

Komplexität

Bearbeitet von
Klaus Mainzer

Unv. ND der 1. Auflage 2008 2013. Taschenbuch. 129 S. Paperback
ISBN 978 3 8252 3012 8
Format (B x L): 12 x 18,5 cm

[Weitere Fachgebiete > Philosophie, Wissenschaftstheorie, Informationswissenschaft > Forschungsmethodik, Wissenschaftliche Ausstattung > Kybernetik, Systemtheorie](#)

Zu [Inhaltsverzeichnis](#)

schnell und portofrei erhältlich bei



Die Online-Fachbuchhandlung beck-shop.de ist spezialisiert auf Fachbücher, insbesondere Recht, Steuern und Wirtschaft. Im Sortiment finden Sie alle Medien (Bücher, Zeitschriften, CDs, eBooks, etc.) aller Verlage. Ergänzt wird das Programm durch Services wie Neuerscheinungsdienst oder Zusammenstellungen von Büchern zu Sonderpreisen. Der Shop führt mehr als 8 Millionen Produkte.

Komplexität

Klaus Mainzer



Profile

W. Fink

UTB



UTB 3012

Eine Arbeitsgemeinschaft der Verlage

Böhlau Verlag · Köln · Weimar · Wien

Verlag Barbara Budrich · Opladen · Farmington Hills

facultas.wuv · Wien

Wilhelm Fink · München

A. Francke Verlag · Tübingen und Basel

Haupt Verlag · Bern · Stuttgart · Wien

Julius Klinkhardt Verlagsbuchhandlung · Bad Heilbrunn

Lucius & Lucius Verlagsgesellschaft · Stuttgart

Mohr Siebeck · Tübingen

C. F. Müller Verlag · Heidelberg

Orell Füssli Verlag · Zürich

Verlag Recht und Wirtschaft · Frankfurt am Main

Ernst Reinhardt Verlag · München · Basel

Ferdinand Schöningh · Paderborn · München · Wien · Zürich

Eugen Ulmer Verlag · Stuttgart

UVK Verlagsgesellschaft · Konstanz

Vandenhoeck & Ruprecht · Göttingen

vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich

ZUR ERINNERUNG
AN MEINEN VATER
KARL-HEINZ MAINZER
1927-2008

Profile
UTB

Klaus Mainzer

Komplexität

Wilhelm Fink

Der Autor: Prof. Dr. Klaus Mainzer, Lehrstuhl für Philosophie und Wissenschaftstheorie und Direktor der Carl von Linde-Akademie der Technischen Universität München, Mitglied u.a. der Europäischen Akademie der Wissenschaften (Academia Europaea in London), Autor von zahlreichen Büchern zur Komplexitätsforschung mit internationalen Übersetzungen.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek.

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

© 2008 Wilhelm Fink Verlag GmbH & Co. Verlags-KG
Wilhelm Fink Verlag GmbH & Co. Verlags-KG, Jühenplatz 1–3, 33098 Paderborn
ISBN: 978-3-7705-4606-0

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt.
Jede Verwertung ausserhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Ein- speicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Printed in Germany

Satz: Ruhrstadt Medien, Castrop-Rauxel

Layout & Einbandgestaltung: Alexandra Brand auf Grundlage der UTB-Reihengestaltung von Atelier Reichert, Stuttgart

Herstellung: Ferdinand Schöningh GmbH, Paderborn

UTB-Bestellnummer: ISBN 978-3-8252-3012-8

Inhalt

Einführung

Komplexität im Profil

1	Komplexität und Berechenbarkeit	15
2	Komplexität und Wahrscheinlichkeit	23
3	Komplexität und Information	31
4	Komplexität und Dynamik	38
5	Komplexität und Evolution	52
6	Komplexität von Geist und Gehirn	65
7	Komplexität und Wirtschaft	78
8	Komplexität und Gesellschaft	90
9	Komplexität und Philosophie	108

Anhang:

