bereits als großer Vorteil von MGH benannt. Die vorgestellte Dissertation greift bei der Diskussion motivationspsychologischer Aspekte zwei bedeutende Theorien auf. Die *Selbstbestimmungstheorie* (SDT) ist in Bezug auf ihre Anwendbarkeit mit Videospielen gut erforscht [RRP06] und hebt die Erfüllung von drei zentralen Bedürfnissen (*Kompetenzempfinden*, *Autonomieempfinden*, und *soziale Eingebundenheit*) hervor, die von modernen Videospielen gut bedient werden können. SDT wird auch im Kontext von körperlicher Aktivität eingesetzt und eignet sich daher besonders für MGH. Die in der SDT beschriebenen Selbstbestimmungsmotive helfen, Beobachtungen wie adhoc initiierte abwechselnde lokale Mehrspielersitzungen mit Publikum im Rahmen des SDF-Projekts zu erklären (hier über soziale Eingebundenheit). Zudem wurde, in Entsprechung zum Autonomieempfinden beobachtet, dass Programme in nutzergeneriertem unvorhergesehenem Kontext [Do04] verwendet werden (z. B. Spiel im Sitzen, mit Gehhilfen, oder auf Wackelbrettern). Selbstbestimmungsmotive spielen also nicht nur in der Behandlung von Kerninhalten und Interaktionen mit Spielen eine Rolle, sondern auch in ihrer kontextualisierten Nutzung.

SDT wird in der vorgestellten Dissertation mit der für die Erklärung der Motivation von Videospielen ebenfalls bedeutsamen *Flowtheorie* nach Csikszentmihalyi [Cs90] zusammengeführt. Es kann dabei argumentiert werden, dass die SDT allgemeine motivationale Faktoren betrachtet, während die Flowtheorie die Aufrechterhaltung von Flow, als

ein fortlaufend hochmotivierter Zustand, beschreibt. Obwohl Flow in MGH während der Durchführung von Übungsprogrammen durchaus gewünscht ist, sind im größeren Kontext der Programme auch Reflexionsphasen bedeutsam, die eine bewusste Aufmerksamkeit und einen Bruch der Immersion mit dem Spielgeschehen nötig machen können. Für die Umsetzung von Adaptivität in Spielen ist Flow als Konstrukt vor allem hilfreich, da die Optimierung der als Grundvoraussetzung für Flow beschriebenen passenden Balance zwischen den Herausforderungen eines Programmes und den Fähigkeiten der Nutzer, diese Herausforderungen zu bewältigen, für die Anpassung spielerischer Leistungsparameter zur dynamischen Steuerung der Spielschwierigkeit eingesetzt werden kann (vgl. Abbildung 1).

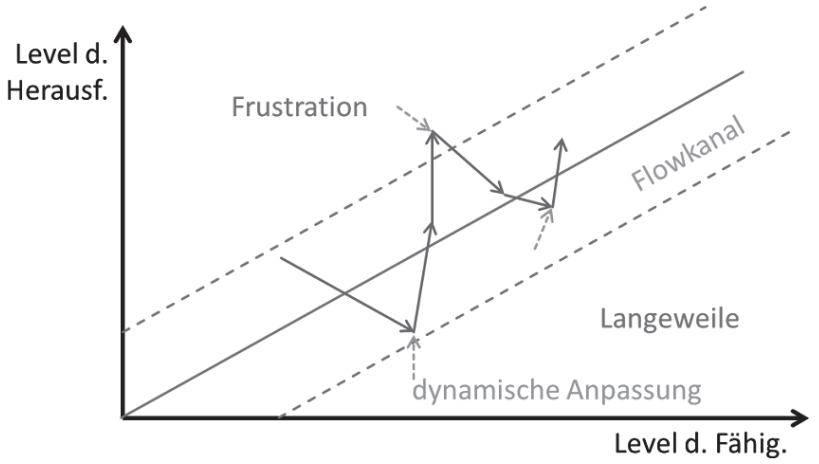


Abb. 1: Adaptivität im Kontext der Balance zwischen Herausforderung und Fähigkeiten als Entstehungsvoraussetzung für Flowerfahrungen. Nach [SS16].

Um den oben beschriebenen Anforderungen an MGH gerecht zu werden, wurden im Rahmen des SDF Projektes manuelle Einstellungsinterfaces entworfen, eingesetzt und bezüglich ihrer Eignung mit positiven Ergebnis evaluiert. In den manuellen Einstellungen können für individuelle Nutzer*innen oder für Nutzergruppen zeitliche Meilensteine mit normalisierten Einstellungsparametern (*range of motion*, *speed*, *accuracy*, etc.) festgelegt werden. Diese menschbezogenen Einstellungen stellen eine Alternative zu klassischen spielbezogenen Parametern dar. über eine Schwellwertskalierung werden die Parameter in Spielvariablen übersetzt. Die Steuerung kann zwischen vordefinierten Meilensteinen über Sollperformanzbereiche automatisiert werden. Adaptivität kann dabei entweder durch Heuristiken, mit spezifischen Methoden aus dem maschinellen Lernen oder der Nutzermodellierung, oder in Mischverfahren umgesetzt werden. Als prinzipielle Komponenten informiert dabei stets eine *Leistungsmessung* einen *Anpassungsmechanismus* [Ad10], wobei häufig Spielerfolg mit Spielschwierigkeit verbunden wird, obwohl auch andere Spielaspekte Ziel automatischer Anpassungen sein können und psychometrische oder psychophysiologische Messungen als alternative Informationsquellen in Frage kommen. Die Umsetzung von anpassbaren und adaptiven MGH ist dabei im Detail komplex

und beinhaltet oft eine Vielzahl von Komponenten in einem verteilten System, die fast immer durch eine Modularisierung im Sinne der Wiederverwendbarkeit und Erweiterbarkeit abgedeckt wird. Berücksichtigt werden dabei in einer entsprechenden detaillierten Aufarbeitung in der Arbeit die Modulbereiche *Kernspiel*, *Feedback* (Leistungsmessung) und *manuelle* bzw. *automatische Anpassung* [Sm16a].

Bei der konkreten Planung oder Analyse von Anpassungsmechanismen sind allerdings wesentlich detailliertere Betrachtungen notwendig. Unter anderem muss entschieden werden, wie stark die Automatisierung sein soll. Dazu gibt es ein Modell der *Levels of Automation* von Sheridan [Sh01]. In der Dissertation werden diese Stufen der Automatisierung mit der SDT verbunden und ihr Einfluss auf das *Autonomie-* und *Kompetenzempfinden* der Nutzer in MGH betrachtet. Unter Zuhilfenahme weiterer verwandter Arbeiten zu dynamischen Schwierigkeitsanpassungen (DDA) in Spielen [Ba13] und zu Modellierungsdimensionen adaptiver Systeme im Allgemeinen [An09] wird das Modell erweitert und ergänzt. Das resultierende Modell für die Planung und Analyse anpassbarer und adaptiver MGH offenbart die Bedeutung einer Vielzahl von Aspekten aus den Bereichen *Anpassungsziele*, *Veränderungen* (die Anpassungen hervorrufen), *Mechanismen* (zur Umsetzung) und *Auswirkungen* und erweitert die vorher bestehenden generellen Klassen damit deutlich.

Dieses Modell findet in der Diskussion zahlreicher in die Dissertation eingeflossener Entwicklungen und Studien Anwendung. Unter anderem wurde im Modellbereich der *Auswirkungen* untersucht, welchen Einfluss Darstellungsmodalitäten für eine Schwierigkeitsauswahl auf die Spielerfahrung haben. In der Studie wurden in einem für den Zweck der Studie angepassten, eigens implementierten Spiel (vgl. Abbildung 2) *klassische Menüs* für Spielschwierigkeitseinstellungen mit *DDA* und mit dem Konzept der *eingebetteten Spielschwierigkeitswahl* [Ch07] verglichen.



Abb. 2: Die Studienkonditionen in ihrer Erscheinung im Spiel THYFTHYF [Sm16a].

Während die Resultate einen erwarteten vergleichsweise positiven Effekt auf das *Autonomieempfinden* für die Konditionen *menu* und *embedded* zeigen waren andere spielerfahrungsbezogene Messungen (*positiver* und *negativer Affekt*, *Interesse* und *Präsenz / Immersion*) nicht nur ohne signifikante Unterschiede, sondern im Schnitt ungewöhnlich konsistent auf quasi-identischem Niveau, obgleich die Flowtheorie eine bessere Immersion bei der eingebetteten Schwierigkeitswahl erwarten ließe [Ch07].

In einer Wiederholungsstudie mit dem Spiel *fl0W* von Chen [Ch07] konnten diese Ergebnisse im Wesentlichen reproduziert werden. Die Studie zeigt, dass eine Unterschei-

dung zwischen eingebetteter und menügesteuerter Spielschwierigkeitswahl sich offenbar nicht nennenswert auf die allgemeine Spielerfahrung auswirkt. Für die Anwendbarkeit semi-automatischer Anpassungen im Kontext von SDF wurde geschlussfolgert, dass die Modalität der Schwierigkeitsauswahl bei gleichzeitigem Vorliegen anderer Anforderungen sekundär betrachtet werden kann.

4 Einsatzerprobung und Akzeptanz

Mit der Gestaltung und Implementierung von Adaptivität in MGH auf Grundlage der vorgestellten Ansätze ist die Frage nach Nutzererfahrungen eng verwoben. Eine weitere zentrale Veröffentlichung im Rahmen der vorgestellten Dissertation dokumentiert diese Nutzererfahrungen in einer frühen Erprobung von Adaptivität im MGH *Sterntaler*, das Bestandteil einer für den Einsatz in der Physiotherapie mit Parkinson-Patienten entwickelten Spielesammlung ist [As11]. Darin kommt ein Anpassungsmechanismus mit drei Parametern zum Einsatz: *Geschwindigkeit* (der benötigten Spielerbewegung um einen Pfad aus Sternen einzusammeln, gesteuert durch die Anzeigedauer von Spielobjekten), *Genauigkeit* (mit der einzelne Spielobjekte getroffen werden müssen, gesteuert durch die Skalierung von Kollisionserkennern) und *Bewegungsreichweite* (siehe Abbildung 3). Letztere wurde dabei aufgrund der besonderen Bedeutung für das Ziel der assoziierten Physiotherapie in der automatischen Steuerung als Primärziel betrachtet.



Abb. 3: Die Einstellungsparameter im MGH Sterntaler in Reihenfolge wie im Text.

Nachdem erste Tests negative Rückmeldungen bei einer sichtbaren Skalierung der Verteilung der einzusammelnden Spielelemente dokumentierten, wurde stattdessen die interne Repräsentation der Nutzer*innen skaliert. Die korrespondierenden Leistungsmessungen waren *Sammelleistung* (Anteil der eingesammelter Sterne an allen einsammelbaren Sternen), *Zeitleistung* (Anteil der durchschnittlich zum Sammeln der Sterne benötigten Zeit nach deren Erscheinen relativ zur zum Einsammeln verfügbaren Zeit) und *Reichweitenleistung* (Summe aller nach Distanz zur Schulterposition gewichtet eingesammelten Sterne in während des Spiels erreichten Zonen geteilt durch die Summe aller ebenso gewichteten verfügbaren Sterne). Diese Leistungsmessungen wurden über eine Skalierung auf einen Werteberich mit über iteratives Tests ermittelten, noch spielbaren Grenzwerten, heuristisch übersetzt.

In einer frühen situierten Studie in den Räumlichkeiten der Deutschen Parkinsonvereinigung in Bremen wurden drei Teilnehmer über drei Wochen mit fünf halbstündige Sitzungen pro Woche intensiv begleitet. Neben den Leistungsmessungen und der Aufzeichnung der Anpassungen wurden Beobachtungen, eine Analyse durch begleitende Therapeuten,

Fragebögen zur Nutzererfahrung und Interviews erhoben. Die Resultate zeigen, dass die Bewegungsreichweite der Teilnehmer bis hin zu vorab festgelegten Maximalwerten verbessert werden konnte. Weiterhin zeigten sich jedoch deutliche individuelle Unterschiede, die mit diversen Faktoren assoziiert werden können, die in MGH eine besondere Herausforderung darstellen. Etwa gab es einen Teilnehmer mit einseitig nicht therapierbaren Einschränkungen in der Bewegungsreichweite und temporäre Auswirkungen von Medikamenten traten deutlich hervor. Diese Beobachtungen verdeutlichen das Potential, aber auch die Notwendigkeit von Adaptivität und Anpassbarkeit in MGH.

Insgesamt wurde die Adaptivität in dieser Studie gut akzeptiert, und die Anwendung des MGH konnte dem therapeutische Ziel einer Zunahme der Bewegungsreichweite gerecht werden. Zudem verdeutlichten die Reaktionen der Teilnehmer auf die Vergabe von Punkten für das Spiel die Wichtigkeit eines bewussten Umgangs mit der Transparenz der Bewertungsmechanismen, die als *Salienz* im entwickelten Modell berücksichtig wird. Weiterhin äußerten die Teilnehmer, dass sie sich trotz der guten Spielerfahrung des ernsten Hintergrunds bewusst sind. Sie gaben an, einem hohen Level an Herausforderung positiv gegenüber zu stehen und auch mit weniger erfolgreichen Spielergebnissen zufrieden zu sein. Die Akzeptanz gegenüber MGH stellt sich damit insgesamt sehr positiv dar.

5 Mittelfristige Studie und Wirksamkeit

Zur Untersuchung von funktionaler Wirksamkeit wurde, auf Basis der aktivierenden Bewegungsprogramme aus dem oben genannten SDF Projekt (siehe Abbildung 4), eine fünfwöchige situierte Studie mit wöchentlichen Terminen in einer Physiotherapiepraxis für Patienten mit chronischen unspezifischen Rückenbeschwerden durchgeführt.



Abb. 4: Bildschirmfotos der SDF Programme im Szenario Garten.

Es wurden drei unterschiedliche Gruppen verglichen. Das Medianalter der Teilnehmer*innen betrug 66 Jahre. Eine Gruppe nutzte die SDF Programme mit Einstellungsinterfaces für Therapeuten (im Sinne eines anpassbaren MGH), eine andere Gruppe nutzte ebenfalls die Programme und die Einstellungsinterfaces, wobei zwischen vordefinierten Meilensteinen eine heuristische Anpassung stattfand (im Sinne eines anpassbaren und adaptiven MGH) und eine Kontrollgruppe erhielt reguläre, proaktive, auf Beweglichkeit und Balance orientierte Physiotherapie ohne den Einsatz eines MGH. Die Durchführung wurde von 12 Therapeut*innen unterstützt. Die Therapiesitzungen dauerten in allen Gruppen etwa 20 Minuten und wurden stets von eine*r Therapeut*in begleitet.

Mehrere motivationale und funktionale Messungen wurden erhoben [SHM15]. Während die SDT-basierte Erhebung von Motivationskomponenten im Einzelnen signifikante Unterschiede zeigte, ergab der Gruppenvergleich keine klar überlegene Kondition. Das *Autonomieempfinden* und die *Immersion / Präsenz* waren mit den MGH erhöht, der *Druck* (hier positiv mit Gesamtmotivation assoziiert) und die *Bedeutsamkeit* wurden in der klassischen Therapie höher empfunden. Zwischen den beiden MGH Konditionen konnten dabei keine signifikanten Unterschiede gemessen werden. Während als Ursache für die Unterschiede zwischen den MGH-Konditionen und der Kontrollgruppe Unterschiede in der Natur der Anwendung und in der beobachteten größeren Distanz der Therapeuten zu den Teilnehmern während der etwas selbständigeren Nutzung der MGH vermutet werden können, deutet ein Mangel an messbaren Unterschieden in der Motivation zwischen den MGH darauf hin, dass die automatische Anpassung von den teilnehmenden Patienten nicht als störend empfunden wurde, aber auch keine messbaren Vorteile brachte. Die Auswertung der funktionalen Daten zeigte in einem Test zur Messung der Oberkörperreichweite [Du90] signifikant bessere Ergebnisse in der Gruppe mit adaptiven MGH als in der Kontrollgruppe, während die beiden MGH-Gruppen nicht trennbar waren.

Obwohl die beiden MGH-Gruppen also in den Ergebnissen keine signifikanten Unterschiede zeigten, haben sich dennoch differenzierte mögliche Vorteile von MGH gegenüber der Kontrollgruppe ergeben. Eine automatische Anpassung war dabei weder eindeutig förderlich noch hinderlich, ihre Präsenz wurde allerdings durch Therapeuten nachdrücklich begrüßt und in Hinblick auf mögliche Zeitersparnisse für zukünftige Iterationen der Programme gewünscht. Die Ergebnisse zur Motivation zeigen ein differenziertes Bild mit einem klaren Entwicklungspotenzial für die Erhöhung der sozialen Eingebundenheit in zukünftigen MGH, etwa durch die Förderung einer stärkeren Interaktion zwischen Patienten und Therapeuten, oder zwischen Patienten untereinander.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Basierend auf dem breiten Potenzial von MGH in Bezug auf zentrale Herausforderungen für die Gesundheitssysteme durch Entwicklungen wie den demografischen Wandel und einen bewegungsarmen Lebensstil, sowie basierend auf der klaren Anforderung an MGH, den individuellen Fähigkeiten und Bedürfnissen der Nutzer gerecht zu werden, fasst die vorgestellte Dissertation Ansätze und Erhebungen zur Gestaltung und Implementierung, sowie Studien zur situierten Akzeptanz und Wirksamkeit von adaptierbaren und adaptiven MGH zusammen. Neben einem Schema für die modulare Entwicklung von MGH trägt die Dissertation dabei ein detailliertes Prozessmodell für die Analyse, Umsetzung und Evaluation von anpassbaren Endnutzerprogrammen bei, welches in praktischen Entwicklungen verankert wird und bestehende Ansätze zusammenführt und erweitert.

Trotz einer umfassenden Betrachtung der hier zusammengefassten Aspekte und weiterer Elemente von adaptierbaren und adaptiven MGH lässt die Arbeit Raum für zukünftige Entwicklungen mit einem Fokus auf Mehrspieler- und soziale Aspekte, eine eigenständigere und unbegleitete Nutzung, komplexere und längerfristiger motivierende Spiele, detailliertere Rückmeldungen zu Einstellungen, weiterführende effiziente manuelle Einstellungsin-

terfaces, feinschrittigere Anpassungen unter Verwendung weiterführender Methoden aus der Nutzermodellierung und dem maschinellen Lernen, oder auf eine umfassendere Realisierung weiterer Therapieformen. Auch sollten dabei mögliche negative Aspekte und Herausforderungen in der Wahrung der Privatsphäre, in der Datensicherheit und der damit verbundenen ethischen Grundlagen tiefgreifender untersucht werden. Längerfristig werden dabei Fortschritte in Ein- und Ausgabegeräten, der unterliegenden Sensortechnik und der Sensorfusion, in der Leistungsanalyse und in Anpassungsmechanismen, sowie in der Ableitung und Analyse objektiver Gesundheitsentwicklungsinformationen eine zentrale Rolle spielen.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass MGH ein vielversprechendes Mittel zur Erweiterung der Methoden in der PRP darstellen. Ein großes Maß an Anpassbarkeit ist essenziell, um den heterogenen Nutzergruppen und den vielfältigen Ansprüchen gerecht zu werden. Automatische Anpassung kann dabei helfen, eine hohe Anpassungsfrequenz und einen hohen Detailgrad der Anpassungen zu ermöglichen. Die Ergebnisse dieser Arbeit bekräftigen die Anwendung von iterativ und menschzentriert entwickelter automatischer Anpassung in MGH, solange die Nutzer adäquat über die Anpassungen informiert und in die Lage versetzt werden, in Situationen wo dies erwünscht oder benötigt wird, Kontrolle über das automatische System auszuüben, und solange die Anpassung so eingebunden wird, dass sie sich nicht negativ auf das Kompetenz- und Autonomieempfinden auswirkt.

Literaturverzeichnis

[Ad10] Adams, Ernest: Fundamentals of Game Design. New Riders, 2010.

[An09] Andersson, J.; De Lemos, R.; Malek, S.; Weyns, D.: Modeling dimensions of self-adaptive software systems. Software Engineering for Self-Adaptive Systems, S. 27–47, 2009.

[As11] Assad, O.; Hermann, R.; Lilla, D.; Mellies, B.; Meyer, R.; Shevach, L.; Siegel, S.; Springer, M.; Tiemkeo, S.; Voges, J.; et al.: Motion-Based Games for Parkinsons Disease Patients. Entertainment Computing-ICEC 2011, S. 47–58, 2011.

[Ba13] Baldwin, Alexander; Johnson, Daniel; Wyeth, Peta; Sweetser, Penny: A framework of Dynamic Difficulty Adjustment in competitive multiplayer video games. In: Proceedings of the Games Innovation Conference (IGIC), 2013 IEEE International. S. 16–19, Sep 2013.

[Bl12] Bloom, D.E.; Cafiero, E.T.; Jane-Llopis, E.; Abrahams-Gessel, S.; Bloom, L.R.; Fathima, S.; Feigl, A.B.; Gaziano, T.; Mowafi, M.; Pandya, A.; et al.: The Global Economic Burden of Noncommunicable Diseases. WHO, Working Paper Series 87. 2012.

[Ch07] Chen, Jenova: Flow in games (and everything else). Commun. ACM, 50(4):31–34, Apr 2007.

[CK09] Clark, Robert; Kraemer, Theresa: Clinical use of Nintendo WiiTM bowling simulation to decrease fall risk in an elderly resident of a nursing home: A case report. Journal of geriatric physical therapy, 32(4):174–180, 2009.

[Cs90] Csikszentmihalyi, Mihaly: Flow: The Psychology of Optimal Experience. Harper and Row, 1990.

[Do04] Dourish, Paul: Where the Action Is. MIT Press, Sep 2004.

[Du90] Duncan, Pamela W.; Weiner, Debra K.; Chandler, Julie; Studenski, Stephanie: Functional Reach: A New Clinical Measure of Balance. Journal of Gerontology, 45(6):M192–M197, Jan 1990.

[RRP06] Ryan, Richard M.; Rigby, C. Scott; Przybylski, Andrew: The Motivational Pull of Video Games: A Self-Determination Theory Approach. Motivation and Emotion, 30(4):344–360, Nov 2006.

[Sh01] Sheridan, Thomas B.: Rumination on automation, 1998. Annual Reviews in Control, 25:89–97, 2001.

[SHM15] Smeddinck, Jan David; Herrlich, Marc; Malaka, Rainer: Exergames for Physiotherapy and Rehabilitation: A Medium-term Situated Study of Motivational Aspects and Impact on Functional Reach. In: Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems. CHI 15. ACM, S. 4143–4146, 2015.

[Sm16a] Smeddinck, Jan: Human-Computer Interaction with Adaptable & Adaptive Motion-based Games for Health. Dissertation, Universität Bremen, Dec 2016. Supervisors: Prof. Rainer Malaka (Univ. of Bremen), Prof. Regan Mandryk (Univ. of Saskatchewan). External review: Prof. Patrick Olivier (Newcastle University). Examiners: Prof. Tanja Schulz (Univ. of Bremen), Prof. Johannes Schöning (Univ. of Bremen).

[Sm16b] Smeddinck, Jan D.: Games for Health. In (Dörner, Ralf; Göbel, Stefan; Kickmeier-Rust, Michael; Masuch, Maic; Zweig, Katharina, Hrsg.): Entertainment Computing and Serious Games, Jgg. 9970 in Lecture Notes in Computer Science. Springer International Publishing, S. 212–264, 2016.

[SS16] Streicher, Alexander; Smeddinck, Jan D.: Personalized and Adaptive Serious Games. In (Dörner, Ralf; Göbel, Stefan; Kickmeier-Rust, Michael; Masuch, Maic; Zweig, Katharina, Hrsg.): Entertainment Computing and Serious Games, Jgg. 9970 in Lecture Notes in Computer Science. Springer International Publishing, S. 332–377, 2016.

[YG07] Yim, Jeffrey; Graham, T. C. Nicholas: Using games to increase exercise motivation. In: Proceedings of the 2007 conference on Future Play. Future Play 07. ACM, S. 166–173, 2007.



Jan Smeddinck, geboren am 30.12.1983 in Köln, besuchte die *Europaschule Gymnasium der Stadt Kerpen* und die *Wichita East High School*, bevor er 2004 ein Studium der *Digitalen Medien* am *Fachbereich Mathematik und Informatik* der *Universität Bremen* beginnen konnte. Nach mehreren Auslandsaufenthalten zu Studienzwecken an der *KMUTT* in Thailand, am *HCI Lab* der *University of Saskatchewan* in Saskatoon, Kanada und bei der *Digital Interaction Group* am *Culture Lab* der *Newcastle University* in England, fand er sich in der glücklichen Situation, eine angeschlossene Promotion zum Dr.-Ing. unter der Betreuung von Prof. Dr. Rainer Malaka am *TZI Digital Media Lab* der *Unversität Bremen* und im Graduiertenkolleg *Advances in Digital Media* beginnen – und im Dezember 2016 mit dem Prädikat *summa cum laude* verteidigen – zu können. Jan Smeddinck ist langjähiges Mitglied der *Gesellschaft für Informatik* und der *Association for Computing Machinery*. Ihm wurden langfristige Stipendien des *ASEM-DUO* Programms, der *Klaus Tschira Stiftung* und durch den *DAAD* verliehen.

Optimierung von tableaubasierten Schlussfolgerungssystemen für ausdrucksstarke Beschreibungslogiken[1]

Andreas Steigmiller[2]

Abstract: Zur Wissensrepräsentation in intelligenten Systemen werden häufig logikbasierte Ontologiesprachen verwendet. Zum Beispiel basiert die vom W3C standardisierte Web Ontology Language auf der Beschreibungslogik $\mathcal{SROIQ}$ und findet breiten Einsatz in den Life Sciences, der Medizin, oder auch im Semantic Web. Die logische Grundlage solcher Sprachen bietet unter anderem den Vorteil, dass mit Schlussfolgerungssystemen implizite Zusammenhänge im repräsentierten Wissen ermittelt werden können, wodurch sich neue Informationen und logische Widersprüche aufdecken lassen. Die Schlussfolgerungssysteme für $\mathcal{SROIQ}$ basieren üblicherweise auf Tableau-Algorithmen. Für diese wurden bereits zahlreiche Optimierungen entwickelt, jedoch ist die Performanz für viele Ontologien und Anwendungsfälle immer noch unzureichend.
In diesem zusammenfassenden Beitrag werden neue Optimierungen und Schlussfolgerungsprozeduren sowie Verbesserungen zu bestehenden Verfahren (aus der gleichnamigen Dissertation) vorgestellt. Die damit erzielten Fortschritte setzen dabei neue Standards für die Implementierung von Schlussfolgerungssystemen und ermöglichen erstmals die Verarbeitung von wichtigen Ontologien insbesondere aus der Medizin und Biomedizin. Die Implementierung im neuen System Konclude zeigt dies auch durch zahlreiche erste Plätze in internationalen Wettbewerben.

1 Motivation und Einführung

Wissensrepräsentation und Wissensmanagement sind für viele Anwendungen der künstlichen Intelligenz (KI) zentrale Bestandteile, insbesondere um Expertenwissen zu verwalten, neue Zusammenhänge abzuleiten und sich an neue Situationen anzupassen. Dies erfolgt häufig mit sogenannten Wissensbasen bzw. Ontologien, bei denen das Wissen und die eigentlichen Daten bzw. Fakten einer Domäne flexibel zusammen repräsentiert werden. Beispielsweise existieren verschiedene medizinische Ontologien (z.B. GALEN, SNOMED CT, NCI Thesaurus), die den Aufbau, die Zusammenhänge und Symptome von Krankheiten beschreiben. Derartige Ontologien bilden die Grundlage von Systemen zur Entscheidungsunterstützung und zur Annotation von Patientendaten im klinischen Bereich. Häufig sind die verwendeten Wissensrepräsentationssprachen logikbasiert, was es erlaubt implizite Zusammenhänge abzuleiten. Zum Beispiel lassen sich aus den Beschreibungen der Ontologie Taxonomien berechnen, d.h. eine hierarchische Anordnung der Begriffe/Krankheiten, wodurch deren Verwaltung deutlich vereinfacht wird.

Beschreibungslogiken (BL) [Ba07] wurden speziell zur Wissensrepräsentation entwickelt und entsprechen entscheidbaren Fragmenten der Prädikatenlogik erster Stufe. Die wesentlichen Bestandteile einer BL sind Individuen (entsprechen Konstanten in der Prädikatenlo-

[1] Englischer Titel der Dissertation: "Optimisation of Tableau-Based Reasoning Systems for Expressive Description Logics"

[2] Institut für künstliche Intelligenz, Universität Ulm, andreas.steigmiller@uni-ulm.de

gik), Konzepte (einstellige Prädikate), welche für eine Menge von Individuen stehen, und Rollen (zweistellige Prädikate), welche Zusammenhänge/Relationen zwischen Individuen repräsentieren. Mit verschiedenen Konzept- und Rollenkonstruktoren können dann komplexe (Konzept-)ausdrücke formuliert werden. Zum Beispiel referenziert der Ausdruck

$$\mathsf{Man} \sqcap \exists \mathsf{hasChild}.\top$$

alle Väter. Die Konzeptkonjunktion ($\sqcap$) bildet dabei die Schnittmenge zwischen Man und der existentiellen Restriktion $\exists \mathsf{hasChild}.\top$, welche alle Individuen referenziert, die mit einem anderen in der hasChild-Relation stehen, d.h. ein Kind haben ($\top$ steht dabei für das allgemeinste Konzept und umfasst somit alle Individuen). Eine Ontologie entspricht dann einer Menge von Axiomen, die Restriktionen bezüglich der erwähnten Entitäten festlegen. Eine Konzeptinklusion ($\sqsubseteq$) kann z.B. eine Unterkonzeptbeziehung festgelegen, d.h.

$$\mathsf{Man} \sqcap \exists \mathsf{hasChild}.\top \sqsubseteq \mathsf{Father}$$

schreibt vor, dass alle Individuen, die dem beschriebenen Ausdruck entsprechen, als Father interpretiert werden müssen. Ergänzend zu solchem terminologischen Wissen können in der Ontologie zudem auch Fakten verwaltet werden. Zum Beispiel muss durch die Fakten

$$\mathsf{Man}(\mathsf{david}) \qquad \text{und} \qquad \mathsf{hasChild}(\mathsf{david}, \mathsf{robert})$$

das Individuum david als Instanz des Konzepts Man und robert als Kind von david interpretiert werden. Durch logisches Schlussfolgern kann aus diesen Axiomen nun abgeleitet werden, dass david auch eine Instanz von Father darstellt. Dies wird in der Regel mittels Schlussfolgerungssystemen realisiert, die eine Reihe von Schlussfolgerungsdiensten anbieten. Zum Beispiel kann die Ontologie auf Konsistenz/Erfüllbarkeit überprüft werden, d.h. es wird festgestellt, ob die Individuen alle Restriktionen der Axiome erfüllen können. Formell wird dies auf Basis von Interpretationen entschieden, d.h. es wird geprüft, ob es eine Interpretation der Entitäten gibt, so dass alle Axiome erfüllt sind (eine solche Interpretation wird dann auch Modell der Ontologie genannt). Des Weiteren gibt es höherwertige Schlussfolgerungsdienste, wie die Klassifikation, bei der alle benannten Konzepte in einer (Subsumptions-)hierarchie angeordnet werden.

Für ausdrucksstärkere BLen, wie $\mathcal{SROIQ}$, das der Web Ontology Language zugrunde liegt, stehen viele zusätzliche Sprachkonstrukte zur Verfügung, wodurch die Anwendungsdomäne genauer modelliert werden kann. Beispielsweise umfasst $\mathcal{SROIQ}$ die Konzeptnegation ($\neg$) und Disjunktionen, wie $\mathsf{Man} \sqcup \mathsf{Woman}$, mit welchen die Vereinigung zwischen Konzepten ausgedrückt werden kann. Zudem erlauben universelle Restriktionen der Form $\forall \mathsf{hasChild}.\mathsf{Man}$ Restriktionen bezüglich der Relations- bzw. Rollennachfolger auszudrücken. Mit Kardinalitätsrestriktionen (z.B. $\geqslant 2\,\mathsf{hasChild}.\top$) kann auf die Anzahl der Rollennachfolger eingegangen werden und inverse Rollen (gekennzeichnet mit $^-$) lassen sich zur Umkehrung verwenden (z.B. entspricht $\mathsf{hasChild}^-$ der Rolle hasParent). Außerdem können mit Nominalen auch Individuen direkt in Konzeptausdrücken referenziert werden, wie z.B. $\{\mathsf{margaret}\} \sqcup \{\mathsf{david}\}$ zur Referenzierung der Eltern von robert.

Mit der zusätzlichen Ausdrucksstärke kann die Anwendungsdomäne genauer abgebildet werden (wodurch auch mehr Schlussfolgerungen ableitbar sind), allerdings werden dann auch aufwendigere Schlussfolgerungsprozeduren benötigt, welche dann üblicherweise auf Tableau-Algorithmen basieren. Prinzipiell versuchen diese systematisch Modelle (oder

Abstraktionen von Modellen) zu konstruieren und somit Aussagen bzw. Annahmen bezüglich der Ontologie zu bestätigen oder zu widerlegen.

Im Anschluss zu den Grundlagen und dem Stand der Technik in Kapitel 2, werden neue Optimierungen für tableaubasierten Schlussfolgerungssysteme präsentiert, die zu signifikanten Performanzsteigerungen führen. Kapitel 3 beschreibt einen neuen Ansatz für die Vorverarbeitung (Absorbierung) von Axiomen, der nichtdeterministische Entscheidungen beim Schlussfolgern deutlich reduziert. Eine Erweiterung dieses neuen Absorbierungsansatzes erlaubt dann auch die direkte Behandlung von regelartigem Wissen in Form von sogenannten Nominal Schemas (Kapitel 4). Kapitel 5 zeigt, dass der Tableau-Algorithmus durch eine Koppelung mit effizienten Saturierungsverfahren für ausdrucksschwächere BLen deutlich entlastet bzw. unterstützt werden kann. Anschließend werden verschiedene Cachingtechniken skizziert (Kapitel 6), welche insbesondere das Schlussfolgern mit vielen Fakten verbessern. Kapitel 7 präsentiert die wichtigsten Evaluierungsergebnisse bevor in Kapitel 8 der Beitrag zusammengefasst wird. Details zu den Optimierungen und Ergebnissen können in der gleichnamigen Dissertation [St16] gefunden werden.

2 Grundlagen und Stand der Technik

Nachfolgend werden A, B als Bezeichnungen für benannte/atomare Konzepte, C, D für komplexe Konzepte, r, s für Rollen und a, b für Individuen verwendet.

Zur Umsetzung der Schlussfolgerungsdienste werden häufig Modellkonstruktionskalküle in Form von Tableau-Algorithmen eingesetzt. Diese testen die Erfüllbarkeit von (beschreibungs-)logischen Ausdrücken, indem sie durch das Anwenden einer Menge von (eventuell nichtdeterministischen) Expansionsregeln systematisch versuchen eine Modellabstraktion, genannt *Completion Graph*, zu konstruieren. Die Knoten des Completion Graphs repräsentieren dabei (eventuell anonyme) Individuen und die Kanten die Relationen zwischen den Individuen. Die Knoten und Kanten sind mit einer Menge von denjenigen Konzepten bzw. Rollen gelabelt, von denen sie Instanzen darstellen. Im Wesentlichen werden Regeln gemäß der Konzepte in Knotenlabels angewendet, wodurch der Graph Stück für Stück expandiert und die Struktur des Modells explizit gemacht wird. Falls z.B. die Konjunktion $C \sqcap D$ (Disjunktion $C \sqcup D$) in einem Knotenlabel ist, dann fügt die entsprechende Regel die Konzepte C und D (bzw. C oder D) hinzu. Wird ein atomarer Widerspruch gefunden, z.B. wenn A und $\neg A$ im gleichen Knotenlabel sind, dann kann der Graph zu keinem Modell mehr erweitert werden und der Algorithmus muss (mittels Backtracking) dann andere nichtdeterministische Alternativen untersuchen. Falls alle nichtdeterministischen Entscheidungen in einem Widerspruch resultieren, dann ist der getestete Ausdruck unerfüllbar. Sind keine weiteren Expansionsregel mehr anwendbar und im Graph gibt es keinen Widerspruch, dann kann gezeigt werden, dass der Graph einer Abstraktion eines Models entspricht und somit die Erfüllbarkeit des Ausdrucks zeigt. Höherwertige Schlussfolgerungsdienste können darauf basierend indirekt umgesetzt werden, indem sie auf eine (eventuell größere) Menge von solchen Erfüllbarkeitstests reduziert werden.

Expansionsregeln für existentielle Restriktionen der Form $\exists r.C$ generieren einen Nachfolgeknoten über eine mit r gelabelte Kante, der C im Label hat. Mehrere solche Re-

gelanwendungen führen daher zu baumartigen Graphstrukturen. Um auch bei zyklisch definierten Konzepten (wie z.B. $A \sqsubseteq \exists r.A$) die Expansion zu terminieren, wurden spezielle Blockierungstechniken entwickelt, die weitere Regelanwendungen verhindern. Abhängig von der Ausdrucksstärke der BL wird beispielsweise geprüft, ob ein Knoten mit den gleichen Konzepten gelabelt ist wie ein Vorgängerknoten. Für ausdrucksstärkere BLen ist zu beachten, dass durch Nominale zudem auch Verbindungen zu Wurzelknoten, d.h. Knoten die benannte Individuen repräsentieren, von überall aus dem Graphen erzwungen werden können, was zu speziellen Ausnahmen bei den ansonsten baumartigen Strukturen führt. Dennoch kann mit entsprechenden Blockierungstechniken gezeigt werden, dass Tableau-Algorithmen für ausdrucksstärkere BLen wie $\mathcal{SROIQ}$ terminieren und dabei sowohl vollständig als auch korrekt sind [HKS06].

Ein naiver Tableau-Algorithmus tendiert jedoch dazu, sehr große Modellabstraktionen mit viel Nichtdeterminismus zu konstruieren. Beispielsweise muss prinzipiell jedes Axiom der Form $C \sqsubseteq D$ in der Ontologie zu einer Disjunktion der Form $\neg C \sqcup D$ "internalisiert" werden, womit eine nichtdeterministische Entscheidung für dieses Axiom in jedem Knoten des Completion Graphs anfällt. Um diese Probleme zu adressieren, wurden zum einen viele Optimierungen aus anderen Bereichen der KI übernommen (z.B. Dependency Directed Backtracking, Boolean Constraint Propagation, Caching, usw. [Ba07, Gl14, TH06, Si07]) und zum anderen spezifische neue Optimierungen entwickelt. Absorbierung ist beispielsweise eine etablierte Methode mit der Axiome so umgeschrieben werden, dass weniger Nichtdeterminismus bei der Verarbeitung (mit dem Tableau-Algorithmus) entsteht [HW06, SCP06]. Anywhere Blocking prüft dagegen, ob auch Knoten aus anderen Graphteilen (d.h. nicht nur Vorgängerknoten) zum Blockieren von Expansionen verwendet werden können [Gl14]. Auch für höherwertige Schlussfolgerungsdienste (wie die Klassifikation) wurden spezielle Algorithmen entwickelt (z.B. Enhanced Traversal [Ba07]), die die Anzahl der benötigten Erfüllbarkeitstests gering halten oder Informationen aus bereits konstruierten Modellen mitverwenden (z.B. Pseudo Model Merging [HMT01]).

Bedingt durch die 2NExpTime-vollständige theoretische Komplexität für Standardschlussfolgerungsdienste für $\mathcal{SROIQ}$ überrascht es nicht, dass es dennoch eine größere Anzahl von Ontologien gibt, denen bisherige Systeme nicht gewachsen sind. Dennoch stellt sich die Frage, ob und wie sich die Performanz von solchen tableaubasierten Schlussfolgerungssystemen für in der Praxis verwendete Ontologien verbessern lässt.

