



MUNICH CENTER FOR TECHNOLOGY IN SOCIETY

DER TECHNISCHEN UNIVERSITÄT MÜNCHEN

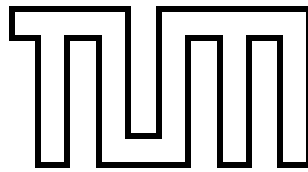
Lehrstuhl für Philosophie und Wissenschaftstheorie

**Beschreibung, Modellierung und
interdisziplinäre Analogien von Komplexität
und komplexen Systemen**

Specification, Modelling and Interdisciplinary Analogies
of Complexity and Complex Systems

Bernhard Walzl

MCTS



MUNICH CENTER FOR TECHNOLOGY IN SOCIETY

DER TECHNISCHEN UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Lehrstuhl für Philosophie und Wissenschaftstheorie
Master of Arts Wissenschafts- und Technikphilosophie

Beschreibung, Modellierung und interdisziplinäre
Analogien von Komplexität und komplexen Systemen

Specification, Modelling and Interdisciplinary Analogies
of Complexity and Complex Systems

Autor: Bernhard Walzl
Themensteller: Prof. Dr. Klaus Mainzer
Datum: December 20, 2013

MCTS

Hiermit erkläre ich, dass die vorliegende Arbeit von mir selbstständig verfasst wurde, und dass keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt wurden. Die Stellen der Arbeit, die anderen Werken dem Wortlaut oder Sinn nach entnommen sind, sind in jedem einzelnen Fall unter Angabe der Quelle als Entlehnung kenntlich gemacht. Diese Erklärung erstreckt sich auch auf in der Arbeit enthaltene Grafiken, Zeichnungen, Kartenskizzen und bildliche Darstellungen.

München, den 20. Dezember 2013

Bernhard Walzl

Danksagung

Zu Beginn möchte ich meinem Betreuer Prof. Mainzer danken für die freundliche Unterstützung und die Möglichkeit, diese Arbeit zu erstellen. Sein Engagement und seine Begeisterung weckten mein Interesse für die Thematik und legten so den Grundstein für diese Arbeit.

Des Weiteren möchte ich mich bei Prof. Matthes und Alexander Schneider vom sebis-Lehrstuhl der TU München bedanken. Sie machten mich auf wichtige Aspekte aufmerksam und gaben mir jederzeit eine Möglichkeit zur Diskussion und Reflexion.

Ich danke auch all meinen Freunden, die einen positiven Beitrag zum Gelingen der Arbeit leisteten, sei es durch Diskussion, Kritik, Korrektur oder Motivation.

Größter Dank gebührt meiner Familie und insbesondere meinen Eltern Ernst und Michaela Walzl, die mich über viele Jahre hinweg in allen Bereichen meines Lebens unterstützten. Sie ermöglichten mir die freie Ausbildung meiner persönlichen Interessen, die sie stets respektierten und mit all ihnen zur Verfügung stehenden Mitteln förderten.

Abstract

Complex systems can be found in a variety of modern sciences. Dealing and interacting with complexity has already become a critical success factor in social, medical, biological and economical areas. The existence of complex systems in biology, sociology, neurology, and economy is long shown and widely accepted throughout the sciences and society. Scientists as well as engineers and technicians are working on an adequate understanding of complexity in the respective system to meet upcoming challenges and react properly.

The theory of non-linear complex systems has become a proven approach to find solutions and proper handling of complex systems. The insights in complexity sciences are of great benefit to sciences throughout all disciplines. The science of complexity inspires and provides a new understanding of systems and assists other disciplines in finding innovative results. This interdisciplinary method is trend-setting for upcoming research topics.

This work is an attempt to examine the historical emergence and thereby the understanding of complexity and complex systems throughout different scientific disciplines. The present methods and procedures, particularly the modelling and description of systems, in the discussed sciences will be analyzed to deduce similarities and also differences. How those insights and results can be used in other scientific disciplines is exemplary shown in computer sciences.

