

Sebastian Vehlken

Systemverhalten. *Urban Dynamics* zwischen Kybernetik und Komplexitätswissenschaft

Verhalten ist, ganz gleich, ob es von biologischen, sozialen oder technischen Systemen ausgeht, in mindestens dreifacher Weise durch mediale Operationen gekennzeichnet: An einem Wissen von diesem Verhalten arbeiten technische Medien mit, indem sie erstens zwischen Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft, zweitens zwischen einem Innen und einem Außen und drittens zwischen Zielgerichtetheit und (unvorhersehbaren) Störeinflüssen vermitteln. Seitdem frühe kybernetische Ansätze universale informationstheoretische Beschreibungen von *communication and control* formulierten, wird Verhalten jedoch nicht nur mittels eines neuen, technischen Vokabulars beschreibbar. Verhalten entwickelt sich vielmehr zu einer Problemkategorie, welche die technische Einrichtung und Einstellung zunehmend komplexer Informationsmaschinen betrifft. Derartige computertechnische Systeme wurden und werden in historisch unterschiedlicher Weise eingesetzt, um Aufschlüsse über *andere* komplexe Systeme – etwa soziale Systeme – und ihre Verhaltensweisen zu erlangen.¹

Die neue Sichtweise kybernetischer Ansätze bestand darin, Komplexität als eine Eigenschaft eigenen Rechts zu behandeln. Systeme und ihre (Dys-)Funktionalitäten wurden in Form (analoger oder digitaler) Modelle von realen Situationen abstrahiert und *als* Modelle explorierbar. Dadurch ließen sie sich interdisziplinär auf andere Gegenstandsbereiche übertragen und wurden zum Ausgangspunkt für die Formulierung genereller Theorien.² Eine computertechnische Erforschung vom

¹ Der Begriff des *Systems* hat eine lange Geschichte und wird in verschiedenen Kontexten und wissenschaftlichen Disziplinen auf höchst unterschiedliche Weise verwendet. Ganz allgemein formuliert ist ein System eine Menge von Einheiten (real oder konzeptionell, materiell oder nicht-materiell), die miteinander interagieren und ein identifizierbares Ganzes bilden. Ein offenes System hat eine bestimmte Umgebung, mit der es interagiert; in Abwesenheit einer Umgebung (oder jeglicher Interaktion mit ihr) wird das System als geschlossen bezeichnet. Steve J. Heims: Gregory Bateson and the mathematicians. From interdisciplinary interaction to societal function. In: *Journal of the History of the Behavioral Sciences* 13 (1977), S. 141–159. Zum Systembegriff vgl. z. B. Geo Siegart: System. In: *Enzyklopädie Philosophie und Wissenschaftstheorie*, Bd. 4. Hg. von Jürgen Mittelstraß. Stuttgart 1996, S. 183–185; Karl Steinbacher et al.: System/Systemtheorie. In: *Enzyklopädie Philosophie*, Bd. 2. Hg. von Hans-Jörg Sandkühler. Hamburg 1999, S. 1579–1588.

² Brian McLoughlin und Judith N. Webster: Cybernetic and general-system approaches to urban and regional research. A review of the literature. In: *Environment and Planning* 2 (1970), S. 369–408.

Systemverhalten bedeutet dabei zugleich, auch die Übertragungs-, Verarbeitungs- und Speicheroperationen digitaler Technologien selbst als Teil einer „Verhaltenswissenschaft von Systemen“ zu begreifen.³ Denn um Systemverhalten möglichst realitätsnah in Computersimulationen zu (re-)produzieren, wird oftmals eben nicht Systemkonformität verlangt, sondern ein Fächer aus Praktiken des Tweakens (d. h. des sukzessiven Verbesserns etwa der Lauffähigkeit eines Programms mittels kleiner Eingriffe in den Code) und des Modulierens der Modelle. Das generierte Wissen um das Verhalten simulierter Systeme ist intrinsisch mit dem Verhalten der Simulationssysteme verquickt.

Diese verschiedenen, miteinander verbundenen Ebenen einer computertechnisch orientierten Beschreibung von Systemverhalten sollen im Folgenden aus einer medien(technik)historischen und wissenschaftsgeschichtlichen Perspektive am Beispiel computergestützter Urbanistik und Stadtplanung näher betrachtet werden. Ausgehend von Arturo Rosenblueths, Norbert Wieners und Julian Bigelows epochemachendem Text *Behavior, purpose and teleology*⁴ wird in einem ersten Schritt das behavioristische Erbe der frühen Kybernetik und dessen Transformation hin zu einer allgemeinen probabilistischen Steuerungswissenschaft thematisiert, deren homöostatische Grundprinzipien um 1970 mitunter in eine regelrechte soziotechnische „Planungseuphorie“⁵ umschlugen. Auch Städte wurden demzufolge als eine Form von Informationsmaschine verstanden, deren Architekturen, Infrastrukturen und soziale Funktionen in digitale Modelle übertragbar werden sollten. Modelle, die ein Experimentieren mit verschiedenen Szenarien und die Optimierung unerwünschter Entwicklungsparameter in Aussicht stellten – etwa in Bezug auf die geografische oder demografische Segregation der Bevölkerung, eindimensionale ökonomische Entwicklungsprogramme oder eine mangelhafte Bereitstellung und Verteilung öffentlicher Infrastrukturen und Institutionen.

3 Bernd Mahr: Modellieren. Beobachtungen und Gedanken zur Geschichte des Modellbegriffs. In: Bild – Schrift – Zahl. Hg. von Horst Bredekamp und Sybille Krämer. München 2003, S. 59–86.

4 Arturo Rosenblueth, Norbert Wiener und Julian Bigelow: Behavior, purpose and teleology. In: Philosophy of Science 10 (1943), S. 18–24.

5 Elke Seefried: Zukünfte. Aufstieg und Krise der Zukunftsforschung 1945–1980. Berlin/Boston 2015. Homöostase bedeutete dabei die Herstellung eines dynamischen Gleichgewichtszustands im Verhalten eines Systems durch geeignete Feedback-Effekte (ein gern genommenes Beispiel ist der Heizungsthermostat). Auch bei externen Veränderungen sollten sich die betrachteten Systeme intern auf neue „lebensfähige“ Zustände hin einpegeln. Vgl. z. B. Bernhard Dotzler: Äquilibristik und Informationsverhalten. Über W. Ross Ashbys Homöostaten. In: Balance. Figuren des Äquilibriums in den Kulturwissenschaften. Berlin 2019, S. 181–192.

Am Beispiel von Ira S. Lowrys *A Model of Metropolis*⁶ und Jay W. Forresters *Urban Dynamics*⁷ werden im Folgenden einerseits konkrete Umsetzungsversuche für ein durch Feedback-Prozesse geprägtes Verständnis des Systemverhaltens von Städten untersucht. Andererseits thematisiert der Beitrag jene operativen Grenzen kybernetischer Technologien, die bereits zu Beginn der 1970er Jahre deutlich sichtbar wurden und zum Beispiel im Vokabular der soziologischen Systemtheorie ihre diskursive Behandlung fanden.

Daran schließt sich in einem zweiten Schritt jene um 1980 einsetzende Konjunktur der *Complexity Science* an, deren interdisziplinäre Forschungen sich verallgemeinerbaren Prinzipien im Verhalten turbulenter Systeme zuwandten.⁸ In den Fokus rückte ein Interesse für die generative Kraft von Extremwerten, Kipppunkten und Bifurkationen⁹ sowie für Prinzipien der Selbstorganisation im Verhalten komplexer Systeme. Der oft interventionistische Impetus eines homöostatischen, kybernetischen Einregelungsdenkens zur Verhinderung von Systemkrisen wurde abgelöst von der Suche nach Möglichkeiten, Systeme schlicht mit hinreichenden responsiven Potenzialen auszustatten, die imstande waren, extreme Verhaltensweisen abzufedern.¹⁰

Auch hier führt der Beitrag zwei Beispiele des wiederum veränderten Problembewusstseins in Bezug auf das Systemverhalten von Städten ins Feld: Zum einen das seit 1995 entwickelte agentenbasierte Stadtsimulationsmodell TRANSIMS¹¹ und zum anderen Ansätze, die sich in der Folge von Paul Krugmans A

6 Ira S. Lowry: *A Model of Metropolis*. Rand Research Memorandum RM-4035-RC (August 1964).

7 Jay W. Forrester: *Urban Dynamics*. Cambridge, Mass. 1969.

8 Dabei interessierten hier einerseits Beobachtungen, dass aus wenigen dynamischen Interaktionsregeln außerordentlich intrikate Verhaltensweisen eines Systems folgen konnten. Andererseits ging es um die Erforschung eben jener Balancepunkte – dem „edge of chaos“ –, die dynamische Vorgänge in Systemen in einem Schwellenbereich hielten, der ein Umkippen in komplette Unordnung verhinderte. Komplexität wurde quasi als Bewältigungsstrategie gegenüber chaotischen Effekten aufgefasst. Vgl. M. Mitchell Waldrop: *Complexity. The Emerging Science at the Edge of Order and Chaos*. New York 1992, S. 11.

9 Ilya Prigogine, Isabelle Stengers und Alvin Toffler: *Order out of Chaos. Man's New Dialogue with Nature*. New York 1984.

10 Vgl. John H. Holland: *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. Cambridge 1975; Karl E. Weick und Kathleen M. Sutcliffe: *Managing the Unexpected. Assuring High Performance in an Age of Complexity*. San Francisco 2001.

11 Kai Nagel, Steen Rasmussen und Chris L. Barrett: *Network traffic as a self-organized critical phenomenon*. In: Los Alamos National Laboratory TSA-DO/SA MS-M997 and CNLS MS-B258, 22. Feb. 1996. Online unter: www.researchgate.net/publication/23740364_Network_Traffic_as_a_Self-Organized_Critical_Phenomena (abgerufen am 30.7.2021).

*slime mold model of city formation*¹² an den biomorphen Strukturbildungsprozessen von Schleimpilzen orientierten. Die Beschreibung von Verhalten im Zeitalter seiner computertechnischen (Re-)Produzierbarkeit stellt sich hierbei in unterschiedlicher Weise als ein Problem der Erzeugung, des Zugriffs und der Verarbeitung von Daten dar, aus denen die Dynamiken biologischer, gesellschaftlicher und technischer Systeme erst extrapoliert und synthetisiert werden können – sowohl auf der inneren Ebene der computertechnischen Operationen als auch auf der äußeren Ebene der Beschreibungskompetenz gegenüber ihren Zielsystemen.

Captain Metropolis: Funktionslogisches Systemverhalten

Schon frühe kybernetische Ansätze gründeten in der Hoffnung, das Verhalten komplexer Lebewesen oder ganzer Sozialwesen durch die Anwendung ingenieurtechnischer Konzepte besser beschreibbar zu machen. Sie postulierten die Analogisierung des Verhaltens biologischer, sozialer und (elektro-)technischer Systeme. Letztere konnten so als Medien eines vereinfachten, test- und experimentierfähigen Zugangs zu allgemeinen Funktionsprinzipien dynamischen Systemverhaltens dienen.¹³

Mit positiven und negativen Rückkoppelungen in Bezug auf Umwelteinflüsse beruht eine kybernetische Modellierung von Verhalten auf „geschlossenen eindeutigen Transformationen“¹⁴ zwischen Inputs und Outputs in der Zeit. Man denke hier etwa an die fotosensiblen *Tortoises* des britischen Kybernetikers Grey Walter und ihre bis hin zu Tanzeinlagen vor dem Labor-Spiegel reichenden Verhaltensweisen zu Beginn der 1960er Jahre.¹⁵ Es sind kybernetische Maschinen, die ein mimetisches Verhältnis zu biologischen oder gesellschaftlichen Systemen an den Tag legen und nur mehr funktionslogisches Systemverhalten imitieren. Jede Form von Verhalten bedarf dabei eines Zielführungsprozesses, in welchem die Notwendigkeit

¹² Paul Krugman: A slime mold model for city formation. In: Topics in Public Economics. Hg. von David Pines, Efraim Sadka und Itzhak Zilcha. Cambridge 1998, S. 5–32.

¹³ Arturo Rosenblueth und Norbert Wiener: Purposeful and non-purposeful behavior. In: Philosophy of Science 17 (1950), S. 326.