3 Partielle Absorbierungsoptimierung

Absorbierung ist eine weit verbreitete Optimierung, um Axiome einer Ontologie so umzuschreiben, dass weniger Nichtdeterminismus bei der Verarbeitung mit dem Tableau-Algorithmus entsteht. Insbesondere werden sogenannte "Lazy Unfolding" Regeln eingesetzt, die einfache Bedingungen überprüfen können (z.B. ob ein atomares Konzept erfüllt ist) und wodurch dann Internalisierung vermieden oder reduziert werden kann. Zum Beispiel kann das Axiom $A \sqcap \geqslant 3\, s.B \sqsubseteq D$ zu $A \sqsubseteq \neg(\geqslant 3\, s.B) \sqcup D$ absorbiert werden, indem eine "Auffaltungsregel" verwendet wird, die $\neg(\geqslant 3\, s.A) \sqcup D$ nur dann hinzufügt, wenn A in einem Knotenlabel vorhanden ist. Allerdings haben bisherige Absorbierungsalgorith-

men verschiedene Schwächen, was vermutlich historisch dadurch bedingt ist, dass diese Algorithmen Stück für Stück an neue Sprachelemente angepasst wurden. Insbesondere haben bisherige Algorithmen Axiome behandelt, indem sie komplexe Teilkonzepte mittels atomarer Hilfskonzepte in separate Axiome aufgeteilt haben (obiges Axiom also zu $A \sqcap F \sqsubseteq D$ und $F \equiv \geqslant 3\, s.B$), was für ausdrucksstärkere Sprachelemente schnell zu zusätzlichem Nichtdeterminismus führt.

Mit der sogenannten partiellen Absorbierung lässt sich das Aufteilen in separate Axiome aber vermeiden. Insbesondere lassen sich aus den Teilkonzepten rekursiv "absorbierbare" Oberkonzepte identifizieren und diese dann als Bedingung so verknüpfen, dass der nicht absorbierbare Rest des Axioms automatisch impliziert wird (d.h. er wird automatisch durch entsprechende Propagierungen existierender Regeln im Completion Graph hinzugefügt). Die erste nichtdeterministische Entscheidung wird somit so lange wie möglich hinausgezögert oder sogar ganz vermieden. Für das obige Axiom kann z.B. einfach die existentielle Restriktion $\exists s.B$ als Oberkonzept von $\geqslant 3\, s.B$ zur Absorbierung verwendet werden, wodurch die Axiome

$$B \sqsubseteq \forall s^{-}.F \qquad\qquad A \sqcap F \sqsubseteq \neg(\geqslant 3\, s.A) \sqcup D$$

erzeugt werden. Die Disjunktion $\neg(\geqslant 3\, s.A) \sqcup D$ muss nun nur beachtet werden, wenn ein Knoten das Konzept A im Label hat und zudem einen s-Nachfolgeknoten mit B im Label besitzt (letzteres ist die Bedingung für das Konzept F in einem Knotenlabel). Für das zweite Axiom wird eine binäre Auffaltungsregel benötigt, d.h. die rechte Seite wird nur hinzugefügt, wenn A und F vorhanden sind, was aber bereits dem Stand der Technik entspricht [HW06]. Im bisherigen Absorbierungsansatz, der zu $A \sqsubseteq \neg(\geqslant 3\, s.B) \sqcup D$ führt, muss die Disjunktion bereits behandelt werden, wenn nur A in einem Knotenlabel auftritt, wodurch deutlich mehr Nichtdeterminismus entstehen kann.

Dieser neue Absorbierungsansatz kann zudem vielseitig erweitert werden. Zum Beispiel lässt sich eine vollständige Definition der Form $A \equiv C$ (partiell) absorbieren, indem ein Kandidatenkonzept A^* impliziert wird, welches andeutet, dass A möglicherweise erfüllt ist. Dieses ist für viele Zwecke ausreichend (z.B. für die Extraktion von möglichen Subsumptionen für die Klassifikation) und benötigt keine (nichtdeterministische) Entscheidung, ob A oder $\neg A$ für einen Knoten erfüllt ist.

4 Absorbierungserweiterungen für Nominal Schemas

Interessanterweise eignet sich die vorgestellte partielle Absorbierung auch, um ganz neue Konstrukte wie Nominal Schemas zu behandeln, welche kürzlich eingeführt wurden, um regelbasiertes Wissen direkt in beschreibungslogische Ontologien zu integrieren [Kr11]. Durch die variablenfreie Notation sind gewöhnliche BLen auf das Ausdrücken von hauptsächlich baumartigen Zusammenhängen beschränkt. Dies kann in der Praxis zu Problemen führen, so dass dann auf regelbasierte Sprachen wie Datalog zurückgegriffen werden muss. Nominal Schemas adressieren dies indem sie den Nominalkonstruktor um Variablen (anstelle von nur Individuen) erweitern. Dies führt zu BLen bei denen regelartiges Wissen nicht nur elegant integriert werden kann, sondern die im Vergleich zu anderen Regelinte-

grationsansätzen auch sehr ausdrucksstark sind. Mit dem Axiom

$$\{X\} \sqcap \exists \mathsf{hasParent}.(\{Y\} \sqcap \exists \mathsf{hasBrother}.\{Z\}) \sqsubseteq \exists \mathsf{hasUncle}.\{Z\}$$

kann beispielsweise ausgedrückt werden, dass der Bruder (Z) von einem Elternteil (Y) ein Onkel ist, was mit klassischen BLen nur begrenzt möglich ist. Obwohl $\mathcal{SROIQ}$ erweitert um Nominal Schemas eine unveränderte worst-case Komplexität hat, waren bisher keine effizienten Schlussfolgerungsverfahren bekannt. Klassische Regelauswertungsansätze wie Rete können wegen den Blockierungstechniken nicht einfach eingesetzt werden und eine Grundierung der Axiome führt schon bei wenigen Individuen und Variablen zu einer kombinatorischen Explosion.

Basierend auf der partiellen Absorbierung können durch kleine Erweiterungen dann Nominal Schemas durch "Bindungskonzepte" absorbiert und der nicht absorbierbare Rest, d.h. in der Regel die rechte Seite, durch ein "Grundierungskonzept" gekapselt werden. Zum Beispiel wird

$$\exists r.\{x\} \sqsubseteq \exists s.\{x\} \qquad \text{zu} \qquad O \sqsubseteq \downarrow x.F \quad \text{und} \quad F \sqsubseteq \forall r^{-}.gr(\exists s.\{x\})$$

umgeschrieben, wobei $\downarrow x.F$ ein Bindungskonzept, $gr(\exists s.\{x\})$ ein Grundierungskonzept und O ein spezielles neues Konzept ist. Das Konzept O wird allen benannten Individuen der Ontologie zugewiesen und führt dazu, dass die Bindungskonzepte nur auf Knoten für benannte Individuen angewendet werden. Durch entsprechende Regelergänzungen im Tableau-Algorithmus wird für ein Bindungskonzept $\downarrow x.F$ in einem Knotenlabel eine Variablenzuweisung für die Variable x zu demjenigen Individuennamen erstellt, welches der Knoten repräsentiert. Diese Variablenzuweisungen werden dann gemäß der Konzepte und Axiome aus der Absorbierung durch den Graphen propagiert. Gelangen diese Variablenzuweisungen zu Grundierungskonzepten, dann wird das gekapselte Konzept entsprechend der vorhandenen Variablenzuweisungen instantiiert und normal weiterverarbeitet. Beispielsweise wird bei einer vorhandenen Variablenzuweisung von $\{x \mapsto a\}$ das Konzept $gr(\exists s.\{x\}))$ zu $\exists s.\{a\}$ instantiiert. Im Prinzip werden also über die Absorbierung und der Propagierung im Graphen nur diejenigen Variablenzuweisungen gesammelt, für welche die rechte Seite eines Axioms betrachtet werden muss.

Dieser Ansatz lässt sich auch noch vielseitig weiter optimieren, so dass trotz der erhörten Ausdrucksstärke eine vergleichbare Performanz zu Schlussfolgerungssystemen mit dediziertem Regelsupport erreicht bzw. diese sogar übertroffen wird. Insbesondere kann über die Absorbierung direkt eine Rückwärtsverkettung eingebaut werden, wodurch der Propagierungsaufwand von Variablenzuweisungen deutlich reduziert wird.

5 Koppelung mit Saturierungsverfahren

Bottom-Up Ansätze zum Schlussfolgern eignen sich insbesondere wenn kein (oder wenig) Nichtdeterminismus behandelt werden muss. Es liegt daher Nahe, den durch die Absorbierungstechniken reduzierten Nichtdeterminismus durch den Einsatz von Bottom-Up Ansätzen geeignet auszunutzen. Jedoch ist bisher unklar, wie zielgerichtete Bottom-Up Verfahren für ausdrucksstärkere BLen wie $\mathcal{SROIQ}$ realisiert werden können. Für viele weniger ausdrucksstarke BLen konnten jedoch sehr effiziente (Completion-/Consequence-

basierte) Saturierungsverfahren entwickelt werden, die in einem Durchlauf auch höherwertige Schlussfolgerungsdienste wie die Klassifikation direkt berechnen können (wogegen bei Tableau-Algorithmen eine Reduktion auf einzelne Erfüllbarkeitstests erfolgt). Zwar lassen sich Teile von Ontologien an solche spezialisierten Schlussfolgerungssysteme delegieren [ACH12], jedoch muss häufig auf die tableaubasierten Systeme zurückgegriffen werden, um Vollständigkeit garantieren zu können.

Nachfolgend ist eine neue (enge) Koppelung zwischen Saturierungsverfahren und Tableau-Algorithmen skizziert, die in einem System auf Basis der Repräsentation des Tableau-Algorithmus realisiert ist. Dadurch können sich beide Verfahren gegenseitig unterstützen und Synergieeffekte werden maximiert. Die wesentliche Idee ist dabei die Saturierung mittels vereinfachten Tableau-Expansionsregeln zu realisieren, welche somit einen Completion Graph approximieren. Insbesondere lassen sich allen Konzepten entsprechende Repräsentativknoten zuordnen, welche für existentielle Restriktionen dann als Nachfolger (eventuell mehrmals) wiederverwendet werden können (anstelle des Erzeugens von neuen Nachfolgeknoten). Um die Korrektheit gewährleisten zu können, müssen gewisse Regeln jedoch eingeschränkt werden; z.B. darf die Regel für universelle Restriktionen der Form $\forall r.C$ nur zu Vorgängerknoten propagieren und für Disjunktionen der Form $C \sqcup D$ dürfen nur die Konzepte hinzugefügt werden, die für beide Disjunkte abgeleitet wurden.

Obwohl die Ergebnisse der Saturierung somit offensichtlich unvollständig sind, können viele Konsequenzen durch die Saturierungsregeln (also den vereinfachten Tableau-Expansionsregeln) sehr effizient hergeleitet werden. Einfach zu prüfende Kriterien erlauben die Unvollständigkeit genauer zu identifizieren, d.h. es lässt sich feststellen, welche Knoten "kritisch" d.h. womöglich unvollständig behandelt sind. Beispielsweise kann für Disjunktionen überprüft werden, ob keines der Disjunkte im Knotenlabel vorhanden ist und für universelle Restriktionen der Form $\forall r.C$ wird geprüft, ob es einen r-Nachfolger gibt, bei dem das quantifizierte Konzept C fehlt.

Für unkritische Knoten und die dadurch repräsentierten Konzepte gilt, dass sie vollständig behandelt sind. Falls ein Widerspruch im Label eines unkritischen Knotens gefunden wurde, ist das entsprechende Konzept unerfüllbar. Andernfalls ist es erfüllbar und es können direkt alle Oberkonzepte für die Klassifikation aus dem Knotenlabel extrahiert werden. Des Weiteren kann der Tableau-Algorithmus mit den Ergebnissen aus der Saturierung unterstützt werden. Muss beispielsweise ein Nachfolgeknoten für eine existentielle Restriktion der Form $\exists r.C$ erstellt werden, kann dieser mit dem Label des Repräsentativknoten von C aus der Saturierung initialisiert werden. Dies reduziert deutlich den Aufwand des Tableau-Algorithmus und erlaubt insbesondere Blockierungen früher zu finden. Des Weiteren lässt sich die Notwendigkeit von Backtracking und der Expansionen von Knoten reduzieren, so dass der Tableau-Algorithmus trotz Unvollständigkeit der Saturierung insgesamt deutlich entlastet wird. Interessanterweise kann auch die Saturierung mit Konsequenzen aus den Completion Graphs angereichert werden, was wiederum eine bessere Unterstützung des Tableau-Algorithmus ermöglicht. Die Kopplung mit der Saturierung resultiert somit in einem sehr guten pay-as-you-go Verhalten, d.h. das Schlussfolgerungssystem kann all diejenigen Teile einer Ontologie sehr effizient bearbeiten, welche nicht direkt von ausdrucksstärkeren Modellierungskonstrukten beeinflusst werden.

6 Nichtdeterministisches Completion Graph Caching

In ausdrucksstärkeren BLen wie $\mathcal{SROIQ}$ können Individuen durch Nominale direkt in normalen Konzeptausdrücken referenziert werden, wodurch potentiell alle Individuen und die daraus folgenden Konsequenzen für jeden Erfüllbarkeitstest relevant sein können. Dies führt in der Praxis relativ schnell zu Problemen, insbesondere für höherwertige Schlussfolgerungsdienste wie die Klassifikation, da immer alle Individuen für eventuell sehr viele Erfüllbarkeitstests berücksichtigt werden müssen.

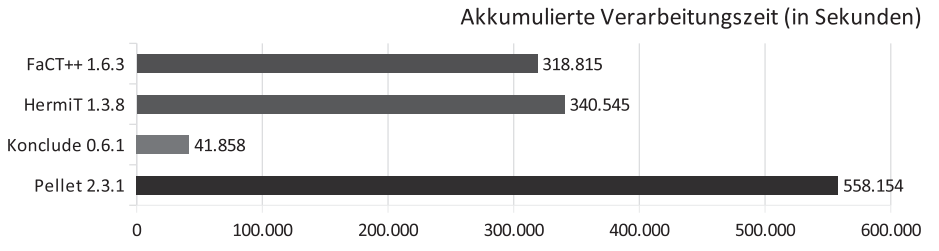
Viele bisherige Ansätze schränken die zu betrachteten Individuen ein, fassen sie zusammen oder partitionieren sie. Jedoch funktioniert dies im Allgemeinen nur bis zu einer bestimmten Ausdrucksstärke und wenn kein Nichtdeterminismus zu behandeln ist. Für deterministische Ontologien kann der für den initialen Konsistenztest erzeugte Completion Graph gespeichert und für nachfolgende Tests wiederverwendet werden [SCP06]. Ein solches Caching ist aber bei vorhandenem Nichtdeterminismus nicht mehr trivial, da keine falschen Konsequenzen übernommen werden dürfen und bei Widersprüchen entsprechend Backtracking betrieben werden muss, d.h. ausgehend von einem früheren Zustand des Completion Graphs müssen viele der nichtdeterministischen Entscheidungen trotz Caching wiederholt werden.

Es lassen sich jedoch effizient prüfbare Kriterien definieren, die diejenigen nichtdeterministischen Teile des initialen Completion Graphs identifizieren, die für nachfolgende Erfüllbarkeitstests wiederverwendet werden können. Ausgehend von der deterministischen Version des Completion Graphs des initialen Konsistenztest werden Knoten in nachfolgenden Tests erzeugt bzw. modifiziert und der Tableau-Algorithmus kann dann gemäß dieser Kriterien die Verarbeitung Schritt für Schritt auf andere Knoten/Individuen ausweiten, bis für die restlichen eine Expansion wie im initialen Completion Graph garantiert werden kann. Wenn z.B. ein aktuell bearbeiteter Knoten einen Nachbarn hat, bei dem in der nichtdeterministischen Erweiterung des initialen Konsistenztests eine universelle Restriktion der Form $\forall r.C$ existiert, dann muss dieser Nachbarknoten ebenfalls (neu) bearbeitet werden, da die universelle Restriktion mit dem aktuellen Knoten interagieren könnte. Abgesehen von der Reduktion des Aufwands für nachfolgende Erfüllbarkeitstests, lässt sich ein solches Completion Graph Caching zudem auch für andere Zwecke einsetzen. Zum Beispiel lassen sich damit Änderungen bezüglich Individuen/Fakten in der Ontologie inkrementell verarbeiten, indem mit Hilfe der Kriterien nur solange Nachbarn von geänderten Individuen neu konstruiert werden, bis wieder nichtdeterministische Teile vorheriger Completion Graphs verwendet werden können.

7 Implementierung und Evaluierung

Die vorgestellten Optimierungen wurden in das neu entwickelte Schlussfolgerungssystem Konclude integriert, um deren praktische Auswirkungen sowie deren Zusammenspiel zu evaluieren. Konclude ist in C++ unter Verwendung der Klassenbibliothek Qt implementiert, ist frei verfügbar unter der LGPL v2.1 und unterstützt die BL $\mathcal{SROIQV}(\mathcal{D})$, d.h. $\mathcal{SROIQ}$ mit Datentypen und Nominal Schemas. Zur Evaluierung wurde ein umfangrei-

Abb. 1 Vergleich der akkumulierten Verarbeitungszeiten zwischen dem entwickelten System Konclude und dem State-of-the-Art zur Klassifikation aller 22.830 Ontologien



cher Testkorpus von insgesamt 22.830 Ontologien verwendet, welcher viele bekannte und verfügbare Repositorien umfasst, wie z.B. das NCBO BioPortal.

Da die einzelnen Optimierungen stark voneinander abhängen (z.B. benötigt die Saturierung eine gute Absorbierung) ist deren separate Evaluierung nur begrenzt aussagekräftig. Interessanter sind Vergleiche mit anderen Systemen, welche auch eher den Fortschritt zum Stand der Technik zeigen. Primär wurde dabei die Klassifikation evaluiert, d.h. das Anordnen der Konzepte in einer Subsumptionshierarchie, welches häufig als einer der wichtigsten Dienste gesehen und auch von den meisten Systemen unterstützt wird. Im Vergleich zu den aktuellen Schlussfolgerungssystemen für $\mathcal{SROIQ}$, nämlich FaCT++ [TH06], HermiT [Gl14] und Pellet [Si07], benötigt Konclude nur 7 bis 13% der Verarbeitungszeit für die Klassifikation aller Ontologien im Testkorpus (vgl. Abbildung 1) bei einem Zeitlimit von 5 Minuten pro Ontologie. Die Verarbeitungszeiten enthalten neben der eigentlichen Klassifikation auch das Laden der Ontologien und das Serialisieren von Ergebnissen, da einige andere Systeme teilweise beim Laden vorverarbeiten. Diese gute Performanz wurde auch in internationalen Wettbewerben bestätigt, bei denen Konclude mit zahlreichen ersten Preisen ausgezeichnet wurde. Beispielsweise konnte Konclude in der OWL Reasoner Competition (ORE) 2014 in 5 von 6 Disziplinen den ersten Platz belegen und in ORE 2015 in weiteren 4 von 6. Bemerkenswert ist auch, dass Konclude in einigen Disziplinen für weniger ausdrucksstarke BLen gewinnen konnte, was insbesondere dem guten pay-as-you-go Verhalten durch die Koppelung mit der Saturierung zu verdanken ist.

8 Fazit und Ausblick

Mit den vorgestellten Optimierungen konnten neue Performanzmaßstäbe für das Schlussfolgern mit ausdrucksstarken Beschreibungslogiken gesetzt werden, was einen wichtigeren Schritt darstellt, die immer größer werdenden Datenmengen trotz detaillierten Modellierungen der Anwendungsdomänen mittels ausdrucksstärkeren Sprachelementen verarbeiten zu können. Für weitere Schlussfolgerungsdienste, wie konjunktive Anfragen, müssen aber noch praxistaugliche Algorithmen für ausdrucksstärkere Beschreibungslogiken entwickelt werden. Vielversprechend scheint dazu ein Ansatz aufbauend auf der vorgestellten Behandlung von Nominal Schemas.

Literaturverzeichnis

[ACH12] Armas Romero, Ana; Cuenca Grau, Bernardo; Horrocks, Ian: MORe: Modular Combination of OWL Reasoners for Ontology Classification. In: Proc. 11th Int. Semantic Web Conf. (ISWC'12). Jgg. 7649 in LNCS. Springer, S. 1–16, 2012.

[Ba07] Baader, Franz; Calvanese, Diego; McGuinness, Deborah; Nardi, Daniele; Patel-Schneider, Peter, Hrsg. The Description Logic Handbook: Theory, Implementation, and Applications. Cambridge University Press, second. Auflage, 2007.

[Gl14] Glimm, Birte; Horrocks, Ian; Motik, Boris; Stoilos, Giorgos; Wang, Zhe: HermiT: An OWL 2 Reasoner. J. of Automated Reasoning, 53(3):1–25, 2014.

[HKS06] Horrocks, Ian; Kutz, Oliver; Sattler, Ulrike: The Even More Irresistible $\mathcal{SROIQ}$. In: Proc. 10th Int. Conf. on Principles of Knowledge Representation and Reasoning (KR'06). AAAI Press, S. 57–67, 2006.

[HMT01] Haarslev, Volker; Möller, Ralf; Turhan, Anni-Yasmin: Exploiting Pseudo Models for TBox and ABox Reasoning in Expressive Description Logics. In: Proc. 1st Int. Joint Conf. on Automated Reasoning (IJCAR'01). Jgg. 2083 in LNCS. Springer, S. 61–75, 2001.

[HW06] Hudek, Alexander K.; Weddell, Grant E.: Binary Absorption in Tableaux-Based Reasoning for Description Logics. In: Proc. 19th Int. Workshop on Description Logics (DL'06). Jgg. 189. CEUR, 2006.

[Kr11] Krötzsch, Markus; Maier, Frederick; Krisnadhi, Adila; Hitzler, Pascal: A better uncle for OWL: nominal schemas for integrating rules and ontologies. In: Proc. 20th Int. Conf. on World Wide Web (WWW'11). ACM, S. 645–654, 2011.

[SCP06] Sirin, Evren; Cuenca Grau, Bernardo; Parsia, Bijan: From wine to water: Optimizing description logic reasoning for nominals. In: Proc. 10th Int. Conf. on Principles of Knowledge Representation and Reasoning (KR'06). AAAI Press, S. 90–99, 2006.

[Si07] Sirin, Evren; Parsia, Bijan; Cuenca Grau, Bernardo; Kalyanpur, Aditya; Katz, Yarden: Pellet: A practical OWL-DL reasoner. J. of Web Semantics, 5(2):51–53, 2007.

[St16] Steigmiller, Andreas: Optimisation of tableau-based reasoning systems for expressive description logics. Dissertation, Universität Ulm, 2016.

[TH06] Tsarkov, Dmitry; Horrocks, Ian: FaCT++ description logic reasoner: System description. In: Proc. 3rd Int. Joint Conf. on Automated Reasoning (IJCAR'06). Jgg. 4130 in LNCS. Springer, S. 292–297, 2006.



Andreas Steigmiller, aus Biberach an der Riß, studierte zunächst Technische Informatik (B.Sc.) an der Hochschule Ulm und dann bis Ende 2011 Informatik (M.Sc.) an der Universität Ulm. Von Anfang 2012 bis Anfang 2016 promovierte er an der Universität Ulm im Institut für Künstliche Intelligenz unter Betreuung von Juniorprof. Dr. Birte Glimm und finanziert durch das Promotionsstipendium nach dem Landesgraduiertenförderungsgesetz des Landes Baden-Württembergs (LGFG) an dem hier vorgestellten Thema. Die Dissertation wurde 2016 mit dem Thomas Gessmann Preis ausgezeichnet. Das entwickelte Schlussfolgerungssystem Konclude gewann mehrere Preise in internationalen Wettbewerben, darunter eine Kurt Gödel Society Medaille in den 2014 FLoC Olympic Games.

Empfehlungstechnologien für Gruppenentscheidungen [1]

Martin Stettinger[2]

Abstract: Eine Vielzahl an Alltagsentscheidungen betreffen eher Gruppen als Einzelpersonen. Beispielhafte Gruppenentscheidungen reichen von heiklen Investitionsentscheidungen (beispielsweise in der öffentlichen Verwaltung) bis hin zu Restaurant-Entscheidungen für ein gemeinsames Abendessen mit Freunden. Empfehlungstechnologien zur Unterstützung von Gruppenentscheidungen stellen einen neuen aufstrebenden Forschungsbereich dar. Zusätzlichen Risikofaktoren, welche die Entscheidungen negativ beeinflussen können, müssen neben den bekannten Herausforderungen (z.B.: "cold start problem") berücksichtigt werden. Sogenannte *decision biases* stellen dabei häufig auftretende Beeinflussungen dar. *Decision biases* beschreiben Situationen, in welchen Menschen nach bestimmten (vereinfachten) Mustern handeln. In dieser Arbeit wird eine neue Umgebung zur Unterstützung von Gruppenentscheidungen präsentiert. Das vorgestellte CHOICLA System zeigt die Fähigkeit, decision biases entgegenzuwirken und somit die Entscheidungsqualität signifikant zu verbessern. CHOICLA erweitert den state-of-the-art, indem es Unterstützung für Gruppenentscheidungen unabhängig von der zugrunde liegenden Domäne anbietet. Existierende Technologien bieten lediglich Unterstützung für spezielle Domänen (z.B.: Terminkoordinationen, Tourismusdestinationen, Musik, ...) und bieten keine Möglichkeit, Entscheidungsaufgaben domänenunabhängig zu konfigurieren.

1 Einführung & Motivation

Empfehlungssysteme für die Unterstützung von Entscheidungen von Einzelpersonen wurden bereits intensiv erforscht. Die Unterstützung von Gruppenentscheidungen auf Basis von Empfehlungssystemen ist jedoch ein Bereich mit vielen offenen Fragestellungen. Es existieren einige wenige Anwendungen mit grundlegenden Empfehlungsansätzen für Gruppen, doch fokussieren diese auf spezielle Domänen wie zum Beispiel Software Requirements Engineering, Ambient Intelligence, Interactive Television und E-Tourismus.

Da sich Gruppenentscheidungsprobleme sehr stark in ihrem Prozessdesign unterscheiden, ist eine Vielfalt von konfigurierbaren Features notwendig, um das Design von Entscheidungsprozessen vernünftig zu unterstützen. Solche Features sind zum Beispiel unterschiedliche Empfehlungsfunktionen, verschiedene Grade der Transparenz von Präferenzen oder spezielle Benutzerrechte. Die Einstellungen bezüglich der Präferenzen-Transparenz legen fest, ob und wann Gruppenmitglieder die Präferenzen anderer Gruppenmitglieder einsehen dürfen. Benutzerrechte steuern, welche Entscheidungsträger neue Informationen während eines Entscheidungsprozesses hinzufügen dürfen. Die Domäne des Entscheidungsproblems bestimmt, welche Features für die konkrete Entscheidung relevant sind. Die Bewertungsmethoden der Alternativen spielen auch eine wichtige Rolle und hängen ebenso von der Domäne des Gruppenentscheidungsproblems ab. Zum Beispiel bedürfen

[1] Englischer Titel der Dissertation: 'Recommendation Technologies for Group Decision Making' [St16]

[2] Institut für Softwaretechnologie, martin.stettinger@ist.tugraz.at

Personalentscheidungen andere Bewertungsmethoden als Entscheidungen bezüglich Restaurants oder Hotels.

Empfehlungstechnologien können grundlegend in ”collaborative filtering”, ”content-based filtering”, ”knowledge-based recommendationünd ”group recommendationäufgeteilt werden [JF10]. ”Collaborative filtering”berechnet Empfehlungen für Einzelpersonen auf der Basis von Benutzern mit ähnlichem Geschmack. Der erste Schritt dabei ist die Definition einer Metrik eines ”ähnlichen”Benutzers. Unter ähnlichen Benutzern werden Verhaltensmuster ausgewertet, um auf die Interessen Einzelner zu schließen. Empfehlungen, welche auf einem ”content-based filteringÄnsatz beruhen, präsentieren neue Produkte. Diese neuen Produkte sind jenen ähnlich, die dem Benutzer bereits bekannt sind. Gleich wie für ”collaborative filtering”bedarf es beim ”content-based filteringäuch einer Definition einer Ähnlichkeitsmetrik. Sowohl ”collaborative filteringäls auch ”content-based filtering”beinhalten ein sogenanntes ”cold start”Problem. Dabei ist es nicht möglich, sinnvolle Empfehlungen für neue Benutzer oder Produkte zu liefern da die dafür notwendigen Daten noch nicht vorhanden sind. In Szenarien, in denen weder ”collaborative filtering”noch ”content-based filtering”verwendet werden können, kommt ”knowledge-based recommendationßum Einsatz. Dieser Ansatz basiert auf explizitem Wissen über Produkte, Benutzerpräferenzen und über Empfehlungswissen (alle zusammen sind auch als Empfehlungswissensbasis bekannt). Dieser Informationsbedarf stellt einen Nachteil von ”knowledge-based recommendation”dar und ist zugleich auch Auslöser für den sogenannten ”knowledge aquisition bottleneck”. Der ”knowldge aquisition bottleneck”resultiert aus den Kommunikationsoverheads zwischen den Domänenexperten und den Ingenieuren der Empfehlungswissensbasis. Der Vorteil von ”knowledge-based recommendationïst, dass auf Grund des vorhandenen expliziten Empfehlungswissens kein ”cold start”Problem auftritt. Verglichen mit Empfehlungsansätzen für Einzelpersonen-Entscheidungen müssen Empfehlungstechnologien für Gruppenentscheidungen neue Herausforderungen bewältigen, da individuelle Präferenzen der Gruppenteilnehmer berücksichtigt werden müssen.

Eine Vielzahl der täglichen Entscheidungen betreffen Gruppen. Solche Entscheidungen reichen von der nächsten Lokation für einen Skiausflug mit Freunden bis hin zu einem neuen Firmenlogo. Manche Entscheidungen, wie zum Beispiel die Wahl eines Restaurants für ein Dinner mit Kollegen, treten in periodischen Abständen in den gleichen Gruppen auf. Sehr oft entstehen sogenannte Biases, welche zu einer suboptimalen Entscheidung führen können. Ein nachteiliger Effekt ist, dass Biases Möglichkeiten zur Manipulation bieten [Co03, Ad13]. Als zusätzlicher Nachteil kann erwähnt werden, dass durch Biases sowohl die Benutzersicht auf die Relevanz der Produkte als auch die Sicht der Empfehlungskomponente auf die Benutzerpräferenzen verzerrt werden können [Co03, Ad13].

Anchoring-Effekte triggern Entscheidungen, welche durch die Präferenzen der ersten Person beeinflusst sind. Wenn ein Empfehlungssystem die Präferenzen der anderen Gruppenteilnehmer in frühen Phasen des Entscheidungsprozesses nicht ersichtlich macht, wird dadurch der Informationsaustausch unter den Gruppenteilnehmern gefördert. Durch diesen erhöhten Informationsaustausch kann die Qualität der Gruppenentscheidung signifikant gesteigert werden [MSH10]. Das Auftreten von Anchoring-Effekten im Zusammenhang mit Empfehlungstechnologien wurde durch verschiedene wissenschaftliche Arbeiten

bestätigt. Sozialpsychologische Studien bestätigen zudem auch den Zusammenhang zwischen der Entscheidungsqualität und dem Grad an Präferenzen-Transparenz innerhalb der Gruppe.

Serielle Positionseffekte beschreiben Situationen, in welchen Produkte am Anfang und am Ende einer Liste signifikant öfter angesehen und gemerkt werden als jene Produkte, die sich in der Mitte einer Liste befinden. Die erhöhte Bewertungswahrscheinlichkeit beschreibt in solchen Situationen den Verhaltensaspekt, während die höhere Merkwahrscheinlichkeit den kognitiven Aspekt von seriellen Positionseffekten beschreibt. Die erwähnten Produkte können beispielsweise Listen von Links, eine Speisekarte in einem Restaurant, Produkte mit ihren Beschreibungen oder auch Argumentationen in Beschreibungstexten sein. Die Popularität eines spezifischen Produktes hat auf diesen Effekt keine Auswirkung. Es werden auch Eigenschaften von Produkten, welche zu Beginn oder am Ende eines Empfehlungsdialogs präsentiert werden, signifikant öfter angesehen ? unabhängig von ihrer Relevanz für den aktuellen Benutzer. Serielle Positionseffekte gehören zu den robustesten Effekten der Psychologie, da sie bereits seit Jahrzehnten bekannt sind und auch schon in dutzenden Studien untersucht wurden [BH15]. Eine Erklärung dieser Effekte ist, dass Menschen längere Listen nur ungern vollständig bewerten um herauszufinden, welches Produkt das geeignetste ist. Ein möglicher Ansatz, um solchen Effekten im Zusammenhang mit Gruppenentscheidungsproblemen entgegenzuwirken, ist die Anpassung der Präferenzerfassungsmaske. Das Benutzerinterface kann in solchen Fällen dazu verwendet werden die Motivation der Gruppenteilnehmer, sich die Produktbeschreibungen im Detail anzusehen, zu steigern.

In vielen Fällen wird die finale Entscheidung nicht erklärt und es werden auch nicht alle Entscheidungsträger darüber informiert. Erklärungen können die Entscheidung selbst betreffen oder auch zu speziellen Entscheidungsalternativen gehören. Erklärungen der Gruppenentscheidung spielen eine wesentliche Rolle, da sie einen positiven Einfluss auf die Akzeptanz der Gruppenentscheidung ausüben können. Erklärungen von Entscheidungsalternativen (zum Beispiel warum eine spezielle Entscheidungsalternative der Gruppe empfohlen wird) können einen signifikanten Einfluss auf die Entscheidung ausüben, da sie die Wahrnehmung der Entscheidungsalternativen und dadurch auch deren Bewertung beeinflussen [TM07, GL14]. Auch die Reihenfolge der Argumente in Beschreibungen von Alternativen kann einen signifikanten Einfluss auf die Entscheidung ausüben [St15a]. Das Fehlen von Erklärungen kann zusätzlich das Vertrauen der Benutzer in das Empfehlungssystem stark reduzieren.

Diese Dissertation fokussiert auf Gruppenempfehlungssysteme und stellt des Weiteren ein Tool zur Entscheidungsunterstützung namens CHOICLA vor. CHOICLA vereint das generierte Wissen aus allen durchgeführten Benutzerstudien und ist zudem selbsterklärend. Zusätzlich wurde bei der Entwicklung von CHOICLA ein spezieller Fokus auf Usability gelegt. Des Weiteren wurden auch die erwähnten Risikofaktoren beachtet, wodurch Gruppenentscheidungsunterstützung auf den nächsten Level angehoben werden konnte. CHOICLA bietet nachstehende Kernfunktionalitäten:

1. Erklärungen in allen Phasen eines Gruppenentscheidungsprozesses (zum Beispiel warum eine Alternative der Gruppe empfohlen wird). Erklärungen stellen eine gewisse Transparenz sicher, wodurch Benutzer dem System mehr Vertrauen schenken. Das Vertrauen der Benutzer in das System wird sowohl durch Erklärungen als auch durch Transparenz signifikant erhöht.
2. Konfigurationstechnologie. Durch die im Erstellungsprozess integrierte Konfigurationstechnologie können in CHOICLA Gruppenentscheidungsaufgaben in verschiedenen Domänen erstellt werden [St14b].
3. Domänenabhängige Empfehlungsheuristiken. Gruppenempfehlungen in CHOICLA werden auf der Basis der individuellen Präferenzen der Gruppenmitglieder berechnet. Es kann zwischen unterschiedlichsten Empfehlungsheuristiken gewählt werden, denn durch die große Varianz der Gruppenentscheidungsaufgaben existiert keine Empfehlungsheuristik, die für alle Gruppenentscheidungsaufgaben gleichermaßen angewandt werden kann [Ma11].
4. Benutzerfreundlichkeit. Ein zentraler Fokus während der Entwicklung von CHOICLA war es, die Benutzerfreundlichkeit des Systems auf einem hohen Niveau zu halten. Ein wesentlicher Vorteil von CHOICLA ist, dass sich die Benutzeroberfläche dynamisch anpasst und nur solche Elemente und Funktionen anzeigt, welche im aktuellen Kontext der Gruppenentscheidung angewandt werden können.
5. Veränderbare Präferenzerfassungsmasken. Um einen maximalen Grad an Flexibilität im System zu erreichen, kann der Ersteller einer Gruppenentscheidungsaufgabe zwischen verschiedenen Präferenzerfassungsmasken wählen. Diese Masken reichen von einer einfachen fünf-Sterne Skala bis hin zu einer dimensionsbasierten Bewertung, bei welcher die verschiedenen Dimensionen auch mit unterschiedlichen Gewichten versehen werden können. Eine dimensionsbasierte Bewertung kann seriellen Positionseffekten entgegenwirken.
6. Sichtbarkeit von Präferenzen. CHOICLA stellt verschiedene Arten der Sichtbarkeit von Benutzerpräferenzen zur Verfügung. Sollte die Sichtbarkeit der Präferenzen der anderen Gruppenmitglieder während des Entscheidungsprozesses gewünscht sein, so kann die Granularität dieser Sichtbarkeit abhängig der Entscheidungsdomäne festgelegt werden. Bei diesem Feature kann zwischen einer Zusammenfassung der Präferenzen bis hin zur kompletten Präferenztransparenz gewählt werden. Intelligente Präferenztransparenzeinstellungen helfen dabei, Anchoring-Effekten entgegenzuwirken.

2 Forschungsziele und Forschungsfragestellungen

Gruppen von Benutzern in Entscheidungsprozessen unterstützen
Da viele Alltagsentscheidungen eher in Gruppen als durch Einzelpersonen getroffen werden, muss der state of the art im Bereich der Empfehlungssysteme erweitert werden, um auch Unterstützung im Bereich von Gruppenentscheidungsaufgaben anbieten zu können. Existierende Technologien fokussieren auf spezielle Entscheidungsdomänen wie zum Bei-

spiel interaktives Fernsehen, ambient intelligence oder E-Tourismus und sind nicht in der Lage, andere Entscheidungsszenarien zu unterstützen. Dies bringt uns zur ersten Forschungsfragestellung:

(Q1) *Wie kann man domänenunabhängige Entscheidungsunterstützung für Gruppen von Benutzern bestmöglich anbieten?*

Konfiguration von Entscheidungsaufgaben
In den meisten Szenarien, in welchen Konfigurationstechnologien zum Einsatz kommen, ist ein (oder eine kleine Gruppe von) Wissensingenieur(en) für die Entwicklung und Wartung der Wissensbasis zuständig. Weiters wird in solchen Szenarien oft davon ausgegangen, dass die Konfiguration der Produkte bzw. Services stets von Einzelpersonen durchgeführt wird. Diese führt unweigerlich zu Skalierungsproblemen, da sowohl die Transformation von Domänenwissen in eine Konfigurationswissensbasis als auch die Erfassung der Präferenzen für die ganze Gruppe eine sehr zeitintensive Aufgabe ist. Moderne Konfigurationstechnologien sollten eine gemeinschaftliche Entwicklung einer Konfigurationswissensbasis und eine gemeinschaftliche Konfiguration von Produkten und Services unterstützen. Daraus entsteht die zweite Forschungsfragestellung:

(Q2) *Wie kann der Erstellungsprozess einer Gruppenentscheidungsaufgabe als Konfigurationsproblem dargestellt werden?*

Personalentscheidungen
Erkenntnisse der Literatur zeigen, dass Faktoren wie zwischenmenschliche Anziehung, erster Eindruck oder die äußerliche Erscheinung eines Bewerbers sehr oft zu subjektiver Bewertung des Bewerbers führen, da in solchen Situationen sehr oft keine konkrete Struktur während eines Interviews eingehalten wird. Auch die Anwendung von Bewertungskriterien ist nicht standardisiert wodurch keine ”faireËntscheidung getroffen werden kann. Da sehr viele Bewerbungsverfahren mehr als eine Person betreffen, stehen wir auch hier vor einer Gruppenentscheidungsaufgabe. Dies führt zur dritten Forschungsfragestellung:

(Q3) *Wie können Gruppen von Benutzern bestmöglich in Personalentscheidungen unterstützt werden?*

Fairness für alle Gruppenmitglieder
Eine Kernfunktionalität eines Gruppenentscheidungstools ist die Fähigkeit, Informationen aus vergangenen Entscheidungsaufgaben zu sammeln und für zukünftige Entscheidungsaufgaben bestmöglich zu verwerten. Dieses Verfahren kann die Empfehlungsqualität signifikant erhöhen. Um Fairness zwischen den Gruppenmitgliedern erreichen zu können, ist es essentiell Informationen aus vergangen Entscheidungsaufgaben in zukünftigen zu verwerten. Fairness spielt eine zentrale Rolle im Zusammenhang von Gruppenentscheidungsaufgaben, da der Grad der wahrgenommenen Fairness zum einen das Vertrauen in andere Gruppenmitglieder signifikant steigern kann und zum anderen auch die Bereitschaft, Kompromisse beim Auflösen von Konflikten einzugehen erhöhen kann. Die Forschungsfragestellung ist:

(Q4) *Wie kann langfristig Fairness in Gruppenentscheidungsaufgaben gewährleistet werden?*

Biases im Zusammenhang von Gruppenentscheidungsszenarien
Vor 20.000 Jahren hatten wir wenig Zeit darüber nachzudenken, was zu tun ist, wenn wir einem Säbelzahntiger gegenüberstanden - unser Leben hing von schnellen Entscheidungen ab. Um solche Entscheidungen zu treffen, bedienten wir uns einer Reihe von Heuristiken, die keineswegs die Optimalität von Entscheidungen, aber dafür unser Überleben sicherstellten.

