
Mathematische Optimierung von Wasserversorgungsnetzwerken für informelle Siedlungen in Mega Cities

Lea Rausch

Band 21



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

FLUID
SYSTEM
TECHNIK

Forschungsberichte zur Fluidsystemtechnik

Herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. Peter F. Pelz

Mathematische Optimierung von Wasserversorgungsnetzwerken für informelle Siedlungen in Mega Cities

Vom Fachbereich Maschinenbau
an der Technischen Universität Darmstadt
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktor der Naturwissenschaften
(Dr. rer. nat.)

genehmigte

D I S S E R T A T I O N

vorgelegt von

Lea Rausch, M.Sc.

aus Frankfurt am Main

Erstgutachter:	Prof. Dr.-Ing. Peter F. Pelz
Zweitgutachter:	Prof. Dr. rer. nat. Ulf Lorenz
Tag der Einreichung:	12.11.2018
Tag der mündlichen Prüfung:	20.02.2019

Darmstadt 2018

D 17

Forschungsberichte zur Fluidsystemtechnik

Band 21

Lea Rausch

**Mathematische Optimierung von
Wasserversorgungsnetzwerken für
informelle Siedlungen in Mega Cities**

D 17 (Diss. TU Darmstadt)

Shaker Verlag
Düren 2019

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Darmstadt, Techn. Univ., Diss., 2019

Copyright Shaker Verlag 2019

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-6687-6

ISSN 2194-9565

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort des Herausgebers

Trinkwasser ist Menschenrecht

Der Zugang zu sauberem Wasser ist Menschenrecht. 2010 wurde die Erfüllung dieses Rechts als eines der wenigen Sustainable Development Goals der United Nations formuliert.

Vergangenheit

Bereits im Römischen Reich bauten Ingenieure für die Frisch- und Abwasserversorgung Infrastruktur, zu besichtigen in Mainz, die Römersteine in Zahlbach, und deutlich besser erhalten das Aquädukt Pont de Gare der Trinkwasserversorgung von Nîmes. Römische Ingenieure führten das Wasser, wie in der Eifel, teils über 100 km weit. In der Stadt wurde das Wasser in Bassins gesammelt, gereinigt und über Rohrleitungen aus Blei-, Ton- oder Beton verteilt. Ingenieurskunst und Wirtschaftlichkeit waren schon damals untrennbar: In dem Ausspruch des römischen Kaisers Vespasian „pecunia non olet“ ist noch heute das Betreibermodell erkennbar: Vespasian erhob Zwangsgebühren, das sind letztlich Steuern, für die Nutzung öffentlicher Latrinen.

Gegenwart

Heute umfasst die Wirtschaft von Wasser- und Abwassersystemen Planungskosten, Investitionskosten, Betriebs- und Wartungskosten. Für weltweite Investitionen in Fluidfördersysteme wurden im Jahr 2017 allein in Deutschland ca. 10 Mrd. Euro für Armaturen und Pumpen umgesetzt (vgl. VDMA). Diese Produkte sind gemeinsam mit der Mess- und Regeltechnik sowie der Wasseraufbereitung die Möglichmacher (engl. enabler) zur Erreichung des UN-Ziels. Das passt zum Darmstädter Maschinenbau: Gesellschaftliche Probleme nachhaltig lösen.

Dass selbst eine Industrienation wie Deutschland Probleme hat, Infrastruktur durch den Staat zu modernisieren, wird uns täglich schmerzhaft bewusst. Des Pudels Kern dieser Unfähigkeit hat zwei Seiten, nämlich mangelnde Akzeptanz der Bevölkerung und unklare Verantwortung der Akteure. In unserer Industrienation ist die Verteilung der Verantwortung zwischen Planer, Betreiber und Exekutive sowie innerhalb der Exekutive nur mangelhaft geklärt. Es gibt zwei asymptotische Lösungen aus diesem Dilemma: Erstens mehr Zentralität und öffentlicher Betrieb mit klarer Verantwortung und Professionalität wie in der Vergangenheit oder zweitens mehr Dezentralität und privater Betrieb, so

wie unter Margret Thatcher die Infrastruktur von Großbritannien entwickelt wurde.