Zusammenfassung

Komplexe Systeme lassen sich in nahezu allen Forschungsgegenständen moderner Wissenschaften finden und die richtige Interaktion mit ihnen ist zu einem Erfolgsfaktor in sozialen, medizinischen, biologischen und ökonomischen Bereichen geworden. Die Existenz komplexer Systeme in Bereichen der Soziologie, Neurologie, Biologie und Ökonomie ist längst nachgewiesen und akzeptiert. Die Wissenschaften erarbeiten ein adäquates Verständnis von Komplexität in den jeweiligen Systemen um auf zukünftige Herausforderungen reagieren zu können.

Die Theorie nichtlinearer komplexer Systeme hat sich als ein Lösungsansatz im Umgang mit komplexen Systemen hervorgetan und wissenschaftlichen Disziplinen profitieren von den Erkenntnissen der Komplexitätsforschung in allen Bereichen. Die Komplexitätsforschung hat die Forschung in anderen Disziplinen inspiriert und ihnen zu neuen Ergebnissen verholfen. Diese Interdisziplinarität ist richtungsweisend für zukünftige Forschungsansätze.

Im Rahmen dieser Arbeit wird das historische Aufkommen und das Verständnis von Komplexität und komplexen Systemen in verschiedenen Disziplinen betrachtet. Die aktuelle Arbeitsweise, insbesondere die Modellierung und Beschreibung von Systemen, in den jeweiligen Wissenschaften wird analysiert, um daraus Gemeinsamkeiten, aber auch Differenzen ableiten zu können. Am Beispiel der Informatik wird anschließend gezeigt, wie diese Erkenntnisse auf eine bestehende Wissenschaft angewendet werden können.

Inhaltsverzeichnis

Abstract	vi
Zusammenfassung	vii
I. Grundlagen	1
1. Komplexität	3
1.1. Komplexität und Zufall	4
1.2. Komplexität und Chaos	5
1.3. Komplexität und Kompliziertheit	6
2. Komplexe Systeme	9
2.1. Was ist ein System?	9
2.2. Modellierung von Systemen	10
2.3. Komplexität in Systemen	13
2.4. Komplexe Systeme in den wissenschaftlichen Disziplinen	15
2.4.1. Soziologie	16
2.4.2. Biologie	16
2.4.3. Neurologie	17
2.4.4. Ökonomie	18
II. Modelle und Analogien komplexer Systeme	19
3. Übersicht	21
4. Soziale Systeme	23
4.1. Historische Entwicklung	23
4.2. Dimensionen der Komplexität	26
4.3. Modellierung sozialer Systeme	28
4.3.1. Quantitative Soziodynamik	29
4.3.2. Simulation sozialer Systeme	34

5. Biologie	39
5.1. Historische Entwicklung	39
5.2. Biologische Systeme verstehen	44
5.3. Systembiologie	46
5.4. Modellierung biologischer Systeme	47
5.4.1. Herausforderungen	47
5.4.2. System Biology Workbench (SBW)	49
5.4.3. Systems Biology Markup Language (SBML)	51
6. Gehirn	55
6.1. Historische Entwicklung	55
6.2. Was bedeutet, es das Gehirn zu verstehen?	59
6.3. Computational Neuroscience	60
6.3.1. Brain Activity Map	61
6.3.2. Human Brain Project	62
6.4. Modellierung des Gehirns	63
7. Ökonomie	69
7.1. Historische Entwicklung	69
7.2. Qualitative Merkmale ökonomischer Komplexität	73
7.3. Wirtschafts- und Ökonophysik	75
7.3.1. Stochastische Prozesse	75
7.3.2. Korrelation, Autokorrelation und Zeitreihen	77
7.3.3. Spieltheorie	77
7.3.4. Simulationen	79
7.4. Modellierung komplexer ökonomischer Systeme	81
7.4.1. The Observatory of Economic Complexity	82
8. Zusammenfassung und Diskussion	87
8.1. Übersicht	87
8.2. Ein integrales Verständnis von Komplexität	89
8.3. Konsequenzen des Komplexitätsparadigmas	89
8.4. Arbeitsweisen und Methoden	91
8.4.1. Arbeitsteilung und Kollaboration	91
8.4.2. Unterschiede anstelle von Gemeinsamkeiten	92
8.4.3. Adäquate Beschreibung qualitativer Eigenschaften	93
8.4.4. Bestätigung durch empirische Daten	94