¹⁴ Vgl. W. Ross Ashby: Einführung in die Kybernetik. 3. Aufl. Frankfurt a. M. 1985, S. 46.

¹⁵ William Grey Walter: Das lebende Gehirn. Entwicklung und Funktion. München 1961; Andrew Pickering: Mit der Schildkröte gegen die Moderne. Gehirn, Technologie und Unterhaltung bei Grey Walter. In: Kultur im Experiment. Hg. von Henning Schmidgen, Peter Geimer und Sven Dierig. Berlin 2004, S. 102–119. Siehe zu den künstlichen Schildkröten auch den Beitrag von Juliane Rettschlag in diesem Band.

einer Operationalisierung des Zukünftigen immer schon eingeschrieben ist. Nicht von ungefähr war *prediction* dabei ein zentrales Schlagwort – eine Vorhersage, die umso besser wird, je genauer und je größer die verarbeiteten Datenmengen sind: Das System simuliert die möglichen Irrungen und Aktionsradien seines Gegenübers, um daraus probabilistisch und – daran scheiterte es seinerzeit – *rechtzeitig* dessen wahrscheinlichsten Weg zu berechnen.¹⁶ Wo die Kybernetik also zukünftiges Verhalten (im Singular) implementiert, um das Überleben eines Systems in veränderbaren Umwelten zu garantieren, stellt ihre Verbindung mit leistungsfähigen Rechenanlagen und Computersimulationen eine Bearbeitung von zukünftigem Systemverhalten (im Plural) in Aussicht. Deren möglichen Nutzen auch für die Verbesserung sozialer und ökonomischer Systeme beschwor Warren Weaver in seinem Essay *Science and complexity*.¹⁷

Weaver bezeichnete solche Systeme als „problems of organized complexity“ – eine Problemklasse, die er mit ihrer charakteristischen Eigenschaft multipler, miteinander verbundener Variablen zwischen profanen und vorhersehbaren „problems of simplicity“ (etwa die Newtonsche Mechanik) und nur mehr wahrscheinlichkeits-theoretisch beschreibbaren „problems of disorganized complexity“ (beispielsweise die Bewegungen von Gasen oder Elementarteilchen) situierte. Und er sah die systematische Quantifizierung und computergestützte kybernetische Erschließung der Funktionabilitäten solcher Systeme durchaus in Reichweite. Dies machte kybernetische Planungsmodelle für multivariante Systeme und ihr Verhalten – so Nicholas de Monchaux – zumindest in den USA in den 1960er Jahren bald auch für den Anwendungsbereich der Stadtplanung und Stadtentwicklung attraktiv.¹⁸

Städte waren jedoch schon zuvor als Informationsmedien begriffen worden. So weitete wiederum Norbert Wiener bereits im Jahr 1950 gemeinsam mit Karl Deutsch und Giorgio de Santillana das posthumanistische Diktum von „animal and machine“ auch auf Städte aus: „A city is primarily a communication center, serving the same purpose as a nerve center in the body. It is a place where railroads, telephone and telegraph centers come together, where ideas, information, and goods can be exchanged.“¹⁹ Während Wiener und seine Mitautoren seinerzeit jedoch einen dispersiven Ansatz der Stadtplanung im Schatten der atomaren Dro-

¹⁶ Vgl. Norbert Wiener: *Extrapolation, Interpolation, and Smoothing of Stationary Time Series*. New York 1949.

¹⁷ Warren Weaver: *Science and complexity*. In: *American Scientist* 36 (1948). S. 536–544, hier S. 540.

¹⁸ Vgl. Nicolas de Monchaux: *Local Code. 3659 Proposals about Data, Design and the Nature of Cities*. New York 2016, S. 132.

¹⁹ Norbert Wiener, Karl Deutsch und Giorgio de Santillana: *The planners evaluate their plans*. In: *Life* 29 (1950), H. 25, S. 85.

hung und deren konzentrischem Zerstörungspotenzial proklamierten – ein Ansatz, den Michael Quinn Dudley einmal mit „sprawl as strategy“ umschrieb²⁰ –, folgten die Planungsmodelle der 1960er Jahre zivileren (und später auch zivilisationskritischen) Maßgaben. Und schon früh wurde darauf hingewiesen, dass es eben jener kommunikative Faktor sei, der eine zeitgemäße Stadtplanung von hergebrachten Methoden der Planungswissenschaft abhebe.²¹ Mit Verweis auf Deutsch und Meier notieren Brian McLoughlin und Judith Webster in einem Überblicksartikel zu kybernetischen Modellen in der Urbanistik im Jahr 1970:

If the focus of the work of regional scientists has been commodity flows and money transactions within a spatially ordered framework, the unifying thread of many studies of urban systems has been inter-personal communications or transactions whereby the metropolis is looked upon as a ‚communication engine‘, a device for fostering, maintaining, and increasing the number of ‚contact choices‘ which can be made by its citizens.²²

Und bereits ein Jahr zuvor erläuterte der Ökonom Robert Kevin Brown 1969 in seinem Text *City cybernetics* die mittlerweile etablierte Sichtweise:

Certainly, a city can be viewed – indeed, needs to be viewed – as a functioning system composed of many interrelated ‚machines‘. Second, cybernetics offers a method for the scientific treatment of systems in which complexity is outstanding and too important to be ignored. [...] Third, cybernetics, treating the why of any system’s functionality, can make use of parallel circumstances in other disciplines to arrive at meaningful conclusions about urban land use systems. [...] Fourth, cybernetics seeks to investigate non-linear relationships [...].²³

Es lag also quasi auf der Hand, dass Forschungsgruppen an der Harvard University und am MIT rund um Jay W. Forrester und Richard L. Meier im Laufe der 1960er Jahre verschiedene Simulationsmodelle entwickelten, mit denen das dynamische Verhalten von Problemen organisierter Komplexität in Bezug auf Indus-

20 Michael Quinn Dudley: Sprawl as strategy. City planners face the bomb. In: *Journal of Planning Education and Research* 21 (2001), H. 3, S. 52–63, hier S. 55, zit. nach Eva Schauerte: Dispersion. Stadtplanung zwischen Utopie und Dystopie im „Atomic Age“. In: *Zeitschrift für Medienwissenschaft* 8 (2016), H. 1, S. 121–133, hier S. 127.

21 Richard L. Meier: *A Communications Theory of Urban Growth*. Cambridge, Mass. 1962.

22 McLoughlin und Webster: *Cybernetic*, S. 386, mit Verweis auf Karl W. Deutsch: On social communication and the metropolis. In: *General Systems* 6 (1961), S. 95–100; und Richard L. Meier: Measuring social and cultural change in urban regions. In: *Journal of the American Institute of Planners* 25 (1959), S. 180–190.

23 Robert Kevin Brown: *City cybernetics*. In: *Land Economics* 45 (1969), H. 4, S. 406–412, hier S. 407.

trien, Städte und später gar den gesamten Globus erforscht werden sollte.²⁴ An der RAND Corporation, jener Mutter aller modernen Thinktanks,²⁵ wiederum entwarf unter anderem Ira S. Lowry ein gleichungsbasiertes *Model of Metropolis* als informationstheoretische Entsprechung Pittsburghs.²⁶ Vom Einsatz computergestützter Technologien erhofften sich diese Akteure gleichermaßen neue Lösungsansätze für jene sprichwörtlichen „Krise der (amerikanischen) Großstadt“, deren Tod und mögliche Auferstehung seinerzeit heiß diskutiert wurde.²⁷ Im Mittelpunkt stand dabei ein grundlegender Wechsel der Blickrichtung: Weg von der Frage, was eine Stadt *sei*, und hin zu der Frage, wie sie *funktioniere*.

Die neue Perspektive der Stadtplanung war inspiriert von computergestützten Verkehrsmodellen, die in den USA bereits in den 1950er Jahren für die Planung von Highways eingesetzt worden waren. Lowry begann sein kybernetisches Forschungsprojekt Mitte der 1960er Jahre im Rahmen ökonomischer Studien der Pittsburgh Regional Planning Association. Anschließend setzte er es innerhalb der RAND Urban Transportation Study fort. Im Mittelpunkt stand ein Computermodell der räumlichen Organisation menschlicher Aktivitäten innerhalb eines Großstadtgebiets und in Abhängigkeit von den Gegebenheiten dieses Areals.²⁸ Um dem Ziel nachvollziehbarer öffentlicher Planungen näherzukommen, gelte es, so Lowry, neue Technologien einzusetzen, die es ermöglichten, auf umfassend quantifizierter Basis mit den komplexen Wechselwirkungen von „land uses, traffic flows, population characteristics, economic activities, tax revenues, and demands for public services“²⁹ umzugehen.

Das *Model of Metropolis* übersetzte solche Wechselwirkungen in eine Reihe interdependenter mathematischer Gleichungen. Im Kern beschrieben diese Gleichungen verschiedene Austausch- und Begrenzungsrelationen zwischen drei grundlegenden

24 Jay W. Forrester: *Industrial Dynamics*. Cambridge, Mass. 1961; Forrester: *Urban Dynamics*; Jay W. Forrester: *World Dynamics*. Cambridge, Mass. 1971; Meier: *Urban Growth*; Richard L. Meier und Richard D. Duke: *Gaming simulation for urban planning*. In: *Journal of the American Institute of Planners* 32 (1966), S. 3–17; Tri-County Regional Planning Commission: *M.E.T.R.O. A Gaming Simulation. Report on Phase 1*. Lansing 1966; Cyril C. Herrman: *Systems Approach to city planning*. San Francisco applies management techniques to urban redevelopment. In: *Harvard Business Review*. Sept./Okt. 1966, S. 71–80; Briton Harris (Hg.): *Urban Development Models. New Tools for Planning*. Special Edition of the *Journal of the American Institute of Planners* 31 (1965), H. 2.

25 Vgl. Thomas Brandstätter, Claus Pias und Sebastian Vehlken: *Think Tanks. Die Beratung der Gesellschaft*. Berlin 2010.

26 Lowry: *Metropolis*.

27 Jane Jacobs: *The Death and Life of the Great American City*. New York 1961.

28 Lowry: *Metropolis*, S. 2.

29 Lowry: *Metropolis*, S. 1.

Kategorien oder „superscripts“, unter denen vorhandene Siedlungsressourcen im Planungsmodell möglichst optimal aufzuteilen waren: Erstens definierten sie einen „basic sector“, der industrielle, geschäftliche und administrative Einrichtungen umfasste, deren Kunden in der Regel nicht vor Ort lebten. Solche Einrichtungen waren recht flexibel in der Wahl eines Ansiedlungsortes. Hinzu kam zweitens ein „retail sector“ mit Einrichtungen, die sich an eine lokale Kundschaft wandten und daher enger mit deren Siedlungsstruktur gekoppelt waren. Und drittens gab es den „household sector“, mit dem die Wohnbevölkerung klassifiziert wurde. Diese „superscripts“ wurden dann von sogenannten Standardelementen näher ausdifferenziert: „area of land use, employment, population, index of trips, constraints.“³⁰ Die Wechselbeziehungen der verschiedenen Systembereiche fasste Lowry in einem kybernetischen Flussdiagramm der „information flows“ des Pittsburgh-Modells gleich zu Beginn seiner Publikation überblickshaft zusammen (siehe Abb. 1).

Mithilfe des daraus erstellten und um einige „subscripts“ ergänzten Gleichungssystems (diese differenzierten die Hauptbereiche weiter aus) sollte nun einerseits die Evaluation von Wirkungen öffentlicher Maßnahmen vereinfacht werden. Um nur ein Beispiel zu nennen: Es ermöglichte die quantitative Verknüpfung des „land use“ eines Betriebs aus dem „basic sector“ mit den daraus entstehenden „employment opportunities“ für den „household sector“, was wiederum auf den „index of trips“ rückwirkte und ggf. neue Ansiedlungen aus dem „retail sector“ evozierte. Andererseits sollten aber auch Ausblicke auf die zukünftige Stadtentwicklung ermöglicht werden, die mittel- und langfristig aus aktuell sichtbaren oder antizipierten Veränderungen resultieren würde. Kurz gesagt: Es ging um „quasi-predictions of the emerging spatial structure of Pittsburgh.“³¹ Computermodelle, so die Hoffnung und der Anspruch, offerierten im Gegensatz zu hergebrachten Planungsverfahren nun die Fähigkeit, viele Variablen simultan zu behandeln – „to provide forecasts of need, normative solutions to problems, or test alternative policies which take into account a greater range of relationships, ramifications, and feed-backs.“³²

Recht offen gesteht Lowry dabei die Beschränktheit seines Modells ein, das bestenfalls als ein „fumbling attempt“ und „half-way house on the road to a general model of urban form“ zu bezeichnen sei.³³ Aus Gründen der Handhabbarkeit hatte sich Lowry für ein „gravity model“ entschieden. Diese Modellierungsart sucht nach empirischen Gesetzmäßigkeiten in aggregiertem menschlichen Sozial- und Interaktionsverhalten. Im Sinne einer „Sozialen Physik“ sollen somit übergreifende Gesetzmäßigkeiten aus großen Samples deduziert werden. Damit gehen jedoch zum einen

³⁰ Lowry: Metropolis, S. 9.