Zukunft

Im Jahr 2050 werden 66% der Bevölkerung in Städten leben. Die Stadtbevölkerung wird dann von 4 Milliarden Menschen auf 6.5 Milliarden Menschen gewachsen sein. Allein die Mega-Cities im globalen Süden wachsen pro Jahr um ca. 100 Millionen Menschen: 90% des globalen Städtewachstums findet dort im Süden statt und zwar in einer für uns unvorstellbaren Dynamik.

Welche Erfahrung haben wir in Deutschland mit einer moderaten Dynamik? Unsere Gesellschaft will Infrastruktur zentral und öffentlich bereitstellen, d.h. planen, investieren, betreiben und warten. Wir definieren kritische Infrastruktur und haben den Anspruch auch im Krisenfall eine Mindestfunktion sicherzustellen. So der Anspruch - tatsächlich sind wir mit unserer Herangehensweise schon mit dem momentanen Wachstum der Rhein-Main-Region überfordert.

Die Wachstumsrate von Städten wie Rio de Janeiro in Brasilien, Lagos in Nigeria, oder Dhaka in Bangladesch ist ungleich größer, so dass es vermessen wäre unsere Herangehensweise auf den globalen Süden anzuwenden. Darüber hinaus zeigen die schnellwachsenden Stadtregionen einen wesentlichen Unterschied zu unseren langsam wachsenden Städten:

Das Zusammenspiel von Migrationsfluss vom Land in die Stadt und lokale Migration in der Stadt von Arm und Reich führt zu Slums, sobald das Verhältnis der lokalen Mobilität von Reich zu Arm einen kritischen Wert übersteigt. Die Slumgröße ist der Migration immanent und daher unabhängig von Stadt, Land und Kultur.

Was bedeuten Slums für den Anspruch sauberes Trinkwasser für alle Menschen? Schon heute leben in Städten des Südens neun von zehn Menschen in einem Slum, d.h. einem Gebiet mit mangelhafter Infrastruktur: Slums sind Wüsten. Dies gilt für digitale Kommunikation (messbar in Tweets) und Wasserinfrastruktur.

Lessons Learned

Erstens, Wasserinfrastruktur wird durch Investitionsgüter des Maschinenbaus ermöglicht. Zweitens, es ist ein ökonomisch und technologisch relevantes Thema für den Maschinenbau in Deutschland. Drittens, schon heute besteht ökonomisch die Aufgabe an Lösungen für morgen zu arbeiten, nämlich den schnell wachsenden Mega-Cities im globalen Süden. Viertens, diese Städte sind geprägt durch informelle Siedlungen, Slums, in denen ein Großteil der Bevölkerung lebt. Fünftens, Infrastrukturplanung muss auf der Basis dieser stadtgeographischen Realität erfolgen. Sechstens und letztens: Infrastruktur

erfordert robuste Betreibermodelle, die vermutlich privat und nicht öffentlich sind. Das private Engagement mit wirtschaftlicher Motivation die Grundlage für das robuste Funktionieren einer Gesellschaft ist, das hat schon der Vordenker der Aufklärung Bernard Mandeville in seiner Bienenfabel 1705 plakativ dargestellt. Die Fabel sei all denen zur Lektüre empfohlen, die heute wieder Planwirtschaft propagieren.

Forschungsfrage

Frau Lea Rausch stellt sich in ihrer Forschungsarbeit einem Teil dieser Fragen:

1. Wie gelangt man zu einer Planungsgrundlage in Mega-Cities?
2. Wie kann die Planung von Infrastruktur in Mega-Cities durch Algorithmen unterstützt werden?
3. Wie kann die Optimierung effizient durchgeführt werden?

Bewusst ausgeklammert ist das Betreibermodell, das Thema einer weiterführenden Arbeit ist.

Methoden

Als Planungsgrundlage nutzt Frau Rausch die sogenannte Fernerkundung. In einer Zusammenarbeit mit Geographen des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt, DLR, wurden Mega-Cities im globalen Süden optisch mit hochauflösenden Satellitenaufnahmen vermessen. In einer Bildnachbearbeitung wurden informelle Siedlungen, Slums, von formellen Siedlungen getrennt, die Robustheit des Auswertalgorithmus bewertet und die Slumentwicklung über mehrere Jahre ausgewertet. Die Bevölkerungsdichte in den informellen Siedlungen wurde geschätzt und Wasserbedarf daraus abgeleitet. Dieses Verhalten trifft die Realität besser als die Auswertung von Zensus-Daten, da Stadtpolitiker stets Slumbewölkerung als Problem erachten und bekanntermaßen wird ein Problem gefühlt kleiner, wenn man es quantitativ unterschätzt.