III. Komplexität in der Informatik	97
9. Allgemeines	99
10. Klassische Komplexitätstheorie	103
10.1. Komplexität von Algorithmen	103
10.2. Komplexität von Information	105
10.3. Zusammenfassung	108
11. Komplexität in der Softwaretechnik	109
11.1. Software Engineering	109
11.2. UML – Unified Modelling Language	113
11.3. Komplexitätsmetriken	119
11.4. NSE und das neue Verständnis von Softwaretechnik	125
11.5. Zusammenfassung	126
12. Komplexität in IT-Landschaften	129
12.1. Einleitung	129
12.2. CPS – Cyber-Physikalische Systeme	131
12.3. IT-Landschaften	133
12.3.1. IT-Landschaft: ein komplexes oder ein kompliziertes System?	138
12.4. SysML – System Modelling Language	140
12.5. EAM – Enterprise Architecture Management	144
12.5.1. Erfolgsmethoden – Best Practices	147
12.6. Zusammenfassung	152
Literatur	157

Teil I.

Grundlagen

1. Komplexität

Der Begriff Komplexität leitet sich vom lateinischen *complexum* ab. Dieser ist eine Form von *complecti*, was so viel bedeutet wie *umschlingen, umfassen, zusammenfassen* [34]. Komplexität zu beschreiben ist keine leichte Aufgabe. Der Begriff selbst wird vielfach überstrapaziert und oftmals synonym verwendet für Begriffe wie Zufall, Chaos oder Kompliziertheit. Man spricht davon, dass ein Sachverhalt komplex sei, meint aber alltagssprachlich, dass er kompliziert ist. Dieser Gebrauch führt leicht zu Missverständnissen. Verwendet man den Begriff des Komplexen zu inflationär, entsteht schnell der Eindruck, *alles* sei komplex und damit wird die Zuschreibung nichtssagend. Sie grenzt sich von nichts mehr ab und sagt somit auch nichts Wesentliches mehr über einen Sachverhalt aus.

Was meint man nun damit, wenn man von komplexen Phänomenen spricht? Was bedeuten die oben genannten Vollverben „umschlingen“, „umfassen“, „zusammenfassen“? Man spricht von Komplexität gerne im Zusammenhang mit sozialen Systemen (siehe Abschnitt 4), in der Biologie (siehe Abschnitt 5), in der Neurologie (siehe Abschnitt 6) oder in der Ökonomie (siehe Abschnitt 7). So unterschiedlich diese Themenfelder auf den ersten Blick sein mögen, sie alle eint die Tatsache, dass sie bestehende Systeme untersuchen und wissenschaftlich beschreiben möchten. In allen Disziplinen ist man durch einen historischen Entwicklungsprozess zu der Einsicht gekommen, dass es auf Systemebene Erscheinungen gibt, die sich nicht ausschließlich auf Addition der Effekte und Wirkungen kleiner Einheiten zurückführen lassen. Das Entstehen von Gesellschaften und Staatsformen kann nicht durch die Analyse einzelner Individuen verstanden werden. Das Auftreten menschlichen Bewusstseins lässt sich nicht durch die Beschreibung von Neuronen und Gehirnnarealen erklären usw. Was hier auftritt sind Effekte, die das gesamte System „umfassen“ bzw. „umschlingen“. Diese Effekte entstehen als sogenannte emergente Eigenschaften, das heißt sie entstehen erst durch das System in seiner Gesamtheit. Komplexität beschreibt somit den Sachverhalt, dass ein System Eigenschaften besitzt, welche erst durch das Bestehen des gesamten Systems ausgebildet werden. Die Eigenschaften lassen sich nicht auf die Summe der Eigenschaften der Einzelelemente eines Systems reduzieren. Das Ganze ist, ganz im Sinne des Aristoteles, mehr als die Summe seiner Einzelteile. Dieses *Mehr* gilt es systematisch zu analysieren und zu beschreiben.

