

Algorithmik an der TU Braunschweig

Sándor P. Fekete

Abteilung Algorithmik
Institut für Betriebssysteme und Rechnerverbund
s.fekete@tu-bs.de

1 Algorithmik

Die Entwicklung systematischer Methoden zur konstruktiven Lösung von Problemklassen hat eine Geschichte, die deutlich älter ist als die Informatik selber. Jedes Kind lernt heute in der Grundschule das Rechnen mit Dezimalzahlen – und macht dabei von einer kulturellen Errungenschaft Gebrauch, die durch die Darstellung von Muhammed al-Chwarizmi („Dixit Algorizmi...“) vor knapp 1200 Jahren nach Europe gelangte.

Innerhalb der Informatik nimmt die Algorithmik eine zentrale Stellung ein. Von der Denk- und Arbeitsweise in der Theorie verankert, liefert sie für die unterschiedlichsten Anwendungsbereiche entscheidende Methoden und Einsichten. So wie Informatik nahezu alle Bereiche unseres Leben durchdringt, gibt es keine Informatik ohne Algorithmik. Entsprechend vielfältig sind die wissenschaftlichen Fragestellungen und Herausforderungen, für die die Algorithmik Antworten und Lösungsmethoden liefert.

An der TU Braunschweig hat die Algorithmik eine deutlich jüngere Geschichte: Erst mit dem Wechsel des Autors aus dem Institut für Mathematischen Optimierung auf die neu geschaffene Professur für Algorithmik im Department für Informatik im Jahre 2007 wurde das Gebiet auch institutionell in Forschung und Lehre verankert. Die Vielseitigkeit der Algorithmik schlägt sich auch darin nieder, dass sie nicht als eigenes Institut installiert wurde, sondern Teil des Instituts für Betriebssysteme und Rechnerverbund ist: Dies erlaubt die beste Nutzung der Synergieeffekte im Herzen der Informatik, als Brücke zwischen Theorie und Praxis. Bereits in dieser relativ kurzen Zeit zeigte sich durch zahlreiche Kooperationen und Projekte, aber auch anhand des sehr positiven Zuspruchs in der Lehre, welche vielfältigen Möglichkeiten dieses wichtige Gebiet bietet.

Diese Erfolge sind nicht zuletzt das Verdienst der beteiligten Personen: Inzwischen zählt die Algorithmik bereits 16 aktuelle und ehemalige Postdoktoranden und Doktoranden, zu großen Teilen finanziert von Forschungsgeldern von DFG, BMBF, EU und Industrie, aber natürlich auch durch einige Landesstellen. Besonderer Dank gebührt dabei Sabine Anthony, die von Anfang an als guter Geist der Abteilung wirkt, Alexander Kröller, der in Forschung und Lehre die Abteilung mitträgt (inzwischen mit eigenen Projekten wie *Kunst!* und *SPITFIRE*), und Christiane Schmidt, die ebenfalls von Beginn an engagiert dabei ist. Aus der Vielzahl der Kooperationspartner in aller Welt seien besonders Stefan Fischer

und Dennis Pfisterer in Lübeck und die Kollegen Paul Spirakis und Ioannis Chatzigiannakis in Patras genannt, mit denen wir zahlreiche DFG- und EU-Projekte pflegen, sowie Joe Mitchell (Stony Brook) und Erik Demaine (MIT), mit denen jeweils über 20 gemeinsame Veröffentlichungen entstanden sind. Von unschätzbarem Wert ist aber nicht zuletzt die angenehme und kollegiale Zusammenarbeit innerhalb des Braunschweiger Informatik-Departments und seiner Studierenden, dessen positive Atmosphäre die Arbeit noch lohnender macht.

