



KOMPLEXITÄT ERKLÄRT

#KomplexitätErklärt

#ComplexityExplained

Inhaltsverzeichnis

1	Wechselwirkungen	4
2	Emergenz	6
3	Dynamik	8
4	Selbstorganisation	10
5	Adaptation	12
6	Interdisziplinarität	14
7	Methoden	16



KOMPLEXITÄT ERKLÄRT



*"In keinem Kohlenstoffatom ist Liebe,
in keinem Wassermolekül ein Wirbelsturm,
in keiner Dollarnote eine Finanzkrise.
-- Peter Dodds*

Komplexität, die Wissenschaft komplexer Systeme, untersucht, wie sich eine große Anzahl verschiedener Komponenten, die auf kleinen Skalen miteinander wechselwirken, sich spontan selbst organisieren und auf größeren Skalen komplexe Strukturen und nicht-triviales Verhalten zeigen, oftmals ohne dass externe oder zentralisierte Steuerungsmechanismen notwendig sind. Die Eigenschaften des Ganzen können nicht durch die vollständige Kenntnis der einzelnen Elemente verstanden oder vorhergesagt werden. Für das Verständnis solcher komplexen Systeme sind neue mathematische Konzepte und wissenschaftliche Methoden notwendig.

Hier sind ein paar Dinge die man über komplexe System wissen sollte.



WECHSELWIRKUNGEN

KOMPLEXE SYSTEME BESTEHEN AUS VIELEN KOMPONENTEN DIE UNTEREINANDER UND MIT IHRER UMGEBUNG WECHSELWIRKEN.



"Jedes biologische System ist ein System aus Systemen."
- Francois Jacob

Komplexe Systeme bestehen oft aus einzelnen Teilkomponenten, die auf verschiedene Weisen aufeinander aber auch auf ihre Umwelt Einfluss haben. Einzelne Elemente bilden ein Netzwerk aus Wechselwirkungen.

Diese Wechselwirkungen tragen wichtige Informationen. Vorhersagen bezüglich des Gesamtsystems sind durch die Betrachtung der Einzelkomponenten unmöglich. Hinzu kommt, dass die einzelnen Komponenten wiederum als Netzwerke kleinerer Subsysteme beschrieben werden können. Man betrachtet also ein System von Systemen. Ziel der Komplexitätsforschung ist es, zunächst die verschiedenen Teile eines Systems zu identifizieren und mögliche Verbindungen zu erkennen, um so das Verhalten des Gesamtsystems zu verstehen.

BEISPIELE:

- Milliarden wechselwirkender Nervenzellen im menschlichen Gehirn
- Computer, die über das Internet kommunizieren
- Facettenreichtum menschlicher Beziehungen

RELEVANTE KONZEPTE:

System, Komponente, Wechselwirkung, Netzwerk, Struktur, Heterogenität, gegenseitige Beziehung, Konnektivität, gegenseitige Abhängigkeit, Subsysteme, Grenzen, Umwelt, offene/geschlossene Systeme, System von Systemen.

REFERENZEN:

Mitchell, Melanie.

Complexity: A Guided Tour .

Oxford University Press, 2009.

Capra, Fritjof and Luisi, Pier Luigi.

The Systems View of Life: A Unifying Vision .

Cambridge University Press, 2016.



EMERGENZ

DIE EIGENSCHAFTEN KOMPLEXER SYSTEM ALS GANZES UNTERSCHIEDEN SICH, OFT UNERWARTET, VON DEN EIGENSCHAFTEN IHRER EINZELKOMPONENTEN.