Obwohl der Säbelzahntiger vor etwa 12.000 Jahren ausgestorben ist und viele andere Bedrohungen in der Form nicht mehr existieren, hat sich unser Entscheidungsverhalten nicht signifikant geändert. Im Grunde verwenden wir die gleichen Heuristiken, die allerdings zu unterschiedlichsten Biases und daraus resultierend zu suboptimalen Entscheidungen führen [Co03, Ad13].

Suboptimale Entscheidungen schaden uns nicht nur, sondern sie werden sehr oft auch systematisch getriggert, um bspw. für bestimmte Produkte einen höheren Umsatz zu erzielen. Der Änchoring-Effekt"bezeichnet bspw. Situationen, in den vorangestellte Referenzwerte die Evaluierung beeinflussen. Wollen wir bspw. für ein Produkt einer Onlineverkaufsplattform eine Evaluierung abgeben und bekommen genau zu diesem Zeitpunkt die Evaluierungen von anderen Benutzern für dieses Produkt präsentiert, wird sich unser Evaluierungsverhalten an das anderer Benutzer anpassen. Gleiches passiert bei Entscheidungen, die von Gruppen getätigt werden.

Auch die Reihenfolge, in der die gleiche Information überbracht wird, bestimmt unser Bewertungsverhalten. So werden einzelne Personen, die als ßielstrebig, unfair, unkommunikativ, belesen"charakterisiert werden, besser bewertet als jene, die als ünfair, zielstrebig, belesen, unkommunikativ"beschrieben werden.

Daraus resultieren die folgenden zwei Forschungsfragestellungen:

(Q5.1) *Wie können Tools zur Gruppenentscheidungsunterstützung Serielle Positionseffekten entgegenwirken?*

(Q5.2) *Wie können Tools zur Gruppenentscheidungsunterstützung Anchoring-Effekten entgegenwirken?*

Eine Zusammenfassung der Forschungsfragestellungen mit den dazugehörigen Beiträgen der Dissertation findet sich in nachstehender Tabelle.

3 Beiträge der Dissertation

Q1 - Wie kann man domänen-unabhängige Entscheidungsunterstützung für Gruppen von Benutzern bestmöglich anbieten?
In der Arbeit wird CHOICLA präsentiert. CHOICLA ist ein innovatives Tool zur Gruppenentscheidungsunterstützung mit der Vision, Gruppenentscheidungen im Allgemeinen

effizienter zu gestalten sowie die Systemfunktionen nicht auf bestimmte Domänen einzuschränken. Die Ergebnisse zahlreicher Benutzerstudien liefern einen ersten Beweis dafür, dass CHOICLA in unterschiedlichsten Domänen von Benutzern akzeptiert wird [St13, St14a, SF14].

Q2 - Wie kann der Erstellungsprozess einer Gruppenentscheidungsaufgabe als Konfigurationsproblem dargestellt werden?
Aufgrund von verschiedenen Feature-Anforderungen der unterschiedlichen Gruppenentscheidungsaufgaben ist eine wesentliche Anforderung an ein Tool zur Gruppenentscheidungsunterstützung ein hohes Maß an Flexibilität. Um die Vision eines domänenunabhängigen Tools zur Gruppenentscheidungsunterstützung umsetzen zu können, ist ein integraler Bestandteil, Konfigurationstechnologien in den Erstellungsprozess zu integrieren. Dies erlaubt dem Ersteller einer Gruppenentscheidungsaufgabe, die verfügbaren Features und Einstellungen in einem hohen Detailierungsgrad abstimmen zu können. Um stets auch ein Auge auf die Benutzerfreundlichkeit zu werfen, setzt Choicla auf intelligente Benutzeroberflächen, welche Benutzern nur jene Einstellungen und Features präsentieren, die in der aktuellen Konfiguration zur Verfügung stehen. Dadurch wird verhindert, dass sich Benutzer während der Interaktion mit dem System in einen inkonsistenten Zustand manövrieren [St14b, Fe14].

Q3 - Wie können Gruppen von Benutzern bestmöglich in Personalentscheidungen unterstützt werden?
Persönliche Auffassungen der unterschiedlichen Entscheidungsträger führen sehr oft zu subjektiven Bewertungen im Zusammenhang mit Personalentscheidungen. Literatur in diesem Bereich zeigt, dass die Bewertungskriterien während des gesamten Einstellungsverfahrens sehr oft nicht stabil sind und Eindrücke wie zum Beispiel das äußerliche Erscheinungsbild, die zwischenmenschliche Anziehung oder der erste Eindruck zu subjektiven Bewertungen führen. CHOICLA ermöglicht objektivere Bewerbungsverfahren, indem es flexible Präferenzerfassungsinterfaces, welche exakt auf die aktuelle Jobposition zugeschnitten werden können, anbietet [SF14].

Q4 - Wie kann langfristig Fairness in Gruppenentscheidungsaufgaben gewährleistet werden?
Entscheidungen bezüglich der Wahl eines Restaurants für ein Abendessen mit Freunden oder die Wahl einer passenden MeetingLokation für ein monatliches Meeting mit Geschäftspartnern werden regelmäßig in Gruppen getroffen. Wenn alle vergangenen Entscheidungen einen Einfluss auf die aktuelle Entscheidung ausüben, kann eine längerfristige Fairness erreicht werden. Wenn zum Beispiel eine Gruppe von Freunden alle drei Monate gemeinsam einen Film im Kino ansieht und die vergangenen drei Film-Entscheidungen nicht im Sinne eines bestimmten Gruppenmitglieds waren, sollte dieses Gruppenmitglied in der aktuellen Entscheidung einen höheren Einfluss auf die Gruppenempfehlung haben. In dieser Arbeit präsentieren wir einen ersten Ansatz, um längerfristige Fairness in wiederkehrenden Entscheidungsaufgaben erreichen zu können [St14a].

Q5.1 - Wie können Tools zur Gruppenentscheidungsunterstützung seriellen Positionseffekten entgegenwirken?
Die Art und Weise der Darstellung von Entscheidungsalternativen übt einen signifikanten Einfluss auf die Entscheidung aus. Alternativen zu Beginn und am Ende von Listen werden deutlich öfter angesehen und evaluiert als jene, welche sich in der Mitte von Listen befinden. Dasselbe Phänomen kann auch in Beschreibungstexten beobachtet werden. Auch in diesen übt die Reihenfolge der Argumentation einen signifikanten Einfluss auf die Entscheidung aus. Speziell in Fällen, in denen ein System einfache Bewertungsskalen wie zum Beispiel Sterne zur Erfassung der Benutzerpräferenzen verwendet, kann der Beschreibungstext einen wesentlichen Einfluss auf die Entscheidung ausüben. Unsere Studien zeigten, dass bei Bewertungstexten, welche alle negativen Aspekte zu Beginn und am Ende darstellen die durchschnittliche Bewertung auf einer fünf-Sterne Skala um 1,5 Sterne geringer ist - verglichen mit dem exakt gleichen Beschreibungstext mit den positiven Aspekten zu Beginn und am Ende. In der Dissertation stellen wir eine Möglichkeit vor, seriellen Positionseffekten entgegenzuwirken, indem das Präferenzerfassungsinterface von einfachen Sterne-Skalen auf dimensionsbasierte Skalen angepasst wird [St15a].

Q5.2 - Wie können Tools zur Gruppenentscheidungsunterstützung Anchoring-Effekten entgegenwirken?
Anchoring-Effekte beschreiben Situationen, in welchen die Entscheidung von der ersten Person, welche Präferenzen artikuliert, beeinflusst wird. Ergebnisse aus sozialpsychologischen Studien zeigen, dass die Transparenz der Präferenzen in frühen Phasen des Entscheidungsprozesses zu suboptimalen Ergebnissen führen kann. Auf der anderen Seite zeigen Studien aus dem Bereich der Empfehlungstechnologien, dass in manchen Fällen eine Transparenz der Präferenzen eine nützliche Funktion eines Empfehlungssystems sein kann. Sichtbare Präferenzen von anderen Benutzern können die Verständlichkeit der Entscheidung erhöhen und auch unsicheren Benutzern bei der Bewertung helfen. Weiters haben die Transparenz-Einstellungen der Präferenzen einen signifikanten Einfluss auf das Kommunikationsaufkommen innerhalb der Gruppe. In dieser Arbeit wird initial das Vorkommen des Anchoring-Effektes in Gruppenentscheidungsszenarien gezeigt. In weiterer Folge werden auch Möglichkeiten aufgezeigt diesen Effekten entgegenzuwirken. Zusätzlich werden auch Ergebnisse von Benutzerstudien diskutiert, welche klar belegen, dass Erklärungen für Gruppenentscheidungen einen positiven Einfluss auf die Akzeptanz der Entscheidung ausüben [St15b].

4 Conclusion

Die aus der Dissertation entstandene Software ”CHOICLA”(eine Community Version ist frei verfügbar im App- und Play-Store) kann die Qualität speziell von Gruppenentscheidungen signifikant verbessern. In Kenntnis der o.a. Biases werden Gruppenentscheidungsprozesse so aufgebaut, dass die Wahrscheinlichkeit dieser Biases reduziert wird und damit die Qualität von Gruppenentscheidungen signifikant verbessert werden kann. Mit Hilfe von Konfigurationstechnologien wird die Adaptierbarkeit des Systems für Entscheidungen unterschiedlicher Komplexität erreicht. Einsatzbereiche für CHOICLA sind bspw. Investitionsentscheidungen in der öffentlichen Verwaltung, bei denen es darum geht, oftmals

sehr hohe Geldbeträge möglichst optimal einzusetzen - das geht eben nur, wenn die darunter liegenden Entscheidungsprozesse möglichst optimal gestaltet sind. Ähnliches gilt für Prozesse wie Personalauswahl, Entscheidungen für Projektförderungen, Auswahl von Tagungsorten und Entscheidungen über zukünftige Business-Modelle. Auch im Privatbereich gibt es eine Vielzahl von Entscheidungssituationen, die von CHOICLA profitieren können: Gestaltung eines gemeinsamen Urlaubs mit Freunden (welche Destination, welches Hotel, Zeitraum, etc.), Auswahl eines Familienautos, Bekleidungsentscheidungen, Restaurant für eine Weihnachtsfeier, uvm.

Für einen Teil der aus der Dissertation entstandenen Ergebnisse erhielten wir den James Chen Best Student Paper Award on the 23rd Conference on User Modelling, Adaptation and Personalization (UMAP 2015)[3] [St15b].

Um das Potential der CHOICLA Technologien im Unternehmensumfeld auszuschöpfen, wurde die Firma SelectionArts - Intelligent Decision Technologies GmbH gegründet.

Literaturverzeichnis

[Ad13] Adomavicius, Gediminas; Bockstedt, Jesse C.; Curley, Shawn P.; Zhang, Jingjing: Do Recommender Systems Manipulate Consumer Preferences? A Study of Anchoring Effects. Information Systems Research, 24(4):956–975, 2013.

[BH15] Bar-Hillel, Maya: Position Effects in Choice From Simultaneous Displays: A Conundrum Solved. Perspectives on Psychological Science, 10(4):419–433, 2015.

[Co03] Cosley, D.; Lam, S.; Albert, I.; Konstan, J.; Riedl, J.: Is seeing believing â how recommender system interfaces affect usersâ opinions. In: CHI03. S. 585–592, 2003.

[Fe14] Felfernig, Alexander; Stettinger, Martin; Ninaus, Gerald; Jeran, Michael; Reiterer, Stefan; Falkner, Andreas A.; Leitner, Gerhard; Tiihonen, Juha: Towards Open Configuration. In: Proceedings of the 16th International Configuration Workshop, Novi Sad, Serbia, September 25-26, 2014. S. 89–94, 2014.

[GL14] Gkika, S.; Lekakos, G.: The Persuasive Role of Explanations in Recommender Systems. In: 2nd Intl. Workshop on Behavior Change Support Systems (BCSS 2014). Jgg. 1153, CEUR Proceedings, Padua, Italy, S. 59–68, 2014.

[JF10] JANNACH, D., ZANKER M. FELFERNIG A.; FRIEDRICH, G.: Recommender Systems âAn Introduction. Cambridge University Press., 2010.

[Ma11] Masthoff, Judith: Group Recommender Systems: Combining Individual Models. In (Ricci, Francesco; Rokach, Lior; Shapira, Bracha; Kantor, Paul B., Hrsg.): Recommender Systems Handbook, S. 677–702. Springer US, 2011.

[MSH10] Mojzisch, A.; Schulz-Hardt, S.: Knowing other's preferences degrades the quality of group decisions. Journal of Personality & Social Psychology, 98(5):794–808, 2010.

[SF14] Stettinger, Martin; Felfernig, Alexander: Choicla: Intelligent Decision Support for Groups of Users in the Context of Personnel Decisions. Joint Workshop on Interfaces and Human Decision Making for Recommender Systems co-located with ACM Conference on Recommender Systems (RecSys 2014), S. 28–32, 2014.

[3] http://www.um.org/awards/james-chen-best-student-paper-awards

[St13] Stettinger, Martin; Ninaus, Gerald; Jeran, Michael; Reinfrank, Florian; Reiterer, Stefan: WE-DECIDE: A Decision Support Environment for Groups of Users. In (Ali, Moonis; Bosse, Tibor; Hindriks, KoenV.; Hoogendoorn, Mark; Jonker, CatholijnM.; Treur, Jan, Hrsg.): Recent Trends in Applied Artificial Intelligence, Jgg. 7906 in Lecture Notes in Computer Science, S. 382–391. Springer Berlin Heidelberg, 2013.

[St14a] Stettinger, Martin: Choicla: Towards Domain-independent Decision Support for Groups of Users. In: Proceedings of the 8th ACM Conference on Recommender Systems. RecSys '14, ACM, New York, NY, USA, S. 425–428, 2014.

[St14b] Stettinger, Martin; Felfernig, Alexander; Ninaus, Gerald; Jeran, Michael; Reiterer, Stefan; Leitner, Gerhard: Configuring Decision Tasks. Workshop on Configuration, Novi Sad, S. 17–21, 2014.

[St15a] Stettinger, M.; Felfernig, A.; Leitner, G.; Reiterer, S.; Jeran, M.: Counteracting Serial Position Effects in the CHOICLA Group Decision Support Environment. In: 20th ACM Conference on Intelligent User Interfaces (IUI2015). ACM, Atlanta, Georgia, USA, S. 148–157, 2015.

[St15b] Stettinger, Martin; Felfernig, Alexander; Leitner, Gerhard; Reiterer, Stefan: Counteracting Anchoring Effects in Group Decision Making. In (Ricci, Francesco; Bontcheva, Kalina; Conlan, Owen; Lawless, Samus, Hrsg.): User Modeling, Adaptation and Personalization, Jgg. 9146 in Lecture Notes in Computer Science, S. 118–130. Springer International Publishing, 2015.

[St16] Stettinger, Martin: Recommendation Technologies for Group Decision Making. Dissertation, Graz, University of Technology, 2016.

[TM07] Tintarev, N.; Masthoff, J.: Explanations of Recommendations. In: ACM Conf. on Recommender Systems 2007. ACM, Minneapolis, MN, USA, S. 203–206, 2007.



Martin Stettinger studierte Softwareentwicklung-Wirtschaft an der Technischen Universiät Graz und schloss das Doktorratsstudium Informatik 2016 mit Auszeichnung ab. Seine Forschungsinteressen inkludieren empfehlungsunterstütztes E-Learning, menschliches Entscheidungsverhalten sowie Empfehlungssysteme und beinhalten neben anderen Themen auch Empfehlungstechnologien für Gruppenentscheidungen, verschiedene Aspekte des menschlichen Lernens und Entscheidungsverhalten sowie verschiedene Arten der Wissensgenerierung. Während seines Studiums sammelte er mehrjährige Erfahrung in der Softwareentwicklung im Bereich der Web-Programmierung, Web-Applikationen sowie Mobile Applikationen.

Abstraktionen zur performanten Programmierung von Multi-Core Architekturen mit hierarchischem Speicher[1]

Christian Terboven[2]

Abstract: Parallelprogrammierung für Computer mit gemeinsamem Speicher (Shared Memory) erscheint oftmals einfach. Allerdings hängt die für Anwendungen erreichbare Leistung von bestimmten Eigenschaften der Systemarchitektur ab. Diese Arbeit präsentiert Lösungen um Shared Memory-parallele Anwendungen mittels eines methodischen Ansatzes für aktuelle und zukünftige Architekturen auszulegen. Geeignete Abstraktionen für Parallelität und Lokalität müssen, um erfolgreich zu sein, gleichzeitig leistungsfähig und einfach in der Verwendung in bestehendem Programmcode sein. Dabei kommen dem Begriff „Abstraktion" in dieser Arbeit zwei Bedeutungen zu. Zum einen ist damit die methodische Auswahl von berücksichtigungswürdigen Architektureigenschaften gemeint. Zum anderen wird hierunter der Entwurf von Konzepten und Mustern für die Parallelprogrammierung zur Unterstützung der Softwareentwicklung verstanden.

1 Einleitung

Bis vor Kurzem hat sich die Ausführungsgeschwindigkeit von seriellen Programmen auf einem jeweils aktuellen Prozessor etwa alle 18 Monate verdoppelt. Wie Asanovic et al. beobachtet haben, haben Softwareentwickler die kontinuierliche Erhöhung der Leistungsaufnahme der Prozessoren akzeptiert, solange diese mit der Erhöhung der Ausführungsgeschwindigkeit serieller Programme einherging [As09]. Diese Entwicklung endete in 2009. Seitdem erhöht sich zwar die Integrationsdichte und die absolute Leistung von Prozessoren weiterhin, aber diese Steigerung resultiert vor allem aus der Erhöhung der Anzahl der Rechenkerne (Cores), die zu Multi-Core Architekturen geführt hat. Allerdings kann die Leistungssteigerung jetzt nur noch durch aktive Ausnutzung der Parallelität abgerufen werden.

Der natürliche Ansatz zur Ausnutzung von Multi-Core Parallelität besteht im Einsatz von Threads. Dabei hat sich OpenMP zum de-facto Standard der Shared-Memory Parallelprogrammierung entwickelt und findet vor allem im Hochleistungsrechnen Verwendung. OpenMP besteht aus einem Satz von Direktiven (Pragmas) zum Ausdruck von Parallelität im Programmcode, sowie Laufzeitfunktionen und Umgebungsvariablen zur Beeinflussung der Ausführung eines OpenMP Programms. OpenMP unterstützt sowohl das klassische Worksharing, z.B. die Aufteilung von Iterationen einer `for`-Schleife auf mehrere Threads, als auch das Tasking, den Ausdruck von feingranularen nebenläufigen Ausführungselementen.

[1] Englischer Titel der Dissertation: "Abstractions for Performance Programming on Multi-Core Architectures with Hierarchical Memory"

[2] RWTH Aachen University, terboven@itc.rwth-aachen.de

Zur Erhöhung der Speicherbandbreite ist in modernen Prozessoren der Speichercontroller integriert und damit bei Systemen mit zwei oder mehr Prozessoren der vorhandene physikalische Speicher partitioniert: Zugriffe eines Rechenkerns auf direkt angebundenen Speicher erfolgen mit geringerer Latenz und höherer Bandbreite als auf entfernten Speicher. Dieses Verhalten bezeichnet man als NUMA (non-uniform memory access). Parallele Programme zeigen folglich auf NUMA-Architekturen schlechte Leistung, wenn auf entfernt liegende Daten zugegriffen wird, und Task-parallele Programme bedürfen Methoden zur Zuordnung von Tasks zu Daten oder Threads. Dabei vertieft sich die Speicherhierarchie durch mehrere Cache-Ebenen, mehrere Speichercontroller pro Prozessor, sowie das Aufkommen neuer Technologien, wie z.B. Speicher mit sehr hoher Bandbreite oder nichtflüchtigem Speicher. Somit wird für hohe Energieeffizienz und Ausführungsleistung die Optimierung des Datenzugriffs notwendig. Dazu bedarf es geeigneter Abstraktionen um die Programmierbarkeit und Wartbarkeit der Codes zu erhalten. Als wissenschaftliche Beiträge liefert diese Arbeit [Te16]:

- Die Definition und Diskussion von abstrakten Ausdrucksweisen zur Speicherverwaltung auf NUMA-Architekturen.
- Die Entwicklung des flexiblen und leistungsfähigen *Affinity Modell*, das in den Standard OpenMP 4.0 eingeflossen ist.
- Die Weiterentwicklung und Bewertung von Methoden zur Parallelisierung Objektorientierter C++-Anwendungen sowie die Unterstützung des Affinity Modells durch den Einsatz geeigneter Entwurfsmuster.
- Die Entwicklung eines Satzes von Benchmarks und Experimenten zur Analyse und Bewertung des Verhaltens von OpenMP Implementierungen.

Als Ganzes liefert diese Arbeit einen methodischen Ansatz zur Entwicklung von paralleler Software. Der Rest dieser Zusammenfassung ist dabei wie folgt strukturiert: Kapitel 2 erläutert die wesentlichen Aspekte von NUMA und stellt die in den Experimenten verwendeten Systeme vor. Kapitel 3 stellt die Entwicklung des Thread Affinity Modells vor, Kapitel 4 präsentiert die Methoden zur Parallelisierung Objekt-orientierter Programme. In Kapitel 5 werden die Ergebnisse anhand einer Fallstudie bewertet. Kapitel 6 schließt mit einer Zusammenfassung sowie einem Ausblick auf zukünftige Forschungsarbeiten.

2 Systemarchitekturen und Benchmarks

Jedes aktuelle Serversystem mit zwei oder mehr Prozessoren ist ein NUMA-System. Das Prinzip des Shared Memory bleibt unberührt, aber der physikalische Speicher wird partitioniert und die Zugriffsgeschwindigkeit hängt damit von der Position des Datums im Speicher relativ zum Rechenkern ab, der den Thread ausführt, welcher den Zugriff tätigt. Abbildung 1 zeigt ein konkretes, hierarchisches NUMA-System.

2.1 Systemarchitekturen

In dieser Arbeit werden exemplarisch zwei Systeme betrachtet, auf denen alle Experimente durchgeführt werden. Das *2-Sockel Intel Westmere System* besteht aus 2 Intel Xeon X5675 Prozessoren mit je 6 Rechenkernen. Es ist repräsentativ für den Standardrechenknoten in aktuellen HPC-Systemen. Die genannten Herausforderungen sind auf einem komplexeren System aber deutlicher zu erkennen und schwieriger zu meistern. Aus diesem Grund wurde als zweites System das *Bull BCS System* ausgewählt. Es besteht aus 4 Boards, die über einen speziellen Interconnect Bull Coherence Switch (BCS) verbunden sind, und somit insgesamt 16 Prozessoren bieten. Das System ist in Abb. 1 dargestellt. Jedes Board ist mit 4 Intel Xeon X7550 Prozessoren mit je 8 Rechenkernen bestückt. Die Abbildung zeigt links die NUMA-Konnektivität innerhalb des Boards, nach der jeder Prozessor mit einem QPI-Link an jeden anderen Prozessor angebunden ist sowie über lokalen Speicher verfügt. Im BCS System werden vier Boards miteinander verbunden, wie rechts dargestellt. Daraus ergibt sich eine NUMA-Hierarchie (auf dem Board und zwischen den Boards) mit unterschiedlichen Zugriffscharakteristiken.

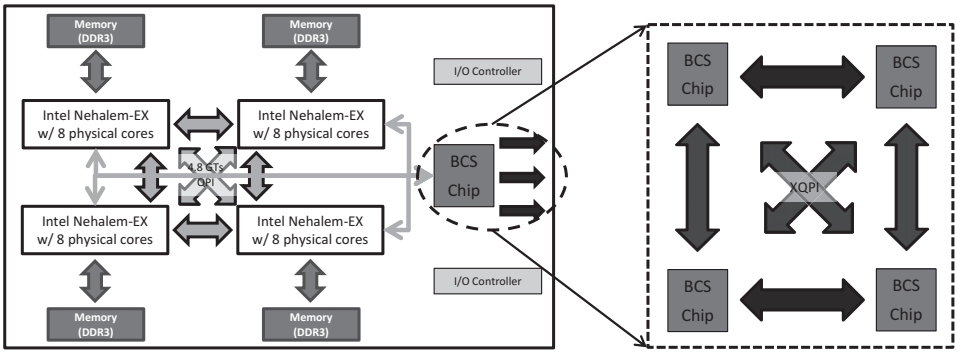


Abb. 1: Architektur des Bull BCS System.

In dieser Zusammenfassung werden Ergebnisse stellvertretend nur für das Bull BCS System betrachtet, da die Herausforderungen in der Programmierung durch die hierarchische Speicherarchitektur eine Obermenge gegenüber einem Standardsystem darstellen. Neuartige Speicher, z.B. mit sehr hoher Bandbreite, werden in Linux ebenfalls als NUMA-Speicherbereiche angeschlossen und sind dementsprechend mit denselben Techniken zu behandeln.

2.2 Benchmarks

Zur Darstellung und Bewertung der Optimierungseffekte der entwickelten Methoden werden drei unterschiedliche Benchmarks verwendet. Diese unterscheiden sich bezüglich des Speicherzugriffsverhaltens und der Lokalität der Datenzugriffe. Zeitliche Lokalität bedeutet, dass kürzlich verwendete Daten mit großer Wahrscheinlichkeit wieder verwendet werden und damit ggfs. noch im Cache vorhanden sind. Räumliche Lokalität bedeutet, dass

nacheinander stattfindende Zugriffe auf Speicherbereiche erfolgen, die im physikalischen Speicher nah beeinander liegen, ggfs. sogar auf derselben Cacheline.

Der STREAM Benchmark misst die tatsächlich erreichbare Speicherbandbreite eines Systems durch die Ausführung von vier unterschiedlichen Vektoroperationen. Diese haben eine hohe räumliche und eine geringe zeitliche Lokalität. Der SpMXV Benchmark realisiert eine Matrix-Vektor-Multiplikation mit einer dünnbesetzten Matrix im CRS-Format (compressed row storage), d.h. ohne Ausnutzung einer bestimmten Struktur der Matrix. Die Leistung von SpMXV ist im Allgemeinen durch die Speicherbandbreite begrenzt. Im iterativen Lösungsverfahren GMRES ist SpMXV die zeitintensivste Operation. Weitere Operationen sind Vektor-Vektor und Vektor-Skalar-Operationen, die in ihrer Charakteristik ähnlich zu den Operationen in STREAM sind.

Zusammengenommen erlauben die drei Benchmarks die Bewertung, ob die angewandten Optimierungsschritte hinsichtlich der Erhöhung der Ausführungsleistung auf komplexen NUMA-Systemen zielführend sind und wann das Optimum erreicht ist. Außerdem stellen sie den Kern vieler technisch-wissenschaftlicher Simulationsanwendungen dar. In dieser Zusammenfassung wird in den folgenden beiden Kapiteln lediglich auf den SpMXV Benchmark eingegangen, da sich damit die Anwendung der entwickelten Methoden exemplarisch darstellen lässt.

3 Softwaredesign für NUMA-Architekturen

Dieses Kapitel motiviert über die Modellierung der Ausführungsleistung die Optimierungsstrategie für NUMA-Architekturen. Darauf aufbauend wird die Entwicklung des Thread Affinity Modells vorgestellt.

Zur Fragestellung der Platzierung von Tasks oder Threads mitsamt Daten in der Systemarchitektur (der sog. *Affinität*), gibt es Vorarbeiten. Über diese hinausgehend führt diese Arbeit das Konzept von sog. *Places* als Abstraktion der Architektur ein. Ein ähnliches Konzept existiert in den Programmiersprachen X10 (ebenfalls als Place [Ch05]) und in Chapel als Locale [CCZ07]. Diese Vorarbeiten haben diese Arbeit beeinflusst, unterscheiden sich als Vertreter der PGAS-Programmiermodelle jedoch in etlichen Aspekten von OpenMP als Shared Memory Programmiermodell und bieten beispielsweise keine vergleichbaren Strategien zur Umsetzung von *Binding*, der Platzierung von Threads in der Systemarchitektur.

3.1 Modellierung der Ausführungsleistung und Systemcharakteristiken

Das Roofline Modell von Williams et al. [WWP09] verknüpft die sog. operationelle Intensität, definiert als Verhältnis von aus dem Hauptspeicher geladenen Daten zu den damit ausgeführten Rechenoperationen, mit der auf einem gegebenen System damit maximal erreichbaren Ausführungsleistung. Die Anwendung auf den SpMXV Benchmark zeigt seine Abhängigkeit von der Speicherbandbreite. Für die als `standard` bezeichnete Matrixgröße

ergibt sich eine operationelle Intensität von 0,1497 FLOPS pro geladenem Byte, was deutlich unter der theoretischen Maximalleistung der Prozessoren liegt.

Die zeilenweise Parallelisierung von SpMXV liefert deutlich weniger Ausführungsleistung als das Modell vorhersagt. Denn neben der Parallelisierung müssen mehrere Faktoren berücksichtigt werden: die Verteilung der Daten in der NUMA-Architektur, die gleichmäßige Verteilung der Rechenaufgaben über die eingesetzten Threads, die Auslegung des Speicherzugriffsmusters auf die Architektur, usw. Alle diese Aspekte müssen in der Entwicklung paralleler Algorithmen und Programme berücksichtigt werden.

3.2 Bewertung der Thread-Affinität

Die Modellierung und die durchgeführten Experimente zeigen grosse Unterschiede in der Ausführungsleistung eines OpenMP Programms auf einer NUMA-Architektur. Als Konsequenz muss die Optimierung vor allem das Speicherzugriffsverhalten betrachten, insbesondere das Verhältnis der Zugriffe auf lokale zu entfernten Daten.

Eine Distanzmatrix zeigt für eine gewählte Metrik die relativen Distanzen zwischen Rechenkernen in der Speicherarchitektur. Für das Bull BCS System ergibt eine solche Darstellung, dass für Zugriffen mit jeweils 8 Threads die Speicherbandbreite zum lokalen (nächesten) Speicher ca. 16 GB/s beträgt, zu benachbartem Speicher auf demselben Board ca. 12 GB/s, und zu entferntem Speicher ca. 4 GB/s.

3.3 Strategien zur Thread-Affinität

Es gibt bereits eine Vielzahl verschiedener NUMA-Systemarchitekturen auf dem Markt und kontinuierlich neue Entwicklungen. Um dennoch Programme entwickeln zu können, die nicht nur für eine gegebene Architektur optimiert sind, enthält das Thread Affinity Modell eine Abstraktion der Maschine sowie Strategien zur Platzierung von Threads, deren Auswahl von den Programmeigenschaften abhängt:

- *close*: Die Threads werden möglichst nahe beieinander platziert, ohne dabei unbedingt auf demselben Kern ausgeführt zu werden. Dabei wird in der Distanzmatrix der Abstand zwischen den ausgewählten Kernen minimiert. Diese Strategie ermöglicht z.B. die schnelle Synchronisation zwischen zwei Threads auf benachbarten Kernen, wenn diese sich einen Cache teilen.
- *spread*: Die Threads werden möglichst weit voneinander entfernt in der Maschinenarchitektur verteilt. Dabei wird in der Distanzmatrix der Abstand zwischen den ausgewählten Kernen maximiert. Diese Strategie ermöglicht z.B. die Optimierung der Speicherbandbreite durch Nutzung mehrerer Speichercontroller bereits ab einer geringen Threadanzahl.
- *master*: Die Threads werden möglichst auf demselben Kern ausgeführt, d.h. der Abstand in der Distanzmatrix ist 0. Diese Strategie ist ein Spezialfall und beschleunigt beispielsweise gewisse I/O-Operationen.

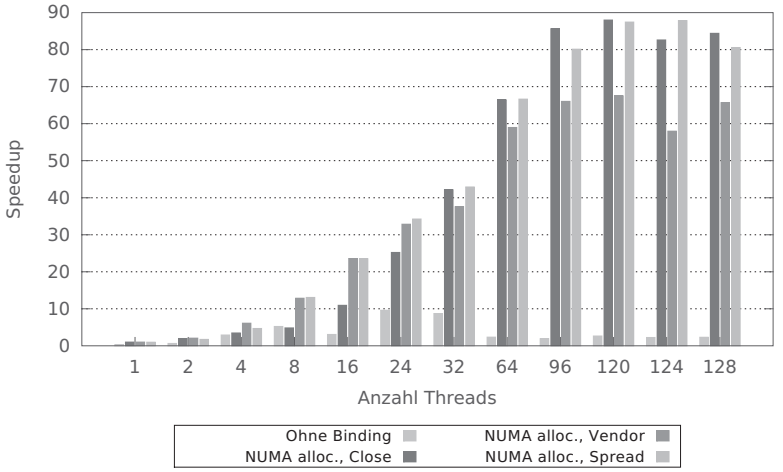


Abb. 2: SpMXV auf dem Bull BCS System mit Thread-Affinität.

Das Konzept der Places liefert eine Abstraktion der Hardware: ein sog. *Place* stellt eine nicht leere Menge von Ausführungseinheiten dar, in der ein Thread ausgeführt wird, aus der er jedoch nicht ausweichen kann. Eine gegebene Maschine wird dabei für ein OpenMP-Programm als eine geordnete Liste der Places (die sog. *Place List*) dargestellt [Ei12]. Diese wird von der Laufzeitumgebung bereitgestellt. Der Benutzer des OpenMP-Programms kann dabei die Konstruktion der Liste über eine Umgebungsvariable festlegen: ein abstrakter Namen steuert, ob die Thread-Affinität z.B. auf Ebene der logischen oder der physikalischen Kerne oder auf Ebene der Sockel erfolgen soll. Letzteres ist ein wichtiger Anwendungsfall in der hybriden Parallelisierung. Zur Konstruktion der Place List und die Umsetzung der Thread-Affinität zur Laufzeit wird in [Te16] ein effizienter Ansatz vorgestellt, der auch die Schachtelung von Parallelität auf mehreren Ebenen (z.B. in Bibliotheken) unterstützt.

Abbildung 2 zeigt das Ergebnis der Anwendung der Affinity Strategien im SpMXV Benchmark auf dem Bull BCS System. Ohne jegliche Affinität kann nur ein sehr geringer Speedup erreicht werden (■). Der Unterschied zwischen den Strategien wird vor allem bei kleineren Threadzahlen deutlich, bei denen *spread* (■) eine höhere Speichbandbreite für SpMXV erzielt. Dazu kommt, dass die Laufzeiten der parallelen Programme nun keinen zufälligen Schwankungen mehr unterliegen. Die vorgestellte Lösung ist herstellerspezifischen Lösungen (■) überlegen.

3.4 Memory-Affinität

Für die Messergebnisse aus Abb. 2 wurde bereits eine NUMA-Optimierung realisiert: für SpMXV wurde die Matrix so über die NUMA-Knoten verteilt, wie in der nachfolgenden Berechnung darauf zugegriffen wird [Te08a].

Eine Besonderheit bei Task-parallelen Programmen ist, dass in diesem Konzept dem Programmierer keine Möglichkeit gegeben wird zu beeinflussen, durch welche Threads und damit wo im System die Tasks abgearbeitet werden. Durch die Durchführung geeigneter Experimente kann festgestellt werden, dass die aktuellen OpenMP-Implementierungen dabei keine NUMA-Optimierung durchführen und entsprechend die Ausführungsleistung hinter den Möglichkeiten zurückbleibt. Um dem zu begegnen, können zwei Programmiermuster eingesetzt werden, mit deren Hilfe die OpenMP Laufzeitumgebung bei der Ausführung unterstützt werden kann: *single-producer* und *parallel-producer* [Te12]. Bei letzterem werden die Tasks in geeigneter Weise parallel erzeugt und mit großer Wahrscheinlichkeit nachfolgend von Threads abgearbeitet, welche eine passende Daten-Affinität besitzen.

Neben den in dieser Zusammenfassung vorgestellten Ergebnissen werden in [Te16] Vorschläge gemacht, wie direkt auf die Platzierung von Daten oder die Migration von Daten mittels Sprachkonstrukten eingewirkt werden kann. Eine Weiterentwicklung dieser Vorschläge wird derzeit zur Aufnahme in OpenMP diskutiert. Ebenfalls wird untersucht, in wie weit ein Ansatz zur Erhöhung der Daten-Affinität innerhalb des Betriebssystems realisiert werden kann.

4 Parallelisierung mit Objekt-orientierten Abstraktionen

Dieses Kapitel führt den Nachweis, dass die Konzepte des Affinity Modells in Objekt-orientierten C++-Programmen ohne Einebnung der Klassenhierarchie eingesetzt werden können.

Blitz++ [Ve98] hat den Einsatz von Expression Templates in C++ entwickelt um die Übersetzung von komplexen Ausdrücken in effizienten Code zu ermöglichen. Gamma et al. [Ga95] haben die Formulierung von allgemeingültigen Entwurfsmuster eingeführt.

4.1 Abstraktionen für Thread- and Task-Parallelität

Die Parallelisierung von C++-Programmen mittels OpenMP Pragmas kann dazu führen, dass dem Compiler die Anwendung von Optimierungen wie Expression Templates unmöglich wird. Dies liegt daran, dass aus Sicht des Compilers die Pragmas nicht bekannte Seiteneffekte induzieren können.

Bei der Parallelisierung eines bestehenden Objekt-orientierten Programmcodes gibt es mehrere Wahlmöglichkeiten, wo die Parallelisierung angesetzt werden kann. Am Beispiel von numerischen Lösern werden in [Te16] verschiedene Ansätze untersucht: generell ist es möglich, innerhalb der einzelnen Funktionen eines Objektes die Parallelisierung unterzubringen, jedoch entsteht dabei in jedem Aufruf ein Overhead der Parallelisierung; die Platzierung außerhalb spart diesen Overhead, führt jedoch häufig zu größeren Änderungen am Programmcode.

Als bester Kompromiss erweist sich der Einsatz von Expression Templates bei der Parallelisierung des Zuweisungsoperators (`operator=`), um komplexe Ausdrücke in einer einzelnen OpenMP Region zu parallelisieren und so deutlich Overhead einzusparen. Die Optimierung durch den Compiler bleibt dabei weiterhin möglich. Mittels des Strategy Muster kann dabei zwischen Details der Implementierung ausgewählt werden. Templates in Verbindung mit dem Adapter Muster erlauben es, die parallelisierten Objekte in Anwendungen einzubinden. Dies ist unter anderem für die Anwendung DROPS erfolgreich [Te08b].

4.2 Abstraktionen für NUMA

Um das Affinity Modell in C++-Programmen einzusetzen, ist die Unterstützung der Trennung von Allokation und Initialisierung mittels Allokatoren notwendig. In [Te16] wird gezeigt, wie entsprechende Allokatoren zu implementieren sind und, dass diese die Anforderungen erfüllen. Damit kann die Objekt-orientierte Art der Programmierung die Parallelisierung unterstützen um die Ausführungsleistung zu steigern. Bei SpMXV und GMRES ist dies beispielsweise der Fall, da die Logik der Datenzugriffsoptimierung in die Objekte integriert wurde und damit Zugriff auf private Informationen wie die Matrixstruktur erhält.

Im Rahmen der Entwicklung an mehreren Anwendungen, unter anderem DROPS, wurde offensichtlich, dass der OpenMP Standard in Versionen vor 3.0 keine geeignete Unterstützung für C++ enthält. Beispielsweise war nicht definiert, zu welchem Zeitpunkt zusätzliche Instanzen eines privatisierten Objekts erstellt werden, und in welcher Anzahl. Um dies zu klären wurden semantische Vorschläge gemacht, die in den Standard OpenMP 3.0 eingeflossen sind.

