
Modellierung und Analyse urbaner informeller Siedlungen für infrastrukturelle Planungen

John Friesen

Band 26



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

FLUID
SYSTEM
TECHNIK

Forschungsberichte zur Fluidsystemtechnik

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

Modellierung und Analyse urbaner informeller Siedlungen für infrastrukturelle Planungen

Vom Fachbereich Maschinenbau
an der Technischen Universität Darmstadt
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktor-Ingenieurs
(Dr.-Ing.)

eingereichte

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

vorgelegt von

John Friesen, M. Sc.

aus Darmstadt

Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Peter F. Pelz
Mitberichterstatter:	Dr. rer. nat. habil. Hannes Taubenböck
Tag der Einreichung:	02.02.2021
Tag der mündlichen Prüfung:	05.05.2021

Darmstadt 2021

D 17

Forschungsberichte zur Fluidsystemtechnik

Band 26

John Friesen

**Modellierung und Analyse urbaner informeller
Siedlungen für infrastrukturelle Planungen**

D 17 (Diss. TU Darmstadt)

Shaker Verlag
Düren 2021

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., 2021

Copyright Shaker Verlag 2021

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8130-5

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

Kontext – die Attraktivität von Städten als Grund für Migration und Infrastruktur

Als Menschen leben wir in wenigen kleinen Kreisen, gebildet aus Familie, Freunden, Kolleginnen. Wir streben nach Gesundheit und Wohlbefinden. Dafür sind wir auf den Austausch von Ideen, Dienstleistung und Waren angewiesen. Dieser Austausch gelingt dort besonders gut, wo Kommunikation stattfindet, die Zusammenarbeit einfach ist und Waren effizient transportiert werden.

Dies ist ein Grund dafür, dass das Zweistromland die Wiege unserer Kultur ist: dort sorgen die Flüsse Euphrat und Tigris nicht nur für die Ernährung, sondern auch für den Dialog, die Zusammenarbeit und den Warenverkehr der Menschen. Am Ufer von Flüssen und Meeren, an den Kreuzungen von Handelswegen, d.h. auch an Furten tauschen sich Menschen aus. Die Marktplätze dienten als Nukleus für Siedlungen.

Das Befrieden von Bedürfnissen hat zwei Seiten, nämlich auf der einen Seite das Äußern oder Wecken von Bedürfnissen, aber auch die Befriedung durch Innovation, die Ideen, Produktion und Vertrieb. Beides geschieht offensichtlich in urbanen Regionen besonders gut und daran ändern auch mittlerweile global kurzweilige Kommunikations- und Transportinfrastrukturen nichts. Im Gegenteil, trotz Internet und Digitalisierung nimmt die Attraktivität von Städten zu, mit dem (erwarteten) Ergebnis, dass im Jahr 2030 zwei von drei Menschen in einer Stadt leben werden. Die Störung dieses Migrationsprozesses durch die Pandemie in den Jahren 2020 bis 2021 beachtet diese Vorhersage noch nicht, wird aber vermutlich vernachlässigbar klein sein.

Stadt und Stadtinfrastruktur gehen immer Hand in Hand. Zumeist stehen der Bevölkerungsdruck bzw. das daraus erwachsene Problem am Anfang und die Infrastruktur entsteht als Reaktion auf dieses Problem. Dies gilt sowohl für die Friedhöfe in Paris, als auch für die Wasserversorgung von London im 18. und 19. Jahrhundert.

Infrastruktursysteme erfüllen die grundlegenden Bedürfnisse der Menschen, z.B. nach sauberem Wasser. Ein Wasserversorgungssystem ist ein Netzwerk mit Quellen und Senken. Die Senken sind die einzelnen Menschen, Familien oder interurbane Strukturen wie Stadtteile. In sehr schnell wachsenden Städten im Globalen Süden sind diese Stadtteile nur sehr selten mit „Vierteln“ einer Planstadt zu vergleichen. Vielmehr entstehen diese Teile dynamisch durch Migration. Ist die Größe dieser Stadtteile bekannt, kann sich die Planung und der Betrieb der Infrastruktur danach richten.