Zunächst in neu gestalteten Räumlichkeiten im Altbereich des Architektenturms untergebracht, ist die Algorithmik im Jahre 2011 in den Kernbereich des Informatikzentrum gezogen, wo sie sicher auch in kommenden Jahren zum Erfolg des gesamten Informatik-Departments beitragen wird. Dieser wird in unserer Zeit ja nicht zuletzt anhand von Kennzahlen gemessen; dazu zählt neben den erworbenen Drittmitteln und den Absolventenzahlen nicht zuletzt der wissenschaftliche Output in Form von einschlägig begutachteten Veröffentlichungen. Hierzu wird auch eine neue (derzeit in Besetzung befindliche) Juniorprofessur für Algorithm Engineering beitragen.

In den folgenden Abschnitten werden unsere Aktivitäten im größeren Kontext dargestellt; dabei wurde mehr Gewicht auf den inhaltliche Zusammenhang gelegt als auf die Vollständigkeit und Präzision der Darstellung.

2 Algorithmik für komplexe Probleme

Ein klassisches algorithmisches Problem geht von einer vollständigen Beschreibung der Eingabedaten aus. Diese werden von einem zentralen Rechner verarbeitet – und das Problem ist gelöst, sobald man die Ausgabedaten berechnet hat.

2.1 Komplexität

Idealerweise hat dabei ein Algorithmus zur Lösung eines Optimierungsproblems die folgenden drei Eigenschaften: Er findet

1. für jede Instanz (d.h. jedes Beispiel) des Problems
2. in polynomiell begrenzter (d.h. auch im schlechtesten Falle beweisbar kurzer) Zeit
3. ein optimales Ergebnis.

Allerdings sind die meisten komplexen algorithmischen Probleme NP-schwer. Damit wird (unter der allgemein akzeptierten Annahme, dass $P \neq NP$ gilt) die Existenz eines „idealen“ Algorithmus sehr unwahrscheinlich: Sobald man zwei der Eigenschaften gesichert hat, ist die dritte ausgeschlossen. Damit ist es notwendig, Kompromisse einzugehen, wenn man sinnvolle Lösungsmethoden entwickeln will.

Dazu zählt zunächst einmal die *Komplexitätsanalyse*: Gibt es möglicherweise zusätzliche Eigenschaften oder spezielle Instanzklassen, für die doch eine polynomielle Lösung möglich ist? In der Regel kommt man aber nicht umhin, auf mindestens eine der drei

Eigenschaften zu verzichten. Dabei beschäftigen sich *Heuristiken* mit der Methoden, die schnell ein gutes Ergebnis liefern sollen – aber eben nicht in allen Fällen, also auf Eigenschaft 1 verzichten. *Exakte Algorithmen* schränken die Eigenschaft 2 ein: Man will auf jeden Fall ein optimales Ergebnis, allerdings um den Preis der garantierten polynomiellen Laufzeit. Und schließlich beschäftigen sich *Approximationsalgorithmen* mit der Entwicklung von Methoden, bei denen für jeden Input in polynomieller Zeit eine Lösung berechnet wird, die zwar nicht unbedingt optimal (Eigenschaft 3), aber dafür beweisbar gut ist. Nachfolgend beschreiben wir die Arbeit in zwei dieser drei Bereiche.

2.2 Approximationsalgorithmen

Welche Lösungsqualität kann man für ein NP-schweres Problem in polynomieller Zeit auch im schlechtesten Falle garantieren? Damit beschäftigt sich ein wichtiger Bereich der Algorithmik. In der Regel sucht man dabei nach Methoden mit konstanter Gütegarantie: einem möglichst kleinen multiplikativen Faktor, der beweisbar die Abweichung des Lösungswertes vom Optimum beschränkt.

In unserer Abteilung sind in den letzten fünf Jahren alleine 20 wissenschaftlich begutachtete Veröffentlichungen erschienen, die mit Approximationsalgorithmen zu tun haben. Viele der Fragestellungen beschäftigen sich mit geometrischen Strukturen oder Graphen; dabei reicht das Spektrum der Anwendungskontexte von der Planung optimaler Touren über die Platzierung von Relaisstationen bis hin zu abstrakten geometrischen Strukturen.