5 Anwendungsfallstudien

Anhand von drei Anwendungen sowie zwei weiteren Beispielen wird in [Te16] gezeigt, dass die vorgestellten Konzepte in den OpenMP Standard integriert und von aktuellen Compilern implementiert wurden. Daraus resultiert eine deutliche Steigerung der Ausführungsleistung in Anwendungen, wie am Beispiel FIRE hier gezeigt wird.

FIRE (Flexible Image Retrieval Engine, am Lehrstuhl I6 der RWTH Aachen entwickelt, C++) liefert zu einem Anfragebild die k ähnlichsten Bilder einer Datenbank zurück, indem mehrere Bildeigenschaften verglichen werden. Hier kann sowohl eine Parallelisierung über die Anfragen (omp1 in Abb. 3) und die Bilder in der Datenbank (omp2) eingesetzt werden, als auch ein Task-basierter Ansatz (tasks), wobei letzterer die beste Leistung liefert. Abb. 3 zeigt den erreichten Speedup auf dem Bull BCS System, der durchweg nahe am Optimum (linear) von 144 Threads liegt.

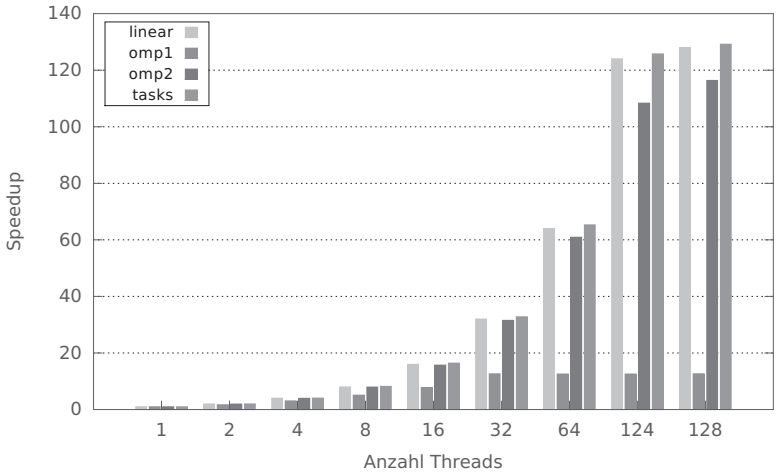


Abb. 3: Vergleich des Speedup von FIRE auf dem Bull BCS System.

6 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurden Abstraktionen zur effizienten Programmierung von Multi-Core Architekturen mit hierarchischem Speicher vorgestellt. Dabei wurde zunächst das Affinity Modell von OpenMP 4.0 entwickelt und anschließend gezeigt, mit welchen Konzepten dies auch in C++-Programmen umgesetzt werden kann. Das Einfließen in den Programmierstandard OpenMP, der von allen wesentlichen Compilerherstellern implementiert wird, macht die Ergebnisse dieser Arbeit der HPC-Gemeinde zugänglich.

Die fortschreitende Entwicklung der Hardware erfordert eine kontinuierliche Anpassung der Programmiermodelle. Dies gilt insbesondere für den Bereich des Hochleistungsrechnens, in dem die aktuellste Hardware eingesetzt und die höchste Leistung gefordert wird. Meine aktuellen Arbeiten zielen auf die Einbringung der entwickelten Konzepte für die Task-parallele Programmierung in den Standard OpenMP ab. Dabei wird berücksichtigt, dass moderne Systeme ein vermehrt dynamisches Verhalten in der Ausführungsleistung zeigen und Programmiersysteme damit umgehen müssen.

Literaturverzeichnis

[As09] Asanovic, K.; Bodik, R.; Demmel, J.; Keaveny, T.; Keutzer, K.; Kubiatowicz, J.; Morgan, N.; Patterson, D.; Sen, K.; Wawrzynek, J.; Wessel, D.; Yelick, K.: A View of the Parallel Computing Landscape. Commun. ACM 52/10, S. 56–67, Okt. 2009.

[CCZ07] Chamberlain, B.; Callahan, D.; Zima, H.: Parallel Programmability and the Chapel Language. International Journal of High Performance Computing Applications 21/3, S. 291–312, 2007.

[Ch05] Charles, P.; Grothoff, C.; Saraswat, V.; Donawa, C.; Kielstra, A.; Ebcioglu, K.; von Praun, C.; Sarkar, V.: X10: an object-oriented approach to non-uniform cluster computing. In: Proceedings of the 20th annual ACM SIGPLAN conference on Object-oriented programming, systems, languages, and applications. OOPSLA '05, ACM, San Diego, CA, USA, S. 519–538, 2005.

[Ei12] Eichenberger, A. E.; Terboven, C.; Wong, M.; an Mey, D.: The Design of OpenMP Thread Affinity. In: OpenMP in a Heterogeneous World. Bd. 7312, Lecture Notes in Computer Science, Springer, S. 15–28, 2012, ISBN: 978-3-642-30960-1.

[Ga95] Gamma, E.; Helm, R.; Johnson, R. E.; Vlissides, J.: Design Patterns: Elements of Reusable Object-Oriented Software. Addison-Wesley, 1995.

[Te08a] Terboven, C.; an Mey, D.; Schmidl, D.; Jin, H.; Reichstein, T.: Data and Thread Affinity in OpenMP Programs. In: MAW '08: Proceedings of the 2008 Workshop on Memory access on Future Processors: a solved problem? ACM, ACM, Ischia, Italy, S. 377–384, 2008, ISBN: 978-1-60558-091-3.

[Te08b] Terboven, C.; Spiegel, A.; an Mey, D.; Gross, S.; Reichelt, V.: Experiences with the OpenMP Parallelization of DROPS, a Navier-Stokes Solver Written in C++. In: OpenMP Shared Memory Parallel Programming. Bd. 4315, Lecture Notes in Computer Science, Springer, S. 95–106, 2008.

[Te12] Terboven, C.; Schmidl, D.; Cramer, T.; an Mey, D.: Task-Parallel Programming on NUMA Architectures. Euro-Par 2012 Parallel Processing/, S. 638–649, 2012.

[Te16] Terboven, C.: Abstractions for Performance Programming on Multi-Core Architectures with Hierarchical Memory, Diss., RWTH Aachen University, 2016.

[Ve98] Veldhuizen, T. L.: Arrays in Blitz++. In: ISCOPE '98: Proceedings of the Second International Symposium on Computing in Object-Oriented Parallel Environments. Springer-Verlag, London, UK, S. 223–230, 1998.

[WWP09] Williams, S.; Waterman, A.; Patterson, D.: Roofline: an insightful visual performance model for multicore architectures. Commun. ACM 52/4, S. 65–76, 2009, ISSN: 0001-0782.



Christian Terboven wurde am 22. Februar 1980 in Kamp-Lintfort geboren. Seit seinem Studium der Informatik arbeitet er am IT Center und Lehrstuhl für Hochleistungsrechnen der RWTH Aachen University. Dort hat er in 2015 die Leitung der HPC Gruppe übernommen. Seit 2006 ist Christian Terboven Mitglied im OpenMP Language Committee, dem Gremium zur Weiterentwicklung des Sprachstandards. Er leitet dort die Affinity Teilgruppe.

Analysestrategien für konfigurierbare Systeme[1]

Alexander von Rhein[2]

Abstract: Viele moderne Softwaresysteme, wie z.B. Linux, lassen sich mit Tausenden von Konfigurationsoptionen anpassen. Mit Hilfe dieser Optionen kann eine oft astronomisch große Anzahl unterschiedlicher Systemvarianten hergestellt werden. Diese Variantenvielfalt bringt enorme Herausforderungen hinsichtlich der Korrektheit der Systemvarianten mit sich. In dieser Arbeit entwickeln und untersuchen wir Techniken zur Analyse von variantenreichen Systemen. Insbesondere vergleichen wir drei Ansätze zum Design solcher Analysen konzeptionell und praktisch (z.B. hinsichtlich ihrer Laufzeit und der Vollständigkeit ihrer Ergebnisse).

1 Einleitung

Ein konfigurierbares System ermöglicht es, individuelle Systemvarianten anhand einer Auswahl von Konfigurationsoptionen abzuleiten. Konfigurationsoptionen werden in der Praxis, zum Beispiel, mit Präprozessorannotationen (#ifdefs) implementiert. Um bei der Systemanalyse mit der oft sehr großen Anzahl möglicher Konfigurationen fertig zu werden, implementieren verschiedene Analyseansätze (z.B. zur Verifikation von konfigurierbaren Systemen) verschiedene Strategien, um die Konfigurierbarkeit zu berücksichtigen.

Eine einfache Strategie, die in der Praxis häufig angewendet wird, besteht darin, nur eine Teilmenge aller Systemvarianten zu verwenden. Während diese *Stichproben Strategie* den Analyseaufwand deutlich reduziert, sind die erhaltenen Informationen notwendigerweise unvollständig, da einige Varianten nicht analysiert werden. Eine zweite Strategie besteht darin, die gemeinsamen und die optionalen Komponenten eines konfigurierbaren Systems zu identifizieren und jede Komponente separat zu analysieren (diese Strategie wird auch als *featurebasierte* Strategie bezeichnet). Als dritte Strategie wurde in den letzten Jahren die *familienbasierte* Strategie entwickelt. Familienbasierte Ansätze analysieren die Codebasis eines konfigurierbaren Systems als Ganzes und nicht einzelne Varianten oder Teile des Systems. So können Gemeinsamkeiten einzelner Varianten genutzt werden um den Analyseaufwand zu reduzieren. Jede dieser drei Strategien hat Vor- und Nachteile, die sogar ihre Anwendung verhindern können (z.B. benötigt die familienbasierte Strategie typischerweise viel Arbeitsspeicher).

Das Ziel dieser Dissertation ist es, die effiziente Analyse von konfigurierbaren Systemen zu ermöglichen, selbst wenn die oben genannten Strategien nicht anwendbar

[1] Englischer Titel der Dissertation: “Analysis Strategies for Configurable Systems” [Rh16]
[2] CQSE GmbH, rhein@cqse.eu

sind (falls z.B. die familienbasierte Strategie aufgrund von Speicherbeschränkungen nicht anwendbar ist). Zu diesem Zweck haben wir ein Modell entwickelt, das die Schlüsselaspekte der Analysestrategien für konfigurierbare Systeme unabhängig von ihrer Implementierung und den Analysetechniken (z. B. Typprüfung, Modelchecking und Taint-Propagation) modelliert. Anhand dieses Modells haben wir eine Reihe von Analysestrategien für konfigurierbare Systeme entwickelt und implementiert. Um mehr über Vor- und Nachteile einzelner Strategien zu lernen, haben wir diese Analysestrategien in einer Reihe empirischer Studien verglichen.

Eines unserer wichtigsten Ergebnisse ist, dass familienbasierte Analysen weniger Ausführungszeit als die meisten stichprobenbasierten Analysen benötigen und gleichzeitig in der Lage sind, definitive Aussagen über alle Varianten eines konfigurierbaren Systems zu machen. Darüber hinaus identifizierten wir die Vor- und Nachteile von Analysestrategien und deren Vermeidung durch die Kombination von Strategien.

Wir haben zwei Schlüsselprobleme, die in Analysen für konfigurierbare Systeme auftreten, identifiziert und haben Unterstützungstechniken entwickelt, um diese zu lösen. Diese Techniken sind allgemein und gelten über unsere Forschung hinaus. Die entwickelten Techniken sind eine Methode zur Vereinfachung von Präsenzbedingungen (*presence-condition simplification*) und Methoden zur Kodierung von Variabilität (*variability encoding*). Die Vereinfachung der Präsenzbedingungen bietet eine einfache Methode, um die Größe der Ausgabe oder die interne Datenstruktur von Analysen zu reduzieren. In dieser Zusammenfassung gehen wir nicht näher auf presence-condition simplification ein. Wir verweisen auf die veröffentlichte Dissertation [Rh16]. Variabilitätskodierung ist eine Programmtransformation zur Umwandlung von Variabilität zur Übersetzungszeit in Variabilität zur Laufzeit bereit, was viele familienbasierte Analysen ermöglicht (siehe Abschnitt 2).

Konfigurierbare Systeme sind Systeme, die maßgeschneidert werden können, um verschiedene Rollen in unterschiedlichen Umgebungen und Anwendungsszenarien zu erfüllen. Konfigurationsoptionen oder “Features” definieren Unterschiede zwischen Systemvarianten.

Zur Illustration von konfigurierbaren Systemen stellen wir ein konfigurierbares Druckersystem vor. In der Praxis wurde ein ähnliches, größeres konfigurierbares System für Hewlett-Packard Drucker von der Owen Firmware Cooperative implementiert. Das Druckersystem besteht aus Features, die unterschiedliche Druck- und Scanfunktionen implementieren. Varianten des Systems können Treiber für eine Familie von Druckern darstellen. Einige der Varianten bieten Funktionalitäten wie Scannen oder Duplexdruck, und andere nicht (z.B. zur Preisreduzierung).

Das konfigurierbare Drucksystem verfügt über vier Features: *BasicPrinter*, *Duplex*, *Scan* und *Copy*. *BasicPrinter* bietet zentrale Druckfunktionen wie z.B. einseitiges Drucken, eine Benutzeroberfläche und Protokolle für den Druckeranschluss. Das Feature *Duplex* ermöglicht das automatische Drucken von Duplexseiten. *Scan*

```
1  class Printer {
2    void printMulti
3      (Page front, Page back) {
4      ... // print both pages on one sheet
5    }
6    #ifdef Duplex
7    void printDuplex
8      (Page front, Page back) {
9      ... // duplex printing
10   }
11   #endif
12   void print(Page front, Page back) {
13   #ifdef Duplex
14     printDuplex(front, back);
15   #else
16     printMulti(front, back);
17   #endif
18   }
19 }
```

(a) #ifdef Implementierung

```
1  class Printer {
2    void printMulti
3      (Page front, Page back) {
4      ... // print both pages on one sheet
5    }
6
7    void printDuplex
8      (Page front, Page back) {
9      ... // duplex printing
10   }
11
12   void print(Page front, Page back) {
13
14     printDuplex(front, back);
15
16
17
18   }
19 }
```

(b) Systemvariante mit den Optionen *BasicPrinter* und *Duplex*

Abb. 1: Eine ifdef-basierte Implementierung und eine Variante des Druckersystems. Leerzeilen in der Variante zeigen wo Code durch #ifdefs weggefallen ist.

ermöglicht es Benutzern, die Scan-Hardware einiger Drucker zu verwenden. *Copy* (erfordert das Feature *Scan*) ermöglicht es Benutzern, Dokumente zu duplizieren.

Abbildung 1a zeigt einen Ausschnitt einer Implementierung mit #ifdef Annotationen. Zur Kompillierzeit können die in den #ifdefs benutzten Optionen mit Werten belegt werden und so Varianten generiert werden. Abbildung 1b zeigt eine Variante.

Für unsere Experimente haben wir sowohl sehr große Systeme, wie den Linux Kernel oder das Datenbanksystem SQLite, als auch kleinere Systeme genutzt. Aufwändige Analysen, wie zum Beispiel Modelchecking, können nicht ohne weiteres auf großen Softwaresystemen angewandt werden. Um unsere Analysen in realistischem Kontext zu evaluieren, haben wir Entwürfe für konfigurierbare Systeme, die von anderen Forschern veröffentlicht wurden, genutzt und entsprechende Programme in C und Java implementiert. Diese Systementwürfe sind in der Forschungsgemeinschaft akzeptiert und werden oft verwendet (z.B. [Cl11; SRA13]). Unsere Implementierungen wurden mittlerweile als Benchmarks von anderen Forschern verwendet (z.B. [Be15]), so dass sie selbst einen Beitrag zur Forschung darstellen.

2 Variabilitätskodierung

Bevor wir verschiedene Strategien für die Analyse von konfigurierbaren Systemen bewerten, müssen wir Mittel entwickeln, um die Strategien umzusetzen. Für die variantenbasierte Strategie ist nahezu kein Aufwand erforderlich, da die Analyseobjekte (Varianten) normale, nicht konfigurierbare Systeme sind. Solche Systeme können oft mit handelsüblichen Werkzeugen analysiert werden. Für die stichprobenbasierte

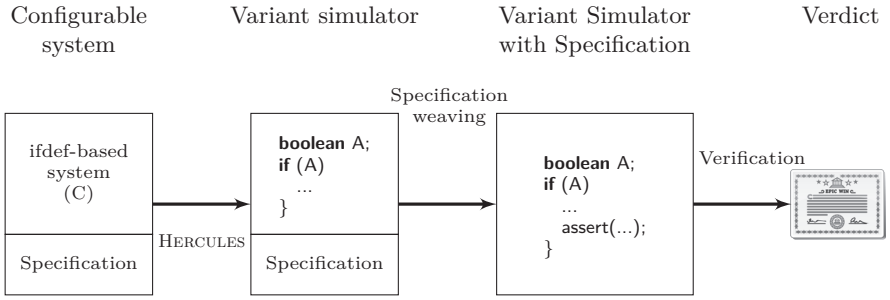


Abb. 2: Variabilitäts-gewahre Verifikation.

Strategie müssen geeignete Stichproben generiert werden. Dieses Thema wurde bereits von anderen Forschern ausführlich erörtert (z.B. [NL11; OMR10]). Die verbleibende Aufgabe, die wir hier ansprechen, ist die Umsetzung der familienbasierten Strategie.

Dafür stellen wir *Variabilitätskodierung* vor, eine Programmtransformation, die aus einem konfigurierbaren System einen *Variantensimulator* erzeugt. Die Transformation kodiert die Variabilität des konfigurierbaren Systems, die normalerweise zur Kompillierzeit aufgelöst wird, als dynamische Variabilität in einem Variantensimulator. Eine wichtige Eigenschaft der Variabilitätskodierung ist, dass der resultierende Simulator das Verhalten einer beliebigen Variante (auf einer abstrakten Ebene) simulieren kann. Durch diese *Verhaltenserhaltung* können wir Simulatoren in familienbasierten Analysen von konfigurierbaren Systemen einsetzen und auf Basis der Analyseergebnisse Aussagen über alle Varianten treffen (Abschnitt 3).

Bei der Transformation werden Konfigurationsoptionen mit globalen Programmvariablen kodiert, und statische Ausführungsbedingungen (z.B. #ifdefs) werden mit bedingten Anweisungen in der Zielsprache (if-Anweisungen) kodiert. Classen et al. [Cl11] und Post und Sinz [PS08] haben manuelle Ansätze verwendet, die der Variabilitätskodierung ähnlich sind. Unser Ansatz zur Variabilitätskodierung ist *automatisch* und kann auf große Codebasen angewendet werden.

Anwendungsszenario Hier beschreiben wir eine Anwendung der Variabilitätskodierung unter Verwendung von Beispielcode aus dem Linux Kernel. Insbesondere verwenden wir Code aus der Variability Bug Database, einer Sammlung von realen Bugs, die im Linux Kernel gefunden wurden und nur in bestimmten Konfigurationen vorkommen. In diesem Szenario nutzen wir Modelchecking um (vereinfachte) Programme aus der Bug-Datenbank zu verifizieren. Wir können zeigen, dass Modelchecking genau die Konfigurationen als fehlerhaft identifiziert, die auch in der Datenbank dokumentiert sind. Der Fehler Bug1[3] (Abb. 3a) verursacht einen Aufruf des Linux `BUG()` Makros, wenn die Konfigurationsoption `VLAN_8021Q` deaktiviert

[3] `http://vbdb.itu.dk/#bug/linux/d549f55`

```
1  #include <assert.h>
2  #include <stdbool.h>
3  #include <stdlib.h>
4  #ifdef CONFIG_VLAN_8021Q
5  void* vlan_dev_real_dev() {
6    return NULL;
7  }
8  #else
9  void* vlan_dev_real_dev() {
10     assert(false); // (3) ERROR
11     return NULL;
12 }
13 #endif
14 #if defined(CONFIG_IPV6) ||
15     defined(CONFIG_VLAN_8021Q)
16 static int ocrdma_inet6addr_event() {
17   vlan_dev_real_dev(); // (2)
18   return 0;
19 }
20 #endif /* IPV6 and VLAN */
21 int main(int argc, char** argv) {
22 #if defined(CONFIG_IPV6) ||
23     defined(CONFIG_VLAN_8021Q)
24   ocrdma_inet6addr_event(); // (1)
25 #endif
26   return 0;
27 }
```

(a) Ursprünglicher Code von Bug1

```
1  ...
2  int id2i_config_ipv6;
3  int id2i_config_vlan_8021q;
4  extern int __VERIFIER_nondet_int();
5  void id2i_init() {
6    id2i_config_vlan_8021q =
7      __VERIFIER_nondet_int();
8    id2i_config_ipv6 =
9      __VERIFIER_nondet_int();
10 }
11 void *_5_vlan_dev_real_dev() {
12   return ((void *) 0);
13 }
14 void *_6_vlan_dev_real_dev() {
15   (0 ? ((void ) 0) : __assert_fail(...);
16   return ((void *) 0);
17 }
18 static int ocrdma_inet6addr_event() {
19   if (((id2i_config_vlan_8021q ) )) {
20     _5_vlan_dev_real_dev();
21   }
22   if ((((! id2i_config_vlan_8021q) ) )) {
23     _6_vlan_dev_real_dev();
24   }
25   return 0;
26 }
27 int main(int argc , char **argv ) {
28   id2i_init();
29   if ((((! id2i_config_vlan_8021q) &&
30         id2i_config_ipv6) ||
31        id2i_config_vlan_8021q)) {
32     ocrdma_inet6addr_event();
33   }
34   return 0;
35 }
```

(b) Code des Variantensimulators für Bug1

Abb. 3: Ursprünglicher und variabilitätskodierter Quellcode (erzeugt mit unserem Tool Hercules) von Bug1. Der Programmpfad, der den Fehler verursacht, wird mit Kommentaren im ursprünglichen Code kommentiert. Vertikale Balken zeigen, welche Features und Anweisungen im Originalcode (links) zu welchen Features und Anweisungen im Simulator (rechts) gehören.

ist und die Option IPV6 aktiviert ist. Daher ist die Präsenzbedingung für den Fehler IPV6 $\wedge \neg$VLAN _8021Q.

Abbildung 2 zeigt den Ablauf der Verifikation eines konfigurierbaren Systems. Wir verwenden unser Tool Hercules, um die #ifdef-Variabilität in Laufzeit-Variabilität umzuwandeln (Abb. 3b). Im nächsten Schritt fügen wir die Systemspezifikation in den Code ein. In diesem Szenario ist die Spezifikation (assert(false) wird nicht erreicht) bereits im Code vorhanden. Dann verifizieren wir den Code mit einem Model Checker (siehe Abschnitt 3).

Bei der Variabilitätskodierung werden Konfigurationsoptionen mit globalen Variablen (*Featurevariablen*) dargestellt. Die Featurevariablen werden mit Rückgabewerten der speziellen Funktion __VERIFIER_nondet_int() initialisiert. Es wird da-

von ausgegangen, dass diese Funktion einen beliebigen Wert vom Typ int zurückgibt [Be15]. In unserem Fall bedeutet diese Annahme, dass alle vier Kombinationen von id2i_config_ipv6 == 0 oder id2i_config_ipv6! = 0 und id2i_config_vlan_8021q == 0 oder id2i_config_vlan_8021q! = 0 im Programm erreichbar sind. Dies entspricht der Abdeckung aller gültigen Konfigurationen des ursprünglichen konfigurierbaren Systems.

Für die Überprüfung des generierten Programms haben wir den Modelchecker CPAchecker erweitert. Die Erweiterungen werden im Abschnitt 3 näher beschrieben. Sie ermöglichen CPAchecker, die Programmausführung in allen gültigen Konfigurationen zu prüfen und ein zusammengefasstes Ergebnis auszugeben. Nach der Überprüfung von Bug1 gibt CPAchecker folgende Fehlerbedingung aus: !Id2i_config_vlan_8021q@0 id2i_config_ipv6@0. Diese entspricht genau der in der Bug Datenbank angegebenen Bedingung $\mathsf{IPV6} \wedge \neg \mathsf{VLAN\_8021Q}$.

Diese Illustration zeigt, dass die Kombination von Variabilitätskodierung und Modelchecking effektiv verwendet werden kann, um Fehler in konfigurierbaren Programmen zu identifizieren und präzise Fehlerbedingungen zu berichten.

Die Notwendigkeit eines formalen Korrektheitsbeweises Variabilitätskodierung wurde in mehreren Forschungsprojekten eingesetzt und ermöglichte beträchtliche Analysebeschleunigungen im Vergleich zur variantenbasierten Analyse [Ap11; Ap13; SRA13]. In diesen Projekten und im vorherigen Beispiel verwendeten die Subjektsysteme einfache Sprachkonstrukte, so dass wir sicher davon ausgehen konnten, dass der generierte Code das Verhalten des ursprünglichen Programms erhalten hatte und dass die nachfolgenden Analysen gültig waren. Es war jedoch unklar, ob Variabilitätskodierung in Gegenwart von anderen Sprachfunktionen, wie Vererbung oder switch Anweisungen umzusetzen ist. Variabilitätskodierung ist eine komplexe Programmtransformation, und in der Praxis können sogar relativ einfache automatische Refaktorisierungs-Werkzeuge das Verhalten bei Vorhandensein von statischen Konfigurationsoptionen nicht erhalten.

Um unser Verständnis der Variabilitätskodierung zu verbessern, haben wir die Verhaltenserhaltung in der Variabilitätskodierung formal untersucht. Wir haben die Variabilitätskodierung, basierend auf einer kleinen, formalen Sprache definiert und formal bewiesen, dass Verhaltenserhaltung gilt. Für den Beweis haben wir den Kontrollfluss von (beliebigen) Systemvarianten und entsprechenden Variantensimulatoren als Transitionssysteme modelliert. Auf diesen Transitionssystemen haben wir schwache Bisimulation bewiesen und so gezeigt, dass das Verhalten der Varianten korrekt von Variantensimulatoren simuliert wird. Außerdem haben wir diskutiert, wie weitergehende Sprachmerkmale behandelt werden können (z.B. Vererbung).

3 Familienbasiertes Modelchecking

In diesem Abschnitt stellen wir unseren Ansatz zum effizienten, familienbasierten Modelchecking von konfigurierbaren Systemen vor. Unser neuer Ansatz basiert

auf einem modularen, zweistufigen Verfahren: Zuerst verwenden wir Variabilitätskodierung, um Varianten-Simulatoren zu erzeugen. Im zweiten Schritt wird ein Modelchecking-Werkzeug eingesetzt, um zu prüfen, ob die generierten Simulatoren alle Spezifikationen der jeweiligen Systeme erfüllen. Wenn das Werkzeug diese Eigenschaft beweisen kann, erfüllen alle Varianten auch ihre Spezifikationen (da die Variabilitätskodierung das Variantenverhalten erhält).

Für Modelchecking von Simulatoren könnten wir existierende Modelchecking Werkzeuge einsetzen, die, mit genügend Zeit und Speicher, gültige Resultate liefern würden. Allerdings können wir die Effizienz mit *variabilitätsgewahren* Optimierungen noch verbessern. Diese Optimierungen nutzen das Wissen über die Kodierung von Variabilität in Simulatoren.

Algorithmus 1: Algorithmus mit Pfadvereinigung und Variabilitätseinschränkung.

```
   Data: initial state q_0
   Result: Set reached_states
1  global-constraint := true
2  add(reached_states, q_0)
3  enqueue(wait_queue, q_0)
4  while ¬ empty(wait_queue) do
5      let v := dequeue(wait_queue)
6      if hasNoPropertyViolations(v) then
7          foreach w ∈ direct_succ(v) do
8              if sat(w_pc ∧ global-constraint) then
9                  if ¬∃ z ∈ reached_states : z_e = w_e then
10                     add(reached_states, w)
11                     enqueue(wait_queue, w)
12                 else
13                     let z ∈ reached_states with z_e = w_e
14                     if z_pc ⇏ w_pc then
15                         // new state is not completely
                           covered by existing state
16                         let z_pc := w_pc ∨ z_pc
17                         if z ∉ wait_queue then
18                             // explore the state again
19                             enqueue(wait_queue, z)
20                         end
21                     end
22                 end
23             end
24         end
25     else
26         global-constraint := global-constraint ∧ ¬v_pc
27     end
28 end
29 return reached_states
```

Beim Überprüfen eines Programms konstruiert ein Modelchecker einen Erreichbarkeitsgraphen, in dem jeder Knoten einen konkreten Zustand darstellt, den das Programm während der Ausführung erreichen kann. Falls einer der erreichbaren Zustände ein Fehlerzustand ist, wird ein Fehler im Programm erkannt. In *explizitem Modelchecking* werden konkrete Variablenwerte in den Zuständen gespeichert. Algorithmus 1 (ohne die farbigen Rechtecke) zeigt einen einfachen Breitensuche-Algorithmus für den Aufbau und die Prüfung eines solchen Erreichbarkeitsgraphen.

Unsere Optimierung besteht aus drei Schritten: (1) Einführung von Präsenzbedingungen, (2) Pfadvereinigung und (3) Variabilitätseinschränkung. Die Optimierungen führen zu einer Verkleinerung des generierten Zustandsraumes und damit zur Beschleunigung der Analyse (*wobei die Korrektheit und Vollständigkeit der Ergebnisse erhalten bleibt*).

Als ersten Schritt führen wir Präsenzbedingungen für Zustände im Erreichbarkeitsgraphen ein. Eine Präsenzbedingung ist eine aussagenlogische Formel über Konfigurationsoptionen, die bestimmt, in welchen Systemvarianten ein Zustand erreichbar ist. Die Nutzung von Präsenzbedingungen ermöglicht uns den nächsten Optimierungsschritt.

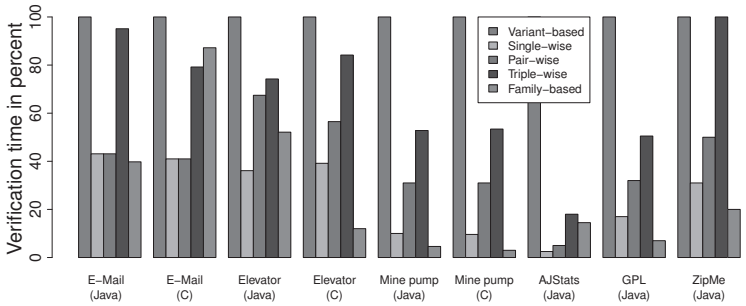


Abb. 4: Vergleich der Laufzeiten für die Verifikation der Systeme; Die Laufzeit der variantenbasierten Strategie definiert den 100 % Wert

Die Pfadvereinigung erlaubt es uns gleiche Zustände, die in verschiedenen Varianten vorkommen, gemeinsam zu behandeln. Das violette Rechteck in Algorithmus 1 zeigt die erforderliche Änderung. Wir erlauben dem Algorithmus verschiedene erreichbare Zustände als einen Zustand zu behandeln, wenn sie den gleichen Programmzustand repräsentieren (selbst wenn sie in unterschiedlichen Varianten vorkommen).

Die dritte Optimierung, Variabilitätseinschränkung, verhindert, dass Teile des Erreichbarkeitsgraphen untersucht werden, die nur schon als fehlerhaft erkannte Varianten repräsentieren. Diese Optimierung wird durch die roten Rechtecke in Algorithmus 1 gezeigt. Sobald ein Zustand als fehlerhaft erkannt wird, werden die durch ihn repräsentierten Systemvarianten von der weiteren Suche ausgeschlossen. Dieses Verhalten ermöglicht einen direkten Vergleich mit variantenbasierten Modelchecking, bei dem auch höchstens ein Fehler pro Variante gefunden werden kann.

Evaluierung Um die verschiedenen Analysestrategien empirisch zu vergleichen, haben wir neun konfigurierbare Systeme ausgewählt und jeweils mit den varianten-, familien- und stichprobenbasierten Strategien analysiert. Zur Analyse haben wir die Modelchecker Java Pathfinder (für Java) und CPAchecker (für C) verwendet. Zur Evaluierung der familienbasierten Strategie haben wir die Werkzeuge dabei mit den oben beschriebenen Optimierungen erweitert.

Wir haben die stichprobenbasierte Strategie in drei Ausprägungen untersucht: single-wise, pair-wise und triple-wise. Die Ausprägungen unterscheiden sich darin, welche Kombinationen von Konfigurationsoptionen in der Stichprobe abgedeckt werden. Bei der pair-wise Stichproben-Strategie werden z.B. alle Paare von Konfigurationsoptionen in mindestens einer Variante in der Stichprobe zusammen ausgewählt.

Abbildung 4 zeigt ein Ergebnis dieser Evaluierung. Die Balken geben jeweils an, wie lange die Analyse aller Systemvarianten mit der jeweiligen Strategie dauert (bei stichprobenbasierter Strategie: alle Varianten in der Stichprobe). Die Abbildung zeigt, dass die familienbasierte Strategie immer schneller zum Ergebnis kommt als

die variantenbasierte Strategie. Weiterhin sind einige stichprobenbasierte Analysen manchmal schneller als die familienbasierte Strategie. Man muss hier jedoch berücksichtigen, dass die stichprobenbasierten Analysen oft nur sehr wenige Systemvarianten analysieren und damit viel weniger aussagekräftige Ergebnisse erzeugen.

4 Weitere Themen und Fazit

Konfigurierbare Systeme haben oft eine riesige Anzahl von Varianten, die die variantenbasierte Analyse sehr teuer macht. Das Ziel dieser Arbeit ist, die effiziente Analyse hochkonfigurierbarer Softwaresysteme zu ermöglichen. Wir haben uns mit der Frage beschäftigt, wie Programmanalysen (z.B. Datenflussanalyse und Modelchecking) auf konfigurierbare Softwaresysteme angewendet werden können. Zu diesem Zweck entwickelten wir das PLA-Modell zur Beschreibung von Analysestrategien für konfigurierbare Systeme (nicht in dieser Zusammenfassung beschrieben). Das PLA-Modell umfasst die vier grundlegenden Analysestrategien (varianten-, stichproben-, feature- und familienbasiert) und verschiedene Kombinationen dieser Strategien. Basierend auf dem Modell diskutierten wir Vor- und Nachteile verschiedener Kombinationen von Basisstrategien. Darüber hinaus haben wir mehrere Analysestrategien implementiert und sie evaluiert. Unsere Evaluierungen haben gezeigt, dass abhängig von dem analysierten konfigurierbaren System und der Art der Analyse (z.B. Typprüfung oder Modelchecking) die Auswahl einer guten Analysestrategie entscheidend für die Effizienz ist. Die Ergebnisse der familien- und variantenbasierten Strategien decken alle Varianten ab; die stichprobenbasierten Strategie analysiert nur einen Teil. Darüber hinaus ist die familienbasierte Strategie oft schneller als die stichproben- und variantenbasierten Strategien. Die familienbasierte Strategie kann jedoch mehr Hauptspeicher verbrauchen andere Strategien.

Eine familienbasierte Analyse, die durch eine variabilitätsgewahre Datenstruktur unterstützt wird, ermöglicht die Analyse von sehr großen Systemen. Wir haben diese Kombination in einer Taint-Propagation-Analyse der Kommunikation zwischen Apps eines Android App Stores verwendet. Durch die Kombination der familien- und variantenbasierten Strategien lässt sich die Analyseleistung verbessern. Diese Analyse und ihre Evaluierung werden in dieser Zusammenfassung nicht weiter diskutiert.

Die Techniken, die in dieser Dissertation entwickelt wurden, insbesondere die Vereinfachung von Präsenzbedingungen und die Variabilitätskodierung, haben Auswirkungen über unsere eigene Forschung hinaus. Sie werden in vielen familienbasierten Analysen verwendet oder ermöglichen diese erst [Ap13; SRA13]. Die Auswirkungen dieser Arbeit auf die Praxis werden vor allem durch unsere Werkzeuge (Hercules, SPLverifier und SIFTA) und unsere Auswertungen dargestellt. Diese Tools und Evaluierungen helfen Entwicklern von Analysen für konfigurierbare Systeme entweder direkt oder bei der Wahl der Analysestrategie.

Literaturverzeichnis

[Ap11] Apel, S.; Speidel, H.; Wendler, P.; von Rhein, A.; Beyer, D.: Detection of Feature Interactions using Feature-Aware Verification. In: Proceedings of the International Conference on Automated Software Engineering (ASE). IEEE, S. 372–375, 2011.

[Ap13] Apel, S.; von Rhein, A.; Wendler, P.; Größlinger, A.; Beyer, D.: Strategies for Product-Line Verification: Case Studies and Experiments. In: Proceedings of the International Conference on Software Engineering (ICSE). IEEE, S. 482–491, 2013.

[Be15] Beyer, D.: Software Verification and Verifiable Witnesses (Report on SV-COMP 2015). In: Proceedings of the International Conference on Tools and Algorithms for the Construction and of Analysis Systems (TACAS). Springer-Verlag, S. 401–416, 2015.

[Cl11] Classen, A.; Heymans, P.; Schobbens, P.-Y.; Legay, A.: Symbolic Model Checking of Software Product Lines. In: Proceedings of the International Conference on Software Engineering (ICSE). ACM, S. 321–330, 2011.

[NL11] Nie, C.; Leung, H.: A Survey of Combinatorial Testing. ACM Computing Surveys 43/2, 11:1–11:29, 2011.

[OMR10] Oster, S.; Markert, F.; Ritter, P.: Automated Incremental Pairwise Testing of Software Product Lines. In: Proceedings of the International Software Product Line Conference (SPLC). Springer-Verlag, S. 196–210, 2010.

[PS08] Post, H.; Sinz, C.: Configuration Lifting: Verification meets Software Configuration. In: Proceedings of the International Conference on Automated Software Engineering (ASE). IEEE, S. 347–350, 2008.

[Rh16] von Rhein, A.: Analysis Strategies for Configurable Systems, Diss., University of Passau, Germany, 2016.

[SRA13] Siegmund, N.; von Rhein, A.; Apel, S.: Family-Based Performance Measurement. In: Proceedings of the International Conference on Generative Programming: Concepts & Experience (GPCE). ACM, S. 95–104, 2013.



Alexander von Rhein studierte von 2005 bis 2010 Informatik an der Universität Passau. Dort folgte im Juni 2016 seine Promotion (Prädikat "summa cum laude") am Lehrstuhl von Prof. Dr.-Ing. Sven Apel. Sein Forschungsinteresse gilt Softwareproduktlinien, automatisierter Verifikation und Analyse von Software sowie formalen und empirischen Methoden. Seit seiner Promotion arbeitet Alexander von Rhein als Berater für Software Qualität bei der CQSE GmbH in Garching. Er widmet sich der Entwicklung von Analysewerkzeugen mit speziellen Kundenanforderungen und dem Transfer von Forschungsergebnissen in die industrielle Praxis.

Messung und Implementierung von Internet-Backbone-Sicherheit: Aktuelle Herausforderungen, aufkommender Einsatz und zukünftige Entwicklungen [1]

Matthias Wählisch[2]

Abstract: Diese Arbeit geht von der Beobachtung aus, dass das Internet eine kritische Infrastruktur ist, die besonderen Schutz bedarf. Die Arbeit orientiert sich dabei an einer praktischen Sicht auf das Internet. Es wird das gesamte Ökosystem bestehend aus Netzwerk, Endgeräten und Diensten betrachtet, welche sowohl von aktuellen als auch zukünftigen Internet-Protokollen bedroht werden. Wir fassen Werkzeuge, Methoden und Messungen zur Verbesserung des aktuellen Standes von Wissenschaft und Technik und der operativen Praxis auf Basis der Dissertation [Wä16] zusammen.

1 Einleitung

Das Internet ist ein global verteiltes Netzwerk, welches aus aus mehr als 60.000 autonomen Systemen besteht. Das primäre Ziel eines jeden autonomen Systems ist die Erreichbarkeit zwischen Internet-Teilnehmern sicherzustellen. Das Internet ermöglicht dabei die Kommunikation zwischen unterschiedlichen Anwendungen über die Grenzen eines jeden autonomen Systems hinweg. Dieses Ökosystem, bestehend aus Netzen, Endgeräten und Diensten, unterliegt einem kontinuierlichen Wandel.