Glossar	118
Personenregister	126
Sachregister	127

Einführung

Die Bedeutung des Themas im Studium

Das Thema »Komplexität« behandelt eines der aufregendsten und spektakulärsten Lehr- und Forschungsgebiete der letzten Jahre. Im Zeitalter der Globalisierung werden die Lebensbedingungen der Menschen immer komplexer und unübersichtlicher. Täglich erleben wir die labilen Gleichgewichte in Politik, Wirtschaft und Gesellschaft. Einige fürchten den Verlust gewohnter Besitzstände und den Absturz ins Chaos. Andere sehen die Chancen kreativer Innovation und den Aufbruch zu neuen Märkten. Chaos, Ordnung und Selbstorganisation entstehen nach den Gesetzen komplexer dynamischer Systeme – in der Natur und der Gesellschaft. Komplexe dynamische Systeme werden bereits erfolgreich in Technik- und Naturwissenschaft untersucht – von atomaren und molekularen Systemen in Physik und Chemie über zelluläre Organismen und ökologische Systeme der Biologie bis zu neuronalen Netzen der Gehirnforschung und den Computernetzen im Internet. Mittlerweile werden auch Anwendungen in Wirtschafts-, Finanz- und Sozialwissenschaften untersucht. Was können wir aus Chaos, der Entstehung von Ordnung und Selbstorganisation in der Natur lernen? Wo sind grundlegende Unterschiede in der Dynamik von Natur und Gesellschaft? Welche Konsequenzen lassen sich aus der Wissenschaft vom Komplexen für unser Entscheiden und Handeln ziehen?

Das Buchprojekt liegt an der Schnittstelle von Geistes-, Sozial- und Wirtschaftswissenschaften mit Technik- und Naturwissenschaften. Seine Inhalte werden daher in Vorlesungen und Seminare für Studierende der Fächer Philosophie, Psychologie, Soziologie und Wirtschaftswissenschaften ebenso berücksichtigt wie in den Naturwissenschaften, Mathematik und Informatik. Über die Anrechnungsmöglichkeiten entsprechender Veranstaltungen in den genannten Fächern hinaus besitzt dieses Thema erfahrungsgemäß hohe Attraktivität in Managementkursen, in denen der Autor seit Jahren tätig ist.

Das Thema wird in dieser Publikation mit Blick auf die Modularisierung der genannten Studiengänge im Bologna-Prozess einführend, allgemeinverständlich, anschaulich (mit Grafiken), übersichtlicher Gliederung (mit Kern- und Merksätzen) und Glossar behandelt. Jedes der folgenden Kapitel ist als für sich lesbares und bearbeitbares Themenpaket konzipiert und kann daher als eigener Ausbildungsbaustein verstan-

den werden. Der Verfasser hat dazu englische Standardwerke in mehrfachen Auflagen und Übersetzungen verfasst. Bei dem Band UTB Profil wird auf in vielen Semestern bewährtes Kursmaterial zurückgegriffen und der Adressatenkreis der Studierenden berücksichtigt.

Gliederung

Grundlegende Einsichten in die Komplexität der Welt verdanken wir fachübergreifend unterschiedlichen Disziplinen und Theorien:

- Am Anfang stehen Mathematik und Informatik mit *Komplexität und Berechenbarkeit* (*Kapitel 1*). Wir unterscheiden Berechenbarkeitsgrade der Komplexität von Problemen, Prozessen, Algorithmen und Computerprogrammen. Mathematik und Informatik liefern erste präzise Maßstäbe für Komplexität, die anschaulich erläutert werden.
- Dabei ist die Welt keineswegs determiniert, wie das 17. bis 19. Jahrhundert überwiegend glaubte. *Wahrscheinlichkeit* und *Statistik* dominieren die Natur-, Wirtschafts- und Sozialwissenschaften im 20. und 21. Jahrhundert (*Kapitel 2*).
- Mit dem Wahrscheinlichkeitsbegriff eng zusammen hängt der *Informationsbegriff* (*Kapitel 3*). Signalrauschen, Entropie, Redundanz und Kommunikation sind Kriterien einer Informationsflut, die Natur und Gesellschaft überrollt. Wie lässt sich die Zunahme von Unbestimmtheit (Informationsentropie) bestimmen? Warum wird die Welt unberechenbarer und unbestimmbarer?
- Newton beschränkte sich noch auf einfache *dynamische Systeme*, die nach Laplace vollständig berechenbar sind (*Kapitel 4*). Dazu wurde eine vereinfachte (»lineare«) Kausalität angenommen, wonach Ursachen und Wirkungen immer proportional sind. In komplexen (»nicht-linearen«) Systemen können kleinste Veränderungen von Ursachen zu globalen Veränderungen führen. Systeme werden instabil und chaotisch. Allerdings können auch Ordnungen entstehen, die nicht durch die Summe der Systemelemente erklärbar sind, sondern nur durch ihre komplexe Wechselwirkungen. Dabei lassen sich Komplexitätsgrade der Dynamik und ihrer Attraktoren vom stabilen Gleichgewicht über reguläre Schwankungen bis zum Chaos unterscheiden.