Auswirkungen, die vielfach beobachtet werden können, sind beispielsweise Selbstorganisation, Phasenübergänge, nichtlineare Dynamik, Chaos und Fixpunkte, sogenannte At-

traktoren. Im Laufe der Arbeit werden zahlreiche Beispiele für Komplexität angeführt, immer unter Berücksichtigung der historischen Entwicklung und des jeweiligen Forschungsstands der Disziplin. Wesentlich ist jedoch im Vorfeld Unterschiede zu klären zu anderen ähnlichen Themenfeldern, die nur allzu gern verwechselt werden, wie beispielsweise die Begriffe Zufall, Chaos und Kompliziertheit. Selbstorganisation beschreibt das Ausbilden von Muster, Struktur und Ordnung in einem Gefüge, das nicht zentral organisiert wird. Aus der Natur sind zahlreiche Beispiele bekannt, die Selbstorganisation verdeutlichen: Organisation von Tierpopulationen, Fell- und Schalenmuster bei Tieren, Nervenzellen und Gehirn usw. Überall dort, wo sich auf Makroebene eine Verhaltensweise einstellt, die nicht durch die Eigenschaften der Einzelelemente erklärt werden kann, sind Anzeichen für Selbstorganisation vorhanden. Hier gilt jedoch nicht der Schluss, dass das Systemverhalten als Ganzes nicht erklärt werden kann. Verhalten der Makroebene kann erklärt bzw. durch Mathematik formalisiert werden [88, 92, 111, 53, 52].

1.1. Komplexität und Zufall

Zufall und Komplexität sind Begriffe, die gerne Hand in Hand gehen. Angesichts der oftmals fehlenden Erklärungen und der Ohnmacht gegenüber komplexen Systemen, die sich scheinbar jeder Mathematisierbarkeit entzogen, versuchte man den Zufall als Erklärungshypothese mitaufzunehmen. Doch sind beide Merkmale von Systemen voneinander zu unterscheiden (siehe auch [88]). Systeme, die komplex sind, müssen nicht zufällig sein. Ein vollständig determiniertes System kann komplexes Verhalten zeigen. Ein berühmtes Beispiel dafür ist das N-Körper-Problem oder das Doppelpendel. Beim Doppelpendel handelt es sich um zwei Pendel, wobei das eine Pendel an den Arm des anderen montiert wird. Setzt man diese Konstruktion in Bewegung, erhält man einen Bewegungsablauf, der zu Beginn nicht absehbar ist. Dieses Muster demonstriert chaotische Prozesse, da es empfindlich von Anfangszuständen abhängt. Kleinste Änderungen zu Beginn oder während des Ablaufs führen zu komplett verschiedenen Mustern. Das bemerkenswerte dabei ist, dass das Doppelpendel vollständig mathematisch beschrieben werden kann. Es handelt sich um zwei Differentialgleichungen, die analytisch nicht gelöst werden können. Aus praktischen Gründen gibt es somit keine Lösung für eine hinreichend lange Zeit. Was bleibt, ist eine numerische Näherung die Anfangswerte benötigt und genau von diesen hängt das Gesamtsystem aber empfindlich ab.

Zufall ist zumeist nur eine Erklärung für Wirkungen, deren Ursachen nicht bekannt sind bzw. nie ganz geklärt werden können. Der französische Mathematiker Henri Poincaré formulierte auf folgende drastische Art: „Nur wegen unserer Unvollkommenheit und unserer Unwissenheit würde es also für uns einen Zufall geben“ [109, S. 54]. Er begründet dies so, dass die Welt nach erkennbaren Naturgesetzen geordnet ist und alle Abläufe den Natur-