*“Man benötigt nicht ‘Mehr’ um ‘Mehr’ zu bekommen. Das versteht man unter Emergenz”
- Murray Gell-Mann*

Die Eigenschaften einfacher Systeme kann man verstehen, indem man ihre Komponenten aggregiert oder einfach zusammenfügt. Die makroskopischen Eigenschaften lassen sich so aus den mikroskopischen Eigenschaften der Einzelteile ableiten. In komplexen Systemen hingegen können die Eigenschaften des Ganzen nicht allein über die Analyse der Komponenten verstanden oder vorhergesagt werden. Dieses Phänomen nennt man “Emergenz”. Diverse Mechanismen können hierfür verantwortlich sein. Das Zusammenspiel der Einzelkomponenten generiert neuartige Informationen, das System zeigt kollektives Verhalten oder komplexe Strukturen auf größeren Skalen. Diese Beobachtung wird oft in dem populären Satz “Das Ganze ist mehr als die Summe seiner Teile” auf den Punkt gebracht.

BEISPIELE:

- Gigantische Mengen an Luft und Wassermolekülen verbinden sich zu einem Tornado
- Viele Milliarden Zellen bilden einen lebenden Organismus
- Milliarden von Neuronen produzieren Bewusstsein und Intelligenz

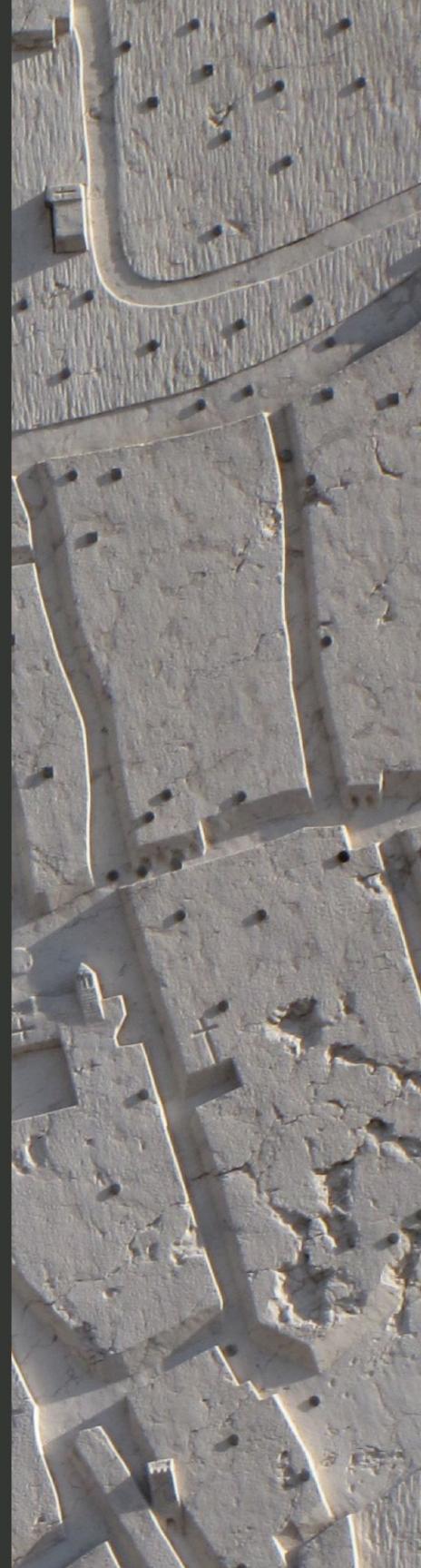
RELEVANTE KONZEPTE:

Emergenz, Skalen, Nicht-Linearität, Bottom-Up, Beschreibung, Unerwartetes, Indirekte Effekte, Kontraintuitives Verhalten, Phasenübergänge, Nicht-Reduzierbarkeit, Versagen traditioneller linearer/statistischer Denkweise, "Das Ganze ist mehr als die Summe seiner Teile".

REFERENZEN:

Bar-Yam, Yaneer.
Dynamics of Complex Systems
Addison-Wesley, 1997.

Ball, Philip.
Critical Mass: How One Thing Leads to Another
Macmillan, 2004.