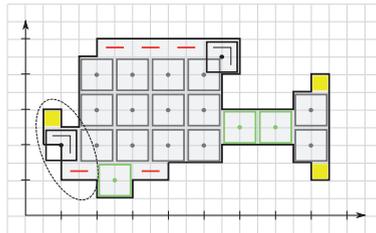


Abbildung 1: Approximation des simultanen Optimierungsproblems „Überdeckung mit Bewegungskosten“: Eine Gütegarantie von gleichzeitig jeweils 2,5 für Zahl der überdeckenden Objekte und dazwischen zurückgelegte Strecke lässt sich erzielen.

2.3 Algorithm Engineering

Die Qualität von Algorithmen wird typischerweise anhand ihrer Worst-Case-Laufzeit gemessen. Wie beschrieben ist dabei das Ziel polynomielle Laufzeit, die aber nicht immer erreichbar ist. Ist diese utopisch, so steht man vor der Aufgabe, möglichst große Instanzen trotzdem optimal zu lösen. Damit zielt man nicht mehr auf den asymptotischen Fall, sondern auf konkrete Instanzen begrenzter (aber u. U. erheblicher) Größe. Die Entwicklung derartiger *exakter Algorithmen* ist ein Teil des neuen wissenschaftlichen Bereiches *Algorithm Engineering*, das sich mit der konkreten Umsetzung und praktischen Optimierung algorithmischer Methoden beschäftigt.

In unserer Abteilung wurden und werden verschiedene derartige Fragestellungen behandelt. Dazu gehören insbesondere Packprobleme, wie sie in den unterschiedlichsten Kontexten auftauchen; viele praktische Aspekte wurden im Projekt ReCoNodes im Rahmen des DFG-Schwerpunktprogrammes „Rekonfigurierbare Rechensysteme“ mit unserem Kooperationspartner Jürgen Teich aus Erlangen behandelt, siehe Abbildung 2.

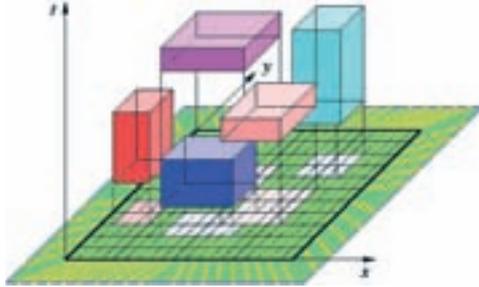


Abbildung 2: Projekt ReCoNodes: Planung optimaler Rekonfigurationsabläufe als dreidimensionales Packproblem

Eine weitere Fragestellung mit vielen praktischen Anwendungen ist das sogenannte *Art Gallery Problem*, bei dem es um die optimale Platzierung einer möglichst kleinen Zahl von Wächtern geht, so dass jeder Punkt eines Polygons überblickt werden kann. (Siehe Abbildung 3 für ein Beispiel, das zugleich einige unserer alten Räumlichkeiten zeigt.) Aufgrund der überabzählbar vielen involvierten Punkte bedarf es der Kombination verschiedener Aspekte der Algorithmischen Geometrie, der Mathematischen Optimierung und des Algorithm Engineering; das Projekt *Kunst!* im Rahmen des DFG-SPPs „Algorithm Engineering“ liefert hierzu Antworten.

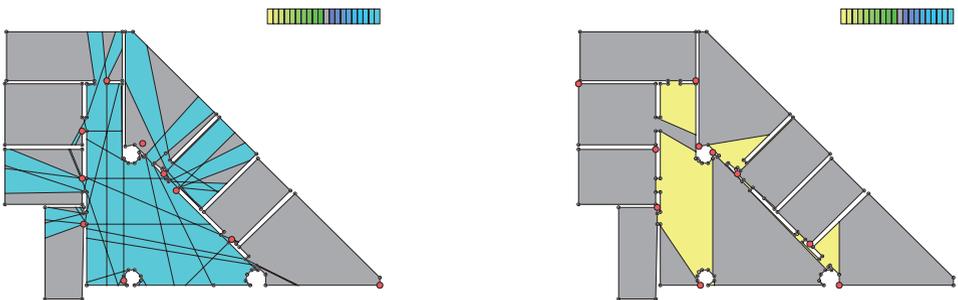


Abbildung 3: Grundriss der Institutsräume 2007-2011: (Links) Optimale Lösung eines Art-Gallery-Problems, (rechts) Beweis der Optimalität