gesetzen und insbesondere der Relation von Ursache und Wirkung unterliegen. Haben wir die Ursachen also noch nicht eindeutig identifiziert oder lassen sich diese aus anderen Gründen nicht zur Gänze erkennen, mag der Zufall zwar als Hypothese gut geeignet sein, die Umstände zu beschreiben bzw. mit ihnen zu arbeiten. Aber erklärt wird die Realität dadurch nicht. Der Wurf einer idealen Münze beispielsweise hängt von der Größe und dem Material der Münze sowie von der Kraft der Hand beim Münzwurf ab usw. Diese Parameter lassen sich aber nur schwer messen und kaum in eine Form bringen, die eine verlässliche Prognose über zukünftige Würfe zulässt. Man nimmt daher nicht ganz ohne Grund an, dass beide Seiten gleich wahrscheinlich sind, über das Ergebnis im Einzelfall „entscheidet“ der Zufall.

Das genannte Beispiel des Doppelpendels illustriert den Unterschied zwischen Zufall und Komplexität. Ein komplexes System ist nicht notwendigerweise zufällig und ein zufälliges System ist nicht notwendigerweise komplex. Trotzdem eignet sich der Zufall in bestimmten Situationen und Anwendungsgebieten gut, komplexe Systeme zu beschreiben bzw. das Verhalten von komplexen Systemen abschätzen zu können (siehe Abschnitt 7.3.1).

1.2. Komplexität und Chaos

Die Chaosforschung beschäftigt sich mit der Analyse von Systemen mit Schwerpunkt auf deren Verhalten. Das zeitliche Verhalten von Systemen, die sogenannte Dynamik, ist je nach Art des Systems mehr oder weniger schwierig zu beschreiben. Betrachtet man beispielsweise ein einfaches Pendel, so ist die Bewegung nicht weiter schwierig zu erklären. Die Auslenkung erfolgt entlang einer Kreisbahn und im Idealfall können Reibungsverluste, also Dämpfung, vernachlässigt werden. Selbst wenn man dieses Pendel kurz stört, findet das Pendel sofort wieder auf eine regelmäßige Kreisbahn zurück. Das bereits erwähnte Doppelpendel verhält sich hingegen ganz anders. Obwohl es sich immer noch um ein System mit einfachen Pendeln handelt, ist das Verhalten ein gänzlich verschiedenes. Der zeitliche Verlauf ist zwar mathematisch eindeutig beschreibbar, aber das bedeutet noch nicht, dass Vorhersagen über eine längere Zeit möglich sind. Die fehlende analytische Lösung zwingt uns zu numerischen Lösungen, deren Berechnungen in die Zukunft schnell an die Grenzen der praktischen Berechnung stoßen. Der Rechenaufwand steigt dermaßen schnell an, dass auch jede zur Verfügung stehende Rechenleistung nicht ausreicht um den langfristigen Verlauf zu berechnen.

Zu diesem Umstand kommt hinzu, dass Systeme oft empfindlich von ihren Anfangszuständen abhängen. Kleinste Änderungen in der Ausgangssituation führen zu ganz unterschiedlichen Verläufen. Berühmt wurde das Beispiel des Flügelschlags eines Schmetterlings, der in einem ganz anderen Ort der Welt einen Wirbelsturm auslösen könnte. Dies verdeutlicht die Sensitivität eines Systems gegenüber Anfangsbedingungen. Dazu existieren

tieren zahlreiche Beispiele in der Natur. Die Vorhersage des Wettergeschehens funktioniert kurzfristig sehr gut, langfristig hingegen ist sie sehr schwierig. Auch die Simulation von Wetterlagen und Wettergeschehen helfen hier nicht weiter. Die hohe Sensitivität von Anfangsbedingungen bewirkt, dass zwei nahezu identische Wetterlagen zu völlig unterschiedlichen Wetterbedingungen binnen weniger Tage führen können. Obwohl natürlich Temperatur, Druck, Wind, Luftfeuchtigkeit, Sonneneinstrahlung usw. durch Naturgesetze beschrieben werden können, ist es nicht möglich, das Wettergeschehen verlässlich zu prognostizieren. Nicht der Zufall bestimmt die Entwicklung, sondern die (Rück-)Kopplungen zwischen den vielen Parametern ergeben die Unsicherheit. Es ist also kein stochastischer Prozess, sondern ein deterministischer Prozess mit sensitiver Abhängigkeit.