Für die Planung nutzt Frau Rausch die Methode Technical Operations Research, TOR, deren Kern eine diskrete Optimierung ist. TOR ist in den vergangenen Jahren in einer Zusammenarbeit der Universität Siegen und der TU Darmstadt entstanden. Systematisch werden Fragen nach Funktion = Lastkollektiv, Ziel = Nachhaltigkeit, Spielfeld = Technische Möglichkeiten gestellt. Die Fragen münden strukturiert in eine mathematische Optimierung unter Nebenbedingungen. Die technische Funktion der Infrastruktur, das ist die Lokation der Slums, deren Größe sowie deren Bedarfe, werden zur

Nebenbedingung. Das Ziel, die Nachhaltigkeit, bemisst sich durch die Lebenszykluskosten der technischen Lösungen. Das Spielfeld umfasst rohrgelundene Infrastruktur, Straßen sowie Wasserwege auf denen der Wassertransport mit Tanklastern, Zweirädern und auch mit autonomen Booten geschehen kann. Letzteres untersuchte Frau Rausch in einem Forschungsaufenthalt am MIT. Hier wird deutlich, dass technische Lösungen, Systemoptimierung unter dem Aspekt der Wirtschaftlichkeit zunehmend den Maschinenbau bestimmen. Die numerische Lösung des Optimierungsproblems erfolgte mit CPLEX, einem MILP-Solver der Firma IBM auf dem Hessischen Höchstleistungsrechner. Um das Problem „rechenbar“ zu machen, nutzt Frau Rausch Heuristiken und Clustermethoden.

Ergebnis

Bis heute wird Infrastrukturplanung von Menschen als Planer vorgenommen. Dabei ist die Funktion (zumeist) erfüllt, die Funktion ist aber nie optimal und robust erfüllt im Sinne von Nachhaltigkeit. Damit ist der Mensch als Planer überfordert. Mit der Arbeit von Frau Rausch ist es aus meiner Sicht erstmals gelungen methodisch sauber von der Anforderung über Fernerkundung bis zum Planungsergebnis eine Wasserversorgung für Zukunftsstädte zu planen. Es ist mir wohlbewusst, und oben ausreichend adressiert, dass dies erst der halbe Schritt ist. Im nächsten Schritt müssen Wege aufgezeigt werden, wie robuste Betreibermodelle aussehen können.

Darmstadt, 2019

Prof. Dr.-Ing. Peter Pelz

Vorwort

Diese Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Fluidsystemtechnik der Technischen Universität Darmstadt. Mit diesem Vorwort bedanke ich mich bei den Menschen, die mich in dieser Zeit begleitet und somit zu diesem Ergebnis beigetragen haben. Zuerst danke ich meinem betreuenden Professor und Institutsleiter, Herrn Prof. Dr.-Ing. Peter Pelz. Nur die Offenheit und Unterstützung, die er mir und diesem neuen Forschungsthema entgegenbrachte, ermöglichte die Arbeit an dieser spannenden Problemstellung. Dabei konnte ich jederzeit auf seinen Rat zählen und meine Arbeit profitierte von der durchweg vertrauensvollen und konstruktiven Zusammenarbeit. Für die Anfertigung des Zweitgutachtens dieser Arbeit und den regelmäßigen Austausch, sowohl während meiner Promotion als auch meines Studiums, bedanke ich mich bei Herrn Prof. Dr. Ulf Lorenz. Des Weiteren möchte ich Herrn Prof. Dr. Carlo Ratti sowie dem gesamten Senseable City Lab für die Möglichkeit zum Forschungsaufenthalt am Massachusetts Institute of Technology und die damit verbundene Zusammenarbeit, den wissenschaftlichen Austausch sowie alle weiteren in Cambridge gesammelten Erfahrungen danken. Ein Dank gilt auch Herrn Dr. Hannes Taubenböck und Dr. Michael Wurm vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt für die Kooperation und die Bereitstellung der klassifizierten Slumdaten. Dem Hessischen Kompetenzzentrum für Hochleistungsrechner der TU Darmstadt danke ich für die Bereitstellung des Lichtenberg-Hochleistungsrechner, auf dem Berechnungen für diese Arbeit ausgeführt wurden.