3 Neue Paradigmen

Ein Kennzeichen unserer modernen vernetzten Welt ist, dass sich soziale, technische und wirtschaftliche Bedingungen rapide ändern. Dabei führen neue Möglichkeiten in kurzer

Zeit wieder zu neuen Herausforderungen. Dies gilt natürlich auch für die Algorithmik als treibende Kraft in der Informatik. Klassisch betrachtet man wiederum drei Aspekte:

1. Eine Instanz ist durch vollständige Eingabedaten beschrieben.
2. Ein zentraler Prozessor führt die Berechnungen durch.
3. Nach Berechnung der Ausgabedaten ist das Problem gelöst.

Demgegenüber hat man es in der modernen Praxis mit folgenden Gegebenheiten zu tun:

1. Die Eingabedaten liegen nur unvollständig vor – und können sich während der Berechnung noch ändern.
2. Es gibt viele beteiligte Prozessoren (oder handelnde Individuen), die lokal vernetzt sind und durch lokalen Entscheidungen das globale Ergebnis bestimmen.
3. Die Ausgabedaten sind jeweils nur in verteilter Form vorhanden, so dass es keinen globalen Output als Problemlösung gibt.

Entsprechend hat man es wiederum mit einer ganzen Reihe von neuen Forschungsbereichen zu tun: *Algorithmen mit unvollständigen Informationen* liefern Herangehensweisen für sogenannte „Online-Szenarien“, in denen die Daten erst zur Laufzeit bekannt werden. *Verteilte Algorithmen* beschäftigen sich mit Szenarien, in denen viele Prozessoren gemeinsam einen Ablauf bestimmen. *Parallele Algorithmen* entwickeln Methoden, bei denen sich das Gesamtergebnis aus dem Zusammenspiel der Prozessoren ergibt.

3.1 Algorithmen mit unvollständiger Information

Wie soll man ein unbekanntes Gebiet durchsuchen? Dabei hat man es mit einer Verallgemeinerung des NP-schweren Rundreiseproblems zu tun; erschwerend kommt aber hinzu, dass man das Gebiet erst während der Erforschung kennenlernt. Derartige algorithmische Online-Probleme sind von großer praktischer Bedeutung, etwa auch in der Routenplanung, bei der man die Verkehrsstörungen auch nicht vorher kennt. Aspekte der Bewegungsplanung mit unvollständiger Information waren Teil des Projektes „RoboRithmics“ im DFG-Schwerpunktprogramm „Algorithm Engineering“. Siehe Abbildung 4 für ein Beispiel, bei dem es um die Erforschung eines unbekanntes Bereiches mit möglichst kurzer Fahrtstrecke geht. Daneben gab es noch eine ganze Reihe weiterer Publikationen mit Ergebnissen im Bereich der Online-Algorithmen.

3.2 Verteilte Algorithmen

Unsere moderne Welt besteht aus zahllosen Akteuren und Prozessoren, die im Zusammenwirken Berechnungen durchführen und Strukturen aufbauen. Dabei hat jeder Prozessor nur begrenzte Information, begrenzte Berechnungskapazität und schließlich begrenzte Ausgabedaten zur Verfügung. Trotzdem ist es möglich, komplexe Ergebnisse zu erzielen, etwa im Kontext von Sensornetzen, im Straßenverkehr oder bei Aufbau und Unterhalt anderer komplexer Netzwerke. In den DFG-Projekten SwarmNet und AutoNomos, den BMBF-Projekten Real-World G-Lab und ADVEST und den EU-Projekten FRONTS und WISEBED haben wir uns mit verteilten Algorithmen und Mechanismen beschäftigt.