Die Chaostheorie beschäftigt sich mit Systemen, die eine solche Sensitivität gegenüber Änderungen zeigen. Diese können in der Soziologie, Ökonomie, Physik, Biologie usw. beobachtet werden. Verkehrsstaus, Netzwerkauslastung und neuronale Netze sind konkrete Beispiele für chaotische dynamische Systeme. Den scheinbar irregulären Abläufen liegen jedoch mathematisch formalisierbare Gesetzmäßigkeiten zugrunde, die zentraler Gegenstand der Chaosforschung sind. Phasenraumdiagramme bieten einen Überblick über die möglichen Zustände und die Dynamik eines Systems. An Bifurkationsdiagramme lassen sich Phasenübergänge und Ordnungsparameter eines Systems ablesen. Die Chaostheorie bereichert die Erforschung komplexer Systeme, ist grundsätzlich aber von ihr zu unterscheiden. Zwar kann das Wettergeschehen durchaus als komplexes System angesehen werden, aber es existieren auch einfache Systeme, die bereits chaotisches Verhalten aufweisen.

1.3. Komplexität und Kompliziertheit

Von besonderer Bedeutung ist die Abgrenzung der Komplexität und der Kompliziertheit bzw. Komplikation. Diese zwei Begriffe werden in der Alltagssprache oft synonym verwendet. Man spricht von komplexen Sachverhalten oder komplexen Systemen und meint eigentlich komplizierte Sachverhalte bzw. komplizierte Systeme. Im Rahmen dieser Arbeit wird auf diese Unterschiede großen Wert gelegt. Diese Synonymie ist nämlich nicht gegeben. Obwohl sich die Verwendung beider Begriffe bei der Klassifizierung von Systemen oftmals anbietet, referenzieren sie auf Dimensionen, die klar voneinander getrennt werden können. Komplexität beschreibt die Tatsache, dass sich auf der Makroebene eines Systems ein Verhalten einstellt, welches durch die noch so genaue Analyse der Gesetze der Mikroebene nicht erklärt werden kann. Diese Verhalten unterliegt einer Gesetzmäßigkeit, die sich der Intuition gerne entzieht, weil sie durch Nichtlinearität, Selbstorganisation usw. geprägt ist [125, 31]. Außerdem müssen diese Gesetzmäßigkeiten nichts mit den Gesetzen der Mikroebene gemeinsam haben.

Die Kompliziertheit hingegen beschreibt einen anderen Aspekt eines Systems. Man muss stark differenzieren zwischen subjektiver und objektiver Kompliziertheit. Eine Sachlage erscheint subjektiv kompliziert, wenn sich der Sachverhalt nicht klar erschließen lässt. Man hat aufgrund mangelnden Wissens, Könnens oder Intelligenz nicht die Möglichkeit, einen Sachverhalt vollständig zu erfassen. Objektiv kompliziert ist etwas genau dann, wenn es unnötig umfangreich und ineffektiv ist. Die lateinische Herkunft *complicare* bedeutet „zusammenfalten“ und „verwickelt sein“ [32].

An einem Beispiel der Soziologie lässt sich der Unterschied klar machen. Beobachtet man beispielsweise Passanten in Fußgängerzonen, so erkennt man, dass sich bestimmte Muster in den Bewegungsabläufen innerhalb der Fußgängerzonen ausbilden. Es bilden sich ab einer bestimmten Personendichte Ströme, die entweder in die eine oder in die andere Richtung fließen. Ganz ähnlich dem im Straßenverkehr vorgeschriebenen Rechts- bzw. Linksverkehr. Man kann sich die Situation einfach vorstellen, nämlich dass eine Person, wenn sie auf eine entgegenlaufende Person trifft, die Möglichkeit hat, ihr rechts oder links herum auszuweichen. Nun bietet es sich für alle Beteiligten an, entweder immer nach rechts oder immer nach links zu gehen und es entstehen die angesprochenen Ströme, in denen sich Personen, ohne permanent auf andere Menschen zu stoßen, fortbewegen können. Die Situation ist sehr einfach. Man hat im Grunde nur zwei Möglichkeiten, sich zu verhalten: „rechts ausweichen“ oder „links ausweichen“. Man wird der Behauptung wohl zustimmen, dass diese Situation nicht weiter kompliziert ist und doch zeigt sie komplexes Verhalten. Die Ausbildung von einem Muster, einer Ordnung (Rechts- bzw. Linksverkehr) ist ein deutliches Anzeichen für Selbstorganisation, wie sie in komplexen Systemen zu finden ist. Diese Situation lässt sich außerdem sehr gut computergestützt simulieren (siehe Abschnitt 4) und spieltheoretisch beschreiben (siehe Abschnitt 7.3.3).