DYNAMIK

KOMPLEXE SYSTEME SIND TYPISCHERWEISE DYNAMISCH UND ÄNDERN IHREN ZUSTAND MIT DER ZEIT, OFT UNVORHERSARBAR BZW. CHAOTISCH AUF LANGE SICHT.

“Chaos: Wenn die Gegenwart die Zukunft bestimmt, aber die ungefähre Gegenwart nicht annähernd die Zukunft”

- Edward Lorenz

Systeme können über ihre zeitliche Änderungen analysiert werden. Der Zustand eines Systems wird typischerweise durch einen Satz von Variablen definiert. Die zeitliche Änderungen des Systems wird durch die Änderungen der Variablen beschrieben, oftmals unter dem Einfluß der Umgebung. Ist die Zustandsänderung proportional zur Zeit bzw. zum Einfluss der Umgebung, ist ein System linear. Komplexe Systeme verhalten sich anders, sie sind nicht-linear. Ihre Änderung als Funktion ihres eigenen Zustands oder der Umgebung kann stark schwanken. Sie können stabile Zustände besitzen, zu denen sie nach einer Störung zurückkehren, oder instabile Zustände in denen schon kleine Störungen große Zustandsänderungen bewirken. In manchen Fällen, können schon kleinste Störungen ein komplett neues Verhalten bedeuten, dann spricht man von Bifurkationen, Phasenübergängen oder “Tipping Points”.

Einige Systeme sind chaotisch -- d.h. sie sind extrem empfindlich gegenüber kleinsten Störungen und sind in ihrer Dynamik praktisch unvorhersehbar, ein Phänomen das auch mit dem "Schmetterlingseffekt" bezeichnet wird. Komplexe Systeme können auch ein "Gedächtnis" haben, d.h. nicht nur ihr gegenwärtiger Zustand bestimmt den zukünftigen, sondern auch Zustände aus der Vergangenheit.

BEISPIELE:

- Wetter ändert sich auf lange Sicht unvorhersehbar
- Die Volatilität an den Börsen und Finanzmärkten

RELEVANTE KONZEPTE:

Dynamik, Verhalten, Nicht-Linearität, Chaos, Nicht-Gleichgewicht, Empfindlichkeit, Schmetterlingseffekt, Bifurkation, Unvorhersehbarkeit, Unschärfe, dynamisches Gedächtnis, Nicht-Ergodizität.

REFERENZEN:

Strogatz, Steven H.
Nonlinear Dynamics and Chaos
CRC Press, 1994.

Gleick, James.
Chaos: Making a New Science
Open Road Media, 2011.



SELBSTORGANISATION

KOMPLEXE SYSTEME KÖNNEN SICH SELBST ORGANISIEREN UND NICHT-TRIVIALE MUSTER OHNE BAUPLAN SPONTAN GENERIEREN.

*“Wir nehmen an, dass ein System aus chemischen Substanzen, Morphogenen, die miteinander reagieren und durch ein Gewebe diffundieren, ausreicht, um die wesentlichen Phänomene der Morphogenese zu erklären”
– Alan Turing*

Die Wechselwirkung zwischen den Komponenten eines komplexen Systems können globale, strukturierte Muster erzeugen. Dieses Phänomen wird dann als Selbstorganisation bezeichnet, also Struktur ohne zentralen Antrieb oder externe Steuerung. Im Gegenteil, die Steuerung eines selbstorganisierenden Systems ist über die Komponenten verteilt und wird durch ihre Interaktionen integrativ bewirkt. Selbstorganisation kann physikalische Strukturen ausbilden, z.B. Kristalle, oder funktionale Einheiten, wie z.B. die Organe komplexer Organismen, aber auch dynamische Verhaltensmuster wie das Schwarmverhalten bei Fischen/Vögeln oder die Signalübertragung in Muskelgewebe. Die Systeme gewinnen an Ordnung während des Prozesses, neue Interaktionen können entstehen und die Komplexität des Systems weiter anwachsen lassen.