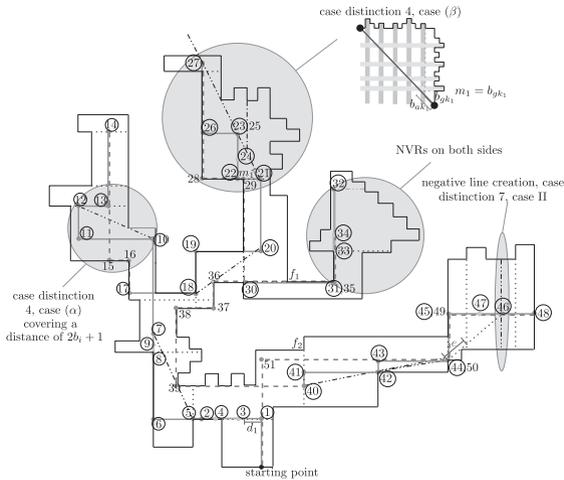


Abbildung 4: Projekt RoboRithmics: Planung einer Tour, die ein unbekanntes Gebäude durchsucht.

3.3 Parallele Algorithmen

Verteilte Algorithmen gehen in der Regel von unspezifisch verteilten Daten und Prozessoren aus – etwa im Internet. Oft gibt es aber einen räumlichen Zusammenhang zwischen dem Ort der Daten, der Prozessoren und den benötigten Berechnungsergebnissen. Dies legt nahe, verteilte algorithmische Methoden in geometrischem Kontext zu sehen. Ein Beispiel ist die Entwicklung von Methoden für Bildanalyse mit Hilfe intelligenter Pixel, die jeweils nur einen begrenzten Ausschnitt eines Bildes erkennen, aber mit ihren Nachbarn kommunizieren und einfache Berechnungen vornehmen können. Hier haben wir ein Verfahren entwickelt, das erheblich schneller ist als zentralisierte Ansätze; siehe Abbildung 5.

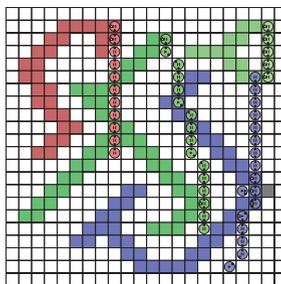


Abbildung 5: Smart Pixels: Ein schneller eingebetteter Algorithmus, bei dem mit lokaler Intelligenz ausgestattete Bildsensorpixel die beobachteten Objekte segmentieren und ihre Größe, Position und Orientierung berechnen.

Komplexere Fragestellungen im sogenannten „Internet of Things“ sind gegenwärtig Gegenstand des EU-Projektes SPITFIRE.

4 Praktische Anwendungen

Algorithmik ist praxisorientierte Theorie. Daher liegt es nahe, sich auch mit praktischen Anwendungen zu beschäftigen. Hier seien zwei Schwerpunkte herausgegriffen: *Sensornetze* und *Verkehrsplanung*.

4.1 Sensornetze

Ein Sensornetz besteht aus einer großen Zahl kleiner Prozessoren, die lokale Messungen durchführen können, Berechnungen von begrenztem Umfang durchführen und drahtlos mit Nachbarn kommunizieren können. Dabei ist die Energieversorgung oft eingeschränkt.

Im EU-Projekt WISEBED haben wir uns gemeinsam mit zahlreichen europäischen Partnern mit Testumgebungen für drahtlosen Sensornetzen beschäftigt. Im BMBF-Projekt Real-World G-Lab haben wir an der Verknüpfung drahtloser Sensoren mit dem Internet gearbeitet, mit dem Ziel, dem Internet Augen und Ohren zu geben. In diesem Zusammenhang entstand unser Sensorflur, der auch in der Lehre schon gute Dienste geliefert hat.



Abbildung 6: Der Sensorflur: Unter den Bodenfliesen angebrachte und vernetzte Sensoren erlauben im Zusammenspiel mit weiteren Ein- und Ausgabevorrichtungen interaktive Sensorik.