An dem genannten Beispiel wird der Unterschied zwischen Komplexität und Kompliziertheit klar. Ein System ist daher nicht entweder komplex oder kompliziert, sondern kann beides sein oder eben auch nicht. Die zwei Eigenschaften schließen einander weder aus noch bedingen sie sich gegenseitig, sondern sie beschreiben unabhängig voneinander verschiedene Aspekte der Realität.

2. Komplexe Systeme

2.1. Was ist ein System?

Ein Ordnungsprinzip, das moderne (Natur-)Wissenschaften beeinflusst, ist das Denken in Systemen. Die zu untersuchenden Gegenstände werden als Systeme angesehen, die anschließend nach den etablierten Arbeitsweisen der jeweiligen Wissenschaft erforscht werden. Wissenschaftler haben oftmals eine klare Vorstellung davon, was sie meinen, wenn sie von „Systemen“ sprechen. Dabei sehen sie vor ihren geistigen Augen immer konkrete Probleme. Ein Mediziner sieht den menschliche Körper oder einzelne Teile, beispielsweise Organe, wenn er von einem System spricht. Ein Biologe sieht möglicherweise umfangreiche Biotop, ein Ökonom sieht ein wirtschaftliches Unternehmen, ein Informatiker sieht einen Rechner und ein Soziologe denkt an die Gesellschaft, wenn von Systemen die Rede ist. Alle haben bis zu einem gewissen Grad Recht und sind stark geprägt durch die wissenschaftliche Denk- und Arbeitsweise der jeweiligen Disziplin. Alle ihre Vorstellungen sind soweit zutreffend, als dass es sich um Systeme handelt. Doch was ein System genau ist, bleibt offen. Im Duden ist eine sehr allgemeine Definition angeführt. Sie lautet: „Gesamtheit von Objekten, die sich in einem ganzheitlichen Zusammenhang befinden und durch die Wechselbeziehungen untereinander gegenüber ihrer Umgebung abzugrenzen sind.“ [33]

Die allgemeine Definition des Systems beschreibt eine Menge von Objekten, die sich klar von einer Umgebung abgrenzen lassen. Innerhalb von Systemen bilden die Objekte einen Zusammenhang aus, der das Verhalten bzw. die Eigenschaften des Systems festlegt. Betrachtet man beispielsweise eine biologische Zelle als System, so grenzt sich diese durch ihre Zellwände bzw. Zellmembran klar von ihrer Umwelt ab. Im Inneren der Zellwände befinden sich zahlreiche Objekte wie zum Beispiel der Zellkern. Diese Objekte, die sich innerhalb der Systemgrenzen befinden, die Systemgrenze eingeschlossen, stellen in ihrer Gesamtheit die Zelle dar.