Mit den Komplexitätsgraden von Berechenbarkeit (*Kapitel 1*), Wahrscheinlichkeit (*Kapitel 2*), Information (*Kapitel 3*) und Dynamik (*Kapitel 4*) sind die Grundbegriffe gegeben, um Modelle und ihre Komplexität

von Evolution, Geist und Gehirn, Wirtschaft und Gesellschaft zu untersuchen:

- In *Kapitel 5* wird die *biologische Evolution* als komplexe Systemdynamik vorgestellt, in der die Entstehung von Leben erklärbar wird.
- Auch *Gehirne* lassen sich als komplexe dynamische Systeme auffassen, in denen sich feuernde Neuronen in Clustern verbinden (*Kapitel 6*). Instabilität und Chaos entsprechen nun neuronalen Aktivitätsmustern, die mit Kognition und Emotion, Entscheiden und Handeln korreliert sind. Neuropsychologie wächst unter dem Gesichtspunkt der Komplexität mit Kognitionspsychologie und Philosophie des Geistes zusammen.
- Eine der bemerkenswertesten Anwendungen von Komplexitätsforschung und nichtlinearer Dynamik liefern heute Modelle aus Wirtschaft und Gesellschaft. In *Kapitel 7* wird zunächst an das ökonomische Gleichgewichtsmodell von Adam Smith erinnert, das nach dem Vorbild Newtonscher Dynamik entwickelt wurde. Wie in vielen neoklassischen *Wirtschaftsmodellen* heute wird dabei rationales Handeln und Entscheiden (»*homo oeconomicus*«) bei vollständiger Information unterstellt. Dieser idealisierte (»reibungslose«) Markt ohne Informationsentropie erlaubt zwar Berechnungen, die aber wenig mit ökonomischer Realität zu tun haben. Tatsächlich ist nichtlineare Dynamik durch Instabilitäten bestimmt, die sowohl Abstürze als auch Innovationsschübe bedeuten können. Finanzmärkte erzeugen instabile Zustände, deren nichtlineare Dynamik an die Turbulenzen von Stürmen erinnern. Wie lassen sich Vorwarnungen in gefährlichen Situationen angeben?
- Auch in Politologie und Soziologie standen Gleichgewichtsmodelle am Anfang. In *Kapitel 8* wird dazu an verschiedene historische Modelle der *Staats-, Organisations- und Gesellschaftstheorie* erinnert. Tatsächlich treten auch hier Instabilität und Phasenübergänge auf. Städte- und Verkehrsplanung zeigen bemerkenswerte praktische Anwendungen komplexer Systeme, die Grundlage für Entscheidungsprozesse werden. Wahlrends und Meinungsanalysen (Demoskopie) unterliegen ebenfalls komplexer Systemdynamik. Organisationstheorie und Komplexitätsmanagement wachsen zusammen.
- Nach den Anwendungsmodellen in Informatik, Natur-, Technik-, Wirtschafts- und Sozialwissenschaften geht es im letzten *9. Kapitel* um die *Philosophie der Komplexität*. Dabei wird Wissenschaftsphilosophie als Teil des Forschungsprozesses verstanden, der sich mit den Grundlagen, Prinzipien und Methoden der Modellbildung beschäftigt. In der

Ethik geht es um Orientierung unseres Handelns und Entscheidens in einer komplexen Welt.