Für den Erfolg der heutigen digitalen Kommunikation ist die Offenheit des Internets maßgeblich verantwortlich, da sie den permanenten Technologiewandel unterstützt. Die Offenheit spiegelt sich sowohl in technischen als auch ökonomischen Aspekten wider. Einerseits ist es jedem autonomen System (AS) freigestellt, mit welchem anderen AS es Daten direkt austauscht, solange es ein gegenseitiges Einverständnis in der Etablierung sogenannter *Peering*-Beziehungen gibt. Andererseits kann jeder Betreiber eines autonomen Systems innerhalb seines Netzes beliebige Technologien einsetzen, so lange ein gemeinsames Protokoll zwischen den Netzen gesprochen wird. Ein derartiges offenes und dezentrales System fordert die Zuverlässigkeit und die Sicherheit heraus.

Der Bedarf nach Sicherheit

Heutige Informations- und Kommunikationssysteme sind fast alle über das Internet miteinander verbunden. Das Internet bildet für nahezu alle öffentlichen und industriellen

[1] Englischer Titel der Dissertation [Wä16]: "Measuring and Implementing Internet Backbone Security: Current Challenges, Upcoming Deployment, and Future Trends".

[2] Freie Universität Berlin, Institut für Informatik m.waehlisch@fu-berlin.de

Organisationen unseres Landes, aber auch für wesentliche Teile des gesellschaftlichen Lebens eine kritische Kommunikationsinfrastruktur. Es gibt eine Vielzahl von Ansätzen auf den unterschiedlichen Schichten, um die Sicherheit und Verfügbarkeit der Internet-Kommunikation zu erhöhen. Dabei ist zu beachten, dass ein Schutz auf den oberen Schicht nur eingeschränkt Wirkung entfalten kann, wenn die untere Schicht verwundbar bleibt. Als Beispiel sei ein Schutz zur Erhöhung der Verfügbareit auf der Transportschicht genannt, welcher unwirksam wird, wenn auf der darunterliegenden Netzwerkschicht eine Verkehrsumleitung zu einem anderen Endpunkt erreicht wird. Viele Sicherheitslösungen wurden in den letzten Jahren vorgeschlagen, aber überraschend wenige erfahren einen praktischen Einsatz.

1.1 Hintergrund: Heutige und zukünftige Internet-Kommunikation

Internet Core: Angriffe auf das Border Gateway Protocol

Die Bekanntmachung der Erreichbarkeit von Internet-Adresspräfixen (z.B. `10.20.0.0/16` für den Adressbereich `10.20.0.0-10.20.255.255`) erfolgt durch das *Border Gateway Protocol* (BGP) [RLH06]. Jeder BGP-Router informiert seine Nachbarn über seine eigenen IP-Präfixe und die ihm anderweitig bekannten Adressbereiche. Die Auswahlregeln, welche Präfixe bzw. Wege zu einem Präfix verteilt werden, sind komplex und nach außen weitgehend unsichtbar. Sie hängen vom jeweiligen Internet Service Provider (ISP) ab. Die Richtigkeit der verteilten BGP-Informationen ist aber für die korrekte Datenverteilung im Internet elementar. Durch Falschinformationen kann es zu einer ungewollten Datenumleitung kommen, wodurch sich Datenverkehr mitlesen lässt oder unzustellbar wird.

In der ursprünglichen Entwicklung von BGP gab es keine Schutzmechanismen gegen Falschinformationen. Das Protokoll [RLH06] basiert auf Vertrauen. Folglich kann jeder BGP-Router z.B. behaupten, der Besitzer eines IP-Präfixes zu sein, wodurch der Router Datenverkehr für dieses Präfix illegitim anzieht. Solche Fehler [Bu10] (auch *Prefix Hijack* genannt) passieren überraschend oft – ob unfreiwillig oder mutwillig ist dabei häufig unklar. Anfang 2012 wurden Internet-Standards verabschiedet und zum Einsatz gebracht, um sich vor einen Teil der Bedrohungen zu schützen. Internet-Betreiber haben nun die Möglichkeit, kryptographisch zu attestieren, welches autonome System welches IP-Präfix initial annoncieren darf. Die Arbeit [Wä16] analysiert erstmalig den Verbreitungsgrad und Gründe für die Nichtverbreitung dieses neuen Schutzverfahrens.

Internet Edge: Entfernte Angriffe auf Endgeräte

Neben Angriffen auf das Internet-Backbone sind Angriffe auf Internet-Endgeräte üblich und stellen eine ernstzunehmende Bedrohung dar. Das heutige Internet folgt weiterhin dem Ende-zu-Ende-Prinzip, auch wenn Middleboxes wie z.B. *Network Address Translation* die reine Lehre brechen. Endgeräte kommunizieren direkt miteinander. Das Internet sollte die Daten auf Basis der Endpunkt-IP-Adressen weiterleiten. Dies vereinfacht den Betrieb des

Internet-Cores erheblich, macht aber die Endgeräte angreifbarer. Wenn es keine separaten Filtermechanismen gibt, kann erst einmal jedes Endgerät Daten an jedes andere Endgerät schicken. Sogenannte *Denial of Service* Angriffe sehen vor, dass der Angreifer mehr Daten schickt, als das Netzwerk oder das Endgerät verarbeiten kann. Diese Angriffe sind für einen Großteil heutiger bösartig herbeigeführter Netzausfälle verantwortlich. Internet Service Provider und Endnutzer haben nur sehr eingeschränkte Möglichkeiten sich davor zu schützen, ohne dabei gleichzeitig die Offenheit des Internets aufzugeben. Es wurde untersucht, wieweit Angriffe auf Endgeräte abhängig vom Netzzugang sind.

Vom Edge zum Core: Informationszentrische Netze als zukünftige Netzarchitektur

Informationszentrische Netze (ICN) [Ah12] wurden entworfen, um sowohl die Verteilung von Inhalten als auch die Sicherheit im Netz zu verbessern. Die Kernidee besteht darin, dass das Netz die Daten inhaltsorientiert verteilt, statt ausschließlich basierend auf einer Endpunktadresse. ICN gibt das klassische Ende-zu-Ende-Pardigma des jetzigen Internets auf, um asynchrones, globales Caching im Netz nativ zu ermöglichen. Für Endgeräte ist es damit nicht mehr wichtig, woher der Inhalt kommt, sondern nur dass der richtige Inhalt zu einer passenden Anfrage ausgeliefert wird.

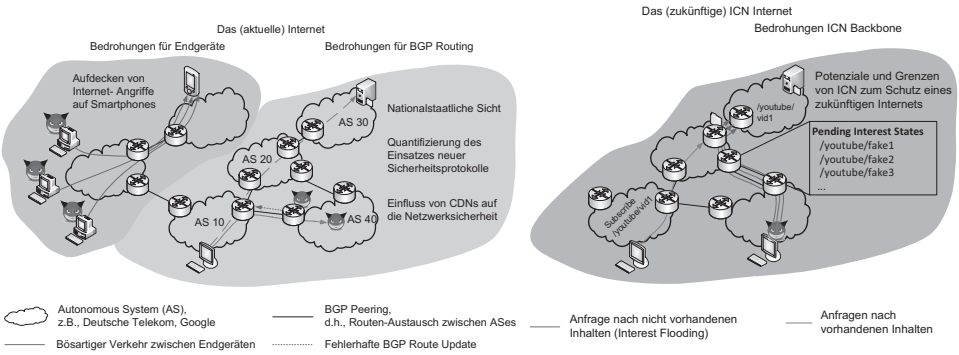
In ICN folgt die Kommunikation somit nur noch der Nachfrage nach Netzinhalten. Folglich sind Denial of Service Angriffe zwischen Endgeräten inhärent nicht mehr möglich – so lange ein Endgerät kein Interesse an Inhalten signalisiert hat, werden auch keine Daten an dieses Endgerät ausgeliefert. Insbesondere kann ein Angreifer nicht unaufgefordert Daten an ein anderes Endgerät schicken.

Named Data Networking (NDN) ist eine prominente Ausgestaltung von ICN. NDN implementiert dabei namensbasiertes Routing direkt auf der Netzwerkschicht. Entsprechend der Anfrage eines Endgeräts werden für die (delokalisierte) Datenverteilung dynamisch Zustände auf den Routern implementiert. Andere ICN-Ansätze funktionieren im Detail anders, verlangen aber ebenfalls eine dynamische Zustandsetablierung auf Core-Netzkomponenten. Es wurden die Auswirkungen der Entwurfsentscheidung in ICN auf die Sicherheit eines zukünftigen Internet-Backbones untersucht.

Nachfolgend geben wir einen genaueren Überblick über die einzelnen Beiträge der Arbeit [Wä16].

2 Beitrag: Eine nationalstaatliche Sicht auf das Internet-Backbone

Empirische Untersuchungen der globalen Internet-Infrastruktur werden seit mehr als zehn Jahren mit stetig steigender Beachtung durchgeführt. Analysen einer nationalen Sicht auf das Internet existieren bisher nur vereinzelt [KFR09]. Doch nicht allein aus gesellschaftlichen Aspekten ist eine landeszentrische Untersuchung der Internet-Infrastruktur von Interesse. Vielmehr begründen die nachfolgenden Fragestellungen einen eigenständigen Forschungsgegenstand.



(a) Angriffe auf die aktuelle Internet-Infrastruktur (b) Gefahren für informationszentrische Netze

Abb. 1: Aktuelle und zukünftige Bedrohungen im Internet

- Ist eine nationale Klassiffizierung auf IP- bzw. AS-Ebene im Internet sinnvoll möglich?
- Inwieweit lässt sich das IP-Routing national abgrenzen?
- Wie sind die strukturellen Abhängigkeiten des nationalen Netzes und dessen Robustheit beschaffen?
- Wie abhängig ist die Landesnetzinfrastruktur von dem internationalen (länderspezifischen) Transport?
- Wie kann das nationale Backbone gegen internationale Angriffe und 'Routen-Entführung' geschützt werden?
- Wie hängen Regionalität und Routen-Proximität voneinander ab?

Um diese Fragen zu beantworten, müssen nationale Teilnehmer und die Routing-Strukturen, welche innerstaatliche Verkehrsflüsse lenken, identifiziert, analysiert und bewertet werden. Das Interesse an einer kontinuierlichen, zeitnahen Beobachtung erfordert dabei eine fast vollständige Automatisierung dieser Analyseschritte. Die Arbeit [Wä16] hat sowohl Methoden als auch Software-Werkzeuge hierfür entwickelt. Dieser Lösungsvorschlag zur Gewinnung einer 'nationalen' Perspektive auf das Internet wurde für Deutschland qualitativ und quantitativ analysiert.

Der Untersuchungsschritt widmet sich zunächst den Möglichkeiten und Grenzen, IP-Adressbereiche und ihre zugehörigen Autonomen Systeme (ASe) länderspezifisch zuzuordnen und die deutschen Teilnehmer herauszufiltern. Obgleich alle vorhandenen administrativen Datenbestände stark verrauscht sind, gelingt es durch eine Verkettung von Prüf- und Korrekturwerkzeugen, die verbleibende Fehlermenge auf weniger als 3 % zu minimieren. Eine schlüsselwortbasierte Suche ermöglicht es hiernach, die wichtigsten autonomen Systeme Kernbranchen zuzuordnen, so dass im Ergebnis eine Liste klassifizierter autonomer Systeme vorliegt, welche deutschen Einrichtungen zuzuordnen sind oder welche IP-Blöcke deutsche Inhaber umfassen.

Unter Nutzung einschlägiger Monitordaten des Internets einschließlich gängiger Peering-Modelle werden in einem weiteren Schritt die minimalen Routing-Graphen zwischen den 'deutschen ASen' ermittelt. Hierbei werden auch alle landesfremden Transit-ASe und -

Pfade bestimmt, so dass eine Visualisierung und quantitative Bewertung des Routing-Teilgraphen möglich wird, der die landesinterne Infrastruktur vollständig funktionsfähig macht. Als Ergebnis umfangreicher Analysen und Datenaufbereitungen konnte eine Sammlung von Topologievisualisierungen erstellt werden, welche Strukturen, Schichten, Branchen und Anwendungsflüsse der deutschen Internet-Infrastruktur veranschaulichen.

Die Analyse der Branchengraphen hat gezeigt, dass ein Peering selten direkt zwischen Autonomen Systemen gleicher Industriebereiche stattfindet, sondern häufig einige wenige ASe – teilweise internationalen Ursprungs – verbindend wirken. Die Entscheidung für ein unmittelbares Peering ist dabei sehr kontextspezifisch. Finanzinstitute beispielsweise sind mit ihren ersten AS-Nachbarn weitgehend unabhängig von einem konkreten Ziel verbunden. Demgegenüber unterhalten Firmenprovider in 80% der Fälle Peering-Beziehungen dediziert abhängig von der Zielbranche. Interessanterweise dienen die Peering-Beziehungen nicht primär der Verkürzung der Inter-AS-Wege, denn die Distanzverteilungen der einzelnen Branchen sowie des gesamten DE-Graphen sind bis auf wenige Ausnahmen gleichmäßig verteilt mit einer mittleren Pfadlänge zwischen 3.0 und 3.4 AS-Knoten.

3 Beitrag: Protokolle zum Schutz des Internet-Backbone-Routings

3.1 Analyse des Einsatzes von RPKI auf Routern

Die Resource Public Key Infrastructure (RPKI) stellt kryptographische Datensätze bereit, mit denen sich der Besitz von Internet-Ressourcen (IP-Präfixe, AS-Nummern) nachweisen lässt [Hu09]. Diese Informationen sollen für die Erkennung von klassischen Präfix-Hijacking benutzt und zukünftig für die Aufdeckung von BGP-Pfadmanipulationen Einsatz finden. Der Erfolg dieser Technologie hängt von zwei Faktoren ab: (1) Wie zuverlässig lassen sich tatsächliche Hijacks erkennen? (2) Welche systemischen Auswirkungen hat der Einsatz von RPKI auf BGP-Routern?

Die Arbeit [Wä16] präsentiert erste Einsichten bezüglich der zusätzlichen Systemlast durch RPKI auf Standard-Routern nund diskutiert neue Angriffsvektoren, die sich hieraus ergeben. Die Ergebnisse basieren auf Experimenten. Hierfür wurden die notwendigen Protokolle und Funktionen in einer C-Bibliothek implementiert, welche auf BGP-Routern zum Einsatz kommt [Wä13a]. Diese Referenzbibliothek ist das erste Werkzeug zur echtzeitfähigen RPKI-Validierung von Internet-Routen. Auf Basis echter BGP-Ströme konnte nachgewiesen werden, dass auf sogenannter *Commodity Hardware* eine ausgesprochen geringe Zusatzlast durch RPKI hervorgerufen wird, welche einen Einsatz nicht verhindert.

Weiterhin wurden die invaliden Präfixen im Detail untersucht: Welche IP-Präfixe sind auf Basis aktueller RPKI-Daten richtig und welche falsch [WMS12]? Hierbei zeigte sich, dass ein überraschend großer Anteil an aktuell im Internet verbreiteten BGP-Announcement inkorrekt sind. Genauere Untersuchungen haben dann gezeigt, dass diese invaliden Präfixe primär Fehlkonfigurationen der RPKI durch die Besitzer der IP-Präfixe zuzuordnen sind. Die Arbeit [Wä16] schlägt eine Heuristik vor, um solche Fehler automatisch zu erkennen. Diese Heuristik hat schließlich dazu beigetragen, die Datenqualität innerhalb der RPKI zu erhöhen.

3.2 Analyse des Schutzes der Webserver-Infrastruktur durch RPKI

Das Web stellt einen der wichtigsten Dienste oberhalb des Internets dar. Durch das Umlenken des Internet-Verkehrs lässt sich die Kommunikation nicht nur mitlesen, sondern auch stören, so dass Webserver nicht mehr erreichbar sind. Folglich ist es von besonderem Interesse, die Webserver-Infrastruktur im Routing abzusichern. In der Arbeit [Wä15, Wä16] wurde untersucht, welche Web-Domains durch die RPKI geschützt sind, d.h. für welche IP-Präfixe von Webservern kryptographisch gesicherte RPKI-Objekte existieren.

Eine solche Analyse ist primär von der Herausforderung begleitet, die hinter einem Domain-Namen verborgene Webserver-Infrastruktur zu ermitteln. Hinter einem Namen (z.B. `www.google.com`) können sich mehrere IP-Adressen (z.B. `216.58.213.228` und `216.58.213.229`) verbergen. Sogenannte *Content Delivery Networks* erschweren diesen Auflösungsprozess insofern, als dass DNS-Antworten vom topologischen und geographischen Ort des Anfragenden (also des Web-Clients) abhängen.

In der Arbeit [Wä16] wurden 1 Millionen Domain Namen untersucht. Im Gegensatz zu bisherigen Verfahren zur Namensauflösung von Webadressen wurden sämtliche Namen mit und ohne `www`-Präfix aufgelöst. Es wurde gezeigt, dass dieser Schritt für die Abbildung auf IP-Präfixe abhängig vom konkreten Domain-Namen wichtig ist. Weiterhin wurde gezeigt, dass populäre Webseiten deutlich schwächer geschützt sind als unpopuläre, entgegen gängiger Vermutungen. Dies ist insbesondere dadurch begründet, dass populäre Webseiten durch Content Delivery Networks (CDN) ausgeliefert werden. Die Betreiber von CDNs haben die Präfixe ihrer eigenen Netze aber nicht durch die RPKI abgesichert, wie gezeigt werden konnte. CDN-Inhalte werden – wenn überhaupt – ausschließlich durch Dritt-Betreiber geschützt.

Die Arbeit [Wä16] hat weiterhin technologiespezifische Gründe identifiziert, die den Einsatz von RPKI verhindern. Hierbei wurden ökonomische und politische Aspekte analysiert. Insbesondere die Einsicht, dass die RPKI mit bestimmten Geschäftsmodellen von Internet Service Providern im Konflikt steht, stellt eine bis dahin wenig beachtete Erkenntnis dar.

4 Beitrag: Sind Angriffe auf Endgeräte abhängig vom Netzzugang?

Mobilgeräte wie z.B. Smartphones sind deutlich leistungsschwächer als herkömmliche PCs. Klassische Schutzverfahren wie Virenscanner oder Firewall können nur bedingt oder überhaupt nicht eingesetzt werden, da die vorhandenen Hardware-Ressourcen auf den Geräten den Leistungsanforderungen der Software nicht genügen. Insbesondere steht eine kontinuierliche Überwachung im Konflikt mit batteriebetriebenen Geräten. Demnach ist zu vermuten, dass Mobilgeräte eine besonderes Angriffsziel darstellen. Die Identifizierung von Netzbereichen, die diese Geräte beherbergen, kann einerseits durch Scans andererseits durch Meta-Informationen in den Datenbanken der Internet Registries erfolgen.

In dieser Arbeit [Wä16] wurde ein *Mobile Honeypot* [Wä13b] entworfen und erprobt, um zu untersuchen, inwieweit sich Angriffe auf Mobilgeräte im Vergleich zu sonstigen PCs

unterscheiden. Die Auswertungen basieren auf Daten von drei unterschiedlich angebundenen Honeypots (Darknet, UMTS, vollständig offenes Netz) über einen Messzeitraum von mehr als 1,5 Jahren.

5 Beitrag: Inhärente Bedrohungen in zukünftigen Netzarchitekturen

Informationszentrische Netze geben die Ende-zu-Ende-Kommunikation auf, um Endgeräte vor ungewollter Kommunikation zu schützen. Somit lassen sich *Denial of Service* Angriffe auf Endgeräte verhindern. In dieser Arbeit [Wä16] wurde erstmalig analysiert, welche Auswirkungen dieser fundamentale Entwurfsschritt der ICN-Netzarchitektur auf die Gefährdung eines zukünftigen Internet-Backbones hat [WSV13a, WSV13b]. Die Arbeit hat inhärente Kernprobleme herausgearbeitet. Die Aufgabe des Ende-zu-Ende-Paradigmas verlangt, dass dynamisch Zustände auf Routern in einem ICN-Backbone erzeugt werden. Diese Zustände sind getrieben durch (a) Endnutzer und (b) Daten. Folglich hat das Abrufen von Inhalten innerhalb eines ICN-Netzes direkten Einfluss auf die Kerninfrastruktur. Dies steht im fundamentalen Gegensatz zum jetzigen Internet, in dem Forwarding-Zustände unabhängig von Endgeräten oder Daten etabliert bzw. aktualisiert werden. Durch die Verhinderung von *Denial of Service* Angriffen auf Endgeräte wird das Internet-Backbone selber angreifbar. Das Problem wird von den Endgeräten auf das Backbone verlagert.

In der Arbeit wurden neue Angriffsvektoren und konkrete Angriffe definiert und diskutiert. Die Angriffe und deren Auswirkungen wurden simuliert und in praktischen Experimenten bestätigt. Weiterhin wurde ein analytisches Modell entwickelt, mit dem sich die Gefahrenlage abhängig von den Eigenschaften der Netztopologie quantifizieren lässt.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Die Dissertation [Wä16] betrachtet das Internet als kritische Infrastruktur. Dabei sollte der Schutz der selbigen nicht die offene Kommunikation einschränken, denn die Offenheit des Internets ist maßgeblich für den Erfolg digitaler Kommunikation verantwortlich. Es wurde eine praktische Sicht auf das Thema Internet-Sicherheit eingenommen, wobei wir das Internet-Core, Endgeräte und Dienste berücksichtigten. Wir stellten das gesamte Internet-Ökosystem in den Kontext aktueller und zukünftiger Netzarchitekturen und -protokolle. Neben neuen Methoden, Konzepten und Messungen trägt die Arbeit Werkzeuge zur Analyse und Verbesserung der Sicherheitslage im Internet bei. Die adressierten Fragestellungen der Dissertation [Wä16] sind in den Tabellen 1 und 2 zusammengefasst.

Unsere zukünftige Forschungsagenda wird auf den gewonnenen Erkenntnissen aufsetzen. Wir werden inbesondere zwei Fragestellungen weiter nachgehen: (1) Warum werden vorhandene Schutzmechanismen nur bedingt eingesetzt, obgleich es einen Bedarf nach einer sicheren Internet-Infrastruktur gibt; sind diese Gründe primär technisch oder ökonomisch motiviert? (2) Lassen sich Endgeräte und Backbone in einem zukünftigen, informationszentrischen Internet inhärent schützen, ohne die Offenheit des Internets zu gefährden?

	Forschungsfragen	Methodik				Kernergebnisse
		S	E	M	Data	
Internet Core	***Aufdecken einer nationalstaatlichen Sicht auf das verteilte Internet, um die für ein Land wichtige Kommuninkationsinfrastruktur zu schützen.***					
	Welche Internet-Ressourcen ermöglichen eine nationalstaatliche Sicht auf die Internet-Infrastruktur?	✘	✘	✓	RIR DB, Maxmind	Durch die Nutzung von IP-Blöcken statt IP-Präfixen konnten 25% mehr ASes identifiziert werden. Verglichen mit gängigen Datenbanken (Maxmind) führt eine Abbildung von IP-Blöcken auf Ländern nur zu 0,2% an False Positives und False Negatives.
	Wie robust ist das Internet-Routing aus Sicht kritscher Geschäftsbranchen?	✘	✘	✓	RIR DB, BGP Dumps	Mitglieder der gleichen Branchen tendieren nicht dazu, miteinander direkt Daten auszutauschen, sondern sind über einige ausgewählte nationale aber auch internationale ASes verbunden. Wieweit sich der erste Hop unterscheidet, hängt von der jeweiligen Branche ab.
	Quantifizierung der Herausforderungen beim Einsatz neuer Sicherheitsvefahren im Internet-Backbone.					
	Wieweit verringert RPKI die Leistungsfähigkeit von Backbone-Routern?	✘	✓	✓	BGP Dumps, RPKI Daten	Eine vollständige RPKI-Tabelle würde 5% mehr RAM auf herkömmlichen Routern benötigen. 10 Millionen ROA-Einträge können in weniger als einer Minute initial verarbeitet werden, wodurch ein Router unmittelbar nach dem Start einsatzfähig wäre. Die Validierung von echten BGP-Daten (max. $\approx$ 92.000 Einträge pro Minute) benötigt weniger als 0,5% der CPU-Ressourcen.
←	Wieweit verändert ein voranschreitener Einsatz von RPKI die Router-Leistung?	✘	✓	✘	künstliche BGP, RPKI Daten	Der Anteil von validen, invaliden und ungeschützten Präfixen kann die CPU-Last um eine Größenordnung verändern.
	Sind invalid BGP-Präfixe Hijacks?	✘	✘	✓	BGP Dumps, RPKI Daten	Zu Beginn des RPKI-Deployments waren 90% der invaliden Updates in der Miskonfiguration der RPKI begründet. In 90% der Fälle war das legitime AS nur einen AS-Hop entfernt.
	Können wir die Zahl der falsch konfigurierten RPKI-Objekte verbessern, indem wir eine geringe Menge an Änderungen vornehmen?	✘	✘	✓	BGP Dumps, RPKI Daten	30%-40% der invaliden Updates werden durch die fünf RPKI-Einträge bestimmt.
Core / Edge Dienste	***Analyse des Einflusses von CDNs auf die Netzwerksicherheit.***					
	Wieweit beeinflussen Namenspräfixe (`www.google.com` vs. `google.com`) den Ort der Webinhalte?	✘	✘	✓	Aktive DNS Daten	Für die ersten 100.000 Alexa-Domains stimmen 76% der IP-Präfixe für www und nicht-www überein. Für die verblebleibenden Domain-Namen weisen 94% das gleiche IP-Präfix auf.
	Für welche IP-Präfixe der Webserver-Infrastruktur gibt es eine Absicherung mittels RPKI?	✘	✘	✓	BGP Dumps, aktive DNS Daten	6% der 1 Millionen Alexa-Domains werden durch RPKI geschützt, wobei $\approx$ 0,09% der zugehörigen BGP Updates invalide sind.
←	Korreliert die Popularität von Webseiten mit einem erhöhten Schutz im Internet-Routing?	✘	✘	✓	BGP Dumps, RPKI, DNS	Populäre Webseiten sind schlechter geschützt. Nur 4% der 100.000 populärsten Webseiten sind überhaupt geschützt.
	Warum sind populäre Webseiten schlechter geschützt?	✘	✘	✓	BGP Dumps, RPKI, DNS	Populäre Webseiten werden in der Regel durch CDNs verteilt, welche RPKI bisher nicht einsetzen.

Tab. 1: Übersicht: Forschungsfragen, Experimente und Kernergebnisse der Dissertation [Wä16] (S=Simulation, E=Emulation, M=Messungen)

	Forschungsfragen	Methodik				Kernergebnisse
		S	E	M	Data	
	Aufdecken von Internet-Angriffen auf Mobilgeräte.					
Internet Edge	Wieweit hängen Angriffe vom Netzzugang ab?	✘	✘	✓	Honeypot-Daten	DSL-, UMTS- und Darknet-Knoten sind durch Angriffe in der gleichen Grösenordnung bedroht.
	Zielen Remote-Angriffe speziell auf mobile Endgeräte?	✘	✘	✓	Honeypot Daten	Angreifer führen selten mobil-spezifische Angriffe durch, sondern eher eher allg. Linux-spezifische Antriffe, indem sie z.B. das generische Linux-Dateisystem durchsuchen.
⟵	Ist der Angreiferort abhängig vom Ziel (mobile vs. stationäre Ziele)?	✘	✘	✓	BGP, Maxmind, honeypot Daten	Ein Grosteil der Angriffe wird von der selben Menge an autonomen Systemen durchgeführt. Die Top-5 ASes sind in China und Russland lokalisiert.
	Potentiale und Grenzen von ICN zum Schutz eines zukünftigen Internets.					
Internet Edge / Core	Welche Angriffe sind auf die ICN-Infrastruktur möglich?	✘	✓	✘	CCNx	Die Verwaltung von Zuständen kann zur Überlast auf den Routern und damit zum Datenverlust führen.
	Wieweit beeinflussen im Internet gängige Laufzeiten die Leistungsfähigkeit von ICN?	✘	✓	✘	analytisches Modell, PingER Daten, CCNx	Laufzeiten sind im Internet sehr heterogen und damit nur sehr schwer vorhersagbar. Laufzeiten, die gängie *Expiration Timer* überschreiten, führen zu einem erhöhten Aufwanf für die Verwaltung der Zusta”nde. Dies wiederum verlangt eine Überversorgung der Router-Hardware.
	Wie beeinflusst die Router-Hardware den Entwurf von ICN-Netzen?	✘	✓	✘	CCNx	Der Upstream Router des schwächsten Routers benötigt 50$-500% mehr Speicher als jeder andere Router im Netz. Für eine zuverlässige Datenzustellung müssten die Router gleichmäßig ausgestattet sein.
	Ist eine geringe Leistungsfähigkeit des Netzes ausschließlich eine Randeffekt von lokalen, insuffizienten Systemressourcen?	✓	✘	✘	ndnSim, Sprintlink-Topologie (Rocketfuel)	Nein. Unsere Simulationen haben geseizgt, dass ICN-Routing die zur Verfügung stehenden Übertragungsressourcen in realistischen Topologien häufig nicht ausnutzen kann, da es pro Zustand unkoordiniertes Hop-by-Hop Forwarding nutzt.

Tab. 2: Übersicht: Forschungsfragen, Experimente und Kernergebnisse der Dissertation [Wä16] (S=Simulation, E=Emulation, M=Messungen)



Matthias Wählisch Herr Wählisch studierte Informatik und Neue deutsche Literatur an der Freien Universität Berlin. In seiner Diplomarbeit erforschte er einen neuartigen Ansatz für die skalierbare, adaptive Gruppenkommunikation mittels bidirektionaler Präfix-Bäume. Von 2009 bis 2016 war Herr Wählisch wissenschaftlicher Mitarbeiter, Dozent und Projektleiter am Lehrstuhl Computer Systems & Telematics. Seit 2016 ist Matthias Wählisch Juniorprofessor an der Freien Universität Berlin und leitet den Bereich Internet-Technologien. Herr Wählisch verantwortet mehrere von ihm eingeworbene Drittmittelprojekte und ist Mitglied zahlreicher Programm- und Organisationskomitees wissenschaftlicher Veranstaltungen (u.a. IEEE ICNP 2013, ACM ICN 2017, ACM SIGCOMM 2017). Seine Forschungsleistungen wurden mehrfach ausgezeichnet, u.a. mit dem Nachwuchspreis 2011 des Leibniz-Kolleg Potsdam und dem Nachwuchspreis 2015 der Stiftung für Industrieforschung.

Design und Evaluation von Verfahren zur Ereigniserkennung in Sozialen Datenströmen[1]

Andreas Weiler[2]

Abstract: Die Dissertation beschreibt Forschungsergebnisse aus der Entwicklung und Evaluation von Verfahren zur Ereigniserkennung in Sozialen Datenströmen. Im ersten Teil präsentieren wir eine auf die besonderen Merkmale von Datenströmen fokussierte Technik zur Erkennung von Ereignissen in Echtzeit. Zusätzlich wird eine Technik zur Erkennung von Ereignissen in vordefinierten geographischen Bereichen vorgestellt. Im zweiten Teil analysieren wir die aufgabenbezogene sowie die Laufzeitperformance von mehreren modernen Techniken zur Ereigniserkennung unter Verwendung von realen Twitter Datenströmen. Um die Laufzeitperformance reproduzierbar zu vergleichen, basiert unsere Methode auf einem Datenstrommanagementsystem. Die aufgabenbezogene Performance wird basierend auf einer Reihe von neuartigen Maßen evaluiert. Diese Maße wurden speziell zur Gegenüberstellung der quantitativen und der qualitativen Performance entworfen. Der letzte Teil beschreibt das Design zweier Visualisierungen zur Unterstützung der visuellen Erkennung von Ereignissen. Mit Stor-e-Motion präsentieren wir eine Visualisierung zur Überwachung der fortlaufenden Entwicklung von Wichtigkeit, Stimmung und Kontext in benutzerdefinierten Themen. Mit SiCi Explorer präsentieren wir eine Visualisierung zur Überwachung von Ereignissen, Themen und Stimmungen über die Zeit und Raum für benutzerdefinierte geographische Bereiche. Für diese Visualisierung wird abschließend eine Benutzerstudie vorgestellt.

1 Einführung und Motivation

Der beispiellose Erfolg und die aktive Verwendung von Social Media Diensten führt zu einer gewaltigen Menge an nutzergenerierten Daten. Ein führender Akteur bei der Erzeugung von großen Datenvolumen als kontinuierlichen Datenstrom bestehend aus Kurznachrichten, den sogenannten Tweets, ist das soziale Netzwerk Twitter. Die Kürze der Tweets machen sie zu einem idealen Medium für die mobile Kommunikation. Deshalb steigt die Beliebtheit von Twitter als Quelle für aktuelle Nachrichten und Informationen über aktuelle Ereignisse stetig. Als Reaktion auf diesen Trend wurden zahlreiche Forschungsarbeiten über Techniken zur Ereigniserkennung, welche auf den Datenstrom von Twitter angewendet werden, vorgestellt. Jedoch weisen die meisten Techniken zwei Hauptmängel auf.
Erstens, tendieren sie dazu, sich exklusiv auf den Aspekt der Informationsgewinnung zu konzentrieren und ignorieren des öfteren die besonderen Eigenschaften von Datenströmen. Obwohl alle vorgestellten Arbeiten Nachweise über die Qualität der erkannten Ereignisse erbringen, stellt zweitens keine Arbeit einen Bezug zwischen dieser aufgabenbezogenen Performance und der Laufzeitperformance hinsichtlich Verarbeitungsgeschwindigkeit oder Datendurchsatz her. Insbesondere wurde bis heute keine quantitative oder vergleichende Evaluation dieser Aspekte durchgeführt.

[1] Englischer Titel der Dissertation: Design and Evaluation of Event Detection Techniques for Social Media Data Streams

[2] Universtität Konstanz, andreas.weiler@uni-konstanz.de

Die wissenschaftlichen Beiträge der Dissertation lassen sich in folgende Punkte aufgliedern.

- Wir haben zwei Verfahren zur Ereigniserkennung in Twitter Datenströmen entwickelt und in unsere Evaluationen eingebunden. Ein Verfahren ist spezialisiert für das Auffinden von nicht spezifizierten Ereignissen in Echtzeit, das andere Verfahren für Orts spezifische Ereignisse.
- Wir haben einen umfassenden Überblick über verwandte Arbeiten im Kontext von Verfahren zur Ereigniserkennung und existierende Evaluationsmethoden der Verfahren erstellt.
- Wir haben existierende Ereigniserkennungsverfahren in einem Datenstrommanagement System implementiert, um eine konsistente Evaluation der Verfahren zu ermöglichen.
- Wir haben zwei detaillierte Studien und Evaluationen der Verfahren in Bezug auf Qualität und Verarbeitungsgeschwindigkeit durchgeführt.
- Wir haben unsere Evaluationen auf einer allgemein verfügbaren Plattform implementiert, um weitere Evaluationen von neuartigen Erkennungsverfahren zu ermöglichen.
- Wir haben zwei Visualisierungsverfahren entworfen, entwickelt und evaluiert, welche die Erkennung von Ereignissen im Twitter Datenstrom unterstützen. Die erste Visualisierung erkennt Ereignisse in definierten Themen in Echtzeit und die zweite spezifische Ereignisse in definierten geographischen Bereichen.

2 Stand der Technik

In den letzten Jahren wurde das Thema Twitter und die aus dem Dienst entstehenden Datenmengen ein fester Bestandteil der wissenschaftlichen Community. Die Anzahl an Publikationen zum Thema Twitter wie aber auch zum Thema Ereigniserkennung ist in den letzten Jahren ständig gestiegen. Die Dissertation stellt einen umfassenden Überblick über die bestehenden wissenschaftlichen Arbeiten im Bereich Ereigniserkennung auf Twitter wie aber auch Arbeiten im Bereich Evaluationen der Verfahren zu Ereigniserkennung bereit. Hierbei haben wir wissenschaftliche Arbeiten untersucht, welche in den bereits existierenden Übersichten [FK15, Gu13, BR14] nicht vorhanden waren.
Ab dem Jahr 2013 kamen 14 neue Publikationen zum Thema Ereigniserkennung hinzu. Insgesamt kann man erkennen, dass der Hauptanteil an Verfahren die open-domain Erkennung von Ereignissen anstrebt (30 von 42). Zusätzlich gibt es Verfahren, welche sich auf die Erkennung von Ereignissen bei Epidemien oder Katastrophen spezialisiert haben. Die verwendeten Techniken der Verfahren umfassen statistische Modelle, Clustering und Wavelet Analysen. Hierbei werden stets verschiedene Dimensionen für die Analysen verwendet, wobei am häufigsten die Zeit- und Geographische Dimension oder eine Kombination der beiden verwendet wird. Aus dieser Kollektion an Verfahren an haben wir uns zwei bekannte Verfahren [WL11, Co12] für unsere Evaluationen ausgewählt, welche wir in einem Data Stream Management System implementiert haben.
Weiterhin haben wir alle Arbeiten auf ihre Evaluationsmethoden untersucht und diese in

einer umfangreichen Übersicht dargestellt. Als Ergebnis aus den Untersuchungen hat sich ergeben, dass trotz der großen Anzahl (42) an wissenschaftlichen Arbeiten keine umfangreichen Evaluationen hinsichtlich der Qualität der Ergebnisse oder der Verarbeitungsgeschwindigkeit der Verfahren durchgeführt wurden. Zum Beispiel haben nur zwei der untersuchten Arbeiten ihre Verfahren hinsichtlich Verarbeitungsgeschwindigkeit evaluiert. Es wurde zusätzlich ersichtlich, dass viele Arbeiten unrealistische Annahmen treffen. Diese Annahmen sind unter anderem dass die Verfahren auf Sammlungen von Daten mehrere Monate ausgeführt werden oder sämtliche Parameter der Verfahren statisch gesetzt werden ohne jegliche Evaluation ob der Datenstrom hiermit verarbeitet werden kann.
Weiterhin gibt es sehr große Unterschiede in den Evalutionskonfigurationen und Evaluationsmethoden. Die Anzahl an Tweets, welche als Eingabedaten für die Verfahren verwendet wird, liegen im Bereich von 0,6 Mio. bis zu über 1,2 Mrd. Eine Schwierigkeit hierbei ist zusätzlich, dass diese Sammlungen von Tweets nicht öffentlich zugänglich gemacht werden dürfen. Deshalb argumentieren wir, dass es nötig ist, die Verfahren in einem Data Stream Management System zu implementieren und auf denselben Eingangsdaten auszuführen, um vergleichbare Ergebnisse zu erhalten.

3 Wissenschaftliche Beiträge

3.1 Verarbeitung der Twitter Datenströme

Für die Verarbeitung der Twitter Datenströme wurde eine Plattform (siehe Abb.1) entwickelt, welche die Tweets von Twitter per Streaming API empfängt, diese auf der einen Seite persistiert und auf der anderen Seite live durch das Data Stream Management System leiten kann. Durch die Verbindungen mit der Streaming API erhalten wir stündlich bis zu 3 Mio. Tweets aus den öffentlichen Kanälen von Twitter. Der Stream Manager konsolidiert die Tweets aus den verschiedenen Streams und leitet diese in den Data Store. Der Data Store speichert die Tweets und streamt diese gleichzeitig weiter in das Data Stream Management System. Weiterhin kann der Data Store auch historische Daten als Stream in das Data Stream Management System leiten.

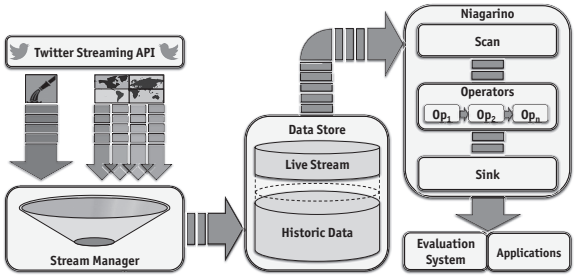


Abb. 1: Plattform und Data Stream Management System für die Verarbeitung der Tweets.