³¹ Lowry: Metropolis, S. V.

³² Lowry: Metropolis, S. 1, 3.

³³ Lowry: Metropolis, S. 133, 8.

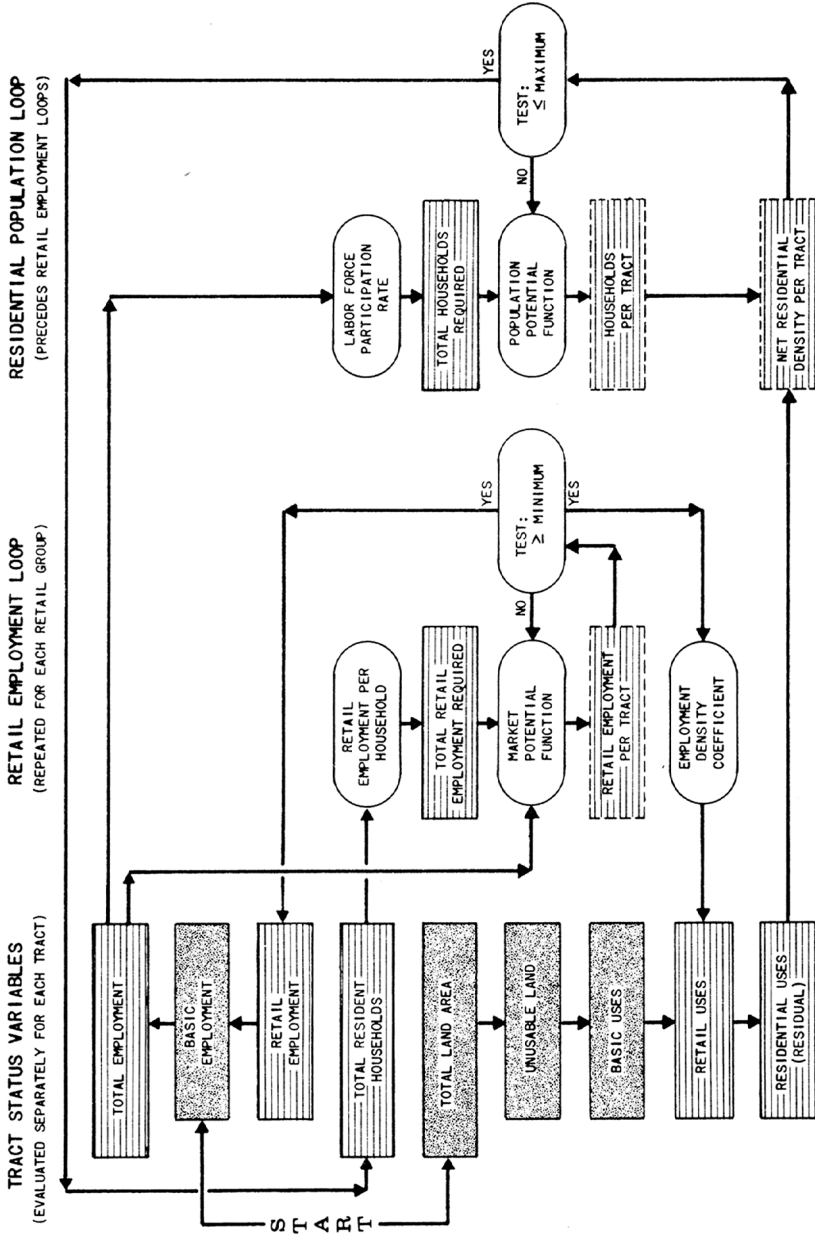


Abb. 1: Ira S. Lowry: Informationsflüsse im Pittsburgh-Modell, 1964.

vielfältige Vorannahmen bezüglich der Zusammensetzung und Interaktionsschwerpunkte dieser Aggregationen in die Modelle ein, deren Realitätsgehalt zumindest fraglich ist. Und dies führt andererseits dazu, dass grundlegende Veränderungen im Rahmen eines solchen Computerprogramms womöglich gar nicht generiert werden könnten, da deren vielfältigen Kräfteverhältnisse sich weder im Hinblick auf die Aktualität der Daten noch im Hinblick auf eine institutionelle Zuordnung genügend spezifizieren ließen.³⁴

Doch für die aufwendige Evaluierung individueller standortbestimmter Daten fehlten Gelder, während aggregierte Daten aus einer bestehenden Studie – der Pittsburgh Area Transportation Study (PATs) – übernommen werden konnten. Und ein „gravity model“ mit einem System feststehender Gleichungen war, so Lowry, auch sehr viel einfacher zu programmieren und zu implementieren.³⁵

Als Resultat orientierte sich die geografische Ausdehnung des Modells exakt an jener der Pittsburgher Studie. Bei Computersimulationen handelt es sich eben stets um experimentelle Epistemologien in zweifacher Hinsicht: einerseits in Bezug auf die Generierung alternativer Szenarien und Zukünfte, andererseits jedoch auch um ein tentatives Explorieren des eigenen Funktionierens:

The process of fitting the model involved a great deal of trial and error. Between the first experimental run and the version presented here, there were five major revisions, each involving alterations in computational routines, changes in structural parameters, and different treatments of input data.³⁶

Das vordringliche Ergebnis des Einsatzes computerisierter Modelle bestand nach Lowry somit in der Notwendigkeit, sich präzise über seine Fragen, Annahmen und die Zusammenhänge im zu modellierenden System klar zu werden, eben um sie mathematisch formulieren zu können. Computermodelle seien daher ein großartiges Medium, um das eigene Fragen zu befragen, und sie erweiterten herkömmliche statistische Methoden um die Fähigkeit, systemweite und rekursive Auswirkungen nachzuvollziehen – auch wenn ihre Validität stets uneindeutig bliebe.³⁷

The wish to experiment clearly bespeaks incomplete knowledge of the real-world environment; so we cannot know for sure which abstractions are safe and which are not. The first

34 Lowry: *Metropolis*, S. 23. Lowry diskutiert jedoch ausgiebig diese epistemologischen Nachteile des „gravity models“ gegenüber den individuenbasierten „market models“ der mikroökonomischen Standorttheorie, die individuelle Verhaltensweisen aggregieren – eine Bottom-up-Strategie, wie sie später mit agentenbasierten Computersimulationen in technische Reichweite gelangen wird.

35 Lowry: *Metropolis*, S. 23, 87.

36 Lowry: *Metropolis*, S. 55.

37 Lowry: *Metropolis*, S. 133 f.

principle of model-building is internal coherence; beyond that, the choice of abstractions is guided in part by the experience of others who have worked in the field, in part by ‚hunch‘ (primitive theory), and in part by a sense of analytical style (say, preference for mathematical elegance, or massive generalization, or intricate mechanism). The strategy of model-building is thus less science than art.³⁸

Dennoch diskutiert Lowry ausgiebig einige Szenarien seiner Testläufe des *Model of Metropolis* bezüglich zu erwartender Transformationen in der Siedlungsstruktur und validiert diese mittels einer Art „Retrofitting“-Prozedur, welche – ganz ähnlich wie bei heute gängigen Klimamodellen – darin besteht, auf Basis vergleichbarer Ausgangsdaten vergangene (und damit im Ergebnis überprüfbare) Entwicklungen nachzumodellieren.

Mit einem sichtlich breiteren Spektrum und größerem Selbstbewusstsein bezüglich der allgemeinen Gültigkeit seiner Modellierungstechniken widmet sich Jay Forrester in seinem Buch *Urban Dynamics* der kybernetischen Regelung des Systems Stadt. John F. Collins, vormaliger Bostoner Bürgermeister und anschließend Gastprofessor am MIT, hatte Forrester für die Übertragung seines *Industrial Dynamics*-Modells auf das Krisenthema Stadt sensibilisiert. Und dieser trat offensiv dafür ein, eine Technologie in die Stadtplanung einzuführen, die in der Lage sei, die tieferen Ursachen und nicht zuvorderst Symptome im Zusammenhang mit urbanen Lebenszyklen (und urbanem Verfall) identifizieren und modellieren zu können.³⁹

Ganz ähnlich wie bei Lowry finden wir auch in Forresters Modell eine Aufschlüsselung urbaner Dynamiken mithilfe von drei Gegenstandsbereichen, denen hier jeweils drei Entwicklungslevel zugeordnet werden und die auf vielfache Weise miteinander in Austausch stehen – daher auch die Bezeichnung des Modells als „theory of urban interaction“:⁴⁰ Erstens wird die wirtschaftliche Produktionstätigkeit zugrunde gelegt, die sich in „new enterprises“, „matured business“ und „declining industries“ ausdifferenziert. Hinzu kommt der Wohnungsbestand, der sich in „premium housing“, „worker housing“ und „underemployed housing“ aufteilt. Und schließlich gibt es drei Einkommensklassen, die unterschieden werden – „managerial-professional“, „labor“ und „underemployed“. Ganz ähnlich wie der Stadtplaner und Ökonom William Alonso in seinem Klassiker *Location and Land Use*⁴¹ beschreibt auch Forresters Modell die Herausbildung von Siedlungsstrukturen unter anderem als einen Wettbewerb bei der Wahl des Standorts sowie beim Abwägen des Wohnorts gegen die Erreichbarkeit des Arbeitsplatzes im Rahmen jeweiliger

³⁸ Lowry: *Metropolis*, S. 20.

³⁹ Vgl. Forrester: *Urban Dynamics*, S. 2.

⁴⁰ Forrester: *Urban Dynamics*, S. 133.

⁴¹ Vgl. William Alonso: *Location and Land Use. Toward a General Theory of Land Rent*. Cambridge, Mass. 1964.

Haushaltsbudgets. Die Auffächerung der möglichen systemischen Prozesse wird dabei ebenfalls in Form eines Flussdiagramms (siehe Abb. 2) illustriert, das sowohl die unterschiedlichen Untersuchungsebenen und -faktoren (als Rechtecke) und eine Reihe verschiedener Änderungsraten oder „Stellschrauben“ (respektive „Ventile“, wie sie sich im Flowchart in schematischer Darstellung finden) enthält.

Das Stadtmodell untersucht also typische und mögliche alternative Austauschbewegungen (oder Fluss-Bewegungen) zwischen diesen Kategorien über einen definierten Zeitverlauf hinweg und berechnet daraus veränderliche Verteilungen von Raumressourcen innerhalb eines gegebenen Areals. Was dabei herauskommen soll, ist eine Sicht auf langjährige Entwicklungsprozesse im „Lebenslauf“ einer Stadt, der Hinweise auf das Ausmaß und die Art von nötigen Erneuerungsprozessen an spezifischen singulären, periodischen oder kontinuierlichen Stellen in dessen Zeitverlauf gibt. So diskutieren einige Kurven in den für *Urban Dynamics* berechneten Szenarien das nötige Ausmaß der Rate von „slum-housing demolition“, um sukzessive Platz für erneuernde Ansiedlungen, etwa von „new enterprises“ oder „worker housing“ zu schaffen, um das Gesamtsystem auf ein dauerhaftes dynamisches Äquilibrium einzustellen (siehe Abb. 3).⁴²

Und genau diese systemische Entwicklung soll durch kybernetische Regelkreismodelle in Bezug auf aktuelle und zukünftige Interventionen explorierbar und experimentierbar gemacht werden:

An important discussion of ‚the role of intelligence systems in urban-systems planning‘ is conducted by Webber (1965) who shows that theory building and data selection are interrelated. An ‚urban intelligence center‘, under public management but accessible to all, would include simulators of the ‚what-would-happen-if‘ kind as well as instant ‚state-of-the-city‘ reporting facilities. Some might use it along cybernetic lines as a control device; information is never value-free, and can be used positively as *an agent of change within a political milieu*.⁴³

Der Soll-Zustand sollte damit operabel werden als ein Ziel, das selbst gesetzt werden und im gleichen Schritt durch Computersimulationen eingeholt werden konnte.