Zum Stand der aktuellen Debatte

Komplexitätsforschung führt unterschiedliche Denkansätze zusammen, die aus den verschiedenen Wissenschaften gewonnen werden. Einerseits sind die Wissenschaften heute hochausdifferenziert und in einer komplexen Vielfalt von Einzeldisziplinen spezialisiert. Andererseits haben es Wissenschaften selber in Natur und Gesellschaft mit hochkomplexen Systemen zu tun – von komplexen atomaren, molekularen und zellulären Systemen in der Natur bis zu komplexen sozialen und wirtschaftlichen Systemen in der Gesellschaft. Komplexitätsforschung beschäftigt sich fachübergreifend mit der Frage, wie durch die Wechselwirkung vieler Elemente eines komplexen Systems (z.B. Moleküle in Materialien, Zellen in Organismen oder Menschen in Märkten und Organisationen) Ordnungen und Strukturen entstehen können, aber auch Chaos und Zusammenbrüche. Komplexitätsforschung hat das Ziel, Chaos, Spannungen und Konflikte in komplexen Systemen zu erkennen und ihre Ursachen zu verstehen, um daraus Einsichten für neue Gestaltungspotentiale der Systeme zu gewinnen.

Dazu werden neue Grundbegriffe, Meßmethoden, Modelle und Algorithmen eingeführt. So lassen sich komplexe Ordnungen durch Ordnungsparameter charakterisieren. Ordnungen entstehen ebenso wie Chaos und Zerfall in kritischen Zuständen, die von Kontrollparametern eines Systems empfindlich abhängen oder sich selber organisieren. Diese ausgezeichneten Zustände werden häufig auch Attraktoren genannt, da die Dynamik eines Systems quasi wie in einen Wasserstrudel hineingezogen wird. Komplexe Muster von Zeitreihen und anderen Kriterien dienen dazu, im Vorfeld kritische Situationen aus Messdaten zu erkennen und rechtzeitig Vorkehrungen zu treffen. Dabei spielen Computermodelle eine entscheidende Rolle. Die Dynamik komplexer Systeme in Natur und Gesellschaft lässt sich erst seit wenigen Jahren in Simulationsmodellen analysieren, die durch die gesteigerten Rechenkapazitäten von Computern möglich wurden.

Komplexität bestimmt die Wissenschaft des 21. Jahrhunderts. Die Expansion des Universums, die Evolution des Lebens und die Globalisierung von Wirtschaft, Gesellschaft und Kulturen führen zu Phasenübergängen komplexer dynamischer Systeme. Die sich abzeichnenden

Schlüsselthemen dieses Jahrhunderts haben mit Komplexität zu tun. Globale Klimaveränderungen, Erdbeben und Tsunamis werden in Computermodellen komplexer dynamischer Systeme untersucht. Die Nanotechnologie entwickelt neue Materialien aus komplexen molekularen Strukturen. Die Gentechnologie analysiert DNS-Information, die komplexe zelluläre Organismen wachsen lässt. Die Life Sciences beschäftigen sich mit der Komplexität des Lebens. Artificial Life simuliert die komplexe Selbstorganisation des Lebens in geeigneten Computermodellen. Komplexität bestimmt auch die moderne Medizin. Heutige Krankheitsgeißeln der Menschheit wie z.B. Krebs, Herz-Kreislauf- und Gefäßkrankungen hängen von hochkomplexen Wechselwirkungen ab. Viren mutieren und schaukeln sich zu globalen Infektionen auf, die sich wie Wellen über den Erdball ausbreiten.

Was wissen wir über den Menschen als komplexen Organismus? Komplexitätsforschung kann dabei helfen, Gräben zwischen Natur-, Geistes- und Sozialwissenschaften zu überwinden. Vom Standpunkt der Naturwissenschaften haben wir es zunächst mit einem konkreten komplexen System zu tun – dem aus Milliarden von Nervenzellen bestehenden Gehirn. Dieses komplexe System zeigt uns, wie aus der Integration und den vielfältigen Wechselwirkungen seiner Elemente Ordnung und Struktur entstehen kann – der menschliche Geist mit seinen vielfältigen Fähigkeiten und Begabungen, aber auch mit seiner Gefährdung von Chaos, Desorientierung und Krankheit. Mit Erschrecken werden wir in einer immer älter werdenden Gesellschaft mit vielfältigen Formen von Demenzerkrankungen konfrontiert, die letztlich eine Auflösung menschlicher Identität zur Folge haben. Andererseits erweisen sich moderne Plagen der Gesellschaft wie Suchtkrankheiten und Drogenabhängigkeit als Programme des Gehirns. Seelische Erkrankungen in hochentwickelten Gesellschaften haben mit diesem komplexen und sensiblen Organ zu tun. Menschliche Würde und Intimität hängen empfindlich davon ab.