4.2 Verkehrsplanung

Individuelle Mobilität ist eine der besonderen Errungenschaften unserer modernen Welt. Zugleich stellt die sinnvolle Nutzung der dabei aufgewendeten Ressourcen eine besondere Herausforderung dar: Wie koordiniert und optimiert man die Bewegung der zahllosen Verkehrsteilnehmer? Jeder Autofahrer kennt die frustrierende Situation, in den Stop-and-Go-Wellen eines Staus gefangen zu sein. Mit Methoden der Verkehrsphysik kann man die zugrundeliegenden Mechanismen inzwischen gut verstehen. Die Informatik geht einen Schritt über Beobachtung und Modellierung hinaus: Mit Hilfe drahtloser Car-to-Car-Kommunikation kann man Informationen zwischen Fahrzeugen austauschen – und darauf basierend auch die Gesetze der Wechselwirkung zwischen den Autos verändern. Auf dieser Basis ist es uns gelungen, ein patentiertes Regelwerk zu entwickeln, das die Kopplung zwischen Fahrzeugen im dichten Verkehr verändert, Stop-and-Go-Wellen glättet und in Simulationen ca. 30-40% Treibstoff einspart.

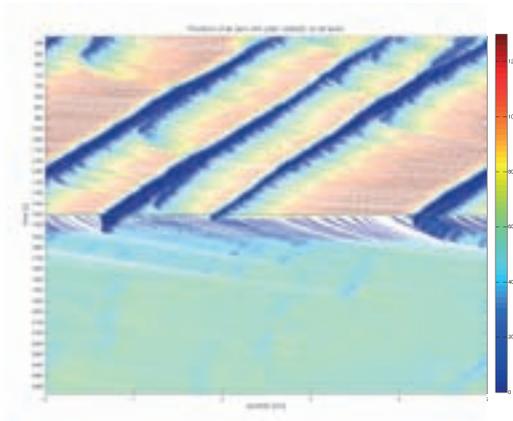


Abbildung 7: Verteilte Methode zur Verbesserung des Verkehrsflusses im dichten Verkehr; kältere Farben entsprechen langsamerer Geschwindigkeit: Im oberen Teil zeigen sich typische Stop-und-Go-Wellen. Das Aktivieren unseres Regelsystems (Mitte) beseitigt die vorliegende Stausituation und führt zu gleichmäßigerem Verkehrsfluss und geringerem Treibstoffverbrauch.

Diese und weitere Aspekte haben wir im DFG-Projekt AutoNomos (im Rahmen des Schwerpunktprogrammes „Organic Computing“) untersucht; im BMBF-geförderten Projekt AD-VEST ging es um Adaptive Verkehrssteuerung.

5 Lehre

Auch in der Lehre schlagen sich unsere diversen Aktivitäten nieder: Neben der gut besuchten Anfängerveranstaltung zu „Algorithmen und Datenstrukturen“ gehören dazu die Einführungsvorlesungen zu „Netzwerkalgorithmen“, diverse Praktika und Seminare und eine Palette weiterführenden Vorlesungen zu Themen wie „Algorithmische Geometrie“, „Mathematische Methoden der Algorithmik“, „Online-Algorithmen“, „Verteilte Algorithmen“, „Approximationsalgorithmen“ und „Algorithm Engineering“. Unsere wissenschaftlichen Aktivitäten schlagen sich unmittelbar in den Lehrveranstaltungen nieder; umgekehrt bemühen wir uns, schon sehr früh unsere Studierenden in unsere Forschung mit einzubeziehen. Es ist einer der besonderen Reize einer Universität, dass sie den ständigen Kontakt zu vielen interessierten und motivierten Menschen bietet!

6 Ausblick

Unsere Welt ist einem immer schnelleren Wandel unterworfen. Dabei kommt der Informatik eine gestaltende, aktive Rolle zu, da sie viele der Entwicklungen erst möglich macht. Entsprechend dynamisch ist die Entwicklung der Informatik selber – und damit natürlich auch der Algorithmik. In zehn Jahren, beim 50-jährigen Jubiläum der Braunschweiger Informatik, werden zahlreiche spannende neue Forschungsergebnisse zu berichten sein!