Jedoch stellten sich die Modelle dieser oft mit dem Oberbegriff der *Systems Dynamics* bezeichneten Simulationen als ähnlich limitiert heraus wie die sozialstatistischen Vorgänger,⁴⁴ deren bürokratische Apparate und allzu langsamen Re-

⁴² Forrester: *Urban Dynamics*, S. 129.

⁴³ McLoughlin und Webster: *Cybernetic*, S. 397, mit Verweis auf Melvin M. Webber: *The roles of intelligence systems in urban-systems planning*. In: *Journal of the American Institute of Planners* 31 (1965), H. 4, S. 289–296.

⁴⁴ Vgl. Ian Hacking: *The Taming of Chance*. Cambridge 1990; Ian Hacking: *The Emergence of Probability. A Philosophical Study of Early Ideas about Probability, Induction and Statistical Inference*. Cambridge 2006; Alain Desrosières: *Die Politik der großen Zahlen. Eine Geschichte der statistischen Denkweise*. Berlin 2005.

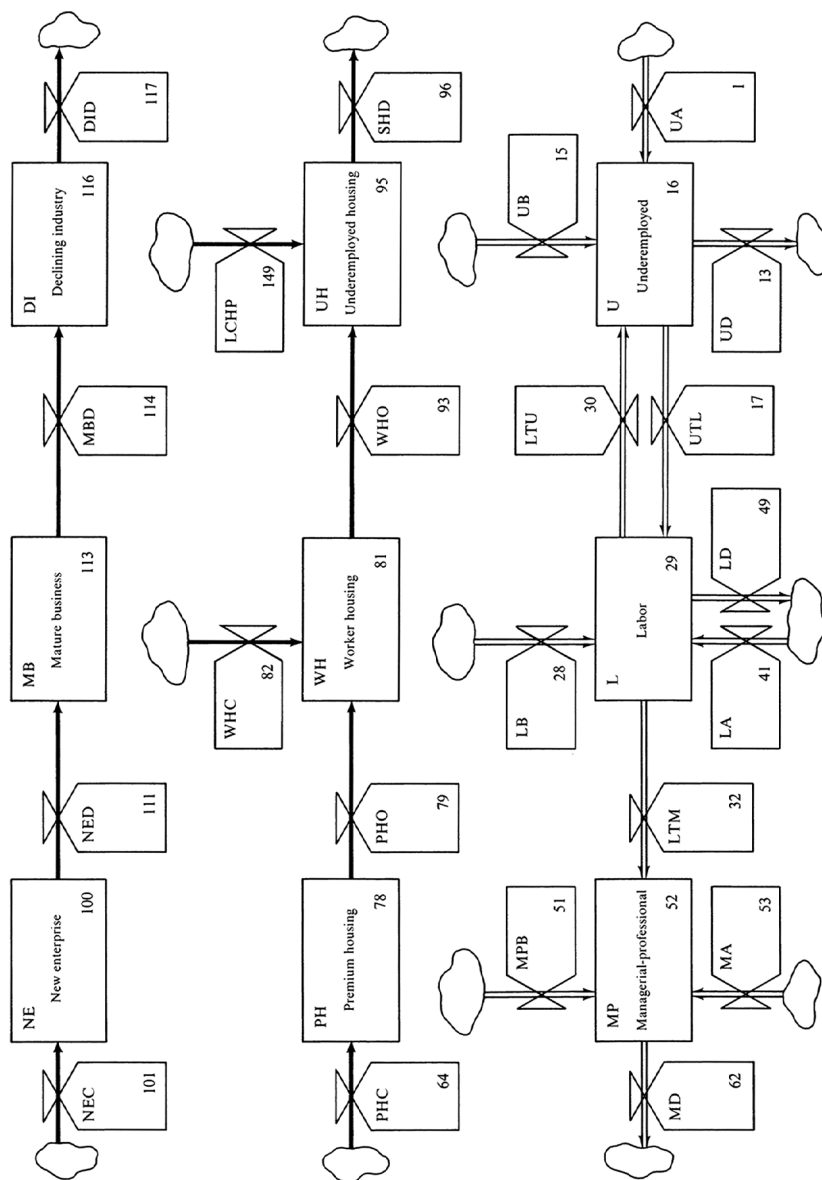


Abb. 2: Jay W. Forrester: Flussdiagramm des Urban Dynamics-Modells, 1969.

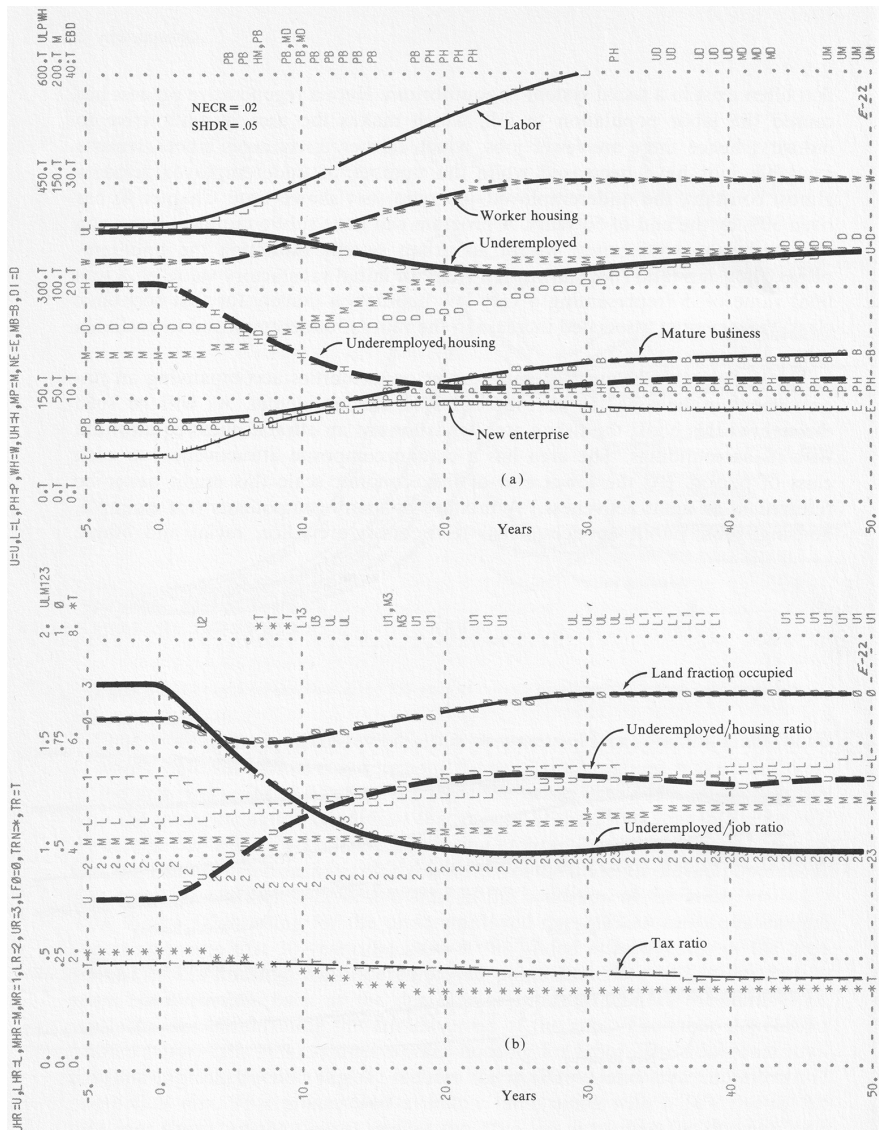


Abb. 3: Jay W. Forrester: Szenario für die Interdependenzen von Lebensbedingungen („upward economic movement“) und bestimmten städtebaulicher Maßnahmen („slum-housing demolition“ und „new enterprise construction“), 1969.

aktionsweisen sie abzulösen versprochen hatten. Der Vielzahl von Operatoren und Rückkopplungsschleifen zum Trotz, wie sie die Diagramme und Flowcharts von *Urban Dynamics* durchziehen, führten die Modelle zu ähnlichen Übersimplifikationen, Abstraktionen und Verzerrungseffekten, welche sie eigentlich zu beheben angetreten waren. Ursächlich beteiligt an dieser Unzulänglichkeit waren nur wenige verwertbare Daten, welche in die in Abb. 4 ausschnittshaft am Beispiel des Faktors „neuzugezogene Arbeitssuchende“ dargestellten Operatorketten einfließen – teils mit verhängnisvollen Folgen: Im Jahre 1974 verschuldete zum Beispiel erst ein zuvor auf Basis von Modellrechnungen der RAND Corporation systematisch ausgedünntes Netz an Feuerwehrestationen die katastrophalen Ausmaße einer Reihe von Großfeuern in der Bronx.⁴⁵

Die Reduktion auf eine begrenzte Anzahl quantifizierbarer Parameter konnte dabei kaum jenem von Brown formulierten klaren Imperativ genügen, den dieser in *City cybernetics* notierte:

In any event, the superstructure of our urban model must be behavioral – reproduction, migration, prejudices, aspirations – for these patterns are the essential fabric of urban growth or decay and must be structured in the model. We must have built into the psyche of the urban analyst the professional expertise of the behaviorist, the planner, the engineer and the real estate developer.⁴⁶

Zwar waren Fortschritte im Hinblick auf die bereits bei Lowry erwähnten epistemologischen Einschränkungen der applizierten „gravity models“ zu verzeichnen: Um realistischere Repräsentationen von Realwelt-Zusammenhängen zu erzielen, wurden die Modelle immer stärker disaggregiert, beispielsweise mittels kleinteiligerer Klassifizierungen von Haushalten, ökonomischen Aktivitäten sowie Transport- und Geldströmen oder mithilfe von Aufsplittungen in Partial- und Allgemeinmodelle: Erstere sollten bestimmte Teilsysteme wie den Verkehr oder den Wohnungsmarkt darstellen, zweitere die Verbindungen von Teilsystemen durch die Beobachtung übergreifender Variablen.⁴⁷

Doch allzu oft wirkten die resultierenden Ergebnisse lediglich wie eine Fortsetzung jener rationalistischen Planungsverfahren, die als Nemesis eines attraktiven urbanen Lebens kritisiert wurden.⁴⁸ Dies bedeutete jedoch keinesfalls, dass kybernetische Vorhersagesysteme für zukünftiges Verhalten keine nachhaltige Wirkung

⁴⁵ Vgl. Monchaux: *Local Code*, S. 134.

⁴⁶ Brown: *City*, S. 411–412.

⁴⁷ McLoughlin und Webster: *Cybernetic*, S. 388.

⁴⁸ Vgl. Jacobs: *Death and Life*. Eine zentrale Reibungsfigur war hier u. a. der sogenannte „master-builder“ Robert Moses. Vgl. Hilary Ballon: *Robert Moses and the Modern City. The Transformation of New York*. New York 2007.