Im Data Stream Management System wird eine Anfrage als gerichteter azyklischer Graph $Q = (O,S)$ repräsentiert, wobei O die Menge der Operatoren der Anfrage und S die Menge

der Streams, welche verwendet werden um die Operatoren zu verknüpfen. Das Datenmodell basiert auf relationalen Tupeln, welche der ersten Normalform folgen und somit keine Verschachtlungen erlauben. Basierend auf dem relationalen Datenmodell umfasst die Menge der Operatoren unter anderem die Selektion (σ) und die Projektion (π), welche genau wie ihre Gegenstücke in relationalen Datenbanksystemen funktionieren. Weitere tuple-basierte Operatoren sind der Derive (f) und der Unnest (μ) Operator. Der Derive Operator führt eine Funktion auf einem Tupel aus und fügt den Ergebniswert an das Tupel an. Der Unnest Operator teilt ein Attribut und sendet ein neues Tupel pro neuem Wert in den Stream. Ein typischer Anwendungsfall für den Unnest Operator ist es eine Zeichenkette zu zerteilen und für jede Teilzeichenkette ein extra Tupel zu senden. Zusätzlich zu diesen allgemeinen Operatoren bietet das Daten Stream Management System eine Vielzahl von stream-spezifischen Operatoren, welche dazu verwendet werden können den Stream in verschiedenste Bereiche zu unterteilen. Zusätzlich zu den bekannten Zeit- und Tupelbasierten Window Operatoren (ω), welche tumbling oder sliding sein können, gibt es auch datengetriebene Datenfenster, welche als Frames [Ma12] bekannt sind. Segmente können mit Join ($\bowtie$) und Aggregationsoperatoren (Σ) verarbeitet werden. Die Implementierung der Anfragepläne der von uns entwickelten und der evaluierten Verfahren ist in der Abbildung 4 dargestellt.

3.2 Verfahren zu Ereigniserkennung

Die Dissertation stellt den Entwurf und die Entwicklung von zwei Verfahren zu Ereigniserkennung vor. Das erste Verfahren (*Shifty* [WGS14a]) beschäftigt sich mit der Erkennung von Ereignissen ohne Einschränkung der Anwendungsdomäne und in Echtzeit. Das Verfahren beruht auf der Analyse der Frequenz von Termen über die Zeit in verschiedenen Intervallen. Dabei wird die Veränderung der Frequenz überwacht und beim überschreiten von gewissen Schwellwerten ein Ereignis ausgelöst. Da dieses Ereignis auf einem einzelnen Term basiert werden dem Ereignis weitere zusammen auftretende Terme hinzugefügt. Diese Zusammenfassung beschreibt das resultierende Event.

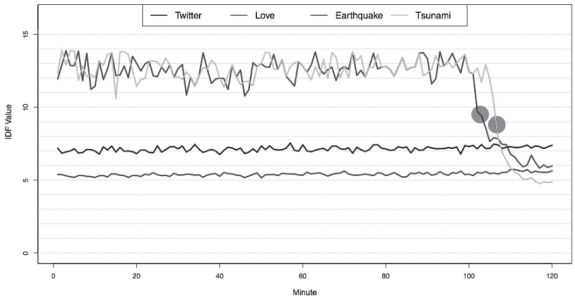


Abb. 2: Erkennung der Ereignisse *Earthquake* und *Tsunami* mit dem Shifty Verfahren.

In Abbildung 2 kann man erkennen, wie sich die Frequenz der Terme *Twitter*, *Love*, *Earthquake* und *Tsunami* über eine Zeit von zwei Stunden verändert. Die beiden Terme *Twitter* und *Love* zeigen fast keinerlei Veränderung ihrer Frequenz. Im Gegensatz hierzu erhöht

sich die Frequenz (invers dargestellt) der Terme *Earthquake* und *Tsunami* plötzlich zwischen den Minuten 100 und 110. An den roten Markierungen greifen die statistischen Regeln des Verfahrens und melden die jeweiligen Terme als Ereignisse. Weiterhin werden den Termen ihre zusammen auftretenden Terme hinzugefügt und somit steht für den Term *earthquake* das Ereignis *earthquake, epicenter, aceh, banda, tsunami*. Hierbei kann man zusätzlich die Verwandtschaft der beiden Ereignisse erkennen.
Das zweite Verfahren (*LLH* [We13]) beschäftigt sich mit der Erkennung von Ereignissen in definierten geographischen Bereichen. Das Verfahren beruht auf der Kombination der Berechnung eines kombinierten des log-likelihood Verhältnis. Die Kombination umfasst das Verhältnis zwischen der Frequenz von Termen innerhalb der definierten Region und außerhalb. Zusätzlich wird das log-likelihood Verhältnis zwischen der Frequenz von Termen innerhalb der definierten Region des aktuellen Zeitfensters gegenüber der historischen Frequenz der Terme in der definierten Region analysiert. Wenn das kombinierte log-likelihood Verhältnis eines Termes einen gewissen Schwellenwert überschreitet wird dieser Term als Ereignis für den spezifizierten geographischen Bereich und das aktuelle Zeitfenster gemeldet. Auch bei diesem Verfahren wird dieser Term mit weiteren gemeinsam auftretenden Termen angereichert, um ein aussagekräftiges Ereignis zu bilden. Ein Beispiel hierfür ist in Abbildung 3 für das geographische Gebiet um Boston dargestellt.

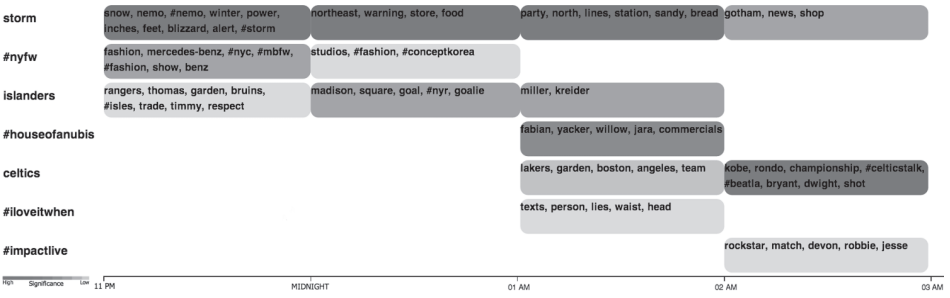


Abb. 3: Erkennung von Ereignissen für das geographische Gebiet um Boston.

3.3 Evaluation zu Verfahren zur Ereigniserkennung

Die Dissertation präsentiert Methoden, um die Qualität und die Verarbeitungsgeschwindigkeit von aktuellen wie aber auch zukünftigen Verfahren zur Ereigniserkennung zu evaluieren. Zusätzlich zu den speziellen Erkennungsverfahren wurden einige Techniken implementiert, welche als Basis verwendet werden, um bessere Vergleiche zu ermöglichen. Um eine möglichst gute Vergleichbarkeit zu gewährleisten wurden alle Verfahren in einem bestehenden Data Stream Management System implementiert (siehe Abb. 4). Zusätzlich wurden einige skalierbare Kennzahlen definiert, um die Qualität der Ergebnisse der Verfahren automatisch zu evaluieren ohne manuell eingreifen zu müssen.

In den Evaluationen [WGS15b, WGS15a] werden die Ergebnisse von vier speziellen Erkennungsverfahren und fünf Basisverfahren untersucht. Aus der großen Sammlung wur-

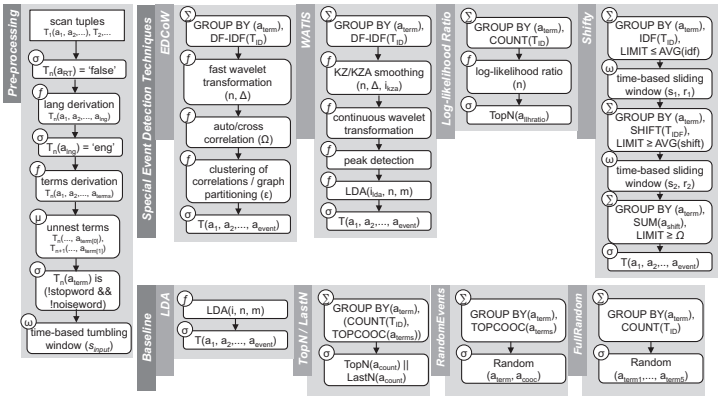


Abb. 4: Anfragepläne des Data Stream Managementsystems für die Verfahren zu Ereigniserkennung.

den hierzu die beiden meist zitierten und damit erfolgversprechendsten Kandidaten *EDCoW* [WL11] und *WATIS* [Co12] ausgewählt. Diese beiden Verfahren verwenden komplexe Wavelet Analysen, um Ereignisse in Datenströmen zu erkennen. Im Gegensatz zu diesen beiden Verfahren wurden zusätzlich unsere selbst entwickelten, weniger komplexere Verfahren Log-likelihood Ratio (LLH) und Shifty evaluiert. Als Basisverfahren wurden *LDA* [BNJ03], ein bekanntes Topic Detection Verfahren, die Top bzw. Letzten N Treffer aus der Menge an Termen, und zwei Verfahren welche zufällige Terme als Ereignisse melden. Um eine faire Evaluation zu gewährleisten, wurden alle Verfahren auf denselben Eingangsdaten mit denselben Vorverabeitungsschritten ausgeführt (siehe Pre-Processing in Abb. 4). Zusätzlich zu den genannten Verfahren wurden ebenfalls die von Twitter selbst generierten Trending Topics (TT) in die Qualitätsevaluation aufgenommen.

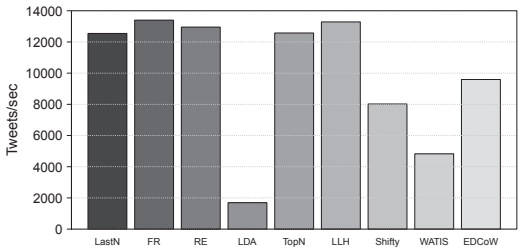


Abb. 5: Vergleich der Laufzeitperformance der Verfahren.

Beim Vergleich der Laufzeitperformance (siehe Abb. 5) kann man erkennen, dass LLH vor EDCoW, Shifty und WATIS in der Rangliste liegt. Am wenigstens Tweets pro Sekunde kann das Topic Detection Verfahren LDA verarbeiten. Dies liegt daran, dass LDA mehrere Iterationen über die Sammlung der Tweets ausführt und somit einen höheren Verabeitungsaufwand hat. Zusätzlich muss man erwähnen, dass Shifty iterativ auf kleineren Zeitfenstern als die anderen Verfahren arbeitet und somit hier nachteilig behandelt wird.

Zusammenfassend kann man aussagen, dass alle Verfahren bis auf LDA und WATIS in der Lage sind, den Datenstrom von Twitter in Echtzeit abzuarbeiten.

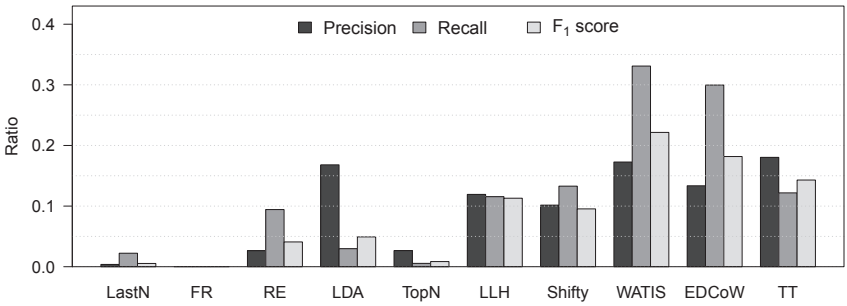


Abb. 6: Qualitätsvergleich der Ergebnisse der Verfahren.

Für den Qualitätsvergleich (siehe Abb. 6) wurden einige neue Maße entwickelt, welche in Kombination zur Anwendung kommen. Die Präzision wird z.B. anhand eines Abgleichs mit Google und dem Newsarchiv von NYTimes berechnet. Hierbei wird das Verhältnis der gemeldeten Ereignisse zu den gefundenen Ereignissen in Google und dem NYTimes Archiv analysiert. Der Recall wird z.B. anhand eines Archivs der Nachrichtenseite Reuters berechnet und analysiert ebenfalls die Gesamtmenge der gemeldeten Ereignisse zu den im Newsarchiv vorhandenen. Weiterhin wird bei der Evaluation die Menge an doppelt gemeldeten Ereignissen berücksichtigt. Für die Ergebnisse der Qualitätsevaluation kann folgendes festgehalten werden. Die berechneten Werte sind für alle der getesteten Verfahren eher niedrig. Da wir jedoch nur an relativen Ergebnissen interessiert sind stellt dies kein Problem der Evaluation dar. Im Bezug auf Präzision erreichen LDA, WATIS und TT die besten Werte. Beim Recall überzeugen ebenfalls WATIS und das weitere komplexe Erkennungsverfahren EDCoW. Beide Werte in Kombination stellen das F_1 Score dar. Hierbei sehen wir, dass die komplexen Erkennungsverfahren und die von Twitter selbst bereitgestellten Trending Topics die besten Werte erzeugen. Die von uns entwickelten weniger komplexen Verfahren erreichen zwar viel höhere Werte als die Basis Verfahren, können jedoch nicht mit den komplexen Verfahren mithalten.

3.4 Visuelle Ereigniserkennung

Die Dissertation stellt zwei Visualisierungsverfahren zur Erkennung von Ereignissen im Twitter-Datenstrom vor. Das erste Verfahren (*Stor-e-Motion*[We14, WGS15c]) stellt den Verlauf von vordefinierten Themen dar und lässt den Benutzer erkennen, falls plötzliche Veränderungen in der Frequenz oder den Emotionen über das Thema stattfinden. Wie in Abbildung 7 zu erkennen ist, kann man hierbei den Tagesverlauf des Themas live verfolgen und wird über unübliche Veränderungen visuell auf dem Laufenden gehalten. Zusätzlich wird stündlich eine Zusammenfassung der Terme der letzten Stunde festgehalten und in der Visualiserung dargestellt. Hierdurch kann verfolgt werden, welche Terme in den Themen wichtig sind und zu den Veränderungen in der Frequenz und den Emotionen geführt haben.

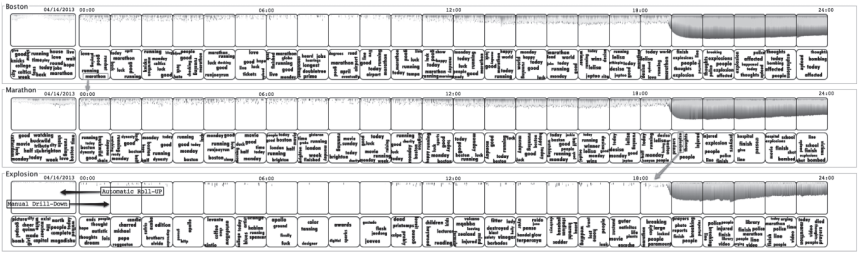


Abb. 7: Monitoring der Topics Boston, Marathon und Explosion während des Boston Marathons im Jahre 2013 mit der Stor-e-Motion Visualisierung.

Das zweite Verfahren (*SiCi Explorer* [WGS16, WGS14b]) stellt den Verlauf von Emotionen und Frequenz von Tweets in vordefinierten geographischen Bereichen dar. Diese Visualisierung lässt den Benutzer erkennen, falls plötzliche Veränderungen in den Emotionen der Tweets gibt, die von Personen innerhalb des geographischen Bereichs oder von Personen, die über den geographischen Bereich (z.B. Boston) schreiben, stammen. Das Beispiel in Abbildung 8 stellt den Verlauf der Tweets aus Boston und über Boston während des Marathons im Jahre 2013 dar. Man erkennt, dass in den letzten 10 Minuten der zweiten Stunde (erste Zeile in der Mitte) die Emotionen von positiv (grün) auf negativ (rot) umschwenken. Dies ist der Zeitpunkt, an dem der Anschlag auf den Marathon in Boston ausgeübt wurde. Weiterhin werden in den einzelnen Segmenten der Visualisierung die beliebtesten Terme eingeblendet und die dazugehörigen Tweets können angezeigt werden. Eine Benutzerstudie zu dieser Visualisierung hat gezeigt, dass die Visualisierung intutiv verstanden wird und die Benutzer in der Wahrnehmung von Ereignissen unterstützt.

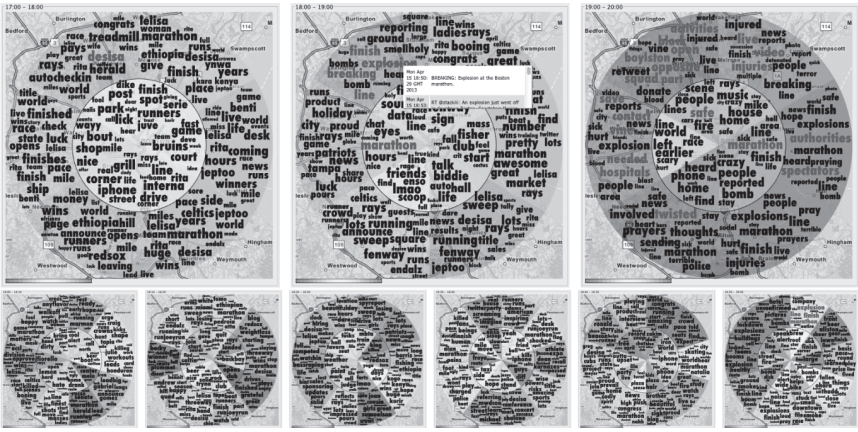


Abb. 8: Monitoring der Situation in Boston während des Boston Marathons im Jahre 2013 mit dem SiCi Explorer.

3.5 Fazit

Die Dissertation [We16] stellt die Ergebnisse von drei Hauptforschungsfragen dar. Das erste Ziel war es, Verfahren zu Erkennung von Ereignissen in den Datenströmen zu entwerfen und entwickeln. Das zweite Ziel leitet sich aus dem Ersten ab und entwickelte sich daraus, dass keine ausreichenden Evaluationen und Evaluationskriterien für Erkennungsverfahren von Ereignissen in Twitter existierten. Das dritte Ziel war es Visualisierungen zu entwerfen und zu entwickeln, welche die Erkennung von Ereignissen in den Twitter Datenströmen aktiv unterstützen.
Zusammenfassend diskutiert und präsentiert die Dissertation neue, noch offene Fragen für zukünftige Forschung. Hierbei wird z.B. aufgezeigt, wie die Evalutionen auf weitere Verfahren ausgeweitet werden können und diese Verfahren auf einfach Art und Weise in das Evaluationsframework eingebunden werden können. Weiterhin wird eine völlig neue Forschungsfrage aufgeworfen. Da die meisten Verfahren zu Ereigniserkennung auf vielen Parametern, wie z.B. die Größe der Zeitfenster, verschiedenste Schwellwerte oder aber die Anzahl an Verarbeitungszyklen, muss dies in weiteren Evaluationen untersucht werden. Dabei ist es spannend zu untersuchen ob diese Parameter fortlaufend während der Ausführung der Verfahren verändert und angepasst werden können. Dieses Untersuchungen könnten dann zu dynamischen, adaptiven und skalierbaren Verfahren zur Ereigniserkennung in Twitter Datenströmen führen.

Literaturverzeichnis

[BNJ03] Blei, David M.; Ng, Andrew Y.; Jordan, Michael I.: Latent Dirichlet Allocation. J. Mach. Learn. Res., 3:993–1022, 2003.

[BR14] Bontcheva, Kalina; Rout, Dominic: Making Sense of Social Media Streams through Semantics: a Survey. Semantic Web, 5(5):373–403, 2014.

[Co12] Cordeiro, Mário: Twitter Event Detection: Combining Wavelet Analysis and Topic Inference Summarization. In: Proc. Doctoral Symposium on Informatics Engineering (DSIE). 2012.

[FK15] Farzindar, Atefeh; Khreich, Wael: A Survey of Techniques for Event Detection in Twitter. Computational Intelligence, 31(1):132–164, 2015.

[Gu13] Guille, Adrien; Favre, Cécile; Hacid, Hakim; Zighed, Djamel A.: Information Diffusion in Online Social Networks: A Survey. SIGMOD Rec., 42(2):17–28, 2013.

[Ma12] Maier, David; Grossniklaus, Michael; Moorthy, Sharmadha; Tufte, Kristin: Capturing Episodes: May the Frame Be with You (Invited Paper). In: Proc. Intl. Conf. on Distributed Event-Based Systems (DEBS). S. 1–11, 2012.

[We13] Weiler, Andreas; Scholl, Marc H.; Wanner, Franz; Rohrdantz, Christian: Event Identification for Local Areas Using Social Media Streaming Data. In: Proc. Workshop on Databases and Social Networks (DBSocial) in conjunction with Intl. Conf. on Management of Data (SIGMOD). S. 1–6, 2013.

[We14] Weiler, Andreas; Grossniklaus, Michael; Wanner, Franz; Scholl, Marc H.: The Stor-e-Motion Visualization for Topic Evolution Tracking in Social Media Streams. In: Proc. Eurographics Conference on Visualization (EuroVis): Posters. 2014.

[We16] Weiler, Andreas: Design and Evaluation of Event Detection Techniques for Social Media Data Streams. Dissertation, University of Konstanz, Konstanz, 2016.

[WGS14a] Weiler, Andreas; Grossniklaus, Michael; Scholl, Marc H.: Event Identification and Tracking in Social Media Streaming Data. In: Proc. Workshop on Multimodal Social Data Management (MSDM) in conjunction with Intl. Conf. on Extending Database Technology (EDBT). S. 282–287, 2014.

[WGS14b] Weiler, Andreas; Grossniklaus, Michael; Scholl, Marc H.: SiCi Explorer: Situation Monitoring of Cities in Social Media Streaming Data. In: Proc. Workshop on Mining Urban Data (MUD) in conjunction with Intl. Conf. on Extending Database Technology (EDBT). S. 369–370, 2014.

[WGS15a] Weiler, Andreas; Grossniklaus, Michael; Scholl, Marc H.: Evaluation Measures for Event Detection Techniques on Twitter Data Streams. In: Proc. British Intl. Conf. on Databases (BICOD). S. 108–119, 2015.

[WGS15b] Weiler, Andreas; Grossniklaus, Michael; Scholl, Marc H.: Run-time and Task-based Performance of Event Detection Techniques for Twitter. In: Proc. Intl. Conf. on Advanced Information Systems Engineering (CAiSE). S. 35–49, 2015.

[WGS15c] Weiler, Andreas; Grossniklaus, Michael; Scholl, Marc H.: The Stor-e-Motion Visualization for Topic Evolution Tracking in Text Data Streams. In: Proc. Intl. Conf. on Information Visualization Theory and Applications (IVAPP). S. 29–40, 2015.

[WGS16] Weiler, Andreas; Grossniklaus, Michael; Scholl, Marc H.: Situation Monitoring of Urban Areas Using Social Media Data Streams. Information Systems, 57:129–141, 2016.

[WL11] Weng, Jianshu; Lee, Bu-Sung: Event Detection in Twitter. In: Proc. Intl. Conf on Weblogs and Social Media (ICWSM). S. 401–408, 2011.



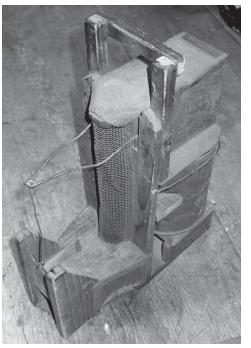
Andreas Weiler wurde am 20. März 1983 in Stuttgart Bad-Cannstatt geboren. Er studierte im Studiengang Information Engineering an der Universität Konstanz. Im Jahr 2006 erhielt er den Abschluss des Bachelor of Science mit einer Spezialisierung in Datenbanken und Informationssysteme. Seine Bachelorarbeit widmete sich dem Thema „Design und Entwicklung eines visuellen Frontends zur Exploration von multi-dimensionalen OLAP Daten“. Hierbei wurde der Fokus speziell auf die interaktive Ausführung der Anfragen und eine innovative Ergebnisdarstellung gelegt. Im Jahr 2010 erhielt er den Abschluss des Masters of Science in Information Engineering mit dem Fokus Computer Science. In seiner Masterarbeit arbeitete er am Design und der Entwicklung einer Client/Server Architektur für die Open-Source XML Datenbank BaseX. Im Jahr 2011 wurde er als Doktorand Teil der Forschungsgruppe für Datenbank und Informationssysteme von Prof. Dr. Marc H. Scholl. Seine Forschungsinteressen liegen in den Gebieten der Verarbeitung und Analyse von Informationen aus sozialen Datenströmen. Speziell evaluierte er Ereigniserkennungsverfahren in Bezug auf Performanz in der Laufzeit und Qualität. Andreas Weiler erhielt seinen Doktortitel für die Dissertation mit dem Titel „Design and Evaluation of Event Detection Techniques for Social Media Data Streams“ im Jahre 2016. Die Betreuer und Gutachter der Dissertation waren Prof. Dr. Marc H. Scholl und Prof. Dr. Michael Grossniklaus. Aktuell arbeitet er in Konstanz als Senior Data Engineer und Data Scientist bei coliquio.de dem größten Experten-Netzwerk für Ärzte.

Quicksort mit zwei Pivots und mehr: Eine mathematische Analyse von Mehrwege-Partitionierungsverfahren und der Frage, wie Quicksort dadurch schneller wird[1]

Sebastian Wild[2]

It is tempting to try to develop ways to improve quicksort: a faster sorting algorithm is computer science's "better mousetrap," and quicksort is a venerable method that seems to invite tinkering.

R. Sedgewick and K. Wayne, Algorithms 4th ed.



Bildquelle: Massel tow (https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Historical_Mousetrap.jpg), https://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.0/de/legalcode

Historische Mausefalle
(Museum der Schwalm, Schwalmstadt)

Abstract: Seit 2011 kommt in der Java runtime library eine Quicksort-Variante mit zwei Pivots zum Einsatz, von der lange unklar war, warum sie gegenüber der vorherigen, ausoptimierten Quicksort-Implementierung nochmals über 10% Laufzeit einsparen kann. Das verwundert umso mehr, da frühere Untersuchungen keinen Vorteil in der Verwendung mehrerer Pivots erwarten ließen. Durch eine umfassende mathematische Analyse aller sinnvollen Quicksort-Varianten konnte ich beweisen, dass durch die Verwendung mehrerer Pivots tatsächlich keine wesentliche Ersparnis bei der Anzahl an Vergleichen, und allgemeiner dem Aufwand innerhalb der CPU, zu erwarten ist, wohl aber eine deutliche Reduktion des Datenvolumens, das zwischen Hauptspeicher und CPU transferiert werden muss. Diese effizientere Nutzung der Speicherhierarchie ist dabei *nur* durch den Einsatz mehrerer Pivots, und durch keine andere der vielen bekannten Optimierungen von Quicksort zu erreichen.

1 Einführung

Im Laufe der vergangenen zehn Jahre hat sich ein technologischer Wandel mit weitreichenden Konsequenzen vollzogen, der eine Vielzahl neuer Informatik-Anwendungen auf neuen Gerätetypen hervorgebracht hat. In solch turbulenten Zeiten sind gründlich analysierte Algorithmen als Inbegriff plattformunabhängiger Programme und dauerhaft gültiger Konzepte wertvolle Pfeiler der Stabilität. Doch gerade bei dem vielleicht am meisten untersuchten und am besten verstandenen aller algorithmischen Probleme, dem Sortieren eines Arrays von Elementen, hat sich eine verstecke Revolution abgespielt: *Alle* Sortiermethoden in Oracles Java runtime library wurden in den vergangenen zehn Jahren von Grund auf neu geschrieben [Ja09, JD09]. Da die neuen Methoden auch in die Android runtime library übernommen wurden, gehören sie wohl zu den am häufigsten ausgeführten Algorithmen überhaupt.[3] So weit verbreitete Bibliotheken werden sehr konservativ gemanagt, ist doch

[1] Englischer Titel der Dissertation: "Dual-Pivot Quicksort and Beyond: Analysis of Multi-Way Partitioning and Its Practical Potential"

[2] TU Kaiserslautern, Fachbereich Informatik, Postfach 3049, 67663 Kaiserslautern, wild@cs.uni-kl.de

[3] Aktuelle Schätzungen sprechen von weltweit über 2 Mrd. aktiven Android-Geräten [Ah16]!

jede Änderung mit der Gefahr verbunden, existierende Anwendungen zu beeinflussen: So basierten (bis vor knapp zehn Jahren) die Quicksort-Implementierungen aller großen Bibliotheken auf dem von Jon Bentley und Douglas McIlroy Anfang der 1990er für die C-Standardbibliothek entwickelten Code [BM93]. Trotzdem war die Laufzeitersparnis der neuen Methoden – Dual-Pivot Quicksort und Timsort – schließlich so groß, dass ihre Überlegenheit nicht ignoriert werden konnte.

Bemerkenswerterweise stammt die Idee von Java's Dual-Pivot Quicksort nicht etwa von einem Algorithmik-Experten; im Gegenteil: Der junge russische Softwareentwickler Vladimir Yaroslavskiy, damals Angestellter bei Sun Microsystems, tüftelte in seiner Freizeit an schnellen Sortiermethoden und entdeckte dabei eher zufällig das Potential von Mehrwege-Partitionierungsverfahren. Mit Hilfe der erfahrenen Algorithmiker und Entwickler Jon Bentley und Joshua Bloch entwickelte Yaroslavskiy schließlich die jetzige Bibliotheksmethode. Diese enthält eine ganze Reihe von geschickten Mechanismen, um für möglichst viele Eingaben effizient zu sein; auf uniform zufälligen Permutationen ist der Code aber im Wesentlichen äquivalent zu nebenstehendem Algorithmus.

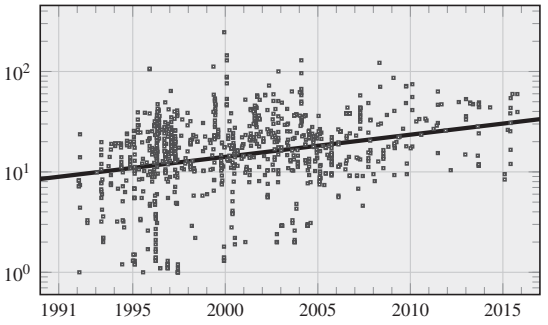
```
DUALPIVOTQUICKSORT(A, left, right)
    // Sortiere A[left..right]
 1  if right − left ≥ 1
        // Wähle äußerste Elemente als Pivots
 2      P := min {A[left], A[right]}
 3      Q := max{A[left], A[right]}
 4      ℓ := left + 1;  g := right − 1;  k := ℓ
 5      while k ≤ g
 6          if A[k] < P
 7              Swap A[k] and A[ℓ];  ℓ := ℓ + 1
 8          else if A[k] ≥ Q
 9              while A[g] > Q and k < g
10                  g := g − 1
11              end while
12              Swap A[k] and A[g];  g := g − 1
13              if A[k] < P
14                  Swap A[k] and A[ℓ];  ℓ := ℓ + 1
15              end if
16          end if
17          k := k + 1
18      end while
19      ℓ := ℓ − 1;  g := g + 1
        // Bringe Pivots an ihren Platz
20      A[left] := A[ℓ];  A[ℓ] := P
21      A[right] := A[g];  A[g] := Q
22      DUALPIVOTQUICKSORT(A, left , ℓ − 1)
23      DUALPIVOTQUICKSORT(A, ℓ + 1, g − 1)
24      DUALPIVOTQUICKSORT(A, g + 1, right)
25  end if
```

Wie konnte dieser so deutlich überlegene Dual-Pivot Quicksort den vielen Forschern weltweit über Jahrzehnte verborgen bleiben? Und wenn zwei Pivots so erfolgreich sind, sind dann noch mehr Pivots vielleicht noch besser?

Diese Fragen waren der Ausgangspunkt meiner Forschung. Der Schlüssel zu ihrer Beantwortung liegt in der zugrundeliegende Frage, *warum* Dual-Pivot Quicksort schneller als der bisherige, klassische Quicksort ist. In meiner Dissertation [Wi16] konnte ich eine plausible Antwort darauf geben: Die klassischen Modellannahmen für die Laufzeitvorhersage sind auf modernen Computern nicht mehr in dem Maße erfüllt, wie es vor 20 Jahren noch der Fall war. Dual-Pivot Quicksort wurde in der Vergangenheit durchaus schon untersucht [Se80, He91] – aber im damals angemessenen Modell, die Anzahl Schlüsselvergleiche und Vertauschungen zu zählen, korrekterweise für nicht hilfreich befunden! Die Idee der Mehrwege-Partitionierung ist also nicht neu; neu ist aber, dass Quicksort dadurch schneller wird. Der Grund dafür ist ein langanhaltender Trend im Hardwaredesign, der mittlerweile wohl auch beim Sortieren im Hauptspeicher ein Umdenken erforderlich macht.

2 Die „Speicher-Wand“

Die Herstellungsprozesse für Prozessoren haben sich seit den Anfängen der integrierten Schaltkreise Mitte des 20. Jahrhunderts enorm weiterentwickelt; nach der bekannten Vorhersage des *Mooreschen Gesetzes* etwa *verdoppelt* sich die Anzahl Transistoren pro Fläche etwa alle zwei Jahre. Auch wenn Auslegung und Gültigkeit dieser Aussage immer wieder Anlass zu Diskussionen geben, hat sich die tatsächlich messbare Durchsatz-Geschwindigkeit der CPUs durchaus in dieser Größenordnung gesteigert und tut es noch – die Geschwindigkeit der Speicher und ihrer Bussysteme konnte dagegen nicht mit dieser Entwicklung Schritt halten: Nach den Daten des STREAM-Benchmarks [Mc07] wuchs die CPU-Geschwindigkeit über die letzten 25 Jahre mit einer jährliche Rate von etwa 46%, während die *Speicherbandbreite,* die messbare Datenmenge, die pro Zeiteinheit zwischen CPU und Hauptspeicher übertragen werden kann, eine Wachstumsrate von etwa 37% jährlich aufwies.[4] Abb. 1 zeigt die Auswirkungen dieser unterschiedlich schnellen Weiterentwicklung: eine exponentiell wachsende Imbalance unserer Computer.



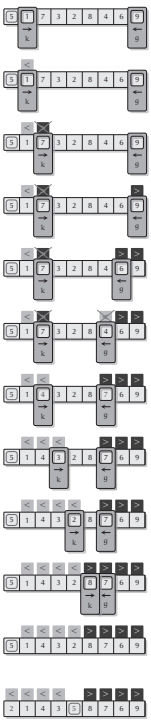
Jeder Punkt zeigt ein Ergebnis des STREAM-Benchmarks: die x-Achse das Datum, die logarithmische y-Achse die gemessene Balance, die sich aus *peak performance* (in MFLOPS) dividiert durch Netto-Bandbreite zum Hauptspeicher (in MW/s im “triad” Benchmark) zusammensetzt. Die Linie ist die Regressionsgerade der gezeigten Punktewolke.
(Für Details zu Daten und Aufbereitung, siehe Figure 1 in [Wi16].)

Abb. 1: Entwicklung der *Maschinenbalance,* dem Quotienten von CPU-Geschwindigkeit und der Speicherbandbreite über die letzten 25 Jahre.

Konsequenzen der Imbalance. Speicher- und Rechenkapazität im Überfluss sind nutzlos, wenn die Berechnungen ständig pausiert werden müssen, um die nächsten Daten aus dem Hauptspeicher zur CPU zu übertragen. Hierbei hilft auch die moderne Speicherhierarchie aus mehreren Levels schneller Cache-Speicher und automatischem *Prefetching* von zukünftig angefragten Speicherbereichen nicht weiter, wenn die Übertragungsgeschwindigkeit selbst der limitierende Faktor ist. John Backus erkannte dieses Problem schon 1977 und nannte es *von-Neumann-Bottleneck* [Ba78]; weit dramatischer formulierten es William Wulf und Sally McKee 1995 [WM95]: Wenn sich die in Abb. 1 gezeigte Entwicklung nur lange genug fortsetzt, laufen wir gegen eine *“memory wall”*, einen Zustand in dem die Geschwindigkeit des ganzen Systems vollständig von der Geschwindigkeit des Speichers dominiert wird. Diese drastische Situation ist beim Sortieren sicher (noch?) nicht gegeben, aber die Gewichte haben sich verschoben: entsprach das Verhältnis von CPU-Geschwindigkeit zu Bandbreite 1993, als die klassische Quicksort-Implementierungen entwickelt wurde, noch etwa 7:1, so liegt es heutzutage bei 30:1.

[4] Diese Werte sollten nicht direkt für quantitative Vorhersagen verwendet werden, da sie Durchschnittswerte über verschiedenste Geräteklassen darstellen und eine gleichmäßige Datenverteilung über die Zeit nicht gewährleistet werden kann. Der qualitative Trend ist aber bekannt und stabil gegen Variationen der Experimente.

3 Quicksort und die Speicherbandbreite



Um zu verstehen, welchen Einfluss diese relative Verteuerung von Speicherzugriffen auf das Sortieren hat, ist ein detaillierter Blick auf die Sortierverfahren nötig. Die Kernidee von Quicksort ist recht einfach: Wir bestimmen den *Rang* eines (beliebigen) Elementes, des *Pivots*, indem wir jedes andere Element mit dem Pivot vergleichen; der Rang des Pivots ist die Anzahl Elemente, die kleiner als das Pivot sind, und damit die *Position* des Pivots im sortierten Array. Indem man kleine Elemente direkt nach links, und große Elemente nach recht bringt, kann man das Array in einem Durchlauf *partitionieren*, also in drei Bereiche aufteilen, die alle kleinen, das Pivot bzw. alle großen Elemente beinhalten. Erste und letztere sortiert man anschließend unabhängig voneinander rekursiv mit dem gleichen Verfahren, solange das Teilarray mehr als ein Element umfasst.

Klassischer Quicksort. Das gängige Partitionierungsverfahren ist rechts illustriert. Es geht auf C. A. R. Hoare [Ho62] und Robert Sedgewick [Se78] zurück und kam bis Version 6 in der Java runtime library (und vielen weiteren Bibliotheken) zum Einsatz. Die Methode arbeitet in-place und basiert auf sequentiellen Scans; das ist optimal bzgl. der Anzahl *Cache Misses*. Tatsächlich arbeiten alle in der Praxis relevanten Partitionierungsmethoden nach diesem Prinzip. Obwohl a priori nicht feststeht, wo die beiden Laufindizes k und g sich treffen, scannen sie gemeinsam stets das gesamte Array genau einmal. (Einfachere Verfahren, z. B. Lomutos Methode [Be84, Co09], haben diese Eigenschaft nicht!)

Um den Bandbreitenbedarf mathematisch analysieren und mit anderen Algorithmen vergleichen zu können, müssen wir ein *Kostenmaß,* ein mathematisch präzise definiertes Modell der Kosten einer Ausführung, fixieren.

Iteratoren: Ein Modell für Scan-basierte Algorithmen. In unserem Modell geben wir die sequentielle Arbeitsweise fest vor; dadurch lässt sich die Kostenanalyse vereinfachen. Wir erlauben Zugriffe auf das Array nur durch *Iteratoren*, konzeptionelle Schreib-Lese-Köpfe, die sich stets an einer bestimmten Stelle im Array befinden und den Wert an dieser Stelle lesen und schreiben können. Iteratoren können darüber hinaus nur zu einer benachbarten Stelle weiterbewegt werden.[5] Die obige Illustration zeigt die Iteratoren als Rechtecke mit Fenster. Als Kosten der Ausführung definieren wir die Summe der zurückgelegten Distanzen aller Iteratoren; wir nennen dies kurz die Anzahl *gescannter Elemente*. Man beachte, dass ein Element als mehrfach gescannt gezählt wird, wenn es von mehreren Iteratoren besucht wird.

Die Anzahl gescannter Elemente ist i. W. proportional zur Anzahl der *(Level 1) Cache Misses* [NWM16, ADK16], da nach B Bewegungen eines Iterators ein neuer Cacheblock adressiert wird, wenn B die Blockgröße des Caches ist. Unser Modell ähnelt daher dem

[5] Zusätzlich benötigt man eine Möglichkeit, Iteratoren zu klonen, also ein Kopie zu behalten, die auf der aktuellen Stelle verbleibt. Die Gesamtzahl aktiver Iteratoren soll aber beschränkt bleiben. Des Weiteren kann man sich auf unidirektionale Iteratoren beschränken; beim Klonen gibt man dann die Scanrichtung des Klons mit an.

klassischen Externspeichermodell [AV88] mit Blockgröße $B = 1$.[6] Trotzdem halte ich es für angebracht, hier nicht die Terminologie des Externspeichermodells zu übernehmen, da das suggerierte, es käme auch beim Sortieren im Hauptspeicher *nur* noch auf die Datenbewegungen an. Tatsächlich spielt aber der Rechenaufwand auch weiterhin eine Rolle.