Forschungsfrage(n) – Was sind die typischen Skalen von Städten?

Im Jahr 2017 hat mich Herr Dr.-Ing. Sören Brodersen, damals Entwicklungsleiter der Fa. KSB, einem führenden Pumpenhersteller, nach der typischen Größe von intra-urbanen Strukturen gefragt. Für ein Maschinenbauunternehmen sind die Fragen nach dem Markt mindestens so wichtig wie die Frage nach der Technologie. Motiviert durch diese Frage haben wir im August 2015 einen Projektantrag mit dem Titel „Strukturbildung in Mega-Cities modelliert über ein Reaktions-Diffusions-Modell“ eingereicht. Ich bin der KSB-Stiftung sehr dankbar, dass diese den Mut hatte, solch ein riskantes Forschungsvorhaben zu fördern. Dankbar bin ich auch einen für das Thema brennenden Doktoranden gefunden zu haben. Er hat auf meine Anregung hin, „Modellierung kann jeder, die empirische Validierung ist wichtig“, den sehr fruchtbaren Kontakt zu den Geographen des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) gesucht und gefunden. Andere Fördermittelgeber wie u.a. die Deutsche Forschungsgemeinschaft fördern das Bestehende. Dies führt zu einer Verstärkung bewährter oder zumindest bekannter Ideen entsprechend dem Matthäus-Effekt, aber nicht zur Entstehung neuer Ideen. In seinen Forschungsjahren beantwortet Herr Friesen folgende vier Fragen:

- (i) Lässt sich die Stadtmorphogenese über ein Migrationsmodell mit möglichst wenigen Annahmen modellieren?
- (ii) Gibt es eine typische Größe, d.h. eine Skala für intra-urbane Strukturen?
- (iii) Welche empirisch begründeten Aussagen folgen aus Fern-Feld-Erkundungsdaten über intra-urbane Strukturen?
- (iv) Wie sieht die Übertragung bei inter-urbanen Strukturen aus?

Modellbildung - „des Pudels Kern“

John von Neumann, der als einer der einflussreichsten Mathematiker (und Informatiker) des letzten Jahrhunderts gilt, sagte:

"With four parameters I can fit an elephant, with five I can make him wiggle his trunk".

Dies ist als scharfe Kritik an Nuancenreichtum von Modellen zu verstehen, die wir uns im Zuge einer Euphorie für die sogenannte „künstliche Intelligenz“ immer wieder vor Augen führen sollten. Schnell ist Kausalität und Korrelation verwechselt. Das Gegenmodell ist die Suche nach des „Pudels Kern“.

Dieser Ruf wird jüngst auch in den Sozialwissenschaften, in der Modelle sich durch Nuancenreichtum negativ auszeichnen, laut. Bei der Entstehung von Stadtstrukturen sind zwei Modelle denkbar, erstens die Strukturbildung an Keimen und zweitens die Bildung von dissipativen Strukturen.

Erstens, Strukturbildung durch Keime: Denkt man über die Entstehung von Mustern nach, dann fällt uns zunächst das Wachsen von Mustern an Keimen ein. Dies beobachten wir z.B. beim Wachsen von Schneeflocken. Allgemein der Phasenwechsel wie Kondensation oder Kristallisation beginnt an ausreichend großen Quellen. Die Strukturen wachsen solange, bis die Objekte aneinanderstoßen. Diesen Vorgang beobachtet man auch bei Städten, so beim Zusammenwachsen von Bessungen und Darmstadt im 19. Jahrhundert. Die Anzahl der Stadtteile pro Flächeneinheit, die Keimdichte, verändert sich bei diesem Wachstumsprozess nicht, die relative Flächenbelegung sehr wohl. Überträgt man diesen Gedanken auf informelle Siedlungen, die „Slums“ genannt werden, so könnten Slums an Keimstellen solange wachsen, bis das Wachstum z.B. die Versorgung mit Wasser begrenzt ist.