Kein wissenschaftliches Thema hat in den letzten Jahren das Selbstverständnis von uns Menschen stärker aufgewühlt als die Forschungsergebnisse der Neurobiologie. Dass die biologische Grundausstattung des Menschen genetisch bestimmt und in der Evolution entstanden ist – daran haben sich viele Zeitgenossen nach Darwin gewöhnt. Wie steht es aber um unsere Persönlichkeit und unseren Charakter, unser Ich und seine Individualität? Fühlen, Denken und Handeln sind, so lehrt die moderne Gehirnforschung, durch die in der Evolution entstandene komplexe Gehirndynamik erklärbar. Die Gelehrten mögen noch um die

letzten Feinheiten streiten. Die Gesellschaft hält aber bei solchen Nachrichten spürbar den Atem an: Wie steht es um menschliche Verantwortung und menschliches Gewissen, die seit Jahrhunderten das moralische Fundament unserer Gesellschaften und unserer Rechtssysteme bilden? Welche unbewussten und verborgenen Kräfte wirken in der komplexen Dynamik des menschlichen Gehirns? Wie ist Freiheit dann noch möglich?

Menschen agieren heute in komplexen Organisationen und Gesellschaften. Was wissen wir über deren Dynamik? Damit haben wir uns das komplexeste System vorgenommen, das wir derzeit überhaupt kennen – die menschliche Gesellschaft, in der alle diese komplexen Gehirne, wir Menschen also kommunizieren: Wie ist Denken, Handeln und Entscheiden in solchen komplexen Systemen möglich? Traditionell ist hier das Feld von Juristen, Ökonomen, Sozial- und Geisteswissenschaftlern. Traditionell sind Mathematikern und Physikern Systeme der Gesellschaft mit ihren ungeheuer vielen Freiheitsgraden handelnder Personen viel zu kompliziert, um sich damit zu beschäftigen. Seit einigen Jahren hat sich aber einiges getan. Ursprüngliche Methoden der Physik aus dem Forschungsgebiet nichtlinearer Dynamik und komplexer Systeme werden auf soziale und ökonomische Systeme angewendet.

Hier liegen wichtige Impulse für die Bewältigung komplexer Entscheidungsabläufe in Wirtschaft und Gesellschaft vor. Die Rede ist international von »Econophysics«. Es handelt sich um ein englisches Kunstwort aus den Disziplinennamen »economics« und »physics«. Man kann darüber streiten, wie geschickt diese Bezeichnung ist, da sie in der deutschen Wissenschaftstradition zu sehr an die alte »Soziophysik« des 19. Jahrhunderts erinnert. Die »Soziophysik« hatte sich damals unter dem Einfluss von Darwinismus und einer klassischen deterministischen Physik entwickelt. Jedenfalls versuchte sie, Soziologie und Ökonomie durch die Naturgesetze dieser Disziplinen zu erklären. Damit hat die moderne Econophysics nichts zu tun. Sie wendet vielmehr mathematische Methoden der nichtlinearen Dynamik und der komplexen Systeme an, die unabhängig von speziellen naturwissenschaftlichen Modellen sind. Anwendungsgebiet sind Daten von Finanz- und Wirtschaftsmärkten, deren Dynamik es herauszufinden gilt.

Nur so besteht eine Chance, zu Prognosen und Vorwarnsystemen für zukünftigen Ereignissen zu kommen. Dabei stellt sich zwar eine bemerkenswerte Analogie mit Wetter- und Klimamodellen heraus, die aber in anderer Hinsicht völlig verschieden sind. So sind bereits Börsendaten