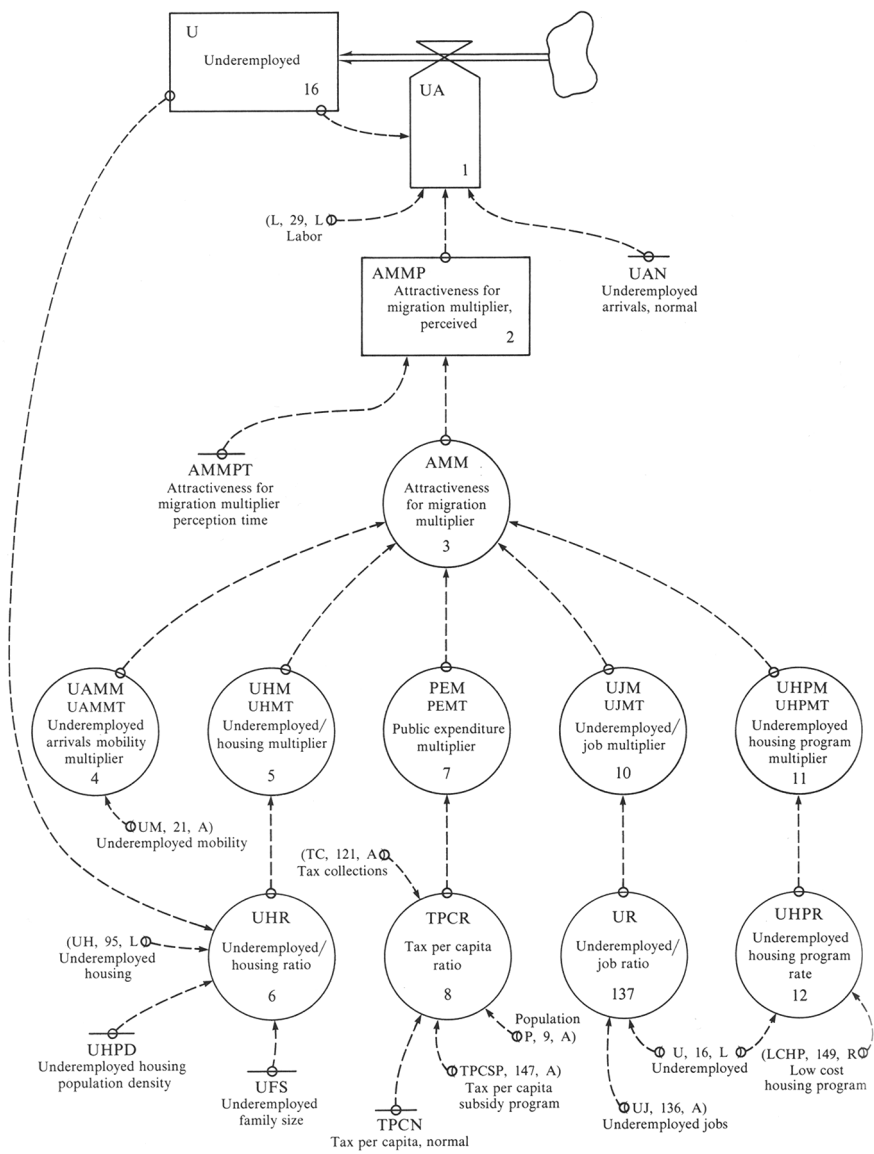


Abb. 4: Jay W. Forrester: Operatoren im Zusammenhang mit der Rate neuzugezogener arbeitssuchender Stadtbewohner, 1969.

entfaltet hätten. Spätestens die Grenzkurven industriellen Wachstums der Studie *Limits to Growth* ließen nicht nur ein Bewusstsein für eine veränderte epistemische Lage erkennen, sondern auch eines für neue inhaltliche Bezugsrahmen.⁴⁹ Postulate gesellschaftlicher Potenziale und Fantasien technischer Machbarkeit wurden abgelöst von einer Diskussion über deren Grenzen. Kybernetische Homöostasegedanken nahmen planetarische Ausmaße an.⁵⁰ Konzepte von Städten als „urbane Metabolismen“ und ihre vielfältige Einbettung in ökologische Kontexte samt energetischem Ressourcenbedarf wurden plötzlich en vogue.⁵¹ Doch es waren vor allem unvorhergesehene Ereignisse wie die Ölkrisen der 1970er Jahre, die eine Phase der Ernüchterung in Bezug auf kybernetische „*communication and control*“-Paradigmen mit sich brachten und die zuvor verbreitete Planungseuphorie erlöschen ließen.⁵² Die stark abstrahierten und simplifizierten Modellierungen von Systems Dynamics und ähnlichen Simulationsansätzen versuchten zwar eine formale und funktionale Kopplung mit Realwelt-Phänomenen, wurden deren komplexen Verhaltensweisen jedoch nicht gerecht.

Ein Effekt war die unter anderem von Heinz von Foerster und Margaret Mead vorangetriebene Entwicklung einer Kybernetik zweiter Ordnung,⁵³ die sich von mechanistischen Ansätzen absetzte und die Autonomie und Selbstorganisationsfähigkeit von Systemen sowie die Rolle des Beobachters in deren Analyse hervorhob. In deren Kontext rückten jedoch verstärkt theoretische Überlegungen – in der Philosophie etwa der Radikale Konstruktivismus, in der Soziologie die Systemtheorie – an die Stelle konkreter technischer Anwendungen. Der Wissenschaftshistoriker Andrew Pickering nannte dies den „linguistic turn“ der Kybernetik, und Francis Heylighen notierte: „[S]ome people feel that the second-order fascination with self-reference and observers observing observers observing themselves has fostered a potentially dangerous detachment from concrete phenomena.“⁵⁴

Neue Ansätze für mathematische Modelle und Simulationen in Bezug auf Systemverhalten entstanden jedoch in anderen Zusammenhängen. 1972 fasste der Physiker Philip W. Anderson, der sich in den Bell Labs lange Zeit mit dem kybernetischen

49 Donella H. Meadows et al. (Hg.): *The Limits to Growth. A Report for the Club of Rome's Project on the Predicament of Mankind*. New York 1972; Francis Sandbach: *The rise and fall of the limits to growth debate*. In: *Social Studies of Science* 8 (1978), H. 4, S. 495–520.

50 Vgl. etwa James Lovelock und Lynn Sagan: *Atmospheric homeostasis by and for the biosphere. The Gaia hypothesis*. In: *Tellus. Series A. Dynamic Meteorology and Oceanography* 26 (1974), H. 1, S. 2–10.

51 Abel Wolman: *The metabolism of cities*. In: *Scientific American* 213 (1965), H. 3, S. 179–190.

52 Seefried: *Zukünfte*, S. 411.

53 Heinz von Foerster: *Cybernetics of Cybernetics*. Urbana 1974.

54 Francis Heylighen und Cliff Joslyn: *Cybernetics and second-order cybernetics*. In: *Encyclopedia of Physical Science and Technology*. Bd. 4. San Diego 2003, S. 155–169.

Systemverhaltensdenken beschäftigte, dessen epistemologischen Fallstricke prägnant zusammen, ohne sich in Metadiskursen zu verlieren. Sein in *Science* publizierter Text *More is different*⁵⁵ stellt die Wirkungen und die Irreduzibilität nicht-linearer Prozesse im Verhalten von multivariablen Systemen in den Mittelpunkt: „The ability to reduce everything to simple fundamental laws does not imply the ability to start from those laws and reconstruct the universe“.⁵⁶ Komplexe Systeme zeichneten sich durch die Produktion von emergenten Eigenschaften aus, die eben nicht aus den Eigenschaften der Ausgangskonfiguration des Systems abgeleitet werden könnten. Diese zeitigten sich – ganz im Wortsinn – erst in dessen prozeduralen Ablauf durch die vielfältigen Interaktionen einzelner Systembestandteile. Genau diesen Aspekt hatten auch McLoughlin und Webster zwei Jahre zuvor in ihrem Überblick zu kybernetischen Stadtmodellen starkgemacht: Zum einen schlossen sie damit an die bei Lowry erwähnte, aber von ihm modellierungstechnisch kaum umsetzbare Option des mikroökonomischen „market model“ an. Zum anderen trugen sie den auch beim Stadtplaner Britton Harris noch einmal unterstrichenen erkenntnispraktischen Konsequenzen Rechnung. Letzterer hatte notiert:

Since many of the decisions relevant to the growth and functioning of the metropolis are made by individuals but have mass effects, it is likely that the conditional predictions which we need will be unsuccessful or suspect if they are not based on an understanding of these individual decisions. There is thus a complementary relationship between prediction and plan evaluation, owing to the fact that both are properly based on a profound understanding of individual needs, desires and behaviour, and on their social interaction.⁵⁷

Nicht mehr die Konstruktion von (noch so komplexen) Regelschemata für die Interaktions-Flüsse innerhalb eines Stadtsystems stand damit länger zur Debatte. Vielmehr verlagerte sich das Modellierungsinteresse auf Systemverhaltensweisen, die direkt aus den disaggregierten Mikro-Verhaltensweisen der das System bildenden Individuen resultierten.⁵⁸

Damit rücken aber zugleich andere Aspekte als die für Norbert Wiener entscheidende Frage der Vorhersagbarkeit (und mathematisch-technischen Antizipation) von Systemverhalten in den Fokus. Zwar findet sich der Begriff der Vorhersagbarkeit im Erscheinungsjahr von Andersons Text noch im Titel eines bahnbrechenden Vortrags des Mathematikers Edward N. Lorenz. Doch dessen Text *Predictability: Does the flap*

55 Philip W. Anderson: *More is different*. In: *Science* 177 (1972), S. 393–396.

56 Anderson: *More is different*, S. 393.

57 Britton Harris: *Inventing the future metropolis*. Paper prepared for the Catherine Bauer Wurster Memorial Public Lecture Series (12. Mai 1966), zit. nach A. G. Wilson: *Models in urban planning*. A synoptic review of recent literature. In: *Urban Studies* 5 (1968), S. 249–276, hier S. 272.

58 McLoughlin und Webster: *Cybernetic*, S. 389.

of a butterfly's wings in Brazil set off a tornado in Texas? (1972)⁵⁹ liefert mit dem „butterfly effect“ vor allem das schnell populäre Stichwort für ein neues Primat der *fuzzy logics*⁶⁰ und der *Nicht-Vorhersagbarkeit* von dynamischem Systemverhalten im Kontext von Komplexität, Selbstorganisation und Adaptation.

Schwarm und Schleim: Strukturlogisches Systemverhalten

Im Vergleich zur „Zeit der Kybernetik“⁶¹ wandelte sich mit den Forschungen der Complexity Science die Perspektive auf das Verhalten von Systemen grundlegend. In Simulationsmodellen wie Systems Dynamics wurden die Bestandteile der zu modellierenden Gegenstandsbereiche in einer Reihe von Subsystemen zusammengefasst, welche miteinander in vielfältigen Austauschbeziehungen stehen konnten. Dies erforderte jedoch ein gewisses Maß an Vorwissen und gleichzeitig schränkte es die möglichen Interaktionen innerhalb des Systems stark ein – zwei Nachteile einer jeden Top-down-Modellierungsmethode. Und wo jedwedes System im Grunde als nachrichtentechnisches Problem behandelt wurde, fiel schlicht alles heraus, was sich nicht als solches interpretieren ließ.

In der Complexity Science kehrten sich solche Modellierungen zu Bottom-up-Verfahren um, die bei den parallelen individuellen Interaktionen kleinster Systembestandteile ansetzten, etwa zwischen Proteinen in der Molekularbiologie, zwischen Hirnzellen in der Neurologie, zwischen Aerosolen im Hurrikan, zwischen Vögeln im Schwarm bis hin zu den „millions of mutually interdependent individuals who make up a human society“⁶². In derartigen Systemen emergiert aus lokalen Interaktionen ein qualitativ neuartiges kollektives Verhalten, das sich in der spontanen Ausbildung spezifischer zeitlicher, räumlicher und funktionaler Strukturen niederschlägt. Wo die Kybernetik zuvor nach universellen Schaltschemata für Systemverhalten fahndete, begannen die Komplexitätswissenschaften nun nach den konstituierenden Eigenschaften der selbstständigen Ausbildung

59 Edward N. Lorenz: Predictability. Does the flap of a butterfly's wings in Brazil set off a tornado in Texas? Vortrag. 29. Dezember 1972. Online unter: <https://fermatlibrary.com/s/predictability-does-the-flap-of-a-butterflys-wings-in-brazil-set-off-a-tornado-in-texas> (abgerufen am 4.8.2021).

60 Lotfi A. Zadeh: Fuzzy logic, neural networks, and soft computing. In: Communications of the ACM 37 (1994), H. 3, S. 77–84.

61 Claus Pias: Zeit der Kybernetik. Eine Einstimmung. In: Cybernetics/Kybernetik. The Macy Conferences. Bd. 2: Documents/Dokumente. Hg. von Claus Pias. Berlin 2004, S. 9–41.

62 Waldrop: Complexity, S. 11.

von Mustern und Ordnungsprozessen zu suchen, welche die dynamischen – und nicht vorhersagbaren – Verhaltensweisen eines Systems ausmachten; eine Suche nach Regelhaftigkeiten, so die Überzeugung, die über rein analogische Bezüge und äußere Ähnlichkeiten hinausgingen.