Zweitens, Bildung von dissipativen Strukturen z.B. durch Turing-Instabilität: Strukturen, die an Keimen entstehen, hängen von der Keimdichte und den Wachstumsprozessen ab. Im Gegensatz dazu sind dissipative Strukturen, im speziellen Turing-Muster, intrinsische Eigenschaften eines dynamischen Systems. In einem schönen Deutschen Wort zusammengefasst: Die Turing-Muster sind Eigen-Muster des Systems und damit unabhängig von den Randbedingungen, den Störungen oder der Größe des Gebietes unter der Voraussetzung, dass die Muster viel kleiner als die Stadterstreckung sind, was praktisch immer gegeben ist. Solche Eigenwerte haben erfahrungsgemäß einen hohen intellektuellen Reiz, da sie in der Tat den Kern der Dynamik offenlegen.

Herr Friesen zeigt, indem er die bekannte lineare Stabilitätsanalyse des Reaktions-Diffusions-Systems auf Migration überträgt, dass eine notwendige Bedingung für die Segregation von relativ armen und relativ reichen Menschen als

$$d := \frac{\text{Mobilität } \textit{reich}}{\text{Mobilität } \textit{arm}} > \frac{\text{Abstossung } \textit{reich} \leftrightarrow \textit{reich}}{\text{Attraktivität } \textit{arm} \rightarrow \leftarrow \textit{arm}}$$

formuliert werden kann, Gleichung 3.15. Die notwendige und hinreichende Bedingung für das Verhältnis der *short distance migration* d ein kritischer Wert d_c der vollständigen Jacobi-Matrix der *short distance migration* abhängt. Für $d > d_c$ kommt es zu einer Bifurkation mit der Ausbildung von räumlichen Wellen, Abb. 3.3. Schön ist nach meinem Dafürhalten die Interpretation der Jacobi-Matrix mit dem generellen Verhalten von Menschen bei der Migration, Abschnitt 3.3.1.

Empirische Verifikation

Der Titel des Artikels „Similar Size of Slums“ erschienen in Habitat International im Jahr 2018 fasst das empirische Ergebnis der Arbeit von Herrn Friesen bereits im Titel zusammen. Die Untersuchung von informellen Siedlungen in Sao Paulo, Dhaka, Rio de Janeiro, Mumbai und Manila zeigen je eine Fläche von 1.3 ha, Abb. 4.4, und eine Dichte der informellen Siedlungen von 2.9 %, Tab. 4.2.2. In den genannten Städten ist die Größenverteilung der informellen Siedlungen logarithmisch normalverteilt. In Caracas, Kapstadt und Kairo sind, vermutlich durch Stadtplanung bzw. Stadtpolitik, die Verteilungen nicht logarithmisch normalverteilt.

In seinen Untersuchungen hat Herr Friesen mehr als 7000 informelle Siedlungen untersucht. Weiterhin hat Herr Friesen das Konzept des average nearest neighbors (ANN) angewendet, um die intra-urbanen Siedlungen auf Regelmäßigkeit hin zu untersuchen. Darüber hinaus hat Herr Friesen aber nicht nur intra-urbane Siedlungen, sondern auch die Struktur von inter-urbanen Siedlungen untersucht. Auf diese Arbeit von Henn, Friesen et al. wird in der vorliegenden Dissertation weniger der Fokus gesetzt.

Darmstadt, im April 2021
Peter Pelz

Vorwort

Die Verstädterung ist einer der prägenden Prozesse der Menschheit. Ich durfte mich während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter intensiv mit diesem Phänomen und der damit verbundenen Entstehung informeller Siedlungen auseinandersetzen. Dabei wurde mir schnell bewusst, wie vielfältig die Perspektiven auf eine solch komplexe Thematik sind. Das Kennenlernen einiger mir vorher fremder Sichtweisen, wie die der Fernerkundung, sowie die vertiefte Auseinandersetzung mit meinem eigenen fachlichen Blickwinkel, haben diese Zeit für mich sehr wertvoll gemacht.