In manchen Systemen führt der Prozess in einen kritischen Zustand, in dem sich Zufälligkeit und Ordnung genau die Waage halten. Muster an solchen kritischen Punkten zeigen bestimmte, interessante Eigenschaften, z.B. Selbstähnlichkeit oder Potenzgesetze in Verteilungen bestimmter Größen.

BEISPIELE:

- Aus einer einzelnen, sich teilenden Zelle entsteht ein komplexer Organismus
- Städte wachsen und organisieren sich während sie immer mehr Menschen und Geld anziehen.
- Große Schwärme von Vögeln zeigen komplexe, dynamische Schwarmphänomene

RELEVANTE KONZEPTE:

Selbstorganisation, kollektives Verhalten, Schwarm, Muster, Raum und Zeit, Ordnung aus Unordnung, Kritikalität, Selbstähnlichkeit, Selbstorganisierte Kritikalität, Potenzgesetze, breite Verteilungen, Morphogenese, dezentralisierte Steuerung, gelenkte Selbst-Organisation.

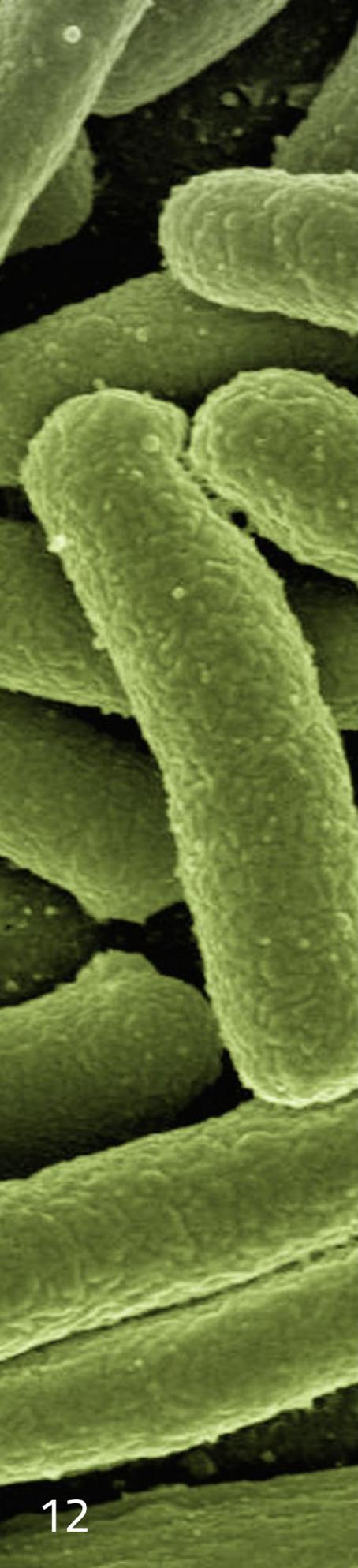
REFERENZEN:

Ball, Philip. *The Self-Made Tapestry: Pattern Formation in Nature*. Oxford University Press, 1999.

Camazine, Scott, et al. *Self-Organization in Biological Systems*. Princeton University Press, 2003.



SELBSTORGANISATION 4



ADAPTATION

KOMPLEXE SYSTEME ADAPTIEREN UND EVOLVIEREN.



*“Nichts in der Biologie macht Sinn außer im Licht der Evolution”
- Theodosius Dobzhansky*

Statt einfach nur der Entwicklung in ein Gleichgewicht zu folgen, reagieren komplexe Systeme oftmals aktiv auf ihre Umgebung. Im Unterschied zu einer Kugel, die einen Hang bis ins Tal hinunter rollt, reagieren sie eher wie ein Vogel auf wechselnde Winde und Luftströmungen. Diese Adaptation passiert auf verschiedenen Ebenen: kognitiv und durch psychologische Faktoren, sozial, also den Austausch von Informationen über soziale Beziehungen, durch evolutionäre Faktoren, also genetische Variation und natürliche Auslese. Wenn einzelne Komponenten eines Systems beschädigt werden oder ausfallen, sind komplexe Systeme oft in der Lage durch Adaptation darauf zu reagieren und sogar ihre volle Funktionalität wiederzugewinnen, oder sogar zu verbessern. Diese Robustheit gegenüber Defekten oder Störungen ist typisch. Komplexe Systeme mit diesen Eigenschaften nennt man komplexe adaptive Systeme.

