Leistungsbewertung von Data Plane Architekturen der nächsten Generation sowie ihrer Komponenten[1]

Stefan Geißler[2]

Abstract: Die Verfügbarkeit von zuverlässigem und hochperformantem Breitband-Internet ist längst ein nicht mehr wegzudenkender Aspekt unserer Gesellschaft. Für viele Aktivitäten, sowohl im Privatleben als auch im Beruf, ist der Zugang zu schnellem Internet mitunter zwingend erforderlich. Gleichermaßen steigt die Belastung der Netzinfrastrukturen in Heim- und Rechenzentrumsumgebungen sowie in Weitverkehrs- und Mobilfunknetzen durch die Einführung neuer, ressourcenintensiver Anwendungen wie Videostreaming oder Cloud-Gaming kontinuierlich an. Um dieser steigenden Belastung zu begegnen, entwickeln wir im Rahmen der diesem Dokument zugrundeliegenden Dissertation Mechanismen und Methodiken zur Überwachung, sowie zur Modellierung und simulativen Leistungsbewertung eben der Netzinfrastruktur, die für die Bereitstellung von allgegenwärtiger Konnektivität unersetzlich ist. Im Rahmen zahlreicher Messstudien, Testaufbauten und Implementierungsarbeiten entwickeln und validieren wir Methoden, die es erlauben, die Leistungsfähigkeit der für uns so kritischen Infrastruktur zu bewerten und zu optimieren.

Einleitung

Seit der Einführung dessen, was heute als Internet bekannt ist, hat die Zahl der aktiven Nutzer im März 2021 5,2 Milliarden erreicht [St18]. Dabei ist der Zustrom intelligenter Geräte, die im Rahmen von Industrie 4.0, Smart Cities und dem Internet der Dinge im Allgemeinen eingesetzt werden, noch nicht berücksichtigt. Darüber hinaus wird die Belastung der Netzinfrastrukturen sowohl in WAN- als auch in Rechenzentrumsumgebungen durch die Einführung neuer, ressourcenintensiver Anwendungen wie Videostreaming oder Cloud-Gaming noch verstärkt. In den Jahren 2020 und 2021 hat der Wechsel zur Fernarbeit aufgrund der COVID-19-Pandemie einmal mehr gezeigt, wie wichtig ein zuverlässiger und allgegenwärtiger Zugang zu Breitband-Internet in unserer vernetzten Welt ist.

All diese Gründe – wachsende Nachfrage, steigende Anwendungsanforderungen, zunehmende gesellschaftliche Abhängigkeit – treiben Betreiber, Industrie und Wissenschaft dazu, Netzinfrastrukturen, -systeme und -mechanismen ständig neu zu erfinden, um Lösungen zu entwickeln, die den ständig wachsenden Anforderungen der Nutzer gerecht werden. Je nach Interessengruppe muss eine Vielzahl unterschiedlicher und konkurrierender Kriterien berücksichtigt werden. Netzbetreiber streben einen hohen Dienstgütegrad (Quality of

[1] Englischer Titel der Dissertation: "Performance Evaluation of Next Generation Data Plane Architectures and their Components"

[2] Julius-Maximilians-Universität Würzburg, Lehrstuhl für Kommunikationsnetze, Sanderring 2, 97070 Würzburg, Deutschland stefan.geissler@uni-wuerzburg.de

Service, QoS) an, indem sie ihren Kunden eine äußerst zuverlässige Netzanbindung bieten. Dienstbetreiber streben nach maximaler Nutzerzufriedenheit (Quality of Experience, QoE). Schließlich erwarten die Endnutzer zuverlässige Dienste unter Verwendung verschiedener, heterogener Endgeräte und Zugangstechnologien. Gleichzeitig muss die Kosteneffizienz aller an diesen komplexen Systemen beteiligten Komponenten so hoch wie möglich sein.