Im Unterschied zur frühen Kybernetik entwickelten sich die Theorien nun nicht mehr im Dialog mit experimentierfähigen Maschinenmodellen, sondern mit Computeranwendungen wie zellulären Automaten⁶³ und neuen Programmierweisen wie etwa mittels genetischer oder evolutionärer Algorithmen.⁶⁴ Und wo die Kybernetik Regelungsmechanismen definieren wollte, die ein beständiges dynamisches Äquilibrium eines Systems garantierten, interessierte man sich nun für das genaue Gegenteil: Hinter vielen der betreffenden Forschungen stand eine konnektionistische Frage nach kritischen Umschlagpunkten oder Phasenübergängen (*phase transitions*) in der Organisation – und d. h. auf Zeit gestellt: im *Verhalten* – von Systemen.

Nicht zuletzt jedoch generierte sich die Faszinationskraft der Komplexitätswissenschaft aus der Hoffnung, einen neuen Brückenschlag zwischen den zwei Kulturen von Naturwissenschaften einerseits sowie Geistes- und Gesellschaftswissenschaften andererseits zu ermöglichen. Denn die mathematisch-computertechnische Erforschung von emergentem Systemverhalten und Selbstorganisationsphänomenen ließ sich wesentlich vielseitiger umlegen auf die Beschreibung von Realwelt-Problemen: zum Beispiel vom Klima über Erdbebenvorhersagen zu Börsendynamiken oder von Verkehrssystemen über Epidemien zu gesellschaftlichen Meinungsbildungsprozessen.⁶⁵ Solche erweiterten Applikationsmöglichkeiten können als direkte Folge computertechnischer Entwicklungen interpretiert werden. So stellen Stefan Thurner, Rudolf Hanel und Peter Klimek in ihrer *Introduction to the Theory of Complex Systems* fest:

The science of complex systems is unthinkable without computers. The analytical tools available until the 1980s were good enough to address problems based on differential equations, for systems in equilibrium, for linear (or sufficiently linearizable) systems, and for stochastic systems with weak interactions. The problems associated with evolutionary processes, non-ergodicity, out-of-equilibrium systems, self-organization, path dependence, and so on, were practically beyond scientific reach, mainly because of computational limits.⁶⁶

⁶³ Stephen Wolfram: *A New Kind of Science*. Urbana 2002; Stephen Wolfram: *Cellular Automata and Complexity*. Collected Papers. Reading 1994.

⁶⁴ Holland: *Adaptation*.

⁶⁵ Robert A. Meyers (Hg.): *Encyclopedia of Complexity and Systems Science*. New York 2009, S. V.

⁶⁶ Stefan Thurner, Rudolf Hanel und Peter Klimek: *Introduction to the Theory of Complex Systems*. Oxford/New York 2018, S. 26.

Anders als im Umfeld der Kybernetik kann man hierbei von einer *strukturellen* Kopplung zwischen den zu beschreibenden Realwelt-Phänomenen und den Modellen und Simulationen der Komplexitätswissenschaft sprechen, die auch auf das Feld der Stadtplanung durchgreift. Dies wird im Folgenden wiederum an zwei exemplarischen Ansätzen konkretisiert, die auf der Schnittstelle von Stadtplanung und Verkehrsmanagement entwickelt wurden: Einerseits handelt es sich dabei um das ab 1995 in verschiedenen Versionen erprobte agentenbasierte TRANSIMS-Modell (für Transport Simulations), andererseits um biomorphe Simulationsmodelle, die sich an die Selbstorganisationsprozesse von Schleimpilzen anlehnen, um optimale Lösungskonfigurationen für Wege- und Siedlungsprobleme zu modellieren.

Agentenbasierte Simulationen bauen auf jenem individuenbasierten Modellierungsparadigma auf, das Anfang der 1970er Jahre in der Urbanistik bereits andiskutiert worden war. Jedoch erlaubten es parallelverarbeitende computertechnische Strukturen zwei Jahrzehnte später bereits sehr viel besser, die zu simulierenden Systeme aus Einzelbestandteilen mit definierten Eigenschaften und Interaktionsweisen zu implementieren.⁶⁷ Agent-Based Modelling and Simulation (ABM) benötigt nur wenige Eingangsdaten, denn die Komplexität der Systeme beruht nicht auf dem komplizierten Aufbau ihrer Bestandteile oder Rückkopplungsschleifen zwischen Partialsystemen, sondern ergibt sich aus deren Interaktionen. Die Simulationen generierten quasi in umgekehrter Richtung erst im Zeitverlauf jene Daten, die anschließend in der „realen Welt“ gefunden, gemessen oder verifiziert werden konnten. Datenmangel stellte mithin nicht mehr das entscheidende Problem dar. Die ABM-Pioniere Robert Axtell und Joshua Epstein bezeichneten diese epistemologische Umstellung als einen Wechsel vom „building“ zum „growing“ von Systemen, deren Verhalten sich nun mittels mannigfacher „virtueller Statistiken“ evaluieren und danach empirisch rückkoppeln ließ.⁶⁸

Solche Agenten spezifizieren die Informatiker Charles Macal und Michael North als voneinander eindeutig unterscheidbare Einheiten, die zum einen ein Set an individuellen Charakteristika aufweisen („agent attributes“) und zum anderen bestimmten Regeln folgen, die ihr Verhalten und ihr Entscheidungsvermögen bestimmen („agent methods“). Agenten sind in einer Modellumwelt situiert, in der sie – gemeinsam mit anderen Agenten – auf der Basis spezifischer Kommunikationsprotokolle interagieren. Sie können zielgerichtete „Motivationen“ haben, denen sie innerhalb ihrer jeweiligen Fähigkeiten zu folgen versuchen, und sind mit einer Art „Gedächtnis“ ausgestattet, das ihnen erlaubt, ihr Verhalten an sich verändernde Verhältnisse

⁶⁷ Thurner, Hanel und Klimek: Introduction, S. 26.

⁶⁸ Joshua M. Epstein und Robert L. Axtell: Growing Artificial Societies. Social Science from the Bottom up. Cambridge, Mass. 1996.

im Simulationsmodell anzupassen und aufgrund früherer Entscheidungen zu lernen. Abhängig von der jeweiligen Situation treffen Agenten folglich autonome Entscheidungen, die nicht im Detail vorprogrammiert sind.⁶⁹

TRANSIMS war eines der aufwendigsten frühen Agentenmodelle. Sein Entwicklerteam umfasste zahlreiche Komplexitätswissenschaftler von beiden Seiten des Atlantiks, denn Verkehrsplanung war zu einem beliebten Anwendungsfeld für die Wissenschaften von Ordnung und Chaos avanciert. Neu war – und hierin ähnelte die Entwicklung jener der 1960er Jahre –, dass sich reine Verkehrssimulationen durch Programme wie TRANSIMS zu sehr viel umfassenderen Modellierungstools wandelten. Basierend auf Zensusdaten, Straßenkarten und Fahrplänen wurde zunächst die gesamte Verkehrs- und Versorgungsinfrastruktur einer Stadt einge spielt – der erste Modellierungsfall betraf die Stadt Portland, Oregon –, inklusive Strom- und Wasserversorgung, ca. 180.000 Einrichtungen (wie Schulen, Bürohäusern, Kinos und Wohnvierteln) und mit 1,6 Millionen virtuellen Einwohnern.⁷⁰ Spätere Einsatzfälle wandten sich unter anderem der Region Dallas/Fort Worth und – mit über vier Millionen Agenten um einiges höherskaliert – Chicago zu.⁷¹

Jeder dieser virtuellen Einwohner folgte – auf Basis individualisierter statistischer Daten über die Stadtbevölkerung – seinen täglichen Routinen, von der Fahrt zur Arbeit, dem Abholen der Kinder aus der Schule bis zum abendlichen Gang ins Kino. Im Computermode ll wurden mithin die Details des Alltagslebens, die in herkömmlichen Sozialstatistiken lediglich als abstrakte Aggregationen, Durchschnittswerte und Normalisierungen gefasst wurden, lebensnah entfaltet. Dies ging bis hin zu all den Betriebsstörungen, Unfällen, unvorhersehbaren Verspätungen und spontanen Entscheidungen, welche die individuellen Handlungen der Agenten mit sich bringen konnten. Und es sind gerade diese außerordentlichen Ereignisse und Handlungen, die oft Aufschluss über Dysfunktionalitäten im Verhalten eines Systems geben. Sie werden in hergebrachten statistischen Verfahren oftmals einfach glattgerechnet und treten nicht in Erscheinung.

Um diese Dynamiken nachvollziehen zu können, beinhaltete TRANSIMS die grafische Benutzeroberfläche eines *Output Visualizers*, der das Verhalten des Systems aus verschiedenen Blickwinkeln für den Computer-Experimentator beobachtbar machte: zum Beispiel eine Bird-View-Perspektive zur Darstellung kumulierter

⁶⁹ Vgl. Charles M. Macal und Michael J. North: Tutorial on agent-based modeling and simulation. Part 2. How to model with agents. In: Proceedings of the 2006 Winter Simulation Conference, S. 73–83, hier S. 74.

⁷⁰ Vgl. Claus Pias: On the epistemology of computer simulations. In: Zeitschrift für Medien- und Kulturforschung 2 (2011), H. 1, S. 29–54, hier S. 47.

⁷¹ Vgl. Sebastian Vehlken: Traffic life. Temporal dynamics and regulatory in agent-based transport simulations. In: Mobilities 15 (2020), H. 5, S. 725–739.

Fahrzeugbewegungen, oder eine On-Board-Perspektive als Mitfahrer in einem der von den Agenten bewegten Autos inmitten des Stadtverkehrs (siehe Abb. 5 und 6).

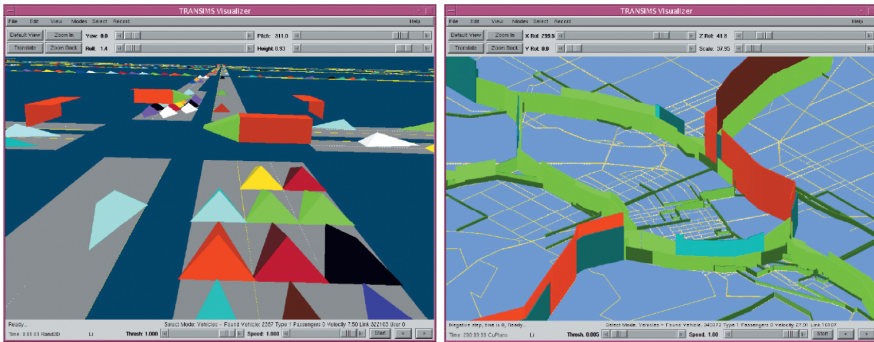


Abb. 5 und 6: Chris Barrett et al.: Screenshots des Output Visualizers von TRANSIMS mit verschiedenen Auflösungsgraden der Darstellung zwischen individualisierenden und summierenden Perspektiven, 2002.