BEISPIELE:

- Das Immunsystem, das fortwährend lernt auf neue Pathogene zu reagieren
- Ein Termitenstaat der Schäden an seinem Bau ausbessert
- Das Leben auf der Erde als Ganzes, das eine Vielzahl von Krisen in den Jahrmilliarden seiner Existenz überdauert hat.

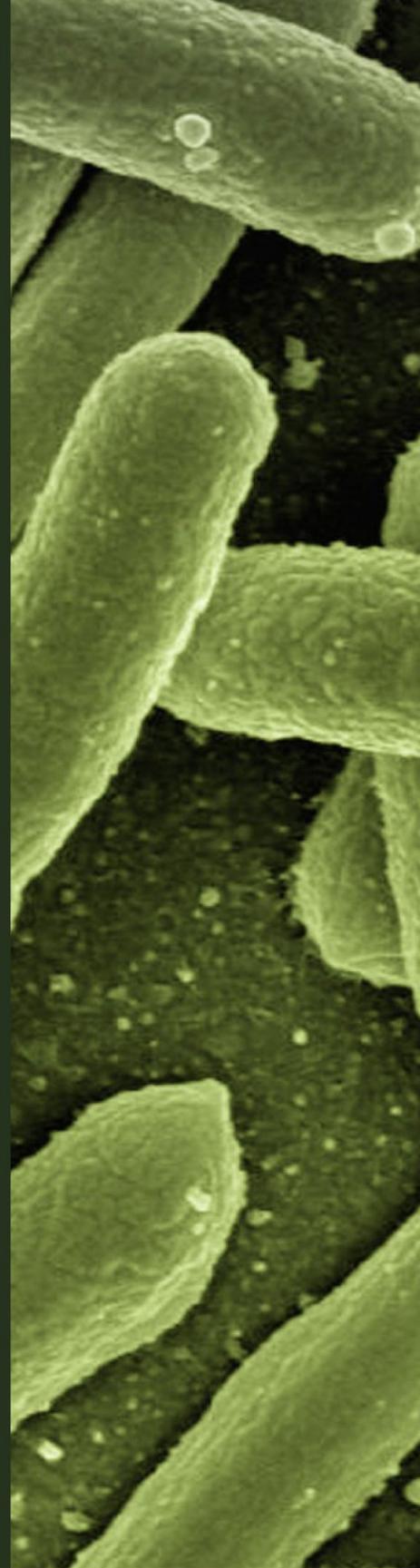
RELEVANTE KONZEPTE:

Lernen, Adaptation, Evolution, Fitnesslandschaften, Robustheit, Resilienz, Diversität, komplexe adaptive Systeme, genetische Algorithmen, künstliches Leben, künstliche Intelligenz, Schwarmintelligenz, Kreativität

REFERENZEN:

Holland, John Henry.
Adaptation in Natural and Artificial Systems.
MIT press, 1992.

Solé, Ricard y Elena, Santiago F. *Viruses as Complex Adaptive Systems.* Princeton University Press, 2018.





INTERDISZIPLINARITÄT

DIE ERKENNTNISSE IM BEREICH KOMPLEXER SYSTEME KÖNNEN IN EINEM BREITEN SPEKTRUM VON GEBIETEN ZUM VERSTÄNDNIS VON SYSTEMEN BEITRAGEN.