4 Dual-Pivot Quicksort gegen Klassischen Quicksort

Wie oben bereits erwähnt, kostet die klassische Hoare-Sedgewick-Partitionierung n gescannte Elemente, da die Iteratoren k und g gemeinsam jedes Elemente genau einmal besuchen. Das ist in diesem Fall gleichzeitig die Anzahl verwendeter Schlüsselvergleiche, sodass sich für den klassischen Quicksort die bekannten Resultate für Vergleiche (z. B. [Se80]) direkt übernehmen lassen. Die Anzahl gescannter Elemente für die Yaroslavskiy-Bentley-Bloch-Partitionierung (kurz YBB) ist im Mittel $\frac{4}{3}n$, da wieder zwei Iteratoren k und g gemeinsam alle Elemente ablaufen, aber zusätzlich ℓ alle kleinen überstreicht; siehe Abb. 2. Dagegen ist die Anzahl Vergleiche trickreicher zu bestimmen, als auf den ersten Blick erscheinen mag; im Mittel sind es $\frac{19}{12}n$ [WN12].



Abb. 2: Zustand des Arrays nach YBB-Partitionierung mit Angabe der gelaufenen Distanzen der Iteratoren.

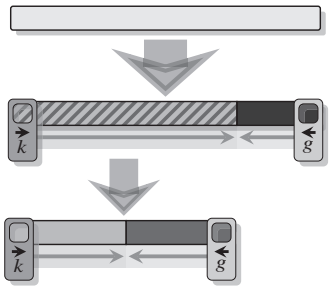


Abb. 3: Simulation einer 3-Wege- durch zwei 2-Wege-Partitionierungen.

Nun kann man die von der YBB-Partitionierung hinterlassene Dreiteilung des Arrays in kleine, mittlere und große Elemente auch erreichen, indem man *zweimal* die klassische anwendet: zuerst das ganze Array bzgl. Q, des größeren Pivots, wodurch die großen Elemente abgespalten werden, und dann das linke Segment nochmals bzgl. P, um auch kleine von mittleren Elemente zu trennen. Der Vorgang ist in Abb. 3 illustriert. Im Vergleich zu YBB wird dabei das mittlere Segment *zweimal* statt einmal durchlaufen, sodass im Mittel $\frac{5}{3}n$ statt der $\frac{4}{3}n$ gescannte Elemente anfallen. Um die gleiche Arbeit zu verrichten, benötigt YBB-Partitionierung also weniger Speicherbandbreite als die klassische Variante! Der Aufwand innerhalb der CPU steigt dagegen durch den komplexeren Partitionierungscode tatsächlich eher an.

Diese Simulationssichtweise ist sehr hilfreich um verschiedene Quicksort-Varianten miteinander zu vergleichen, sie bedarf aber etwas Sorgfalt. Während im üblichen Eingabemodell – zufällige Permutationen von n paarweise verschiedenen Schlüsseln – jeder Rang des Pivots im klassischen Quicksort gleich wahrscheinlich ist, gilt das für simuliertes Mehrwege-Partitionieren nicht mehr: Q ist stets das Maximum zweier Elemente, die Verteilung des Rangs ist also nach rechts verschoben! Der Rang von P ist dagegen innerhalb seines Teilbereiches uniform verteilt. Effektiv haben wir das Pivot Q als Ordnungsstatistik aus einem zufälligen Sample gewählt (max von 2), P dagegen als ein zufälliges Element.

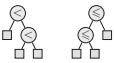
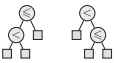
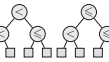
[6] Die interne Speichergröße M entspricht der erlaubten Anzahl aktiver Iteratoren, und es sind keine parallelen Transfers möglich, also $P = 1$.

5 Die Großfamilie der Quicksort-Varianten

Die Wahl der Pivots ist eine der vielen Stellschrauben von Quicksort, und in der Tat eine sehr effektive. Es ist *best practice* für Quicksort mit einem Pivot den Median von drei Elementen, oder sogar eine Approximation des Medians von neun Elementen ("ninther") zu wählen, da dies in Erwartung gut ein Viertel der Vergleiche – und damit gleichzeitig der gescannten Elemente, wie wir aus obiger Diskussion wissen! – einspart [NWM16]. Eine weitere erfolgreiche Optimierung ist, ab einer gewissen Teilproblemgröße die Rekursion abzubrechen und zu Insertionsort zu wechseln, weil dieser Algorithmus auf winzigen Eingaben schneller ist. Schließlich kann man die Partitionierungsmethode selbst in vielen Details variieren. Tatsächlich war es in Quicksorts Jugendzeit geradezu Volkssport, gewiefte neue Quicksort-Varianten zu ersinnen; auf diesen Umstand spielt das Zitat zu Beginn dieses Artikels an, das die Parallele zu Mausefallen zieht, der Erfindung, zu der es in den USA mit Abstand die meisten Patente gibt (weit über 4000 [Ja11]!). Erst durch seine mathematische Analyse konnte Robert Sedgewick 1975 etliche im Umlauf befindliche vermeintliche Verbesserungen als ineffektiv oder gar kontraproduktiv entlarven [Se80].

Vierzig Jahre später herrscht neuerliche Euphorie: Nach dem Erfolg von YBB-Quicksort wurden neue Mehrwege-Quicksort-Varianten vorgeschlagen [AD15, Ku14], und unzählige weitere sind denkbar, da sich die altbekannten Optimierungen, allen voran das *Pivot Sampling*, auch auf Mehrwege-Quicksort anwenden lassen. Meine Dissertation versucht im Geiste von Sedgewicks Arbeit eine Neubewertung vorzunehmen, die den Effekt auf den Bandbreitenverbrauch mit einbezieht.

Generisches one-pass in-place s-Wege-Partitionieren. Um der Vielzahl existierender und denkbarer Quicksort-Varianten Herr zu werden, analysiere ich einen generischen Partitionierungsalgorithmus, der eine ganze Reihe an Stellschrauben als Parameter offen lässt: s, die Anzahl *Segmente* (oder äquivalent: $s-1$ Pivots), m, die Anzahl Iteratoren, die von links nach rechts laufen (die restlichen $s-m$ laufen entgegengesetzt), sowie λ_k und λ_g, die beiden *Vergleichsbäume*. Vergleichsbäume sind binäre Suchbäume mit den Pivots als Schlüsseln, die bestimmen, in welcher Reihenfolge ein Element mit den $s-1$ Pivots verglichen wird, um seine *Klasse*, den Index seines Zielsegments, zu bestimmen. Ich erlaube dabei zwei verschiedene Vergleichsbäume zu verwenden, je nachdem, ob ein Element zuerst vom Links-nach-rechts-Iterator k oder vom Rechts-nach-links-Iterator g erreicht wird. Tatsächlich macht die YBB-Partitionierung davon Gebrauch; dort vergleicht λ_k zuerst mit P, aber λ_g zuerst mit Q (vgl. Zeile 6 bzw. Zeile 11 auf Seite 2).

Method	s	m	λ_k	λ_g
Classic [Se80]	2	1		
Lomuto [Be84]	2	2		
YBB [WN12]	3	2		
Sedgewick [Se80]	3	1.5		
Waterloo [Ku14]	4	2		

Tab. 1: Parameterwerte für bekannte Quicksort-Varianten

Pivot Sampling. Außerdem können die $s-1$ Pivots $P_1, \ldots, P_{s-1}$ als $\boldsymbol{\tau}$-Ordnungsstatistiken aus einem Sample der Größe $k \geq s-1$ gezogen werden; konkret ist P_1 das τ_1-Quantil des Samples, P_2 das $(\tau_1+\tau_2)$-Quantil, …, P_{s-1} das $(\tau_1+\cdots+\tau_{s-1})$-Quantil. Dabei ist

$\boldsymbol{\tau} = (\tau_1, \ldots, \tau_s) \in (0,1)^s$ ein Vektor mit $\tau_1 + \cdots + \tau_s = 1$, der die erwarteten relativen Größenanteile der s Segmente angibt. Für den Median von 3 ist $k = 3$ und $\boldsymbol{\tau} = \left(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}\right)$, max von 2 entspricht $k = 2$ und $\boldsymbol{\tau} = \left(\frac{2}{3}, \frac{1}{3}\right)$; $k = s - 1$ bedeutet kein Pivot Sampling. Weitere Details und Pseudocode finden sich in Abschnit 4.3 von [Wi16].

Wir legen uns mit diesem Schema darauf fest, dass die Partitionierung in einem Durchlauf erreicht wird – nicht etwa in mehreren Phasen, die jeweils alle Elemente betrachten – und in-place ausgeführt wird, also mit konstant viel Zusatzspeicher; da alle gängigen Bibliotheksimplementierungen so arbeiten, stellt das keine echte Einschränkung dar.

6 Vereinheitlichte Average-Case Analyse

Der Beitrag meiner Dissertation ist die parametrische Average-Case Analyse dieses allgemeinen Partitionierungsverfahrens inklusive Pivot Sampling. Auch für die Kostenmaße konnte ich ein parametrisches Schema ausarbeiten, dass die konkreten Kostenmaße von Interesse als Spezialfall umfasst: Vergleiche, Schreibzugriffe, gescannte Elemente, und sogar *Branch Mispredictions.* Die Analyse verallgemeinert und vereinheitlicht damit mehrere Arbeiten, in denen jeweils einzelne Quicksort-Varianten und Kostenmaße getrennt untersucht wurden. Im Laufe der Zeit habe ich für diese Analyse eine Vielzahl mathematischer Fakten und Methoden zusammengetragen und teilweise weiterentwickelt. Dabei habe ich mich bemüht, neben den formalen Beweisen stets auch (m)eine Intuition zu vermitteln, warum eine gewisse Aussage gilt. Das resultierende Kapitel 2 in [Wi16] wurde so zu einer umfassenden Sammlung der mathematischen Methoden zur Analyse von Quicksort. Das Ergebnis der Analyse lässt sich schließlich als das folgende Theorem zusammenfassen.

Theorem 1 (Theorem 7.1 aus [Wi16], gekürzte Fassung): *Quicksort mit generischem one-pass in-place Partitionieren sortiert eine zufällige Permutation von n Elementen in Erwartung mit $C_n = \frac{a_C}{\mathcal{H}} n \ln n \pm O(n)$ Schlüsselvergleichen und $SE_n = \frac{a_{SE}}{\mathcal{H}} n \ln n \pm O(n)$ gescannten Elementen, wobei die Konstanten von den Algorithmus-Parametern abhängen:*

$$a_C = \sum_{r=1}^{s} \tau_r \cdot \left(\frac{\lambda_k(r) \cdot \left(\sigma_{\rightarrow} + \left[r \le \lfloor m \rfloor\right]\right)}{\kappa - \sigma_{\leftrightarrow} + \left[r \le \lfloor m \rfloor \vee r > \lceil m \rceil\right]} + \frac{\lambda_g(r) \cdot \left(\sigma_{\leftarrow} + \left[r > \lceil m \rceil\right]\right)}{\kappa - \sigma_{\leftrightarrow} + \left[r \le \lfloor m \rfloor \vee r > \lceil m \rceil\right]} \right), \quad (1)$$

$$a_{SE} = \sum_{i=1}^{\lceil m \rceil} i \cdot \tau_{\lceil m \rceil - i + 1} + \sum_{j=1}^{s - \lfloor m \rfloor} j \cdot \tau_{\lfloor m \rfloor + j} - \frac{\sigma_{\leftrightarrow}}{\kappa}, \quad (2)$$

$$\mathcal{H} = \sum_{r=1}^{s} \tau_r (H_\kappa - H_{\sigma_r}). \quad (3)$$

Symbol	*Bedeutung*
κ	$k+1$
$\boldsymbol{\sigma}$	$\boldsymbol{\tau} \cdot \kappa = (\tau_1 \cdot \kappa, \ldots, \tau_s \cdot \kappa)$
$\sigma_{\rightarrow}$	$\sigma_1 + \cdots + \sigma_{\lfloor m \rfloor}$
$\sigma_{\leftrightarrow}$	$\sigma_{\lfloor m \rfloor + 1} + \cdots + \sigma_{\lceil m \rceil}$
$\sigma_{\leftarrow}$	$\sigma_{\lceil m \rceil + 1} + \cdots + \sigma_s$
$\lambda(r)$	*Tiefe des r ten Blattes in* λ
H_n	$1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \cdots + \frac{1}{n}$
[*Aussage*]	1 *falls Auss. wahr,* 0 *sonst*

Insbesondere die Möglichkeit zweier Vergleichsbäume erschwert die Analyse, da die Partitionierungskosten dann eine nicht-lineare Funktion der zufälligen Segmentgrößen sind. Darum hängt z. B. a_C nicht nur von $\boldsymbol{\tau}$, sondern von k direkt ab. Der erste Schritt der Analyse besteht darin, n unabhängige, uniform in $(0,1)$ verteilte reelle Zahlen statt der üblichen Permutation von $\{1, \ldots, n\}$ als Eingabe zu betrachten. Das entkoppelt den *Wert P* eines

Pivots von seinem *Rang* in der Eingabe; bedingt auf die Zufallsgröße P, sind die Klassen der anderen Elemente dann *unabhängig und identisch verteilt!* Die Pivotwerte definieren also eine Wahrscheinlichkeitsverteilung $\boldsymbol{D} = (D_1, \ldots, D_s)$ für die s Klassen. Daraus folgt, dass das Pivot Sampling nur noch die Verteilung $\boldsymbol{D}$ direkt beeinflusst, die Kosten des Partitionieren für festes $\boldsymbol{D}$ dagegen nicht.

Entropie-Intuition. Auf dieser Basis lässt sich ein Teil von Theorem 1 intuitiv nachvollziehen: Pro Element benötigen wir (im Mittel) a_C Vergleiche für seine Klassifizierung und „lernen" dadurch $\mathcal{H}(\boldsymbol{D}) = -\sum_{r=1}^{s} D_r \log_2(D_r)$ Bits an Information über die Eingabe, wobei $\mathcal{H}(\boldsymbol{D})$ die *Shannon-Entropie* der Klassenverteilung ist. Da $\boldsymbol{D}$ von den zufälligen Pivotwerten abhängt, müssen wir die *erwartete* Entropie berechnen. Diese ergibt sich schließlich gerade zu $\mathcal{H} = \mathbb{E}[-\sum_{r=1}^{s} D_r \ln(D_r)] = \ln(2)\mathbb{E}[\mathcal{H}(\boldsymbol{D})]$ aus Gleichung (3); der Informationsgewinn eines Vergleichs ist also $a_C/(\mathcal{H}\ln 2)$. Da wir insgesamt $\log_2(n!) \sim n\log_2(n)$ Bits an Information lernen müssen um zu sortieren, bedarf es dazu im Mittel einer Anzahl von $\frac{a_C}{\mathcal{H}} n \ln n$ Vergleichen. Auch wenn es noch einer rigorosen Fehlerabschätzung bedarf (siehe Kapitel 6 von [Wi16]), liefert diese Argumentation das korrekte Ergebnis.

7 Diskussion der Ergebnisse

Auf Basis von Theorem 1 lassen sich zwei gegebene Quicksort-Varianten vergleichen, doch aufgrund der wechselseitigen Abhängigkeiten ist der Einfluss einzelner Parameter unklar. Kapitel 7 in [Wi16] enthält eine umfassende Diskussion dieser Einflüsse und bestimmt optimale Parameterwerte. Oft sind die Ergebnisse auf den ersten Blick unerwartet: Beispielsweise ist eine leicht *asymmetrische* Pivotwahl, also $\boldsymbol{\tau} \neq \left(\frac{1}{s}, \ldots, \frac{1}{s}\right)$, meist *vorteilhaft* (siehe Abb. 4). Ohne Pivot Sampling sind 5 Pivots bzgl. gescannter Elemente optimal, für noch größere s steigt der Aufwand wieder. Mit passenden Sampling dagegen lassen sich aus jedem weiteren Pivot asymptotisch Vorteile ziehen; die Anzahl gescannter Elemente konvergiert dann gegen $n\log_3(n)$. Ebenso kann man durch passendes Sampling für jeden noch so unbalancierten Vergleichsbaum sicherstellen, dass Quicksort die optimale Vergleichszahl $n\log_2(n)$ im Grenzfall für große Samples erreicht – sofern man $\lambda_k = \lambda_g$ wählt. (Mit $\lambda_k \neq \lambda_g$ erreicht man $n\log_2(n)$ nie!) Für realistische Samplegrößen k gibt es aber durchaus bessere und schlechtere Vergleichsbäume.

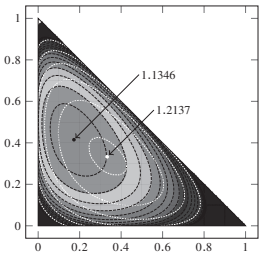


Abb. 4: Gescannte Elem. in YBB als Funktion von (τ_1, τ_2) für $k \to \infty$.

Faire Vergleiche. Obige asymptotisch optimale Varianten sind für realistische Eingabegrößen von begrenztem Nutzen, weil sich dort große Konstanten im $O(n)$-Fehlerterm verstecken: Da nur linear viele Partitionierungen stattfinden, verschwinden die Kosten des Pivot Sampling im $O(n)$-Term. Das bedeutet, dass man beim direkten Vergleich von z. B. klassischem und YBB-Quicksort selbst ohne Sampling Äpfel mit Birnen vergleicht: YBB darf (und muss) seine beiden Pivots sortieren, was sich aber nicht im führenden Term der Kosten niederschlägt, während wir dem klassischen Quicksort dies nicht zugestehen – kein Wunder, dass da YBB besser abschneidet. Um diesen Vergleich fair zu gestalten, habe ich das Vehikel des *Entropie-äquivalenten Samplings* entwickelt: Indem

man k und τ für den klassischen Quicksort *zufällig* nach einer gewissen Verteilung wählt (siehe Proposition 7.2 in [Wi16]), erhält man für beide Varianten den *gleichen* Nenner $\mathcal{H}$. Für das Beispiel aus Abschnitt 4 muss man mit Wahrscheinlichkeit $\frac{3}{5}$ das Maximum von 2 wählen und sonst gar nicht samplen. Weil eine YBB-Partitionierung günstiger als $\frac{5}{3}$ binäre Partitionierungen unter diesem Entropie-äquivalenten Sampling Schema ist, kann man von einem intrinsischen Vorteil des Drei-Wege-Partitionierens sprechen. Die Verallgemeinerung dieses Vergleichs liefert schließlich die Hauptaussage meiner Arbeit: *Bezüglich der Anzahl Vergleiche sind keine bzw. kaum Einsparungen möglich – die Vorteile, die in einigen Arbeiten ausgewiesen werden, sind ausschließlich der Übervorteilung durch bessere Pivots geschuldet – bezüglich der Anzahl gescannter Elemente hat Mehrwege-Quicksort aber originäre Vorteile.*

Gleiche Schlüssel. Neben diesen Ergebnissen zu zufälligen Permutationen, die stets n verschiedene Schlüssel betrachten, konnte ich wesentliche Teile der Analyse auch auf Eingaben mit vielen *gleichen* Schlüsseln erweitern (Kapitel 8 in [Wi16]) und eine lange bestehende, unbewiesene Vermutung von Robert Sedgewick und Jon Bentley bestätigen [SB02].

8 Fazit

Durch die Einbeziehung des Bedarfs an Speicherbandbreite in die mathematische Analyse konnte eine plausible Erklärung für die jüngsten Erfolge von Mehrwege-Quicksort-Varianten in der Praxis gegeben werden: Ähnlich zu Mehrwege-Mergesort sortiert Mehrwege-Quicksort mit weniger Durchläufen über die Eingabe und spart dadurch Speicherzugriffe; die geringen Kosten innerhalb der CPU bleiben dabei fast identisch erhalten. Durch die Analyse einer umfassenden Familie von Quicksort-Varianten können wir die Suche nach der Sortiermethode für das 21. Jahrhundert auf wenige Kandidaten eingrenzen.

Literatur

[AD15] Aumüller, Martin; Dietzfelbinger, Martin: Optimal Partitioning for Dual-Pivot Quicksort. ACM Transactions on Algorithms, 12(2):1–36, November 2015.

[ADK16] Aumüller, Martin; Dietzfelbinger, Martin; Klaue, Pascal: How Good Is Multi-Pivot Quicksort? ACM Transactions on Algorithms, 13(1):1–47, 2016.

[Ah16] Ahonen, Tomi T.: , Smartphone Bloodbath Market Share Update Q1: All the Top 10 brands plus OS shares plus installed base. http://communities-dominate.blogs.com/brands/2016/05/smartphone-bloodbath-market-share-update-q1-all-the-top-10-brands-plus-os-shares-plus-installed-base.html, 2016.

[AV88] Aggarwal, Alok; Vitter, Jeffrey S.: The Input/Output Complexity of Sorting and Related Problems. Communications of the ACM, 31(9):1116–1127, August 1988.

[Ba78] Backus, John: Can Programming Be Liberated from the Von Neumann Style? A Functional Style and Its Algebra of Programs. Communications of the ACM, 21(8):613–641, August 1978.

[Be84] Bentley, Jon: Programming pearls: how to sort. Communications of the ACM, 27(4):287–291, April 1984.

[BM93] Bentley, Jon L.; McIlroy, M. Douglas: Engineering a sort function. Software: Practice and Experience, 23(11):1249–1265, 1993.

[Co09] Cormen, Thomas H.; Leiserson, Charles E.; Rivest, Ronald L.; Stein, Clifford: Introduction to Algorithms. MIT Press, 3rd edition, 2009.

[He91] Hennequin, Pascal: Analyse en moyenne d'algorithmes : tri rapide et arbres de recherche. Thèse (Ph. D. Thesis), Ecole Politechnique, Palaiseau, 1991.

[Ho62] Hoare, C. A. R.: Quicksort. The Computer Journal, 5(1):10–16, January 1962.

[Ja09] Java Core Library Development Mailing List: , Replacement of Quicksort in java.util.Arrays with new Dual-Pivot Quicksort, 2009.

[Ja11] Jackson, Nicholas: Mousetraps: A Symbol of the American Entrepreneurial Spirit. The Atlantic, 2011.

[JD09] JDK Bug System: , Replace modified mergesort in java.util.Arrays.sort with timsort. https://bugs.openjdk.java.net/browse/JDK-6804124, 2009.

[Ku14] Kushagra, Shrinu; López-Ortiz, Alejandro; Qiao, Aurick; Munro, J. Ian: Multi-Pivot Quicksort: Theory and Experiments. In: Meeting on Algorithm Engineering and Experiments (ALENEX). SIAM, pp. 47–60, 2014.

[Mc07] McCalpin, John D.: Sustainable Memory Bandwidth in High Performance Computers. Technical report, University of Virginia, Charlottesville, Virginia, 1991-2007. continually updated technical report.

[NWM16] Nebel, Markus E.; Wild, Sebastian; Martínez, Conrado: Analysis of Pivot Sampling in Dual-Pivot Quicksort. Algorithmica, 75(4):632–683, August 2016.

[SB02] Sedgewick, Robert; Bentley, Jon: , Quicksort is Optimal (Talk Slides), 2002.

[Se78] Sedgewick, Robert: Implementing Quicksort programs. Communications of the ACM, 21(10):847–857, 1978.

[Se80] Sedgewick, Robert: Quicksort. Reprint of the author's Ph. D. thesis, 1980.

[Wi16] Wild, Sebastian: Dual-Pivot Quicksort and Beyond: Analysis of Multiway Partitioning and Its Practical Potential. Doktorarbeit, Technische Universität Kaiserslautern, 2016.

[WM95] Wulf, William Allen; McKee, Sally A.: Hitting the Memory Wall: Implications of the Obvious. ACM SIGARCH Computer Architecture News, 23(1):20–24, March 1995.

[WN12] Wild, Sebastian; Nebel, Markus E.: Average Case Analysis of Java 7's Dual Pivot Quicksort. In (Epstein, Leah; Ferragina, Paolo, eds): European Symposium on Algorithms (ESA). volume 7501 of LNCS. Springer, pp. 825–836, 2012.



Sebastian Wild hat an der Technischen Universität Kaiserslautern mit einem Stipendium der Studienstiftung Informatik studiert und 2012 mit dem Master of Science abgeschlossen. Nach dem Studium blieb er an der TU Kaiserslautern als wissenschaftlicher Mitarbeiter tätig und promovierte bei Prof. Dr. Markus Nebel. Seine Forschungsergebnisse im Bereich der Analyse von Algorithmen führten schon zu Beginn der Promotion zu mehreren Publikationen mit internationalen Kooperationen und einem *Best Paper Award* [WN12]. Er war während des Studiums regelmäßig als Übungsleiter tätig und als wissenschaftlicher Mitarbeiter in der inhaltlichen und organisatorischen Betreuung, sowie der Konzeption neuer Lehrveranstaltungen involviert. Sebastian Wild engagierte sich als Vertreter der wissenschaftlichen Mitarbeiter im Prüfungsausschluss. Er ist verheiratet und Vater von drei Kindern.

GI-Edition Lecture Notes in Informatics

Dissertations

Vol. D-1: Ausgezeichnete Informatikdissertationen 2000
Vol. D-2: Ausgezeichnete Informatikdissertationen 2001
Vol. D-3: Ausgezeichnete Informatikdissertationen 2002
Vol. D-4: Ausgezeichnete Informatikdissertationen 2003
Vol. D-5: Ausgezeichnete Informatikdissertationen 2004
Vol. D-6: Ausgezeichnete Informatikdissertationen 2005
Vol. D-7: Ausgezeichnete Informatikdissertationen 2006
Vol. D-8: Ausgezeichnete Informatikdissertationen 2007
Vol. D-9: Ausgezeichnete Informatikdissertationen 2008
Vol. D-10: Ausgezeichnete Informatikdissertationen 2009
Vol. D-11: Ausgezeichnete Informatikdissertationen 2010
Vol. D-12: Ausgezeichnete Informatikdissertationen 2011
Vol. D-13: Ausgezeichnete Informatikdissertationen 2012
Vol. D-14: Ausgezeichnete Informatikdissertationen 2013
Vol. D-15: Ausgezeichnete Informatikdissertationen 2014
Vol. D-16: Ausgezeichnete Informatikdissertationen 2015
Vol. D-17: Ausgezeichnete Informatikdissertationen 2016

P-1 Gregor Engels, Andreas Oberweis, Albert Zündorf (Hrsg.): Modellierung 2001.

P-2 Mikhail Godlevsky, Heinrich C. Mayr (Hrsg.): Information Systems Technology and its Applications, ISTA'2001.

P-3 Ana M. Moreno, Reind P. van de Riet (Hrsg.): Applications of Natural Lan-guage to Information Systems, NLDB'2001.

P-4 H. Wörn, J. Mühling, C. Vahl, H.-P. Meinzer (Hrsg.): Rechner- und sensor-gestützte Chirurgie; Workshop des SFB 414.

P-5 Andy Schürr (Hg.): OMER – Object-Oriented Modeling of Embedded Real-Time Systems.

P-6 Hans-Jürgen Appelrath, Rolf Beyer, Uwe Marquardt, Heinrich C. Mayr, Claudia Steinberger (Hrsg.): Unternehmen Hoch-schule, UH'2001.

P-7 Andy Evans, Robert France, Ana Moreira, Bernhard Rumpe (Hrsg.): Practical UML-Based Rigorous Development Methods – Countering or Integrating the extremists, pUML'2001.

P-8 Reinhard Keil-Slawik, Johannes Magen-heim (Hrsg.): Informatikunterricht und Medienbildung, INFOS'2001.

P-9 Jan von Knop, Wilhelm Haverkamp (Hrsg.): Innovative Anwendungen in Kommunikationsnetzen, 15. DFN Arbeits-tagung.

P-10 Mirjam Minor, Steffen Staab (Hrsg.): 1st German Workshop on Experience Man-agement: Sharing Experiences about the Sharing Experience.

P-11 Michael Weber, Frank Kargl (Hrsg.): Mobile Ad-Hoc Netzwerke, WMAN 2002.

P-12 Martin Glinz, Günther Müller-Luschnat (Hrsg.): Modellierung 2002.

P-13 Jan von Knop, Peter Schirmbacher and Viljan Mahni_ (Hrsg.): The Changing Universities – The Role of Technology.

P-14 Robert Tolksdorf, Rainer Eckstein (Hrsg.): XML-Technologien für das Se-mantic Web – XSW 2002.

P-15 Hans-Bernd Bludau, Andreas Koop (Hrsg.): Mobile Computing in Medicine.

P-16 J. Felix Hampe, Gerhard Schwabe (Hrsg.): Mobile and Collaborative Busi-ness 2002.

P-17 Jan von Knop, Wilhelm Haverkamp (Hrsg.): Zukunft der Netze –Die Verletz-barkeit meistern, 16. DFN Arbeitstagung.

P-18 Elmar J. Sinz, Markus Plaha (Hrsg.): Modellierung betrieblicher Informations-systeme – MobIS 2002.

P-19 Sigrid Schubert, Bernd Reusch, Norbert Jesse (Hrsg.): Informatik bewegt – Informatik 2002 – 32. Jahrestagung der Gesellschaft für Informatik e.V. (GI) 30.Sept.-3. Okt. 2002 in Dortmund.

P-20 Sigrid Schubert, Bernd Reusch, Norbert Jesse (Hrsg.): Informatik bewegt – Informatik 2002 – 32. Jahrestagung der Gesellschaft für Informatik e.V. (GI) 30.Sept.-3. Okt. 2002 in Dortmund (Ergänzungsband).

P-21 Jörg Desel, Mathias Weske (Hrsg.): Promise 2002: Prozessorientierte Methoden und Werkzeuge für die Entwicklung von Informationssystemen.

P-22 Sigrid Schubert, Johannes Magenheim, Peter Hubwieser, Torsten Brinda (Hrsg.): Forschungsbeiträge zur "Didaktik der Informatik" – Theorie, Praxis, Evaluation.

P-23 Thorsten Spitta, Jens Borchers, Harry M. Sneed (Hrsg.): Software Management 2002 – Fortschritt durch Beständigkeit

P-24 Rainer Eckstein, Robert Tolksdorf (Hrsg.): XMIDX 2003 – XML-Technologien für Middleware – Middleware für XML-Anwendungen

P-25 Key Pousttchi, Klaus Turowski (Hrsg.): Mobile Commerce – Anwendungen und Perspektiven – 3. Workshop Mobile Commerce, Universität Augsburg, 04.02.2003

P-26 Gerhard Weikum, Harald Schöning, Erhard Rahm (Hrsg.): BTW 2003: Datenbanksysteme für Business, Technologie und Web

P-27 Michael Kroll, Hans-Gerd Lipinski, Kay Melzer (Hrsg.): Mobiles Computing in der Medizin

P-28 Ulrich Reimer, Andreas Abecker, Steffen Staab, Gerd Stumme (Hrsg.): WM 2003: Professionelles Wissensmanagement – Er-fahrungen und Visionen

P-29 Antje Düsterhöft, Bernhard Thalheim (Eds.): NLDB'2003: Natural Language Processing and Information Systems

P-30 Mikhail Godlevsky, Stephen Liddle, Heinrich C. Mayr (Eds.): Information Systems Technology and its Applications

P-31 Arslan Brömme, Christoph Busch (Eds.): BIOSIG 2003: Biometrics and Electronic Signatures

P-32 Peter Hubwieser (Hrsg.): Informatische Fachkonzepte im Unterricht – INFOS 2003

P-33 Andreas Geyer-Schulz, Alfred Taudes (Hrsg.): Informationswirtschaft: Ein Sektor mit Zukunft

P-34 Klaus Dittrich, Wolfgang König, Andreas Oberweis, Kai Rannenberg, Wolfgang Wahlster (Hrsg.): Informatik 2003 – Innovative Informatikanwendungen (Band 1)

P-35 Klaus Dittrich, Wolfgang König, Andreas Oberweis, Kai Rannenberg, Wolfgang Wahlster (Hrsg.): Informatik 2003 – Innovative Informatikanwendungen (Band 2)

P-36 Rüdiger Grimm, Hubert B. Keller, Kai Rannenberg (Hrsg.): Informatik 2003 – Mit Sicherheit Informatik

P-37 Arndt Bode, Jörg Desel, Sabine Rathmayer, Martin Wessner (Hrsg.): DeLFI 2003: e-Learning Fachtagung Informatik

P-38 E.J. Sinz, M. Plaha, P. Neckel (Hrsg.): Modellierung betrieblicher Informationssysteme – MobIS 2003

P-39 Jens Nedon, Sandra Frings, Oliver Göbel (Hrsg.): IT-Incident Management & IT-Forensics – IMF 2003

P-40 Michael Rebstock (Hrsg.): Modellierung betrieblicher Informationssysteme – MobIS 2004

P-41 Uwe Brinkschulte, Jürgen Becker, Dietmar Fey, Karl-Erwin Großpietsch, Christian Hochberger, Erik Maehle, Thomas Runkler (Edts.): ARCS 2004 – Organic and Pervasive Computing

P-42 Key Pousttchi, Klaus Turowski (Hrsg.): Mobile Economy – Transaktionen und Prozesse, Anwendungen und Dienste

P-43 Birgitta König-Ries, Michael Klein, Philipp Obreiter (Hrsg.): Persistance, Scalability, Transactions – Database Mechanisms for Mobile Applications

P-44 Jan von Knop, Wilhelm Haverkamp, Eike Jessen (Hrsg.): Security, E-Learning. E-Services

P-45 Bernhard Rumpe, Wofgang Hesse (Hrsg.): Modellierung 2004

P-46 Ulrich Flegel, Michael Meier (Hrsg.): Detection of Intrusions of Malware & Vulnerability Assessment

P-47 Alexander Prosser, Robert Krimmer (Hrsg.): Electronic Voting in Europe – Technology, Law, Politics and Society

P-48 Anatoly Doroshenko, Terry Halpin, Stephen W. Liddle, Heinrich C. Mayr (Hrsg.): Information Systems Technology and its Applications

P-49 G. Schiefer, P. Wagner, M. Morgenstern, U. Rickert (Hrsg.): Integration und Datensicherheit – Anforderungen, Konflikte und Perspektiven

P-50 Peter Dadam, Manfred Reichert (Hrsg.): INFORMATIK 2004 – Informatik verbindet (Band 1) Beiträge der 34. Jahrestagung der Gesellschaft für Informatik e.V. (GI), 20.-24. September 2004 in Ulm

P-51 Peter Dadam, Manfred Reichert (Hrsg.): INFORMATIK 2004 – Informatik verbindet (Band 2) Beiträge der 34. Jahrestagung der Gesellschaft für Informatik e.V. (GI), 20.-24. September 2004 in Ulm

P-52 Gregor Engels, Silke Seehusen (Hrsg.): DELFI 2004 – Tagungsband der 2. e-Learning Fachtagung Informatik

P-53 Robert Giegerich, Jens Stoye (Hrsg.): German Conference on Bioinformatics – GCB 2004

P-54 Jens Borchers, Ralf Kneuper (Hrsg.): Softwaremanagement 2004 – Outsourcing und Integration

P-55 Jan von Knop, Wilhelm Haverkamp, Eike Jessen (Hrsg.): E-Science und Grid Adhoc-Netze Medienintegration

P-56 Fernand Feltz, Andreas Oberweis, Benoit Otjacques (Hrsg.): EMISA 2004 – Informationssysteme im E-Business und E-Government

P-57 Klaus Turowski (Hrsg.): Architekturen, Komponenten, Anwendungen

P-58 Sami Beydeda, Volker Gruhn, Johannes Mayer, Ralf Reussner, Franz Schweiggert (Hrsg.): Testing of Component-Based Systems and Software Quality

P-59 J. Felix Hampe, Franz Lehner, Key Pousttchi, Kai Ranneberg, Klaus Turowski (Hrsg.): Mobile Business – Processes, Platforms, Payments

P-60 Steffen Friedrich (Hrsg.): Unterrichtskonzepte für inforrmatische Bildung

P-61 Paul Müller, Reinhard Gotzhein, Jens B. Schmitt (Hrsg.): Kommunikation in verteilten Systemen

P-62 Federrath, Hannes (Hrsg.): „Sicherheit 2005“ – Sicherheit – Schutz und Zuverlässigkeit

P-63 Roland Kaschek, Heinrich C. Mayr, Stephen Liddle (Hrsg.): Information Systems – Technology and ist Applications

P-64 Peter Liggesmeyer, Klaus Pohl, Michael Goedicke (Hrsg.): Software Engineering 2005

P-65 Gottfried Vossen, Frank Leymann, Peter Lockemann, Wolffried Stucky (Hrsg.): Datenbanksysteme in Business, Technologie und Web

P-66 Jörg M. Haake, Ulrike Lucke, Djamshid Tavangarian (Hrsg.): DeLFI 2005: 3. deutsche e-Learning Fachtagung Informatik

P-67 Armin B. Cremers, Rainer Manthey, Peter Martini, Volker Steinhage (Hrsg.): INFORMATIK 2005 – Informatik LIVE (Band 1)

P-68 Armin B. Cremers, Rainer Manthey, Peter Martini, Volker Steinhage (Hrsg.): INFORMATIK 2005 – Informatik LIVE (Band 2)

P-69 Robert Hirschfeld, Ryszard Kowalcyk, Andreas Polze, Matthias Weske (Hrsg.): NODe 2005, GSEM 2005

P-70 Klaus Turowski, Johannes-Maria Zaha (Hrsg.): Component-oriented Enterprise Application (COAE 2005)

P-71 Andrew Torda, Stefan Kurz, Matthias Rarey (Hrsg.): German Conference on Bioinformatics 2005

P-72 Klaus P. Jantke, Klaus-Peter Fähnrich, Wolfgang S. Wittig (Hrsg.): Marktplatz Internet: Von e-Learning bis e-Payment

P-73 Jan von Knop, Wilhelm Haverkamp, Eike Jessen (Hrsg.): “Heute schon das Morgen sehen“

P-74 Christopher Wolf, Stefan Lucks, Po-Wah Yau (Hrsg.): WEWoRC 2005 – Western European Workshop on Research in Cryptology

P-75 Jörg Desel, Ulrich Frank (Hrsg.): Enterprise Modelling and Information Systems Architecture

P-76 Thomas Kirste, Birgitta König-Riess, Key Pousttchi, Klaus Turowski (Hrsg.): Mobile Informationssysteme – Potentiale, Hindernisse, Einsatz

P-77 Jana Dittmann (Hrsg.): SICHERHEIT 2006

P-78 K.-O. Wenkel, P. Wagner, M. Morgenstern, K. Luzi, P. Eisermann (Hrsg.): Land- und Ernährungswirtschaft im Wandel

P-79 Bettina Biel, Matthias Book, Volker Gruhn (Hrsg.): Softwareengineering 2006

P-80 Mareike Schoop, Christian Huemer, Michael Rebstock, Martin Bichler (Hrsg.): Service-Oriented Electronic Commerce

P-81 Wolfgang Karl, Jürgen Becker, Karl-Erwin Großpietsch, Christian Hochberger, Erik Maehle (Hrsg.): ARCS´06

P-82 Heinrich C. Mayr, Ruth Breu (Hrsg.): Modellierung 2006

P-83 Daniel Huson, Oliver Kohlbacher, Andrei Lupas, Kay Nieselt and Andreas Zell (eds.): German Conference on Bioinformatics

P-84 Dimitris Karagiannis, Heinrich C. Mayr, (Hrsg.): Information Systems Technology and its Applications

P-85 Witold Abramowicz, Heinrich C. Mayr, (Hrsg.): Business Information Systems

P-86 Robert Krimmer (Ed.): Electronic Voting 2006

P-87 Max Mühlhäuser, Guido Rößling, Ralf Steinmetz (Hrsg.): DELFI 2006: 4. e-Learning Fachtagung Informatik

P-88 Robert Hirschfeld, Andreas Polze, Ryszard Kowalczyk (Hrsg.): NODe 2006, GSEM 2006

P-90 Joachim Schelp, Robert Winter, Ulrich Frank, Bodo Rieger, Klaus Turowski (Hrsg.): Integration, Informationslogistik und Architektur

P-91 Henrik Stormer, Andreas Meier, Michael Schumacher (Eds.): European Conference on eHealth 2006

P-92 Fernand Feltz, Benoît Otjacques, Andreas Oberweis, Nicolas Poussing (Eds.): AIM 2006

P-93 Christian Hochberger, Rüdiger Liskowsky (Eds.): INFORMATIK 2006 – Informatik für Menschen, Band 1