Andererseits hat mich die Beschäftigung mit der informellen Siedlungsbildung und die damit häufig einhergehende Armut demütig gemacht. Meine Sicht im Rahmen der Forschung ist immer eine privilegierte Sicht *von oben* gewesen. Ich schreibe diese Zeilen in einer warmen Drei-Zimmer-Wohnung mit Internetanbindung, fließendem Wasser und einer funktionierenden Abwasserentsorgung. Armut habe ich in meinem Leben nie erfahren müssen und bin mir dieses unverdienten Privilegs durchaus bewusst.

Gleichzeitig habe ich die Hoffnung, dass die häufig anzutreffende dystopische Sicht auf diese Siedlungsareale nicht das Ende beschreibt, sondern dass der Prozess der Verstädterung die Versprechen, die er in sich trägt, auch einlösen kann. Vielleicht kann die hier beschriebene Forschung einen kleinen Teil dazu beitragen.

Urbanisierung, Forschung und *alles wirkliche Leben ist Begegnung*, wie Martin Buber sagt. Diese Erfahrung habe ich in den letzten Jahren vielfältig machen dürfen, denn ohne die Unterstützung vieler Personen, denen ich in den letzten Jahren *begegnet* bin, wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen. Ihnen gilt der folgende Dank.

Zuerst sei hier mein Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Peter F. Pelz erwähnt. In einer lehrreichen Mischung aus positiver Rückmeldung, ehrlicher Kritik und der mir ermöglichten Freiheit, eigene Forschungsideen umzusetzen, konnte ich meine Perspektive erweitern und schärfen. Vor allem der Mut die Kreativität als Teil und nicht als Gegensatz von wissenschaftlichem Arbeiten zu verstehen, hat mich geprägt. Dafür bin ich ihm sehr dankbar.

Weiterhin bedanke ich mich bei Dr. Hannes Taubenböck vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt für die Übernahme des Korreferats, die Bereitstellung der verwendeten Forschungsdaten und vor allem für die Wertschätzung sowie das Vertrauen, das er mir entgegen gebracht hat. In den zahlreichen Diskussionen und dem darin stattfindenden interdisziplinären Austausch mit seinem Kollegen Dr. Michael Wurm habe ich viel gelernt.

Der KSB-Stiftung danke ich für die dreijährige Förderung des Forschungsprojektes, die das offene Suchen, das in dieser Arbeit beschrieben wird, erst ermöglicht hat.

Weiterhin bin ich meinen Kolleginnen und Kollegen, von denen ich Dr. Lea Rausch, Dr.-Ing. Christian Schänzle, Ingo Dietrich, Jakob Hartig und Martin Pietsch besonders hervorheben möchte, für die vielen kritischen fachlichen und gleichzeitig freundschaftlichen Gespräche dankbar. Sie halfen mir meine Gedanken klarer zu formulieren und waren mir immer wieder ein wertvolles Gegenüber. Auch den Studierenden Christoph Knoche, Katharina Henn und Bartosz Prokop möchte ich für ihren Fleiß und ihren Beitrag zu dieser Arbeit danken.

Die Möglichkeit sich intensiv mit Fragen auseinander zu setzen, ist nicht selbstverständlich, sondern braucht Freiräume. Deshalb möchte ich meiner Schwiegermutter und meinem im letzten Jahr verstorbenen Schwiegervater für die Unterstützung in der Betreuung unseres Sohnes und die dadurch entstandene Möglichkeit zum Verfassen dieser Arbeit herzlich danken.

Ein weiterer Dank gilt meinen Schwestern, die mir in den letzten Jahren mit Rat und Tat zur Seite gestanden haben und im Speziellen meiner Schwester Jenny Friesen für die Durchsicht der Arbeit.