“Es ist nicht vergebens nach gemeinsamen Eigenschaften verschiedener, komplexer Systeme zu suchen... Konzepte wie Feedback und Information liefern Perspektiven auf ein breites Spektrum von Situationen.”

– Herbert Simon

Komplexe Systeme existieren in allen Wissenschaftszweigen und Forschungsgebieten, in der Physik, der Biologie, der Ökologie, den Sozialwissenschaften, der Ökonomie, in den Politikwissenschaften, der Psychologie, der Anthropologie, der medizinischen Forschung, den Ingenieurwissenschaften, der Informatik. Viele der neueren Technologien, von sozialen Medien und mobilen Endgeräten bis zu autonomen Fahrzeugen und Blockchain, produzieren komplexe Systeme mit emergenten Eigenschaften deren Verständnis und Vorhersage für das gesellschaftliche Gemeinwohl wichtig sind. Ein wesentliches Prinzip im Studium komplexer Systeme ist das Prinzip der Universalität, d.h. dass Systeme aus verschiedenen Bereichen oftmals gleichen Mechanismen und Regeln folgen und durch ähnliche Modelle beschrieben werden können.

Diese Konzept erfordert also einen interdisziplinären mathematischen/informatischen Ansatz. Komplexitätswissenschaft kann umfassende, holistische und transdisziplinäre Methoden und Sichtweisen liefern, die traditionelle, disziplinspezifische Methoden ergänzen.

BEISPIELE:

- Verwandte Eigenschaften informationsverarbeitender Systeme (Nervensystem, Internet, Kommunikations-Infrastruktur)
- Universelle Muster verschiedener Ausbreitungsphänomene (Epidemien, Gerüchte, Waldbrände)

RELEVANTE KONZEPTE:

Universalität, Anwendungen, Multi-/Inter-/Transdisziplinarität, Ökonomie, soziale Systeme, Ökosysteme, Nachhaltigkeit, praxisnahe Probleme, Kultur, Relevanz für praktische Problemlösungen.

REFERENZEN:

Turner, Stefan, Hanel, Rudolf and Klimek, Peter. *Introduction to the Theory of Complex Systems*. Oxford University Press, 2018.

Page, Scott E. *The Model Thinker*. Hachette UK, 2018.



METHODEN

MATHEMATISCHE UND RECHNERGESTÜTZTE METHODEN SIND WICHTIGE WERKZEUGE BEI DER ERFORSCHUNG KOMPLEXER SYSTEME



“Alle Modelle sind falsch, aber einige sind nützlich”
- George Box

Komplexe Systeme werden durch viele Variablen beschrieben und mögliche Konfigurationen können nicht mit Hilfe von Intuition oder Papier-und-Bleistift Rechnungen erforscht werden. Stattdessen werden fortgeschritten mathematische Methoden und Computer-Simulationsmodelle fast immer beim Studium komplexer Systeme eingesetzt, um deren Dynamik zu verstehen. Mit Hilfe von Computern kann man überprüfen, inwiefern die hypothetischen Gesetzmäßigkeiten tatsächlich zu den richtigen Vorhersagen führen. Man kann dann auch “Was wenn...“-Situationen explorieren, um herauszufinden wie sich ein System unter anderen Bedingungen verhält. Außerdem werden Computer verwendet, um sehr große Datensätze zu analysieren und ggf. versteckte Strukturen und Muster in Daten zu entdecken und zu visualisieren. Diese Art der explorativen Forschung mit Computern führt zu neuen Entdeckungen und vertieft unser Verständnis komplexer Systeme.

BEISPIELE:

- Agentenbasiertes Modellieren von Schwarmverhalten
- Mathematische und Computermodelle für Prozesse im menschlichen Gehirn
- Klima-Modelle
- Computermodelle zur Dynamik von Fußgängern

RELEVANTE KONZEPTE:

Modellierung, Simulationen, Datenanalyse, Methodologie, agentenbasierte Simulationen, Netzwerkanalyse, Spieltheorie, Visualisierung, Gesetzmäßigkeiten, Verständnis

REFERENZEN:

Pagels, Heinz R.