Messungen von subjektiven Glaubensannahmen, Meinungen und Hoffnungen, die Wirtschaftsdynamik beeinflussen, d.h. etwas verändert sich messbar, weil wir es wünschen, glauben, hoffen oder befürchten. Dabei kommt es zu charakteristischen Rückkopplungen zwischen Handelnden, ihren Absichten und Modellen sozialer Wirklichkeit. Solche Rückkopplungen sind in der Naturwissenschaft nicht bekannt, können aber durch die nichtlineare Dynamik komplexer Systeme erfasst werden. Um die Eigentümlichkeit sozialer und wirtschaftlicher Entwicklungen zu betonen, ziehe ich die Bezeichnung »Sociodynamics« bzw. Soziodynamik vor. Traditionelle soziologische Systemtheorien, wie sie z.B. von Niklas Luhmann vorgetragen wurden, beziehen sich demgegenüber auf ältere kybernetische und neurobiologische Theorien des letzten Jahrhunderts (z.B. H.R. Maturana und F.G. Varela). Einerseits fehlt diesen Theorien häufig der Bezug zu logisch-mathematischen Methoden. Andererseits fehlt manchmal auch die empirische Bodenhaftung zu den empirischen Sozial- und Wirtschaftswissenschaften. Die Situation erinnert daher historisch an die spätmittelalterliche aristotelische Physik vor Galilei. Die älteren Systemtheorien lassen sich allerdings als Vorstufen einer fachübergreifenden Komplexitäts- und Systemforschung betrachten, die sich nun abzeichnet. Sie ist keineswegs abgeschlossen, sondern als offener Forschungsprozess zu verstehen.

Es geht jedoch nicht nur um empirische und mathematische Modellbildung. Welche Konsequenzen folgen aus diesen Einsichten in das Handeln und Entscheiden in komplexen Systemen jenseits heute möglicher mathematischer Modelle? Alle Erfahrungen zeigen uns, dass Entscheidungsverhalten in politischen und wirtschaftlichen Systemen letztlich auf einer tiefer liegenden Schicht beruht. Menschen entscheiden und handeln nämlich bewusst oder unbewusst auf der Grundlage rechtlicher, kultureller und religiöser Wertvorstellungen, die seit Jahrhunderten weltweit in unterschiedlichen Traditionen gewachsen sind und sie prägen. Wir können diese Wertvorstellungen daher als Ordnungsparameter rechtlicher, kultureller und religiöser Dynamik auffassen. Kulturelle und religiöse Symbole treten an die Stelle mathematischer Zeichen von Modellen nichtlinearer Dynamik. Es ist eine globale Herausforderung, friedliche Koexistenz und kulturelle Balance zu fördern, um den Crash der Kulturen und Religionen in ihrer komplexen nichtlinearen Dynamik zu verhindern.

Vom Standpunkt der nichtlinearen Dynamik aus betrachtet geht es um die Schaffung gemeinsamer »Ordnungsparameter«, um die globale Regierbarkeit (*global governance*) dieses Planeten zu sichern, Konflikte

zu minimieren und Komplexität zu reduzieren. Wir müssen geeignete Impulse und Signale auslösen, damit diese Integration wachsen und sich entwickeln kann. Verordnen und programmieren lässt sie sich nicht. Auch diese Einsicht vermittelt uns Komplexitätsforschung.

Komplexität im Profil

1

Komplexität und Berechenbarkeit

Wir leben in einer Welt der Digitalisierung und Informatisierung. Ohne Computer und ihre Rechenleistungen sind die technischen und ökonomischen Prozesse hoch industrialisierter Gesellschaften nicht zu bewältigen. Wie komplex dürfen Probleme und Prozesse sein, um mit Computerprogrammen erfasst zu werden? In der Informatik unterscheidet man Grade der Rechenkomplexität nach der Rechenzeit oder der Größe eines Programms. Dabei stoßen wir auf unentscheidbare Probleme und unvollständige Systeme – grundlegende Probleme der Logik und des menschlichen Denkens überhaupt.

Was ist ein Computer?

Computer begegnen uns heute nicht nur als PCs, sondern als Mikroprozessoren in allen möglichen Alltagsgeräten verteilt und verborgen. Was dabei ein Computer ist, hängt keineswegs von technischen Entwicklungsstandards ab. In Alan M. Turings berühmter Arbeit »On computable numbers with an application to the Entscheidungsproblem« (1936) wird der Begriff einer effektiven programmgesteuerten Rechenmaschine logisch-mathematisch definiert. Turings Maschinenbegriff versteht Rechnen als effektive Verarbeitung von Zeichen und Symbolen. Anstelle der historischen Turingmaschine sei hier zunächst die auf Marvin Minsky u.a. zurückgehende Registermaschine eingeführt, die anschaulich leicht mit einer PC-Architektur in Beziehung gebracht werden kann. Bei einem PC ist die technische Hardware für den Benutzer unter vielen Schichten von Bedienungssoftware verborgen. Auf der untersten Schicht besteht jeder Zentralprozessor (CPU) eines Standardcomputers aus Registern, in denen Zahlen als Spannungszustände