Um diese Ziele zu erreichen, wurden in den letzten Jahren mehrere neuartige Paradigmen zur Softwarisierung vorgeschlagen und untersucht. Ursprünglich bestand das Ziel softwarebasierter Netze (Software-defined Networking, SDN) darin, die Datenebene physisch und logisch von der Steuerungsebene zu trennen und offene Schnittstellen zu definieren, um eine herstellerunabhängige Programmierbarkeit zu ermöglichen. Zu diesem Zweck wurden die Steuerungskomponenten aus den Geräten der Datenebene entfernt und stattdessen in einer logisch zentralisierten Steuereinheit zusammengefasst [KF13]. Diese Art der Steuerungszentralisierung ermöglicht eine neue, dynamische Netzkonfiguration und -rekonfiguration, da die Controller nun in der Lage sind, globales Wissen über die Systeme zu erhalten und Weiterleitungsentscheidungen auf der Grundlage dieses globalen Wissens zu treffen. Gleichzeitig werden die Geräte auf der Datenebene immer einfacher, da die Geräte lediglich Anweisungen von einer lokalen Steuerungsinstanz entgegennehmen und keine eigenen Entscheidungen auf der Grundlage begrenzter Kenntnisse treffen müssen.

Der nächste Schritt in dieser Softwarisierung von Netzen ist die Einführung der Virtualisierung und Softwarisierung von Netzfunktionen (Network Function Virtualization, NFV). Während man in den Anfängen von SDN davon ausging, dass es sich bei den Geräten der Datenebene größtenteils um dedizierte Hardwarekomponenten handeln würde, zielt NFV darauf ab, applikationsspezifische Hardwarekomponenten (ASICs) durch Softwarelösungen zu ersetzen, die auf kommerzieller Hardware ausgeführt werden können. Diese Verwendung von Software anstelle von statischen Middleboxen soll die Effizienz von Netzen verbessern, da Softwarekomponenten dynamisch auf der Grundlage der aktuellen Anforderungen skaliert werden können. Darüber hinaus sind Software-Tools einfacher zu warten und zu aktualisieren als Hardware-Middleboxen, was die Kosten für den Betrieb von Netzen weiter senkt.

Die Verarbeitung des Netzverkehrs in Software ist jedoch im Allgemeinen weniger leistungsfähig als dedizierte Hardwareanwendungen und bringt neue Herausforderungen mit sich. Einerseits sind neuartige Überwachungsansätze erforderlich, um die Leistung von Funktionen sowohl vor als auch nach der Anschaffung und Installation von Lösungen zuverlässig zu bewerten. Andererseits sind Mechanismen und Modelle zur zuverlässigen und genauen Abschätzung der Leistung softwarebasierter Netzfunktionen von entscheidender Bedeutung für die Entwicklung, die Dimensionierung und den Betrieb softwarebasierter Netzinfrastrukturen.

Neben den Leistungsaspekten von Softwarelösungen muss auch die Interoperabilität mit bestehenden, potenziell veralteten Netzinfrastrukturen gewahrt bleiben, um einen zuverlässigen Netzbetrieb zu gewährleisten. Der Betrieb von Netzen, die aus Legacy-Geräten,

programmierbarer Hardware sowie softwarebasierten Elementen bestehen, erfordert die Untersuchung neuer Mechanismen der Steuerebene [Xi15].

Schließlich spielen die Softwarisierung von Netzen und Netzkomponenten sowie die Netzvirtualisierung eine zentrale Schlüsselrolle für Mobilfunknetze der 5. Generation, sowie zukünftige Netze wie 6G. Die in dieser Arbeit entwickelten Konzepte ermöglichen eine hohe Flexibilität und Programmierbarkeit der Netze sowie eine Reduzierung der Gesamtkosten, d. h. Investitionsausgaben (CAPEX) und Betriebskosten (OPEX). Gerade auch in zukünftigen Netzen können mit diesen Schlüsseltechnologien die geforderte Nachhaltigkeit erreicht werden, z.B. durch Reduktion von Energie- und CO2-Verbrauch, ohne dass die Leistung und Dienstgüte darunter leiden. Allerdings fehlen in der Praxis Ansätze und in der Forschung wissenschaftliche Methoden, um die Leistungsfähigkeit der Netze zu messen, zu modellieren und vorherzusagen.