Einen herzlichen Dank möchte ich meinen geliebten Eltern Peter und Helene Friesen aussprechen, die mir durch finanzielle Unterstützung aber vor allem durch ihren liebevollen Zuspruch die Sicherheit und Möglichkeit gegeben haben, meinen Interessen und Talenten nachgehen zu können.

Der letzte Dank gilt den beiden für mich wichtigsten Menschen. Meinem Sohn Theodor David, der mir durch das gemeinsame Toben wunderbare Pausen im Schreibprozess verschaffen hat und von dem ich die Offenheit für das Leben immer wieder lernen darf. Und natürlich meiner liebsten Victoria, mit der ich in den letzten Jahren durch wunderbare Höhen und traurige Tiefen gegangen bin. Sie schuf mir Freiräume und ermutigte mich stets. In Liebe widme ich ihr diese Arbeit.

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

Darmstadt, am 2. Februar 2021
John Friesen

Und Gott der HERR pflanzte einen Garten in Eden gegen Osten hin und setzte den Menschen hinein, den er gemacht hatte.

Genesis 2,8

Und ich sah die heilige Stadt, das neue Jerusalem, von Gott aus dem Himmel herabkommen.

Apokalypse 21,2

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Forschungsfragen	10
1.2	Aufbau der Arbeit	10
2	Grundlagen zu informellen Siedlungen	13
2.1	Stadtdefinitionen	14
2.2	Polarität von Städten	16
2.3	Historie, Definition und Eigenschaften informeller Siedlungen .	18
2.4	Infrastrukturen	24
2.5	Erfassung und Modellierung	27
2.5.1	Erfassung	27
2.5.2	Zeitliche Entwicklung	32
2.5.3	Modellierungsansätze	33
2.6	Städte als Organismen	35
3	Modellbildung	39
3.1	Grundlegende Arbeiten	39
3.2	Beschreibung informeller Siedlungen auf Grundlage einer Turing-Instabilität	49
3.3	Lineare Stabilitätsanalyse	52
3.3.1	Fermigration	54
3.3.2	Kurzstreckenmigration	56
3.3.3	Dispersionsrelation, Bifurkation und Modenselektion .	58
3.4	Simulationsbasierte Analyse	61
3.4.1	Schwellwert zur Erzeugung binärer Muster	61
3.4.2	Zeitliche Entwicklung eines Turing Musters	62
3.5	Modellinterpretation	63
4	Empirische Analyse	67
4.1	Daten und Methoden	67
4.1.1	Siedlungsdaten	67
4.1.2	Statistische Analysen räumlicher Muster	72
4.2	Ergebnisse	76
4.2.1	Häufigkeitsverteilungen der Grundfläche	76
4.2.2	Siedlungsdichte	84
4.2.3	Räumliche Verteilung	86

5 Diskussion	89
5.1 Modellbewertung	90
5.1.1 Korrektheit	91
5.1.2 Zulässigkeit	97
5.1.3 Zweckmäßigkeit	102
5.2 Philosophische und modelltheoretische Einordnung	105
5.3 Modellerweiterungen und Anwendungen	109
5.4 Modelle als Gegenüber	114
6 Zusammenfassung und Ausblick	119
Literatur	123
A Anhang	144
A.1 Alternative Entdimensionierung und Reaktionskinetik	144
A.2 Kontextuelle Darstellungen morphologischer Slums	147
Eigene Veröffentlichungen	149

Symbolverzeichnis

Die Symbole der ersten Spalte werden in der zweiten Spalte beschrieben. Die dritte Spalte, wenn vorhanden, gibt die Dimension als Monom mit den Basisgrößen Länge (L), Masse (M), Zeit (T), Temperatur (Θ) und elektrischer Strom (I).