Eine große Bereicherung für meine Promotion boten meine Kolleginnen und Kollegen am Institut. Ihnen möchte ich meinen Dank für die fachliche Zusammenarbeit und Unterstützung, ohne die diese Arbeit nicht in der gleichen Form möglich gewesen wäre ausdrücken, aber auch für die gemeinsam verbrachte Zeit und die Gespräche - auch über die Fluidsystemtechnik hinaus. Dabei sind insbesondere Dr.-Ing. Lena Altherr für die Leitung und einhergehende Unterstützung in der Arbeitsgruppe "Mathematische Modellbildung", sowie John Friesen, der dieses Forschungsthema gemeinsam mit mir am FST etabliert und in einer stets sehr wertvollen Zusammenarbeit vorangetrieben hat, zu nennen. Abschließen möchte ich mit einem Dank an meine Familie und Freunde, die mich in allen Phasen der Promotion bedingungslos unterstützt und begleitet haben.

Damit blicke ich auf eine sehr schöne Zeit mit einer Vielzahl an gesammelten Erfahrungen und Erinnerungen zurück, die meine Erwartungen weitaus übertroffen hat.

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit, abgesehen von den in ihr ausdrücklich genannten Hilfen, selbständig verfasst habe.

Darmstadt, im November 2018

Lea Rausch

*Wenn eine Idee am Anfang nicht absurd klingt,
dann gibt es keine Hoffnung für sie.*

Albert Einstein

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation und Relevanz des Themas	1
1.2	Formulierung der Forschungsfragen	2
1.3	Vorstellung des entwickelten Konzeptes	3
2	Grundlagen	11
2.1	Grundlagen aus der Mathematik	11
2.1.1	Technical Operations Research	11
2.1.2	Gemischt-ganzzahlige lineare Optimierung	14
2.1.3	Modellierungsmethoden	19
2.1.4	Graphentheorie	22
2.2	Grundlagen aus dem Ingenieurwesen	24
2.2.1	Fluidsystemtechnik	24
2.2.2	Bauingenieurwesen	26
2.3	Grundlagen aus der Informatik	27
2.3.1	Minimale Spannbäume	27
2.3.2	Clusterbildung	28
2.4	Einordnung der Forschungsfragen	29
3	Modellbildung	31
3.1	Kostenmodell	31
3.2	Grundmodell des Optimierungsproblems	38
3.2.1	Zielfunktion	39
3.2.2	Nebenbedingungen	39
3.3	Erweiterungen des Grundmodells	44
3.3.1	Geographische Einschränkungen	45
3.3.2	Berücksichtigung von Abwasser	45
3.3.3	Umweltaspekte als Zielkriterium	48
4	Lösungsverfahren	51
4.1	Klassische Lösungsverfahren	51
4.1.1	Größe des Lösungsraums im Grundmodell	52
4.1.2	Standardsolver zur Lösung des Optimierungsproblems	56
4.2	Verfahrensanpassungen zur Laufzeitverringerung	56
4.2.1	Zerlegung in Slumcluster	57
4.2.2	Minimale-Spannbaum-Heuristik	58
4.2.3	Startlösung für Optimierungssolver	66

5	Ergebnisse	69
5.1	Optimierungslösungen für Beispielstädte	71
5.1.1	Ergebnisse für Rio de Janeiro	71
5.1.2	Vergleich der Ergebnisse für Rio de Janeiro und Dhaka	76
5.1.3	Ergebnisse unter Berücksichtigung von Abwasser	78
5.1.4	Ergebnisse mit Umweltaspekten als Zielkriterium	80
5.1.5	Sensitivitätsanalyse	82
5.2	Laufzeitanalyse	83
5.2.1	Analyse des Optimalitätsgap	85
5.2.2	Einfluss der Modellierungsformen auf Laufzeit	89
5.2.3	Laufzeitreduktion durch Minimale-Spannbaum-Heuristik	91
5.3	Erweiterung der Transportmittel um autonom fahrende Boote	99
6	Konzepterweiterung und Ausblick	103
6.1	Detailgrad der Betrachtung	103
6.2	Routenplanung und Flottenmanagement	106
6.3	Data Mining zur Prognose der Slumentwicklung	107
6.4	Finanzierungs- und Bezahlungsmethoden	108
6.5	Berücksichtigung von Unsicherheiten	110
	Zusammenfassung	113
	Literaturverzeichnis	115
	Anhang	125