Die zugrundeliegende Monographie behandelt sowohl technische als auch analytische Mechanismen zur Bewertung der Leistung softwarebasierter Netzfunktionen sowie komplexer Funktionsketten bestehend aus mehreren Einzelfunktionen im Bereich der Microservice-Architekturen. Wir schlagen einen neuartigen Monitoring-Ansatz vor, der die Überwachung von Leistungsmetriken hochperformanter, softwarebasierter Netzfunktionen ermöglicht, ohne dabei selbst viele Ressourcen zu beanspruchen. Anschließend wenden wir diesen Ansatz an, um Messungen mit dem Ziel durchzuführen, ein detailliertes, zeitdiskretes Modell eines Software-Routers unter Verwendung modernster Beschleunigungstechniken zu entwickeln. Wir zeigen, dass die Integration von Softwarelösungen in bestehende Netze unter Beibehaltung der Systemleistung möglich ist. Durch die Abstraktion von Komponenten der Datenebene kann ein standardisierter SDN-Controller zur Verwaltung einer heterogenen Landschaft von Geräten verwendet werden. Schließlich führen wir eine detaillierte, simulative Leistungsbewertung einer komplexen Microservice-Architektur im Kontext IoT durch. Wir schlagen Simulationsmodelle sowohl für das Arbeitslastprofil als auch für die Systemarchitektur vor, um die Untersuchung verschiedener, zentraler Leistungsindikatoren (Key Performance Indicator, KPI) zu ermöglichen. Zusammenfassend identifizieren wir die folgenden Forschungsfragen und tragen zu deren Beantwortung bei.

- Wie kann die Verarbeitungsleistung von softwarebasierten Netzfunktionen effizient überwacht werden?
- Wie lassen sich kritische KPIs von softwarebasierten Netzfunktionen unter verschiedenen Laststufen vorhersagen?
- Wie kann die Interoperabilität von Softwarelösungen, programmierbarer Hardware und SDN-fähigen Geräten sichergestellt werden?
- Wie kann die Leistung von komplexen Microservice-basierten Paketverarbeitungsarchitekturen modelliert und bewertet werden?

Diese und weitere Fragen sowie die Methodik zu deren Beantwortung werden im Folgenden skizziert. Für eine umfassende Bearbeitung der Problemstellungen referenzieren wir auf die zugrundeliegende Dissertationsschrift mit dem Titel *Performance Evaluation of Next Generation Data Plane Architectures and their Components* [Ge22].

1 Wissenschaftlicher Beitrag

In den folgenden Abschnitten werden die wissenschaftlichen Beiträge in jedem der in dieser Arbeit behandelten Bereiche skizziert. Beachten Sie, dass eine detailliertere Beschreibung der Beiträge und der untersuchten Forschungsfragen jeweils zu Beginn der einzelnen Kapitel zu finden ist. Abbildung 1 zeigt eine Auswahl von Forschungsaktivitäten im Rahmen dieser Arbeit. Dabei sind die einzelnen Forschungsbereiche entlang der x-Achse nach ihrem jeweiligen Forschungsgegenstand, NFV, SDN oder Anwendungen im Kontext von NFV kategorisiert. Zusätzlich zeigt die y-Achse die angewandte Methodik: Modellierung, Messungen und Simulation. Die Abbildung zeigt außerdem den spezifischen Forschungsbereich als Titel jedes Kästchens und das Kapitel der zugrundeliegenden Dissertation, in dem jedes der Themen bearbeitet wird, durch die eingekreiste Nummer.