Lateinische Symbole:

Symbol	Beschreibung	Dimension
A	Fläche	L^2
A_{Ges}	alle Elemente umschließende rechteckige Fläche	$1 / L^2$
A_{INF}	dimensionslose Summe aller Flächen der modellierten informellen Siedlungen	1
A_{MS}	Summe der Flächen aller morphologischen Slums in einer Stadt	L^2
A_{Stadt}	Grundfläche der morphologisch erfassten Stadt	L^2
\hat{A}	geometrisches Mittel der Flächen der morphologischen Slums	L^2
a_{ij}	Jakobi-Matrix	1
b_{ij}	Matrix zur Analyse der Systemstabilität unter Einfluss von Diffusion	1
b_{P}	Puffer	L
C	Grenze einer Stadt	L
c_1, c_2	Reaktionskonstanten in der Schnakenberg-Kinetik	1
d	Diffusionszahl	1
d_c	kritische Diffusionszahl	1
d_o	Diffusionszahl größer als d_c	1
d_u	Diffusionszahl kleiner als d_c	1
d_{ij}	Matrix der Diffusionszahlen	1
D_x	Diffusionskoeffizient	$L^2 T^{-1}$
f_i	Reaktionskinetik	1
\vec{J}_i	Strom über die Systemgrenze	LT^{-1}
k	Wellenzahl	1
k_B	Boltzmannkonstante	$L^2 MT^{-2} \Theta^{-1}$

L	Gebietslänge	1
l_M	dimensionsloser Durchmesser einer modellierten informellen Siedlung	1
\tilde{l}_M	Durchmesser einer modellierten informellen Siedlung	L
N	Anzahl	1
\vec{n}	Normalenvektor auf die Systemgrenze	1
R	Regelmäßigkeit	1
\hat{R}	Reaktionsrate	T ⁻¹
r_A	Abstand zum nächsten Nachbar in einer zufälligen Punktverteilung	L
r_E	Abstand zum nächsten Nachbar in der untersuchten Punktverteilung	L
r_i	Abstand zum nächsten Nachbar	L
S	Entropie	L ² MT ⁻² Θ ⁻¹
T	Temperatur	Θ
t	dimensionslose Zeit	1
\tilde{t}	Zeit	T
U_x	homogene Lösung der Reaktionsgleichung f_i	L ⁻²
\hat{U}	maximale Bevölkerungsdichte in einer Stadt	L ⁻²
\tilde{u}_x	Bevölkerungsdichte	L ⁻²
u_x	dimensionslose Bevölkerungsdichte	1
x	dimensionsloser Ort	1
\tilde{x}	Ort	L
z	z -Wert zur Beschreibung der Standardabweichung	1

Griechische Symbole:

Symbol	Beschreibung	Dimension
α_x	Flächenanteil morphologischer Slums in einem Sektor	1
β_x	relativer Anteil morphologischer Slums in einem Sektor	1
γ	Maßstabsfaktor	1
ϑ	Schwellwert	1
λ	Wellenlänge	1
μ	Mobilität	TM ⁻¹
σ	Wachstumsrate und Eigenwert	1
σ_A	logarithmische Standardabweichung	1
σ_c	Standardabweichung des Abstands in einer zufälligen Punktverteilung	L
Φ	Siedlungsdichte	1
Ω	Anzahl möglicher Mikrozustände, die einen Makrozustand eines Systems beschreiben	1

Sonstige:

Symbol	Beschreibung
\oint	Ringintegral
D/Dt	allgemeine Zeitableitung
$\partial/\partial x$	partielle Ortsableitung
$\partial/\partial t$	partielle Zeitableitung
∇	Nabla-Operator
Δ	Laplace-Operator
\mathcal{R}	Realteil von

Indices

Index	Beschreibung
1	auf <i>arme</i> Bevölkerungsgruppen bezugnehmend
2	auf <i>reiche</i> Bevölkerungsgruppen bezugnehmend
i, j, k	Index und Laufvariable
FM	Fernmigration
KM	Kurzstreckenmigration
max	maximal
min	minimal
dom	Dominant
I - V	Sektoren der Größenordnung von morphologischen Slums

Abkürzungen

Kürzel	Bedeutung
Mio.	Millionen
vgl.	vergleiche
engl.	englisch