Von unterschiedlicher Warte aus und mit differierender Detailauflösung konnte somit im laufenden Simulationsmodell dessen Entwicklung realitätsnah verfolgt und die positiven oder negativen Effekte verschiedenster Eingriffe in die Organisation der virtuellen Stadt getestet werden. Und dies wiederum konnte dann in einem Vorschlagswesen für Reorganisationsmaßnahmen der realen Städte resultieren.⁷² Auf der Grundlage dieser verwobenen zeitlichen Dynamik kann die Auswertung beispielsweise in Form von Gesamtreisezeiten, Fahrzeugkilometern oder Emissionen erfolgen. All diese Auswirkungen können auf die Demografie bestimmter Personen zurückgeführt werden, was eine Einschätzung der unterschiedlichen Auswirkungen auf verschiedene, sich möglicherweise überschneidende Teilpopulationen ermöglicht. So können Stadtplaner feststellen, welche Anwohner von Verbesserungen der lokalen Straßen profitieren und etwa kürzere Fahrzeiten genießen oder welcher Teil der Bevölkerung unter der Verschlechterung der Luftqualität leidet. Aber abgesehen von solchen unmittelbaren Ergebnissen hatte die Abschätzung des Verkehrs, so Stephen Eubank, einer der führenden TRANSIMS-Entwickler, auch allgemeinere Auswirkungen: „Human mobility is the basic data needed for understanding the characteristics of social networks. These in turn

⁷² Vgl. Pias: *Epistemology*, S. 48.

underlie estimates of mobile telecommunication demand, electric power demand, epidemiology, and many other poorly understood processes.“⁷³

Wie diese Aussage zeigt, kann TRANSIMS als eine Softwareumgebung angesehen werden, die soziale Beziehungen als logistische Probleme organisiert und so ihre intrinsischen zeitlichen Regime mit der „automatic production of space“ verbindet.⁷⁴ Gerade im Zusammenhang mit solchen Ansprüchen weisen Autoren wie David O’Sullivan und Mordechai Haklay jedoch auf einen intrinsischen Bias zu einem methodologischen Individualismus hin, der sich bei vielen ABM ausprägt. Sie schlagen einen intensiveren Austausch zwischen Modellbauern und Sozialtheoretikern vor, um zu weniger reduktionistischen und utilitaristischen Beschreibungen gesellschaftlicher Effekte zu gelangen. Dies liegt daran, dass ABM häufig eine einseitige Vorstellung von Emergenz implizieren und damit die Ansicht fördern, dass

society is nothing more than the aggregate activity of individuals. That society is also the resultant of all previous actions of individuals (living or dead), and that it shapes and constrains our actions as individuals is ignored. [...] The effects of society may also be felt in the reflexive ways in which individuals decide to act in response to their perceptions of the social structures in which they are embedded. Thus, society not only constrains human actions, it may also give rise to conscious efforts to change society itself.⁷⁵

Damit kommen ABM einer multiperspektivischen Modellierung urbaner Dynamiken zwar näher als die kybernetischen Systems-Analysis-Modelle der 1960er und 1970er Jahre. Doch auch sie stellen letzten Endes sehr grobe Abstraktionen realer komplexer Systeme wie eben Städten dar. Sie können jedoch als Medientechnologien angesehen werden, welche die Bühne unseres zeitgenössischen „smartness mandate“ bereiten: nämlich die untrennbare Verknüpfung von Selbstorganisation mit Operationen der Optimierung – mit der Behauptung, dass jede Art von Beziehung zwischen Menschen, ihren Technologien und den Umgebungen, in denen sie leben, algorithmisch verwaltet werden könne und solle.⁷⁶

Ein solches „smartness mandate“ – dies wiederum lehrt der Blick in die Mediengeschichte der Complexity Science – kann sich durchaus anhand völlig hirnloser

73 Stephen G. Eubank: *Transportation Networks. Dynamics and Simulation*, Los Alamos Unrestricted Paper LA-UR-01-4031 (1996).

74 Nigel Thrift und Shaun French: *The automatic production of space*. In: *Transactions of the Institute of British Geographers* 27 (2002), H. 3, S. 309–335.

75 David O’Sullivan und Mordechai Haklay: *Agent-based models and individualism. Is the world agent-based?* In: *Environmental Planning A* 32 (2000), S. 1409–1425, hier S. 1414, 1416.

76 Vgl. Orit Halpern, Robert Mitchell und Bernard D. Geoghegan: *The smartness mandate. Notes toward a critique*. In: *Grey Room* 68 (2017), S. 106–129, hier S. 119. Siehe auch die Sektion zu „Big Data und Verhalten“ in diesem Band.

Vorbilder generieren. Das Paradebeispiel eines in diesem Fall biochemisch verfassten Modells für selbstorganisierendes Verhalten, das eine große Faszinationskraft auf die interdisziplinären Forschungen zur Komplexität ausübte und unübersehbare Residuen auch für die Suche nach neuen Ansätzen in der Stadtplanung hinterlassen hat, ist sicherlich der Schleimpilz *Physarum polycephalum*.⁷⁷ Auf die mehr als bloß metaphorische Verbindung zwischen Städten und Schleimpilzen hatte als einer der ersten der Wirtschaftswissenschaftler Paul Krugman im Jahr 1996 hingewiesen:

It has often been observed that a city is like a living thing. In particular, like an organism it continually replaces its cells yet somehow retains its identity, a city contains an ever-changing population yet remains a well-defined unit. But what sort of organism does a city most resemble? This paper will suggest that a good answer may be that cities are not too unlike slime molds.⁷⁸

Schleimpilze vereinen zwei Existenzformen. In Umgebungen mit ausreichendem Nahrungsangebot splitten sie sich in viele kleine, individuell agierende Amöben auf, die sich zufallsgetrieben bewegen. Sobald die Nahrung jedoch knapp wird, beginnen diese Amöben chemische Signale auszusenden, die sie dazu bringen, sich zu einer zusammenhängenden Zelle zusammenzuschließen, dem sogenannten Plasmodium. Dieses gelartige Plasmodium vereint dann die Zellkerne aller vorherigen Amöben und verhält sich nun wie eine Kolonie: Es kann sich von jeder Stelle aus rhythmisch ausdehnen und zusammenziehen, etwa um kleine Ärmchen aus der Hauptmasse heraus vorzustrecken, wodurch die Flüssigkeit im Inneren herumgeschoben und so die Gesamtgestalt stetig verändert wird. Trifft ein Teil des Plasmodiums auf einen Attraktor wie Nahrung, pulsiert es schneller und weitet sich. Trifft ein anderer Teil auf etwas Abstoßendes wie Licht, pulsiert er langsamer und schrumpft.⁷⁹ Durch die Addition all dieser Effekte fließt das Plasmodium ohne bewusste Entscheidungsfindung in die bestmögliche Richtung – eine Art Schwarmintelligenz in Blob-Form.⁸⁰ Aufgrund seiner Einfachheit und Anwendungsfreundlichkeit in Laborexperimenten avancierte *Physarum* zu einer Art Modellorganismus, an dem allgemeine Eigenschaften komplexer Systeme studiert werden sollten.

⁷⁷ Vgl. Andrew Adamatzky: *Physarum Machines. Computers from Slime Mould*. Singapore 2010.

⁷⁸ Krugman: *City Formation*, S. 15.

⁷⁹ Vgl. Ed Yong: Let slime moulds do the thinking! In: *The Guardian*, 8. Sept. 2010. Online unter: www.theguardian.com/science/blog/2010/sep/08/slime-mould-physarum (abgerufen am 10.7.2021).

⁸⁰ Vgl. Sebastian Vehlken: *Zootechnologien. Eine Mediengeschichte der Schwarmforschung*. Berlin 2012, S. 241–247.

In Krugmans Modell bleibt die Bezugnahme zwischen Stadt und Schleimpilz indes recht rudimentär. Er bezieht sich lediglich auf prinzipielle Analogien zwischen *Physarums*-Agglomerationen (d. h. chemischen Reaktionen) und Stadtentwicklung:

Spatial economic models normally involve a tension between ‚centripetal‘ and ‚centrifugal‘ forces, not too different from the tension between positive and negative feedback that is central to many models of biological, chemical, and physical self-organization. And the distribution of firms and households across the landscape surley can be viewed as an ‚excitable medium‘ [...].⁸¹

Krugmans Modell macht noch einen recht abstrakten Gebrauch von den Schleimpilz-Fähigkeiten: Ihm geht es um einen prinzipiellen Nachweis des potenziellen Nutzens biochemischer Attraktor-Netzwerke für die Erforschung selbstorganisierender Systeme am Beispiel ökonomischer Raumplanungsmodelle. Sein Text beschreibt daher lediglich ein rudimentäres, eindimensionales Verteilungsmodell auf Basis bestimmter lokaler Attraktor-Konfigurationen – eine „Stadt“ in Ringform, auf deren Außenrand die Transportakte vorzustellen waren. Eine für Stadtplanungszwecke unabdingliche Erweiterung auf zwei Dimensionen legte er nur mehr als Ausblick nahe.

Doch andere Forschungen schlossen die Frage nach urbaner Infrastrukturplanung und *Physarum*-Fähigkeiten in den Folgejahren zunehmend kurz: Einerseits wurde dabei ganz konkret das biologische Material des Schleimpilzes als Modellierungsverfahren eingesetzt – mit *Physarum* als „living amorphous computer“ ließen sich mathematische Probleme wie „shortest path, implementation of storage modification machines, Voronoi diagram, Delaunay triangulation, logical computing, and process algebra“ angehen. Andererseits wurde sein Nahrungssuchverhalten wiederum in mathematische Modelle überführt und seine Selbstorganisationsprozesse zum Beispiel mittels ABM simuliert und erforscht.⁸² Seinen Durchbruch in Bezug auf Stadtplanungsfragen hatte der Schleimpilz jedoch erst mehr als ein Jahrzehnt nach Krugmans Artikel⁸³:

In 2009, scientists unleashed an amoeba-like blob on to Tokyo, and watched as it consumed everything in sight. In less than a day, the blob had spread throughout the entire city, concentrating itself along major transport routes. Fortunately for the citizens of the great Japa-

⁸¹ Krugman: City Formation, S. 15 f.

⁸² Vgl. Andrew Adamatzky und Andrew Ilachinski: Slime mold imitates the United States Highway System. In: Complex Systems 21 (2012), S. 1–20.

⁸³ Vgl. Atsushi Tero et al.: Rules for biologically inspired adaptive network design. In: Science 327 (2010), H. 5964, S. 439–442.

nese metropolis, the blob did its work on a model. Flakes of oats stood in for the major urban zones and the scientists involved were no B-movie villains. Rather, they were biologists studying the sophisticated behaviour of a slime mould.⁸⁴

Es stellte sich heraus, dass *Physarum* seine Struktur in einer Modellumwelt aus Haferflocken, die urbane Zentren simulierten, und Lichtquellen, die unbebaubares Gelände markierten, so verteilte und nach und nach ausdünnte, dass ein Verbindungsnetzwerk aus Protoplasmaröhrchen zwischen den Nahrungsquellen ausgebildet wurde. Die im Zusammenhang mit dem *Science*-Artikel Atsushi Teros veröffentlichte und hier in Abb. 7 und 8 aufgenommene Reihe von Bildern überlagert dabei die Ausbreitung des biologischen Schleimpilz-Netzwerks mit einer geografischen Umrisskarte der interessierenden urbanen Region und vergleicht die emergierende Struktur mit dem Tokioter Schienennetzwerk.

Dessen Struktur war in Bezug auf die Effizienz der räumlichen Abdeckung der Nährstoffe, die Empfindlichkeit gegenüber Umweltbedingungen und den kosteneffizienten Transport von Nährstoffen und Metaboliten im Körper des Plasmodiums nahezu optimal.⁸⁵ Und das Netzwerk ähnelte verblüffenderweise fast aufs Haar den tatsächlichen Hauptachsen des Schienensystems von Tokio.⁸⁶ Der Schleimpilz konnte somit als prototypisches selbstorganisierendes Lösungsmodell für Netzwerk-Optimierungsfragen eintreten. In Computersimulationen übertragen, ließen sich damit neue Ansätze einer Bottom-up-orientierten Generierung urbaner Infrastrukturen und Raumordnungen verwirklichen, die mit einer bewussten Delegation von *control* an das Simulationssystem und sein Verhalten einhergingen.⁸⁷ Computersimulationen wurden nun also im Gegensatz zu den in der ersten Sektion behandelten kybernetischen Planungsansätzen eher als Umgebungen angesehen, in denen auf Basis möglichst treffend modellierter Grundprinzipien von Selbstorganisation ein tatsächliches „growing“ eines aus multiplen individuellen Verhaltensweisen resultierenden Systemverhaltens beobachtbar werden sollte. Das Ziel war nicht mehr die möglichst umfassende systeminterne Beherrschbarmachung von Komplexität durch eine adäquate Organisationsstruktur. Vielmehr bestand es in der Verfügbarmachung geeigneter computertechnischer Umgebungen, die eine Entfaltung komplexer Systemprozesse ermöglichten und deren szenarische Auswahl für Lösungskonfigurationen anregten.

⁸⁴ Yong: Slime moulds, o. S.

⁸⁵ Toshiyuki Nakagaki, Hiroyasu Yamada und Agota Tóth: Path finding by tube morphogenesis in an amoeboid organism. In: *Biophysical Chemistry* 92 (2001), H. 1/2, S. 47–52.

⁸⁶ Yong: Slime moulds, o. S.

⁸⁷ Vgl. Jeff Jones: *From Pattern Formation to Material Computation. Multi-Agent Modelling of Physarum Polycephalum*. 2015 (DOI: 10.1007/978-3-319-16823-4).