Monitoring von Leistungsparametern. Um unser Verständnis für die Leistungsmerkmale softwarebasierter Netzfunktionen zu vertiefen, sind neue Überwachungsmechanismen, die die Bewertung relevanter Kennzahlen ermöglichen, von entscheidender Bedeutung. Zu diesem Zweck stellen wir im ersten Teil dieser Monographie einen neuartigen Ansatz zur Überwachung der genauen Paketverarbeitungszeiten von Netzfunktionen vor. Unser Ansatz der In-Stack-Überwachung beruht auf der Überwachung von Paketeingangs- und -ausgangsereignissen direkt im verwendeten Netzwerkstack, um eine Überwachung mit geringem Aufwand sowohl während der Entwicklung als auch nach dem Ausrollen einer Funktion durchzuführen. Die Implementierung der Netzwerkfuntkionalität ist ein zentraler Baustein der softwarebasierten Paketverarbeitung. Da, um die Bearbeitung von Paketen auf Anwendungsschicht überhaupt zu ermöglichen, das zugrundeliegende Betriebssystem sämtliche Pakete empfangen, verarbeiten und der entsprechenden Anwendung zuweisen muss, wird hier ohnehin ein großer Teil der Arbeit, die zum Überwachen der Verarbeitungsfunktionalität nötig ist durchgeführt. Basierend auf dieser Beobachtung entwickeln wir KOMon [Ge19b], eine Proof-of-Concept-Implementierung, die auf dem im Linux-Kernel verwendeten NAPI-Stack basiert. Wir bewerten sowohl die Genauigkeit als auch den Overhead unseres Ansatzes durch Messungen und diskutieren seine Anwendung und Einschränkungen in der Praxis. Die Ergebnisse der durchgeführten Studie zeigen, dass die sich die Methodik der In-Stack-Überwachung auf eine vielzahl verschiedener Netzfunktionen anwenden lässt. Ferner ermöglicht der geringe Einfluss auf das überwachte System die Anwendung zur Laufzeit, was eine Echtzeitüberwachung verschiedenster Funktionen ermöglicht. Die durchgeführte Parametstudie hat schließlich gezeigt, dass der entwickelte

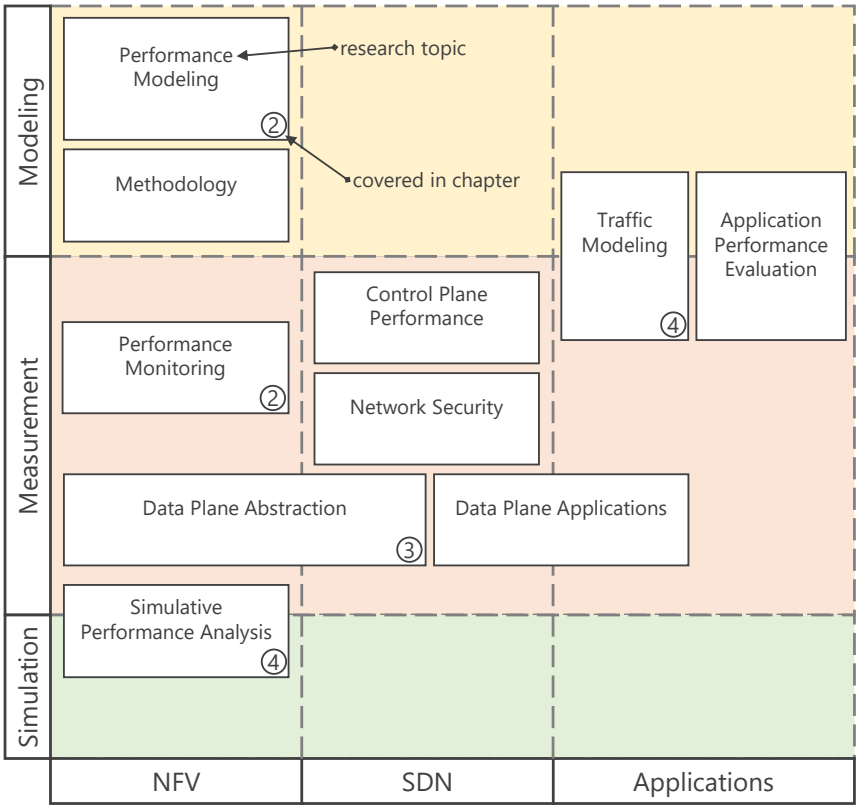

Abb. 1: Einordnung der vom Autor durchgeführten Forschungsarbeiten. Die in grauer Schrift vermerkten Referenzen werden in diesem Manuskript nicht behandelt. Die eingekreisten Ziffern unten rechts verweisen auf das Kapitel, in dem die jeweiligen Veröffentlichungen behandelt werden.

Prototyp in der Lage ist, die genaue Verteilung der Bedienzeiten verschiedener Funktionen mit sehr hoher genauigkeit nachzubilden.