P-94 Christian Hochberger, Rüdiger Liskowsky (Eds.): INFORMATIK 2006 – Informatik für Menschen, Band 2

P-95 Matthias Weske, Markus Nüttgens (Eds.): EMISA 2005: Methoden, Konzepte und Technologien für die Entwicklung von dienstbasierten Informationssystemen

P-96 Saartje Brockmans, Jürgen Jung, York Sure (Eds.): Meta-Modelling and Ontologies

P-97 Oliver Göbel, Dirk Schadt, Sandra Frings, Hardo Hase, Detlef Günther, Jens Nedon (Eds.): IT-Incident Mangament & IT-Forensics – IMF 2006

P-98 Hans Brandt-Pook, Werner Simonsmeier und Thorsten Spitta (Hrsg.): Beratung in der Softwareentwicklung – Modelle, Methoden, Best Practices

P-99 Andreas Schwill, Carsten Schulte, Marco Thomas (Hrsg.): Didaktik der Informatik

P-100 Peter Forbrig, Günter Siegel, Markus Schneider (Hrsg.): HDI 2006: Hochschuldidaktik der Informatik

P-101 Stefan Böttinger, Ludwig Theuvsen, Susanne Rank, Marlies Morgenstern (Hrsg.): Agrarinformatik im Spannungsfeld zwischen Regionalisierung und globalen Wertschöpfungsketten

P-102 Otto Spaniol (Eds.): Mobile Services and Personalized Environments

P-103 Alfons Kemper, Harald Schöning, Thomas Rose, Matthias Jarke, Thomas Seidl, Christoph Quix, Christoph Brochhaus (Hrsg.): Datenbanksysteme in Business, Technologie und Web (BTW 2007)

P-104 Birgitta König-Ries, Franz Lehner, Rainer Malaka, Can Türker (Hrsg.) MMS 2007: Mobilität und mobile Informationssysteme

P-105 Wolf-Gideon Bleek, Jörg Raasch, Heinz Züllighoven (Hrsg.) Software Engineering 2007

P-106 Wolf-Gideon Bleek, Henning Schwentner, Heinz Züllighoven (Hrsg.) Software Engineering 2007 – Beiträge zu den Workshops

P-107 Heinrich C. Mayr, Dimitris Karagiannis (eds.) Information Systems Technology and its Applications

P-108 Arslan Brömme, Christoph Busch, Detlef Hühnlein (eds.) BIOSIG 2007: Biometrics and Electronic Signatures

P-109 Rainer Koschke, Otthein Herzog, Karl-Heinz Rödiger, Marc Ronthaler (Hrsg.) INFORMATIK 2007 Informatik trifft Logistik Band 1

P-110 Rainer Koschke, Otthein Herzog, Karl-Heinz Rödiger, Marc Ronthaler (Hrsg.) INFORMATIK 2007 Informatik trifft Logistik Band 2

P-111 Christian Eibl, Johannes Magenheim, Sigrid Schubert, Martin Wessner (Hrsg.) DeLFI 2007: 5. e-Learning Fachtagung Informatik

P-112 Sigrid Schubert (Hrsg.) Didaktik der Informatik in Theorie und Praxis

P-113 Sören Auer, Christian Bizer, Claudia Müller, Anna V. Zhdanova (Eds.) The Social Semantic Web 2007 Proceedings of the 1st Conference on Social Semantic Web (CSSW)

P-114 Sandra Frings, Oliver Göbel, Detlef Günther, Hardo G. Hase, Jens Nedon, Dirk Schadt, Arslan Brömme (Eds.)
IMF2007 IT-incident management & IT-forensics
Proceedings of the 3rd International Conference on IT-Incident Management & IT-Forensics

P-115 Claudia Falter, Alexander Schliep, Joachim Selbig, Martin Vingron and Dirk Walther (Eds.)
German conference on bioinformatics GCB 2007

P-116 Witold Abramowicz, Leszek Maciszek (Eds.)
Business Process and Services Computing
1st International Working Conference on Business Process and Services Computing BPSC 2007

P-117 Ryszard Kowalczyk (Ed.)
Grid service engineering and manegement
The 4th International Conference on Grid Service Engineering and Management GSEM 2007

P-118 Andreas Hein, Wilfried Thoben, Hans-Jürgen Appelrath, Peter Jensch (Eds.)
European Conference on ehealth 2007

P-119 Manfred Reichert, Stefan Strecker, Klaus Turowski (Eds.)
Enterprise Modelling and Information Systems Architectures
Concepts and Applications

P-120 Adam Pawlak, Kurt Sandkuhl, Wojciech Cholewa, Leandro Soares Indrusiak (Eds.)
Coordination of Collaborative Engineering - State of the Art and Future Challenges

P-121 Korbinian Herrmann, Bernd Bruegge (Hrsg.)
Software Engineering 2008
Fachtagung des GI-Fachbereichs Softwaretechnik

P-122 Walid Maalej, Bernd Bruegge (Hrsg.)
Software Engineering 2008 - Workshopband
Fachtagung des GI-Fachbereichs Softwaretechnik

P-123 Michael H. Breitner, Martin Breunig, Elgar Fleisch, Ley Pousttchi, Klaus Turowski (Hrsg.)
Mobile und Ubiquitäre Informationssysteme – Technologien, Prozesse, Marktfähigkeit
Proceedings zur 3. Konferenz Mobile und Ubiquitäre Informationssysteme (MMS 2008)

P-124 Wolfgang E. Nagel, Rolf Hoffmann, Andreas Koch (Eds.)
9th Workshop on Parallel Systems and Algorithms (PASA)
Workshop of the GI/ITG Speciel Interest Groups PARS and PARVA

P-125 Rolf A.E. Müller, Hans-H. Sundermeier, Ludwig Theuvsen, Stephanie Schütze, Marlies Morgenstern (Hrsg.)
Unternehmens-IT:
Führungsinstrument oder Verwaltungsbürde
Referate der 28. GIL Jahrestagung

P-126 Rainer Gimnich, Uwe Kaiser, Jochen Quante, Andreas Winter (Hrsg.)
10th Workshop Software Reengineering (WSR 2008)

P-127 Thomas Kühne, Wolfgang Reisig, Friedrich Steimann (Hrsg.)
Modellierung 2008

P-128 Ammar Alkassar, Jörg Siekmann (Hrsg.)
Sicherheit 2008
Sicherheit, Schutz und Zuverlässigkeit
Beiträge der 4. Jahrestagung des Fachbereichs Sicherheit der Gesellschaft für Informatik e.V. (GI)
2.-4. April 2008
Saarbrücken, Germany

P-129 Wolfgang Hesse, Andreas Oberweis (Eds.)
Sigsand-Europe 2008
Proceedings of the Third AIS SIGSAND European Symposium on Analysis, Design, Use and Societal Impact of Information Systems

P-130 Paul Müller, Bernhard Neumair, Gabi Dreo Rodosek (Hrsg.)
1. DFN-Forum Kommunikations-technologien Beiträge der Fachtagung

P-131 Robert Krimmer, Rüdiger Grimm (Eds.)
3rd International Conference on Electronic Voting 2008
Co-organized by Council of Europe, Gesellschaft für Informatik and E-Voting. CC

P-132 Silke Seehusen, Ulrike Lucke, Stefan Fischer (Hrsg.)
DeLFI 2008:
Die 6. e-Learning Fachtagung Informatik

P-133 Heinz-Gerd Hegering, Axel Lehmann, Hans Jürgen Ohlbach, Christian Scheideler (Hrsg.)
INFORMATIK 2008
Beherrschbare Systeme – dank Informatik
Band 1

P-134 Heinz-Gerd Hegering, Axel Lehmann, Hans Jürgen Ohlbach, Christian Scheideler (Hrsg.)
INFORMATIK 2008
Beherrschbare Systeme – dank Informatik
Band 2

P-135 Torsten Brinda, Michael Fothe, Peter Hubwieser, Kirsten Schlüter (Hrsg.)
Didaktik der Informatik –
Aktuelle Forschungsergebnisse

P-136 Andreas Beyer, Michael Schroeder (Eds.)
German Conference on Bioinformatics
GCB 2008

P-137 Arslan Brömme, Christoph Busch, Detlef Hühnlein (Eds.)
BIOSIG 2008: Biometrics and Electronic Signatures

P-138 Barbara Dinter, Robert Winter, Peter Chamoni, Norbert Gronau, Klaus Turowski (Hrsg.)
Synergien durch Integration und Informationslogistik
Proceedings zur DW2008

P-139 Georg Herzwurm, Martin Mikusz (Hrsg.)°
Industrialisierung des Software-Managements
Fachtagung des GI-Fachausschusses Management der Anwendungsentwicklung und -wartung im Fachbereich Wirtschaftsinformatik

P-140 Oliver Göbel, Sandra Frings, Detlef Günther, Jens Nedon, Dirk Schadt (Eds.)°
IMF 2008 - IT Incident Management & IT Forensics

P-141 Peter Loos, Markus Nüttgens, Klaus Turowski, Dirk Werth (Hrsg.)
Modellierung betrieblicher Informationssysteme (MobIS 2008)
Modellierung zwischen SOA und Compliance Management

P-142 R. Bill, P. Korduan, L. Theuvsen, M. Morgenstern (Hrsg.)
Anforderungen an die Agrarinformatik durch Globalisierung und Klimaveränderung

P-143 Peter Liggesmeyer, Gregor Engels, Jürgen Münch, Jörg Dörr, Norman Riegel (Hrsg.)
Software Engineering 2009
Fachtagung des GI-Fachbereichs Softwaretechnik

P-144 Johann-Christoph Freytag, Thomas Ruf, Wolfgang Lehner, Gottfried Vossen (Hrsg.)
Datenbanksysteme in Business, Technologie und Web (BTW)

P-145 Knut Hinkelmann, Holger Wache (Eds.)
WM2009: 5th Conference on Professional Knowledge Management

P-146 Markus Bick, Martin Breunig, Hagen Höpfner (Hrsg.)
Mobile und Ubiquitäre Informationssysteme – Entwicklung, Implementierung und Anwendung
4. Konferenz Mobile und Ubiquitäre Informationssysteme (MMS 2009)

P-147 Witold Abramowicz, Leszek Maciaszek, Ryszard Kowalczyk, Andreas Speck (Eds.)
Business Process, Services Computing and Intelligent Service Management
BPSC 2009 · ISM 2009 · YRW-MBP 2009

P-148 Christian Erfurth, Gerald Eichler, Volkmar Schau (Eds.)
9th International Conference on Innovative Internet Community Systems
I^2CS 2009

P-149 Paul Müller, Bernhard Neumair, Gabi Dreo Rodosek (Hrsg.)
2. DFN-Forum Kommunikationstechnologien
Beiträge der Fachtagung

P-150 Jürgen Münch, Peter Liggesmeyer (Hrsg.)
Software Engineering
2009 - Workshopband

P-151 Armin Heinzl, Peter Dadam, Stefan Kirn, Peter Lockemann (Eds.)
PRIMIUM
Process Innovation for Enterprise Software

P-152 Jan Mendling, Stefanie Rinderle-Ma, Werner Esswein (Eds.)
Enterprise Modelling and Information Systems Architectures
Proceedings of the 3rd Int'l Workshop EMISA 2009

P-153 Andreas Schwill, Nicolas Apostolopoulos (Hrsg.)
Lernen im Digitalen Zeitalter
DeLFI 2009 – Die 7. E-Learning Fachtagung Informatik

P-154 Stefan Fischer, Erik Maehle Rüdiger Reischuk (Hrsg.)
INFORMATIK 2009
Im Focus das Leben

P-155 Arslan Brömme, Christoph Busch, Detlef Hühnlein (Eds.)
BIOSIG 2009:
Biometrics and Electronic Signatures
Proceedings of the Special Interest Group on Biometrics and Electronic Signatures

P-156 Bernhard Koerber (Hrsg.)
Zukunft braucht Herkunft
25 Jahre »INFOS – Informatik und Schule«

P-157 Ivo Grosse, Steffen Neumann, Stefan Posch, Falk Schreiber, Peter Stadler (Eds.)
German Conference on Bioinformatics 2009

P-158 W. Claupein, L. Theuvsen, A. Kämpf, M. Morgenstern (Hrsg.)
Precision Agriculture Reloaded – Informationsgestützte Landwirtschaft

P-159 Gregor Engels, Markus Luckey, Wilhelm Schäfer (Hrsg.)
Software Engineering 2010

P-160 Gregor Engels, Markus Luckey, Alexander Pretschner, Ralf Reussner (Hrsg.)
Software Engineering 2010 – Workshopband
(inkl. Doktorandensymposium)

P-161 Gregor Engels, Dimitris Karagiannis Heinrich C. Mayr (Hrsg.)
Modellierung 2010

P-162 Maria A. Wimmer, Uwe Brinkhoff, Siegfried Kaiser, Dagmar Lück-Schneider, Erich Schweighofer, Andreas Wiebe (Hrsg.)
Vernetzte IT für einen effektiven Staat
Gemeinsame Fachtagung Verwaltungsinformatik (FTVI) und Fachtagung Rechtsinformatik (FTRI) 2010

P-163 Markus Bick, Stefan Eulgem, Elgar Fleisch, J. Felix Hampe, Birgitta König-Ries, Franz Lehner, Key Pousttchi, Kai Rannenberg (Hrsg.)
Mobile und Ubiquitäre Informationssysteme
Technologien, Anwendungen und Dienste zur Unterstützung von mobiler Kollaboration

P-164 Arslan Brömme, Christoph Busch (Eds.)
BIOSIG 2010: Biometrics and Electronic Signatures Proceedings of the Special Interest Group on Biometrics and Electronic Signatures

P-165 Gerald Eichler, Peter Kropf, Ulrike Lechner, Phayung Meesad, Herwig Unger (Eds.)
10th International Conference on Innovative Internet Community Systems (I^2CS) – Jubilee Edition 2010 –

P-166 Paul Müller, Bernhard Neumair, Gabi Dreo Rodosek (Hrsg.)
3. DFN-Forum Kommunikationstechnologien
Beiträge der Fachtagung

P-167 Robert Krimmer, Rüdiger Grimm (Eds.)
4th International Conference on Electronic Voting 2010
co-organized by the Council of Europe, Gesellschaft für Informatik and E-Voting.CC

P-168 Ira Diethelm, Christina Dörge, Claudia Hildebrandt, Carsten Schulte (Hrsg.)
Didaktik der Informatik
Möglichkeiten empirischer Forschungsmethoden und Perspektiven der Fachdidaktik

P-169 Michael Kerres, Nadine Ojstersek Ulrik Schroeder, Ulrich Hoppe (Hrsg.)
DeLFI 2010 - 8. Tagung der Fachgruppe E-Learning der Gesellschaft für Informatik e.V.

P-170 Felix C. Freiling (Hrsg.)
Sicherheit 2010
Sicherheit, Schutz und Zuverlässigkeit

P-171 Werner Esswein, Klaus Turowski, Martin Juhrisch (Hrsg.)
Modellierung betrieblicher Informationssysteme (MobIS 2010)
Modellgestütztes Management

P-172 Stefan Klink, Agnes Koschmider Marco Mevius, Andreas Oberweis (Hrsg.)
EMISA 2010
Einflussfaktoren auf die Entwicklung flexibler, integrierter Informationssysteme
Beiträge des Workshops der GI-Fachgruppe EMISA (Entwicklungsmethoden für Informationssysteme und deren Anwendung)

P-173 Dietmar Schomburg, Andreas Grote (Eds.)
German Conference on Bioinformatics 2010

P-174 Arslan Brömme, Torsten Eymann, Detlef Hühnlein, Heiko Roßnagel, Paul Schmücker (Hrsg.)
perspeGKtive 2010
Workshop „Innovative und sichere Informationstechnologie für das Gesundheitswesen von morgen“

P-175 Klaus-Peter Fähnrich, Bogdan Franczyk (Hrsg.)
INFORMATIK 2010
Service Science – Neue Perspektiven für die Informatik
Band 1

P-176 Klaus-Peter Fähnrich, Bogdan Franczyk (Hrsg.)
INFORMATIK 2010
Service Science – Neue Perspektiven für die Informatik
Band 2

P-177 Witold Abramowicz, Rainer Alt, Klaus-Peter Fähnrich, Bogdan Franczyk, Leszek A. Maciaszek (Eds.)
INFORMATIK 2010
Business Process and Service Science – Proceedings of ISSS and BPSC

P-178 Wolfram Pietsch, Benedikt Krams (Hrsg.)
Vom Projekt zum Produkt
Fachtagung des GI-Fachausschusses Management der Anwendungsentwicklung und -wartung im Fachbereich Wirtschaftsinformatik (WI-MAW), Aachen, 2010

P-179 Stefan Gruner, Bernhard Rumpe (Eds.)
FM+AM`2010
Second International Workshop on Formal Methods and Agile Methods

P-180 Theo Härder, Wolfgang Lehner, Bernhard Mitschang, Harald Schöning, Holger Schwarz (Hrsg.)
Datenbanksysteme für Business, Technologie und Web (BTW)
14. Fachtagung des GI-Fachbereichs „Datenbanken und Informationssysteme“ (DBIS)

P-181 Michael Clasen, Otto Schätzel, Brigitte Theuvsen (Hrsg.)
Qualität und Effizienz durch informationsgestützte Landwirtschaft, Fokus: Moderne Weinwirtschaft

P-182 Ronald Maier (Hrsg.)
6th Conference on Professional Knowledge Management
From Knowledge to Action

P-183 Ralf Reussner, Matthias Grund, Andreas Oberweis, Walter Tichy (Hrsg.)
Software Engineering 2011
Fachtagung des GI-Fachbereichs Softwaretechnik

P-184 Ralf Reussner, Alexander Pretschner, Stefan Jähnichen (Hrsg.)
Software Engineering 2011 Workshopband (inkl. Doktorandensymposium)

P-185 Hagen Höpfner, Günther Specht, Thomas Ritz, Christian Bunse (Hrsg.)
MMS 2011: Mobile und ubiquitäre Informationssysteme Proceedings zur 6. Konferenz Mobile und Ubiquitäre Informationssysteme (MMS 2011)

P-186 Gerald Eichler, Axel Küpper, Volkmar Schau, Hacène Fouchal, Herwig Unger (Eds.)
11th International Conference on Innovative Internet Community Systems (I^2CS)

P-187 Paul Müller, Bernhard Neumair, Gabi Dreo Rodosek (Hrsg.)
4. DFN-Forum Kommunikationstechnologien, Beiträge der Fachtagung 20. Juni bis 21. Juni 2011 Bonn

P-188 Holger Rohland, Andrea Kienle, Steffen Friedrich (Hrsg.)
DeLFI 2011 – Die 9. e-Learning Fachtagung Informatik der Gesellschaft für Informatik e.V. 5.–8. September 2011, Dresden

P-189 Thomas, Marco (Hrsg.)
Informatik in Bildung und Beruf
INFOS 2011
14. GI-Fachtagung Informatik und Schule

P-190 Markus Nüttgens, Oliver Thomas, Barbara Weber (Eds.)
Enterprise Modelling and Information Systems Architectures (EMISA 2011)

P-191 Arslan Brömme, Christoph Busch (Eds.)
BIOSIG 2011
International Conference of the Biometrics Special Interest Group

P-192 Hans-Ulrich Heiß, Peter Pepper, Holger Schlingloff, Jörg Schneider (Hrsg.)
INFORMATIK 2011
Informatik schafft Communities

P-193 Wolfgang Lehner, Gunther Piller (Hrsg.)
IMDM 2011

P-194 M. Clasen, G. Fröhlich, H. Bernhardt, K. Hildebrand, B. Theuvsen (Hrsg.)
Informationstechnologie für eine nachhaltige Landbewirtschaftung
Fokus Forstwirtschaft

P-195 Neeraj Suri, Michael Waidner (Hrsg.)
Sicherheit 2012
Sicherheit, Schutz und Zuverlässigkeit
Beiträge der 6. Jahrestagung des Fachbereichs Sicherheit der Gesellschaft für Informatik e.V. (GI)

P-196 Arslan Brömme, Christoph Busch (Eds.)
BIOSIG 2012
Proceedings of the 11th International Conference of the Biometrics Special Interest Group

P-197 Jörn von Lucke, Christian P. Geiger, Siegfried Kaiser, Erich Schweighofer, Maria A. Wimmer (Hrsg.)
Auf dem Weg zu einer offenen, smarten und vernetzten Verwaltungskultur
Gemeinsame Fachtagung Verwaltungsinformatik (FTVI) und Fachtagung Rechtsinformatik (FTRI) 2012

P-198 Stefan Jähnichen, Axel Küpper, Sahin Albayrak (Hrsg.)
Software Engineering 2012
Fachtagung des GI-Fachbereichs Softwaretechnik

P-199 Stefan Jähnichen, Bernhard Rumpe, Holger Schlingloff (Hrsg.)
Software Engineering 2012
Workshopband

P-200 Gero Mühl, Jan Richling, Andreas Herkersdorf (Hrsg.)
ARCS 2012 Workshops

P-201 Elmar J. Sinz Andy Schürr (Hrsg.)
Modellierung 2012

P-202 Andrea Back, Markus Bick, Martin Breunig, Key Pousttchi, Frédéric Thiesse (Hrsg.)
MMS 2012:Mobile und Ubiquitäre Informationssysteme

P-203 Paul Müller, Bernhard Neumair, Helmut Reiser, Gabi Dreo Rodosek (Hrsg.)
5. DFN-Forum Kommunikations-technologien
Beiträge der Fachtagung

P-204 Gerald Eichler, Leendert W. M. Wienhofen, Anders Kofod-Petersen, Herwig Unger (Eds.)
12th International Conference on Innovative Internet Community Systems (I2CS 2012)

P-205 Manuel J. Kripp, Melanie Volkamer, Rüdiger Grimm (Eds.)
5th International Conference on Electronic Voting 2012 (EVOTE2012)
Co-organized by the Council of Europe, Gesellschaft für Informatik and E-Voting.CC

P-206 Stefanie Rinderle-Ma, Mathias Weske (Hrsg.)
EMISA 2012
Der Mensch im Zentrum der Modellierung

P-207 Jörg Desel, Jörg M. Haake, Christian Spannagel (Hrsg.)
DeLFI 2012: Die 10. e-Learning Fachtagung Informatik der Gesellschaft für Informatik e.V.
24.–26. September 2012

P-208 Ursula Goltz, Marcus Magnor, Hans-Jürgen Appelrath, Herbert Matthies, Wolf-Tilo Balke, Lars Wolf (Hrsg.)
INFORMATIK 2012

P-209 Hans Brandt-Pook, André Fleer, Thorsten Spitta, Malte Wattenberg (Hrsg.)
Nachhaltiges Software Management

P-210 Erhard Plödereder, Peter Dencker, Herbert Klenk, Hubert B. Keller, Silke Spitzer (Hrsg.)
Automotive – Safety & Security 2012
Sicherheit und Zuverlässigkeit für automobile Informationstechnik

P-211 M. Clasen, K. C. Kersebaum, A. Meyer-Aurich, B. Theuvsen (Hrsg.)
Massendatenmanagement in der Agrar- und Ernährungswirtschaft
Erhebung - Verarbeitung - Nutzung
Referate der 33. GIL-Jahrestagung
20. – 21. Februar 2013, Potsdam

P-212 Arslan Brömme, Christoph Busch (Eds.)
BIOSIG 2013
Proceedings of the 12th International Conference of the Biometrics Special Interest Group
04.–06. September 2013
Darmstadt, Germany

P-213 Stefan Kowalewski, Bernhard Rumpe (Hrsg.)
Software Engineering 2013
Fachtagung des GI-Fachbereichs Softwaretechnik

P-214 Volker Markl, Gunter Saake, Kai-Uwe Sattler, Gregor Hackenbroich, Bernhard Mit schang, Theo Härder, Veit Köppen (Hrsg.)
Datenbanksysteme für Business, Technologie und Web (BTW) 2013
13. – 15. März 2013, Magdeburg

P-215 Stefan Wagner, Horst Lichter (Hrsg.)Software Engineering 2013
Workshopband
(inkl. Doktorandensymposium)
26. Februar – 1. März 2013, Aachen

P-216 Gunter Saake, Andreas Henrich, Wolfgang Lehner, Thomas Neumann, Veit Köppen (Hrsg.)
Datenbanksysteme für Business, Technologie und Web (BTW) 2013 –Workshopband
11. – 12. März 2013, Magdeburg

P-217 Paul Müller, Bernhard Neumair, Helmut Reiser, Gabi Dreo Rodosek (Hrsg.)
6. DFN-Forum Kommunikations-technologien
Beiträge der Fachtagung
03.–04. Juni 2013, Erlangen

P-218 Andreas Breiter, Christoph Rensing (Hrsg.)
DeLFI 2013: Die 11 e-Learning Fachtagung Informatik der Gesellschaft für Informatik e.V. (GI)
8. – 11. September 2013, Bremen

P-219 Norbert Breier, Peer Stechert, Thomas Wilke (Hrsg.)
Informatik erweitert Horizonte
INFOS 2013
15. GI-Fachtagung Informatik und Schule
26. – 28. September 2013

P-220 Matthias Horbach (Hrsg.)
INFORMATIK 2013
Informatik angepasst an Mensch, Organisation und Umwelt
16. – 20. September 2013, Koblenz

P-221 Maria A. Wimmer, Marijn Janssen, Ann Macintosh, Hans Jochen Scholl, Efthimios Tambouris (Eds.)
Electronic Government and Electronic Participation
Joint Proceedings of Ongoing Research of IFIP EGOV and IFIP ePart 2013
16. – 19. September 2013, Koblenz

P-222 Reinhard Jung, Manfred Reichert (Eds.)
Enterprise Modelling
and Information Systems Architectures
(EMISA 2013)
St. Gallen, Switzerland
September 5. – 6. 2013

P-223 Detlef Hühnlein, Heiko Roßnagel (Hrsg.)
Open Identity Summit 2013
10. – 11. September 2013
Kloster Banz, Germany

P-224 Eckhart Hanser, Martin Mikusz, Masud Fazal-Baqaie (Hrsg.)
Vorgehensmodelle 2013
Vorgehensmodelle – Anspruch und Wirklichkeit
20. Tagung der Fachgruppe Vorgehensmodelle im Fachgebiet Wirtschaftsinformatik (WI-VM) der Gesellschaft für Informatik e.V.
Lörrach, 2013

P-225 Hans-Georg Fill, Dimitris Karagiannis, Ulrich Reimer (Hrsg.)
Modellierung 2014
19. – 21. März 2014, Wien

P-226 M. Clasen, M. Hamer, S. Lehnert, B. Petersen, B. Theuvsen (Hrsg.)
IT-Standards in der Agrar- und Ernährungswirtschaft Fokus: Risiko- und Krisenmanagement
Referate der 34. GIL-Jahrestagung
24. – 25. Februar 2014, Bonn

P-227 Wilhelm Hasselbring, Nils Christian Ehmke (Hrsg.)
Software Engineering 2014
Fachtagung des GI-Fachbereichs Softwaretechnik
25. – 28. Februar 2014
Kiel, Deutschland

P-228 Stefan Katzenbeisser, Volkmar Lotz, Edgar Weippl (Hrsg.)
Sicherheit 2014
Sicherheit, Schutz und Zuverlässigkeit
Beiträge der 7. Jahrestagung des Fachbereichs Sicherheit der Gesellschaft für Informatik e.V. (GI)
19. – 21. März 2014, Wien

P-229 Dagmar Lück-Schneider, Thomas Gordon, Siegfried Kaiser, Jörn von Lucke,Erich Schweighofer, Maria A.Wimmer, Martin G. Löhe (Hrsg.)
Gemeinsam Electronic Government ziel(gruppen)gerecht gestalten und organisieren
Gemeinsame Fachtagung Verwaltungsinformatik (FTVI) und Fachtagung Rechtsinformatik (FTRI) 2014, 20.-21. März 2014 in Berlin

P-230 Arslan Brömme, Christoph Busch (Eds.)
BIOSIG 2014
Proceedings of the 13th International Conference of the Biometrics Special Interest Group
10. – 12. September 2014 in Darmstadt, Germany

P-231 Paul Müller, Bernhard Neumair, Helmut Reiser, Gabi Dreo Rodosek (Hrsg.)
7. DFN-Forum Kommunikationstechnologien
16. – 17. Juni 2014
Fulda

P-232 E. Plödereder, L. Grunske, E. Schneider, D. Ull (Hrsg.)
INFORMATIK 2014
Big Data – Komplexität meistern
22. – 26. September 2014
Stuttgart

P-233 Stephan Trahasch, Rolf Plötzner, Gerhard Schneider, Claudia Gayer, Daniel Sassiat, Nicole Wöhrle (Hrsg.)
DeLFI 2014 – Die 12. e-Learning Fachtagung Informatik
der Gesellschaft für Informatik e.V.
15. – 17. September 2014
Freiburg

P-234 Fernand Feltz, Bela Mutschler, Benoît Otjacques (Eds.)
Enterprise Modelling and Information Systems Architectures
(EMISA 2014)
Luxembourg, September 25-26, 2014

P-235 Robert Giegerich, Ralf Hofestädt, Tim W. Nattkemper (Eds.)
German Conference on Bioinformatics 2014
September 28 – October 1
Bielefeld, Germany

P-236 Martin Engstler, Eckhart Hanser, Martin Mikusz, Georg Herzwurm (Hrsg.)
Projektmanagement und Vorgehensmodelle 2014
Soziale Aspekte und Standardisierung
Gemeinsame Tagung der Fachgruppen Projektmanagement (WI-PM) und Vorgehensmodelle (WI-VM) im Fachgebiet Wirtschaftsinformatik der Gesellschaft für Informatik e.V., Stuttgart 2014

P-237 Detlef Hühnlein, Heiko Roßnagel (Hrsg.)
Open Identity Summit 2014
4.–6. November 2014
Stuttgart, Germany

P-238 Arno Ruckelshausen, Hans-Peter Schwarz, Brigitte Theuvsen (Hrsg.)
Informatik in der Land-, Forst- und Ernährungswirtschaft
Referate der 35. GIL-Jahrestagung
23. – 24. Februar 2015, Geisenheim

P-239 Uwe Aßmann, Birgit Demuth, Thorsten Spitta, Georg Püschel, Ronny Kaiser (Hrsg.)
Software Engineering & Management 2015
17.-20. März 2015, Dresden

P-240 Herbert Klenk, Hubert B. Keller, Erhard Plödereder, Peter Dencker (Hrsg.)
Automotive – Safety & Security 2015
Sicherheit und Zuverlässigkeit für automobile Informationstechnik
21.–22. April 2015, Stuttgart

P-241 Thomas Seidl, Norbert Ritter, Harald Schöning, Kai-Uwe Sattler, Theo Härder, Steffen Friedrich, Wolfram Wingerath (Hrsg.)
Datenbanksysteme für Business, Technologie und Web (BTW 2015)
04. – 06. März 2015, Hamburg

P-242 Norbert Ritter, Andreas Henrich, Wolfgang Lehner, Andreas Thor, Steffen Friedrich, Wolfram Wingerath (Hrsg.)
Datenbanksysteme für Business, Technologie und Web (BTW 2015) – Workshopband
02. – 03. März 2015, Hamburg

P-243 Paul Müller, Bernhard Neumair, Helmut Reiser, Gabi Dreo Rodosek (Hrsg.)
8. DFN-Forum Kommunikationstechnologien
06.–09. Juni 2015, Lübeck

P-244 Alfred Zimmermann, Alexander Rossmann (Eds.)
Digital Enterprise Computing (DEC 2015)
Böblingen, Germany June 25-26, 2015

P-245 Arslan Brömme, Christoph Busch , Christian Rathgeb, Andreas Uhl (Eds.)
BIOSIG 2015
Proceedings of the 14th International Conference of the Biometrics Special Interest Group
09.–11. September 2015
Darmstadt, Germany

P-246 Douglas W. Cunningham, Petra Hofstedt, Klaus Meer, Ingo Schmitt (Hrsg.)
INFORMATIK 2015
28.9.-2.10. 2015, Cottbus

P-247 Hans Pongratz, Reinhard Keil (Hrsg.)
DeLFI 2015 – Die 13. E-Learning Fachtagung Informatik der Gesellschaft für Informatik e.V. (GI)
1.–4. September 2015
München

P-248 Jens Kolb, Henrik Leopold, Jan Mendling (Eds.)
Enterprise Modelling and Information Systems Architectures
Proceedings of the 6th Int. Workshop on Enterprise Modelling and Information Systems Architectures, Innsbruck, Austria
September 3-4, 2015

P-249 Jens Gallenbacher (Hrsg.)
Informatik allgemeinbildend begreifen
INFOS 2015 16. GI-Fachtagung Informatik und Schule
20.–23. September 2015

P-250 Martin Engstler, Masud Fazal-Baqaie, Eckhart Hanser, Martin Mikusz, Alexander Volland (Hrsg.)
Projektmanagement und Vorgehensmodelle 2015
Hybride Projektstrukturen erfolgreich umsetzen
Gemeinsame Tagung der Fachgruppen Projektmanagement (WI-PM) und Vorgehensmodelle (WI-VM) im Fachgebiet Wirtschaftsinformatik der Gesellschaft für Informatik e.V., Elmshorn 2015

P-251 Detlef Hühnlein, Heiko Roßnagel, Raik Kuhlisch, Jan Ziesing (Eds.)
Open Identity Summit 2015
10.–11. November 2015
Berlin, Germany

P-252 Jens Knoop, Uwe Zdun (Hrsg.)
Software Engineering 2016
Fachtagung des GI-Fachbereichs Softwaretechnik
23.–26. Februar 2016, Wien

P-253 A. Ruckelshausen, A. Meyer-Aurich, T. Rath, G. Recke, B. Theuvsen (Hrsg.)
Informatik in der Land-, Forst- und Ernährungswirtschaft
Fokus: Intelligente Systeme – Stand der Technik und neue Möglichkeiten
Referate der 36. GIL-Jahrestagung
22.-23. Februar 2016, Osnabrück

P-254 Andreas Oberweis, Ralf Reussner (Hrsg.)
Modellierung 2016
2.–4. März 2016, Karlsruhe

P-255 Stefanie Betz, Ulrich Reimer (Hrsg.)
Modellierung 2016 Workshopband
2.–4. März 2016, Karlsruhe

P-256 Michael Meier, Delphine Reinhardt, Steffen Wendzel (Hrsg.)
Sicherheit 2016
Sicherheit, Schutz und Zuverlässigkeit
Beiträge der 8. Jahrestagung des Fachbereichs Sicherheit der Gesellschaft für Informatik e.V. (GI)
5.–7. April 2016, Bonn

P-257 Paul Müller, Bernhard Neumair, Helmut Reiser, Gabi Dreo Rodosek (Hrsg.)
9. DFN-Forum Kommunikationstechnologien
31. Mai – 01. Juni 2016, Rostock

P-258 Dieter Hertweck, Christian Decker (Eds.)
Digital Enterprise Computing (DEC 2016)
14.–15. Juni 2016, Böblingen

P-259 Heinrich C. Mayr, Martin Pinzger (Hrsg.)
INFORMATIK 2016
26.–30. September 2016, Klagenfurt

P-260 Arslan Brömme, Christoph Busch, Christian Rathgeb, Andreas Uhl (Eds.)
BIOSIG 2016
Proceedings of the 15th International Conference of the Biometrics Special Interest Group
21.–23. September 2016, Darmstadt

P-261 Detlef Rätz, Michael Breidung, Dagmar Lück-Schneider, Siegfried Kaiser, Erich Schweighofer (Hrsg.)
Digitale Transformation: Methoden, Kompetenzen und Technologien für die Verwaltung
Gemeinsame Fachtagung Verwaltungsinformatik (FTVI) und Fachtagung Rechtsinformatik (FTRI) 2016
22.–23. September 2016, Dresden

P-262 Ulrike Lucke, Andreas Schwill, Raphael Zender (Hrsg.)
DeLFI 2016 – Die 14. E-Learning Fachtagung Informatik
der Gesellschaft für Informatik e.V. (GI)
11.–14. September 2016, Potsdam

P-263 Martin Engstler, Masud Fazal-Baqaie, Eckhart Hanser, Oliver Linssen, Martin Mikusz, Alexander Volland (Hrsg.)
Projektmanagement und Vorgehensmodelle 2016
Arbeiten in hybriden Projekten: Das Sowohl-als-auch von Stabilität und Dynamik
Gemeinsame Tagung der Fachgruppen Projektmanagement (WI-PM) und Vorgehensmodelle (WI-VM) im Fachgebiet Wirtschaftsinformatik der Gesellschaft für Informatik e.V., Paderborn 2016

P-264 Detlef Hühnlein, Heiko Roßnagel, Christian H. Schunck, Maurizio Talamo (Eds.)
Open Identity Summit 2016
der Gesellschaft für Informatik e.V. (GI)
13.–14. October 2016, Rome, Italy

P-265 Bernhard Mitschang, Daniela Nicklas,Frank Leymann, Harald Schöning, Melanie Herschel, Jens Teubner, Theo Härder, Oliver Kopp, Matthias Wieland (Hrsg.)
Datenbanksysteme für Business, Technologie und Web (BTW 2017)
6.–10. März 2017, Stuttgart

P-266 Bernhard Mitschang, Norbert Ritter, Holger Schwarz, Meike Klettke, Andreas Thor, Oliver Kopp, Matthias Wieland (Hrsg.)
Datenbanksysteme für Business, Technologie und Web (BTW 2017)
Workshopband
6.–7. März 2017, Stuttgart

P-267 Jan Jürjens, Kurt Schneider (Hrsg.)
Software Engineering 2017
21.–24. Februar 2017, Hannover

P-268 A. Ruckelshausen, A. Meyer-Aurich, W. Lentz, B. Theuvsen (Hrsg.)
Informatik in der Land-, Forst- und Ernährungswirtschaft
Fokus: Digitale Transformation – Wege in eine zukunftsfähige Landwirtschaft
Referate der 37. GIL-Jahrestagung
06.–07. März 2017, Dresden

P-269 Peter Dencker, Herbert Klenk, Hubert Keller, Erhard Plödereder (Hrsg.)
Automotive – Safety & Security 2017
30.–31. Mai 2017, Stuttgart

P-270 Arslan Brömme, Christoph Busch, Antitza Dantcheva, Christian Rathgeb, Andreas Uhl (Eds.)
BIOSIG 2017
20.–22. September 2017, Darmstadt

P-271 Paul Müller, Bernhard Neumair, Helmut Reiser, Gabi Dreo Rodosek (Hrsg.)
10. DFN-Forum Kommunikations-technologien
30. – 31. Mai 2017, Berlin

P-272 Alexander Rossmann, Alfred Zimmermann (eds.)
Digital Enterprise Computing (DEC 2017)
11.–12. Juli 2017, Böblingen

P-273 Christoph Igel, Carsten Ullrich, Martin Wessner (Hrsg.)
BILDUNGSRÄUME
DeLFI 2017
Die 15. e-Learning Fachtagung Informatik der Gesellschaft für Informatik e.V. (GI)
5. bis 8. September 2017, Chemnitz

P-274 Ira Diethelm (Hrsg.)
Informatische Bildung zum Verstehen und Gestalten der digitalen Welt
13.–15. September 2017, Oldenburg

P-275 Maximilian Eibl, Martin Gaedke (Hrsg.)
INFORMATIK 2017
25.–29. September 2017, Chemnitz

P276 Alexander Volland, Martin Engstler, Masud Fazal-Baqaie, Eckhart Hanser, Oliver Linssen, Martin Mikusz (Hrsg.)
Projektmanagement und Vorgehensmodelle 2017
Die Spannung zwischen dem Prozess und den Menschen im Projekt
Gemeinsame Tagung der Fachgruppen Projektmanagement und Vorgehensmodelle im Fachgebiet Wirtschaftsinformatik der Gesellschaft für Informatik e.V. in Kooperation mit der Fachgruppe IT-Projektmanagement der GPM e.V., Darmstadt 2017

P-277 Lothar Fritsch, Heiko Roßnagel, Detlef Hühnlein (Hrsg.)
Open Identity Summit 2017
5.– 6. October 2017, Karlstad, Sweden

The titles can be purchased at:

Köllen Druck + Verlag GmbH
Ernst-Robert-Curtius-Str. 14 · D-53117 Bonn
Fax: +49 (0)228/9898222
E-Mail: druckverlag@koellen.de