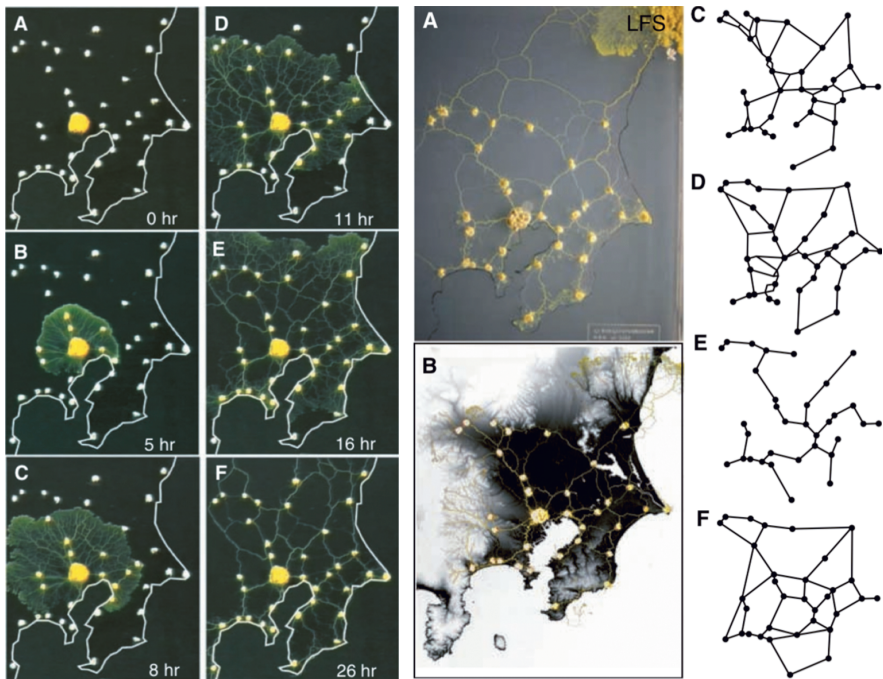


Abb. 7 und 8: Atsushi Tero et al.: Netzwerkformierung durch *Physarum polycephalum*, 2010, Copyright: *Science*.

Systemverhalten und Selbstreflexivität

Mediale Operationen, seien es die der frühen Kybernetik oder jene der Komplexitätswissenschaft, bestimmen die wissenschaftliche, kommerzielle oder politischen Aneignung des Verhaltens. Genauer gesagt, wird das Verhalten als eine Störung verstanden, die berechenbar und von einem System eingehegt wird. Dabei bezeichnet der Begriff ‚Systemverhalten‘ ein Zweifaches: Erstens passen sich die erwähnten Systeme dem Verhalten an, um Daten zu erfassen, zu extrahieren und zu analysieren, um so ein zukünftiges Verhalten zu errechnen. Zweitens ist das Systemverhalten durch den Umstand gekennzeichnet, dass in den unterschiedlichen Bereichen – Naturwissenschaften, Soziologie, Politik oder Wirtschaft – auf das Verhalten des Systems geachtet und in dieses eingegriffen wird. Es lässt sich eine historische und epistemologische Varietät beim Einsatz computertechnischer Systeme erkennen, die unter ihren jeweiligen historischen und technologischen Bedingungen ein Wissen über das Verhalten entwickeln.

Wie dieser Artikel anhand computergestützter *Urban Dynamics*-Modelle zeigen wollte, kommen über den hier gespannten historischen Bogen einige grundlegende epistemologische Aspekte von Computersimulationen zur Sprache: Allgemein lösen Computersimulationen die schon von Prigogine⁸⁸ betonte zeitliche Irreversibilität der Systemprozesse durch eine Auffächerung in mannigfache alternative Durchlauf-Szenarien auf:

Ensembles of histories can be created that help us understand the systemic properties of the systems that lead to them. Without simulations, predictive statements about systemic properties like robustness, resilience, efficiency, likelihood of collapse, and so on, would never be possible.⁸⁹

Dabei werden klassische wissenschaftstheoretische Konzepte wie Gesetz, Beweis, Wahrheit oder Genauigkeit durch solche wie Regel, Adäquatheit, Richtigkeit oder Performanz irritiert.⁹⁰ Denn welcher Grad an Genauigkeit hinreichend ist, um ein zu simulierendes System adäquat zu beschreiben, ist häufig zunächst einmal unklar und überdies nur im Vergleich von Simulationsszenarien oder von konkurrierenden Simulationsmodellen annäherungsweise zu bestimmen. Bei der Validierungsfrage von Bottom-up-Modellen im Bereich der Urbanistik kommt es dabei beispielsweise zu interessanten Überschneidungen zwischen ABM- und *Physarium*-Modellen. So notierten erst kürzlich die Geowissenschaftler Alison Heppenstall und Nick Malleon am Ende eines Artikels, der verschiedene Validierungsmethoden für ABM aufführt:

Hence simpler systems are needed to develop and test these new methods, but these systems must exhibit some complex behaviour (e.g. emergence, feedback loops, non-linear behaviour, etc.) and there must be sufficient data about them to allow their 'true' state to be observed. To this end, perhaps biological systems such as *Physarum polycephalum* – 'slime mould' – provide the ideal test bed. The rules that underpin their behaviour are reasonably well understood, they exhibit complex outcomes, they can (and have been) observed in great detail, and they can be modelled reliably using agent-based modelling. Whilst there are many methodological challenges that agent-based modelling presents, ongoing work is moving the discipline towards robustly validated models containing behavioural realism.⁹¹

⁸⁸ Vgl. Ilya Prigogine: Irreversibility and randomness. In: *Astrophysics and Space Science* 65 (1979), H. 2, S. 371–381.

⁸⁹ Thurner, Hanel und Klimek: Introduction, S. 26.

⁹⁰ Vgl. Pias: Epistemology.

⁹¹ Alison Heppenstall und Nick Malleon: Building cities from slime mould, agents and quantum field theory. In: *Proceedings of the 19th International Conference on Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*. Richland 2020, S. 3–4.

Im Zuge der notwendigerweise „internen“ Validierung von Computersimulationsmodellen treten folglich verschiedene Arten von selbstorganisierenden komplexen Systemen in Austausch miteinander und informieren sich wechselseitig.

Hinzu kommt eine partielle Autonomie von Computersimulationen in Relation zu den von ihnen simulierten Systemen, die sich im Hinblick auf ihre unabdingbare *Lauffähigkeit* ergibt. Die zumeist kollaborativ entwickelten Codes müssen nämlich erstens operativ funktionieren und beinhalten daher in der Regel Vereinfachungen gegenüber zugrunde liegenden mathematischen Modellen. Zudem müssen sie zweitens durch adäquates Software-Engineering an die verwendete Hardware, zum Beispiel bestimmte Supercomputing-Cluster, angepasst werden. Ein dritter Aspekt ihrer partiellen Autonomie sind die fehlenden materiellen Friktionen, die in klassischen Experimentalsystemen ein Gelingen oder Scheitern anzeigen und die nun durch neue Evaluationsstrategien ersetzt werden müssen. Oftmals wird daher die Relevanz von Erfahrungswissen im Umgang mit komplexen Computermodellen und ein intuitives Arbeiten bei deren evolutionärer Weiterentwicklung betont.⁹² Und viertens garantieren manchmal schlicht Tricks die Lauffähigkeit, etwa die Hinzunahme unrealistischer Parameter zugunsten eines „realistischen“ Entwicklungsverlaufs der Gesamt-Simulation.⁹³ „Forschung mit Computerexperimenten“, so Gabriele Gramelsberger, „gleicht daher eher einem permanenten Rekonfigurieren, Differenzieren und (Re-)Arrangieren als einem exakt definierten, deduktiven Frage-und-Antwort-Vorgang.“⁹⁴ Es gilt somit, auch mit dem Eigenverhalten von Simulationen umzugehen, indem sie beständig in ein rekursives Selbstverhältnis gesetzt werden.

Die Mediengeschichte des computergestützten Systemverhaltens beginnt spätestens bei der frühen Kybernetik und der probabilistischen Steuerungswissenschaft, führt weiter zur Complexity Science und ihrem typischen Prinzip der Selbstorganisation und endet sicherlich nicht bei gegenwärtigen Diskussionen über Big Data, die unter dem Oberbegriff der Smart City seit gut einem Jahrzehnt ganz prominent auch in der Urbanistik diskutiert werden. Neuere datengetriebene Ansätze behaupten von sich, aufgrund eines ubiquitären Suchens, Sammelns und Analysierens mannigfacher Daten einen besseren Zugang zu Lebensvollzügen, Verhaltensstilen und Hand-

⁹² Vgl. Gabriele Gramelsberger: Computerexperimente. Zum Wandel der Wissenschaft im Zeitalter des Computers. Bielefeld 2010, S. 148.

⁹³ Akio Arakawa: A personal perspective on the early years of general circulation modeling at UCLA. In: General Circulation Model Development. Hg. von David A. Randall. San Diego 2000, S. 1–66; Günter Küppers und Johannes Lenhard: Computersimulationen. Modellierungen 2. Ordnung. In: Journal for General Philosophy of Science 36 (2005), S. 305–329; vgl. Claus Pias: Klimasimulation. In: 2°. Der Mensch und sein Wetter. Hg. von Thomas Macho und Petra Lutz. Göttingen 2008, S. 100–107, hier S. 104.

⁹⁴ Gramelsberger: Computerexperimente, S. 157.

lungszukünften zu haben als künstliche Agentenpopulationen. Und heutige *City Dashboards* bieten sicherlich beeindruckendere grafische Interfaces als die *Output Visualizers* der 1990er Jahre. Doch ein medien- und wissenschaftsgeschichtlich informierter Blick, wie er hier exemplarisch auf die Erforschung, Beobachtung und Modellierung von Verhaltensphänomenen durch Computersimulationen in Kybernetik und Komplexitätswissenschaft angelegt wurde, stellt einem neopositivistischen Disruptions-Diskurs mancher Smart-City-Erzählungen konsequent nüchterne genealogische Beobachtungen entgegen: Etwa die Feststellung, dass in datengetriebenen Ansätze zwar prinzipiell all das zusammenläuft, *was* Akteure tun – aber im Gegensatz zu ABM kaum Aufschluss darüber besteht, *wer* sie sind. Systemverhalten bleibt damit stets eine gemeinsame Sache von Statistik, Modellierung und Simulation.

Danksagung

Ich danke Rupert Gaderer (Ruhr-Universität Bochum) für viele intensive Gespräche während seines Fellowships an der DFG-Kollegforschungsgruppe Medienkulturen der Computersimulation (MECS) in Lüneburg, die wesentlich zur Erstellung dieses Artikels beigetragen haben.

Abbildungsverzeichnis

- Abb. 1** Informationsflüsse im Pittsburgh-Modell. Aus: Ira S. Lowry: A Model of Metropolis. Rand Research Memorandum RM-4035-RC (August 1964), S. 5.
- Abb. 2** Flussdiagramm des Urban Dynamics-Modells. Aus: Jay W. Forrester: Urban Dynamics. Cambridge, Mass. 1969, S. 17.
- Abb. 3** Szenario für die Interdependenzen von Lebensbedingungen („upward economic movement“) und bestimmten städtebaulicher Maßnahmen („slum-housing demolition“ und „new enterprise construction“. Aus: Jay W. Forrester: Urban Dynamics. Cambridge, Mass. 1969, S. 6.
- Abb. 4** Operatoren im Zusammenhang mit der Rate neuzugezogener arbeitssuchender Stadtbewohner. Aus: Jay W. Forrester: Urban Dynamics. Cambridge, Mass. 1969, S. 24.
- Abb. 5 und 6** Screenshots des Output Visualizers von TRANSIMS mit verschiedenen Auflösungsgraden der Darstellung zwischen individualisierenden und summierenden Perspektiven. Aus: Chris Barrett et al.: TRANSIMS, Vol. 4:

Calibrations, Scenarios, and Tutorials. Los Alamos National Laboratory, Report LA-UR-00-1766 (März 2002), S. 90 und 92.

Abb. 7 und 8 Netzwerkformierung durch *Physarum polycephalum*. Aus: Atsushi Tero et al.: Rules for biologically inspired adaptive network design. *Science* 327 (2010), H. 5964, S. 439–442, hier S. 440, Copyright: *Science*.