Modellierung von Leistungsparametern. Anschließend wenden wir den zuvor entwickelten Überwachungsansatz an, um Messwerte für einen modernen Software-Router zu erhalten. Auf der Grundlage der erhaltenen Verarbeitungszeitmessungen entwickeln wir ein präzises, zeitdiskretes Modell von Cisco's Vector Packet Processessor (VPP), das in der Lage ist, mehrere wichtige Leistungsindikatoren vorherzusagen [Ge21a; La19]. Dazu gehören die Größe der Warteschlange, die Antwortzeit, die Wartezeit sowie die Wahrscheinlichkeit von Paketverlusten bei unterschiedlichen Laststufen und Systemparametern. Wir präsentieren eine detaillierte Beschreibung unseres Modells und validieren seine Vorhersagegenauigkeit anhand der zuvor erhaltenen Messwerte. Das entwickelte Modell

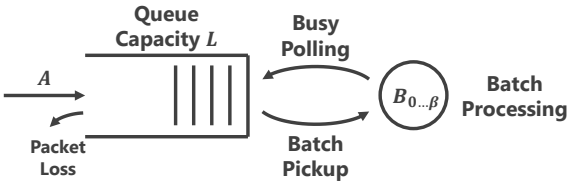

Abb. 2: Darstellung des modellierten Warteschlangensystems und seinen zentralen besonderheiten.

in Kombination mit dem vorgeschlagenen Überwachungsansatz ermöglicht sowohl die genaue Überwachung der Netzfunktionsleistung als auch die Vorhersage von relevanten KPIs. Abbildung 2 zeigt das zugrundeliegende Warteschlangenmodell, bestehend aus einer Warteschlange mit beschränkter Länge, einer Bedieneinheit mit Batchverarbeitung sowie den entsprechenden Ankunfts- sowie Bedienprozessen. Für dieses Modell lässt sich mit Methoden der zeitdiskreten Analyse eine eingebettete Markovkette identifizieren, die sich mithilfe einer Fixpunktiteration lösen lässt. Im Weiteren lassen sich die oben erwähnten Leistungsindikatoren aus der stationären Zustandsverteilung des Warteschlangensystems direkt ableiten. Die durchgeführte Modellierung, unterstützt durch Messungen am echten System, hat gezeigt, dass das entwickelte Modell sämtliche Leistungsparameter mit hoher Präzision vorhersagen kann.

Abstraktion der Datenebene. Nach der Leistungsbewertung von Netzfunktionen bestehend aus einzelnen Komponenten stellen wir einen Ansatz zur Abstraktion der Datenebene vor. Hier wird das allgemeine Konzept der Abstraktion der Datenebene durch Protokollübersetzung vorgestellt und der Entwurf unserer Proof-of-Concept-Implementierung skizziert [Ge17; Ge19a]. Das vorgestellte Konzept basiert auf der Idee des aktiven Abfangens von Kontrollnachrichten verschiedener Protokolle zwischen Steuer- und Datenebene. Vor der Weiterleitung der abgefangenen Nachrichten werden verschiedene Modifikationen am Inhalt vorgenommen, um eine transparente Abbildung zwischen verschiedenen Technologien der Datenebene und Anwendungen der Steuerungsebene zu ermöglichen. Wir demonstrieren damit die Praktikabilität der Übersetzung zwischen OpenFlow [Mc08] und P4 [Bo14] sowie Hardware- und Softwarelösungen. Wir demonstrieren auch die Möglichkeit, virtuelle Geräte für die Steuerungsebene zu emulieren, während die Operationen der Datenebene durch mehrere, potenziell heterogene Geräte der Datenebene realisiert werden. Schließlich führen wir Leistungsmessungen durch und diskutieren die Auswirkungen unseres Konzepts auf die Leistung der Steuerungsebene.