The Dreams of Reason: The Computer and the Rise of the Sciences of Complexity. Bantam Books, 1989.

Sayama, Hiroki.

Introduction to the Modeling and Analysis of Complex Systems. Open SUNY Textbooks, 2015.



*“Ich denke das 21. Jahrhundert wird
das Jahrhundert der Komplexität”
– Stephen Hawking*

Beigetragen haben:

Manlio De Domenico*, Chico Camargo, Carlos Gershenson,
Daniel Goldsmith, Sabine Jeschonnek, Lorren Kay, Stefano
Nichele, José R. Nicolás, Thomas Schmickl, Massimo Stella,
Josh Brandoff, Ángel José Martínez Salinas, Hiroki Sayama*

(*korrespondierende Autoren)

[mdedomenico\[at\]fbk.eu](mailto:mdedomenico@fbk.eu)

[sayama\[at\]binghamton.edu](mailto:sayama@binghamton.edu)

Credits::

Design und Editing: **Serafina Agnello**

✉ [serafina.agnello\[at\]gmail.com](mailto:serafina.agnello@gmail.com)

in [Serafina Agnello](#)

Für Anregungen und Feedback bedanken wir uns besonders herzlich bei:

Hayford Adjavor, Alex Arenas, Yaneer Bar-Yam, Rogelio Basurto Flores, Michele Battle-Fisher, Anton Bernatskiy, Jacob D. Biamonte, Victor Bonilla, Dirk Brockmann, Victor Buendia, Seth Bullock, Simon Carrignon, Xubin Chai, Jon Darkow, Luca Dellanna, David Rushing Dewhurst, Peter Dodds, Alan Dorin, Peter Eerens, Christos Ellinad, Diego Espinosa, Ernesto Estrada, Nelson Fernández, Len Fisher, Erin Gallagher, Riccardo Gallotti, Pier Luigi Gentili, Lasse Gerrits, Nigel Goldenfeld, Sergio Gómez, Héctor Gómez-Escobar, Alfredo González-Espinoza, Marcus Guest, J. W. Helkenberg, Stephan Herminghaus, Enrique Hernández-Zavaleta, Marco A. Javarone, Hang-Hyun Jo, Pedro Jordano, Abbas Karimi, J. Kasmire, Erin Kenzie, Tamer Khraisha, Heetae Kim, Bob Klapetzky, Brennan Klein, Karen Kommerce, Roman Koziol, Roland Kupers, Erika Legara, Carl Lipo, Oliver Lopez-Corona, Yeu Wen Mak, Vivien Marmelat, Steve McCormack, Dan Mønster, Alfredo Morales, Yamir Moreno, Ronald Nicholson, Enzo Nicosia, Sibout Nooteboom, Dragan Okanovic, Charles R Paez, Julia Poncela C., Francisco Rodrigues, Jorge P. Rodríguez, Iza Romanowska, Pier Luigi Sacco, Joaquín Sanz, Samuel Scarpino, Alice Schwarze, Nasser Sharareh, Keith Malcolm Smith, Ricard Sole, Keith Sonnenburg, Cédric Sueur, Ali Sumner, Michael Szell, Ali Tareq, Adam Timlett, Ignacio Toledo, Leo Torres, Paul van der Cingel, Ben van Lier, Jeffrey Ventrella, Alessandro Vespignani, Joe Wasserman, Kristen Weiss, Daehan Won, Phil Wood, Nicky Zachariou, Mengsen Zhang, Arshi, Brewingsense, Complexity Space Consulting, Raoul, Systems Innovation, The NoDE Lab.

Übersetzung:

Dirk Brockmann.



Serafina Agnello

Version 1.0 (13 May 2019) (English)

Translation to German: 15 November 2019.