Verkehrsmodellierung. Um eine genaue Leistungsbewertung eines komplexen Systems, bestehend aus mehreren paketverarbeitenden Komponenten, durchführen zu können, wird das dem System auferlegte Arbeitslastprofil identifiziert. Zu diesem Zweck führen wir eine umfassende Analyse einer 31 Tage langen Netzaufzeichnung durch, die mehr als

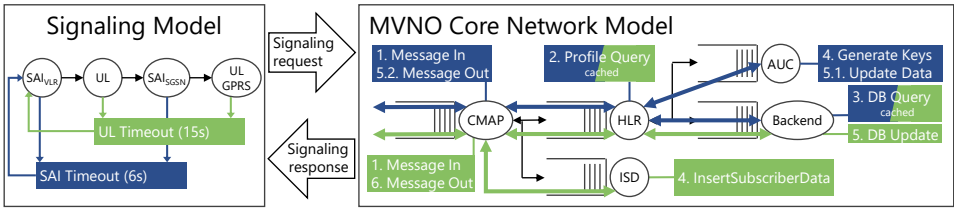

Abb. 3: Schematische Darstellung der beiden entwickelten Modelle sowie deren Interaktionen.

1,4 Milliarden Nachrichten und über sieben Terabyte an Rohdaten enthält [Ge21b]. Der Mitschnitt wurde am Ingress eines realen Mobilfunkkernnetzes gewonnen. Wir analysieren den Mitschnitt hinsichtlich der Nachrichtenverteilung und identifizieren ein Feature-Set, das die Klassifizierung einzelner IoT-Geräte anhand ihres mobilen Signalisierungsverkehrs ermöglicht. Basierend auf den identifizierten Merkmalen wenden wir Methoden des maschinellen Lernens an und bewerten die Unterschiede im Geräteverhalten zwischen den resultierenden Gerätegruppen. Schließlich heben wir kritische Eigenschaften des aggregierten Ankunftsprozesses hervor, der sich aus der Überlagerung des Signalverkehrs der einzelnen Geräte ergibt. Wir zeigen, dass die in Standardisierung und Literatur übliche Markov-Annahme in der Praxis nicht unbedingt zutrifft, aber durch eine vorangestellte Geräteklassifizierung wiederhergestellt werden kann.

Simulative Leistungsbewertung. Nach der Erstellung eines Arbeitslastprofils stellt der letzte Teil der Arbeit schließlich ein allumfassendes Simulationsmodell sowie eine Fallstudie zur Anwendbarkeit dieses Modells vor. Hier skizzieren wir die Architektur des realen Systems und stellen eine geeignete Abstraktion vor. Anschließend werden sowohl ein Signalisierungsmodell, das das Verhalten einzelner Geräte vorgibt, als auch ein Kernnetzmodell, das die verfügbaren Ressourcen sowie deren Interaktionen beschreibt, eingeführt [**geissler2023mvno**]. Nach der Validierung der Genauigkeit des vorgeschlagenen Simulationsmodells durch Messungen sowohl in speziellen Testumgebungen als auch in einem produktiven System führen wir eine Fallstudie zur Systemdimensionierung durch. Schließlich bewerten wir verschiedene Überlastregelungsmechanismen im Hinblick auf ihre Fähigkeit, einen effizienten Betrieb unter extremen Überlastbedingungen zu gewährleisten. Unsere Validierung und Untersuchung von Überlastkontrollmechanismen zeigt, dass das entwickelte Simulationsmodell in der Lage ist, die Bedingungen im realen System genau nachzubilden. Daher kann das Modell zur Untersuchung komplexer Erweiterungen des Systems verwendet werden, um Effizienzprobleme zu identifizieren und so das Optimierungspotenzial des Systems zu erhöhen. Eine schematische Darstellung der entwickelten Modelle zur Lastgenerierung sowie der Kernnetzmodellierung ist in Abbildung 3 zu sehen. Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Mechanismen zur Überlastregelung wurden in Kooperation mit dem Mobilfunkbetreiber in dessen Produktivsystem integriert und tragen dort zu einer massiven zuverlässigkeitssteigerung der Netzinfrastruktur bei.

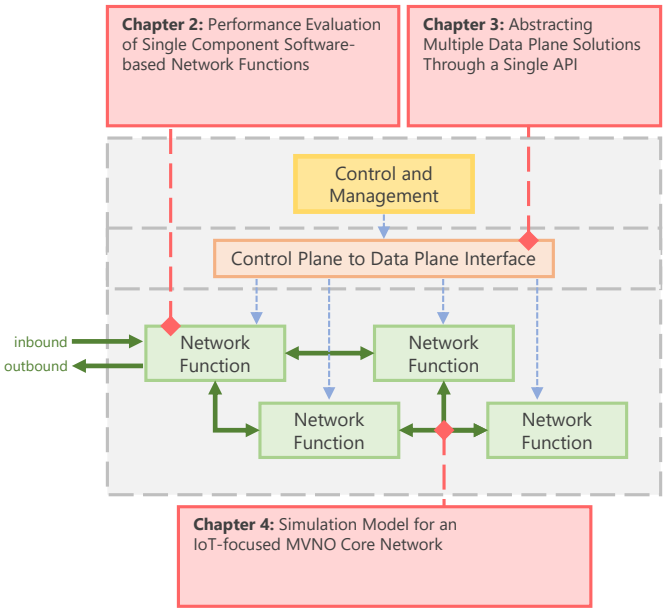

Abb. 4: Abstrakte Systemarchitektur mit Annotationen, welches Kapitel der Dissertation welchen Aspekt des Systems abdeckt.

2 Gliederung der zugrundeliegenden Monographie.

Im Folgenden geben wir einen kurzen Überblick über die in dieser Arbeit geleisteten Beiträge. Abbildung 4 gibt einen abstrakten Überblick über das System, das in den Kapiteln der Monographie untersucht wird. Die Anmerkungen in roten Kästchen beschreiben das Kapitel, in dem jeder Teil des Systems behandelt wird. Die Abbildung zeigt die Komponenten der Datenebene und ihre Interaktionen in Grün. Jede Netzfunktion kann dabei mit Software, programmierbarer Hardware oder SDN-fähigen Whitebox-Switches realisiert werden. Wie in modernen, softwarisierten Netzen üblich, wird die Steuerungseinheit durch eine logisch zentralisierte Steuerungs- und Managementeinheit realisiert, die oben in der Abbildung dargestellt ist.

Kapitel 2 der Arbeit befasst sich mit der Leistungsbewertung von softwarebasierten Netzfunktionen aus einzelnen Komponenten. Zu diesem Zweck führen wir Messungen durch und entwickeln analytische Modelle, um unser allgemeines Verständnis für das Verhalten solcher Netzkomponenten zu verbessern.

Nach der Erstellung präziser Leistungsmodelle für einzelne Netzfunktionen beleuchtet Kapitel 3 die Machbarkeit der Integration mehrerer, potenziell technologisch heterogener Netzfunktionen in eine einzige Datenebene. Zu diesem Zweck entwickeln wir ein Abstraktionswerkzeug, das zwischen Steuerungs- und Datenebene vermittelt. Wir zeigen die

Machbarkeit von Mehrkomponenten- und Multitechnologie-Lösungen für die Datenebene und diskutieren die Auswirkungen unseres Abstraktionsansatzes auf die Leistung des Systems.

Schließlich wird in Kapitel 4 die Leistungsbewertung eines komplexen Systems aus mehreren softwarebasierten Netzfunktionen am Beispiel eines Mobilfunkkernnetzes behandelt. Um dies zu erreichen, erstellen wir ein Lastprofil durch eine detaillierte Analyse eines umfangreichen Verkehrsmitschnitts, das von einem produktiven Kernnetz stammt. Anschließend wenden wir die gewonnenen Erkenntnisse an, um ein detailliertes Simulationsmodell des realen Netzes zu entwickeln. Wir zeigen die Anwendungsmöglichkeiten unseres Modells für die Erkennung von Engpässen, die Systemdimensionierung sowie die Untersuchung von systemischen Erweiterungen wie Überlastkontrollmechanismen.

Literatur

[Bo14] Bosshart, P.; Daly, D.; Gibb, G.; Izzard, M.; McKeown, N.; Rexford, J.; Schlesinger, C.; Talayco, D.; Vahdat, A.; Varghese, G. et al.: P4: Programming Protocol-independent Packet Processors. ACM SIGCOMM Computer Communication Review/, 2014.

[Ge17] Geißler, S.; Herrnleben, S.; Bauer, R.; Gebert, S.; Zinner, T.; Jarschel, M.: TableVisor 2.0: Towards Full-featured, Scalable and Hardware-Independent Multi Table Processing. In: IEEE Conference on Network Softwarization (NetSoft). 2017.

[Ge19a] Geißler, S.; Herrnleben, S.; Bauer, R.; Grigorjew, A.; Zinner, T.; Jarschel, M.: The Power of Composition: Abstracting a Multi-device SDN Data Path Through a Single API. IEEE Transactions on Network and Service Management/, 2019.

[Ge19b] Geißler, S.; Lange, S.; Wamser, F.; Zinner, T.; Hoßfeld, T.: KOMon — Kernel-based Online Monitoring of VNF Packet Processing Times. In: International Conference on Networked Systems (NetSys). 2019.

[Ge21a] Geißler, S.; Lange, S.; Linguaglossa, L.; Rossi, D.; Zinner, T.; Hoßfeld, T.: Discrete-time Modeling of NFV Accelerators that Exploit Batched Processing. ACM Transactions on Modeling and Performance Evaluation of Computing Systems/, 2021.

[Ge21b] Geißler, S.; Wamser, F.; Bauer, W.; Krolikowski, M.; Gebert, S.; Hoßfeld, T.: Signaling Traffic in Internet-of-Things Mobile Networks. In: IFIP/IEEE International Symposium on Integrated Network Management (IM). 2021.

[Ge22] Geißler, S.: Performance Evaluation of Next-Generation Data Plane Architectures and their Components, Diss., Universität Würzburg, 2022.

[KF13] Kim, H.; Feamster, N.: Improving Network Management with Software Defined Networking. IEEE Communications Magazine/, 2013.

[La19] Lange, S.; Linguaglossa, L.; Geißler, S.; Rossi, D.; Zinner, T.: Discrete-time Modeling of NFV Accelerators that Exploit Batched Processing. In: IEEE INFOCOM 2019-IEEE Conference on Computer Communications. 2019.

[Mc08] McKeown, N.; Anderson, T.; Balakrishnan, H.; Parulkar, G.; Peterson, L.; Rexford, J.; Shenker, S.; Turner, J.: OpenFlow: Enabling Innovation in Campus Networks. ACM SIGCOMM computer communication review/, 2008.

[St18] Stats, I. W.: Internet Users in the World by Regions. Miniwatts Marketing Group/, 2018.

[Xi15] Xie, J.; Guo, D.; Hu, Z.; Qu, T.; Lv, P.: Control Plane of Software Defined Networks: A Survey. Computer communications/, 2015.

Stefan Geißler wurde am 23. Dezember 1989 geboren. Nach dem Abitur studierte er Informatik im Bachelor an der Julius-Maximilians-Universität (JMU) Würzburg, den er im Oktober 2012 abschloss. Das anschließende Masterstudium absolvierte Geißler zu Teilen an der JMU und der Universidade do Minho in Guimarães, Portugal. Sein Masterstudium schloss er im Februar 2016 an der JMU ab, wo er direkt im Anschluss die Promotion unter Prof. Dr.-Ing. Phuoc Tran-Gia am Lehrstuhl für Kommunikationsnetze antrat. Während seiner Zeit am Lehrstuhl veröffentliche Geißler Arbeiten auf international renommierten Konferenzen, Workshops und in Journals. Seine Arbeiten im Bereich der Leistungsbewertung software-basierter Netze wurden bereits während der Promotion mit drei Best Paper Awards ausgezeichnet. In diesem Forschungsbereich ist auch seine Arbeit mit dem Titel *Leistungsbewertung von Data Plane Architekturen der nächsten Generation sowie ihrer Komponenten* verankert, mit der er im April 2022 die Promotion unter Prof. Dr. Tobias Hoßfeld abschloss. Für seine Dissertation erhielt Geißler zahlreiche Preise, unter anderem den VDE Bayern Award für herausragende Leistungen im Bereich Wissenschaft sowie den Promotionspreis der Unterfränkischen Gedenkjahrstiftung und der JMU Würzburg. Schließlich wurde ihm in seiner Funktion als Postdoc am Lehrstuhl für Kommunikationsnetze im April 2023 der Universitäts-Förderpreis der Mainfränkischen Wirtschaft für seine Forschung im Bereich der Optimierung von Mobilfunkarchitekturen für das Internet der Dinge verliehen.