Es kommt jedoch oft vor, dass Systemgrenzen nicht so klar erkennbar sind, wie dies im Bereich der biologischen Zelle der Fall ist. Vor allem Forschungsgegenstände geisteswissenschaftlicher Disziplinen stehen nicht selten vor dem Problem, dass ihre Anschauungsobjekte weniger konkret und deshalb viel abstrakter sind. Die Objekte entziehen sich somit der unmittelbaren Erfahrung, das bedeutet der unmittelbaren Anschauung durch

ein Messinstrument. Der Soziologe, der die Gesellschaft untersucht und Fragen nach der Organisation und der Struktur stellt, steht vor der Herausforderung, dass er die Gesellschaft nicht oder nur schwer als ein Ganzes betrachten kann. Er muss sich auf kleine repräsentative Ausschnitte und Momentaufnahmen beschränken und auf deren Basis seine Theorien und Hypothesen ausarbeiten. Der Ökonom steht vor einem ähnlichen Problem. Ein Wirtschaftssystem kann als Ganzes nur schwer analysiert werden. So ist zum Beispiel die freie Marktwirtschaft nicht als ein einziges System in einem Labor analysierbar. Man kann die Abläufe und die selbstorganisierten Strukturen zwar erkennen, wenn man die komplexen Abläufe der Marktwirtschaft untersucht, doch die Marktwirtschaft an sich entzieht sich der Anschauung. Denn es handelt sich um eine Idee, die sich in der Welt zwar durch konkrete Regeln und Institutionen zeigt, doch die freie Marktwirtschaft ist mehr als nur die Summe der Gesetze, Regeln und Institutionen.

Die ganzheitliche Betrachtung ist also entscheidend beim Umgang mit Systemen. Es reicht nicht aus, nur einzelne, zum Teil willkürliche Aspekte herauszugreifen und somit auf das Gesamtsystem zu schließen. Im 20. Jahrhundert versuchte Ludwig von Bertalanffy, ein österreichischer Biologe, die vorherrschenden Paradigmen um eine Sichtweise zu bereichern, nämlich um die holistische Sichtweise. Die holistische bzw. ganzheitliche Sicht betrachtet ein System in seiner Gesamtheit, so wie es die oben genannte Definition nahelegt. Sein Buch „Allgemeine Systemtheorie“ (engl. General System Theory) stellt einen Versuch dar, systemübergreifende Prinzipien zu finden. Er arbeitete daran, Gesetzmäßigkeiten zu finden, die sich auf eine Klasse von Systemen anwenden lässt. Der zweite Hauptsatz der Thermodynamik war bereits bekannt (siehe Abschnitt 5), dass also ein abgeschlossenes System auf einen Gleichgewichtszustand maximaler Entropie zusteuert, und wird als ein Grundsatz für systemtheoretische Überlegungen angesehen. Von Bertalanffy untersuchte vorrangig biologische, physikalische und soziale Systeme, um daraus Erkenntnisse im Bereich Komplexität, Selbstorganisation und Dynamik von Systemen gewinnen zu können (siehe [12]). Er prägte den Begriff der Systemtheorie entscheidend mit und legte gemeinsam mit anderen Wissenschaftlern die Grundlagen für das aktuelle Verständnis von Systemen und der wissenschaftlichen Erforschung derselben.

2.2. Modellierung von Systemen

Entscheidend bei der Arbeit mit Systemen ist die Formalisierung und Abbildung des realen Sachverhalts. Diese Abbildung ist notwendigerweise mit Einschränkungen verbunden. Das Original kann nicht eins-zu-eins wiedergegeben werden, da die Realität meistens zu umfangreich und zum Teil auch zu unbekannt ist. Diese zwei Faktoren führen zu Abbildungen, die von der Realität abweichen. In vielen Fällen ist eine Abweichung sogar ausdrücklich gewünscht. Im Rahmen der Modellbildung werden zumeist Merkmale

ausgewählt, die man besonders berücksichtigt. Andere Objekte hingegen werden bewusst weggelassen. So erfolgt einerseits eine Reduktion des tatsächlichen Umfangs durch selektive Auswahl der Merkmale und andererseits eine abstrahierte Abbildung durch Unkenntnis oder ausblenden exakter Objektdetails bei Strukturen und Prozesse.

Um Modellen in einer systemischen Sichtweise erstellen zu können, wird eine Vielzahl von Eigenschaften bei der gewählten Beschreibungssprache erwartet. Für die Beschreibung von biologischen Organismen haben Klipp et al. die wichtigsten Eigenschaften herausgearbeitet, die im Rahmen der Modellierung von Beschreibungssprachen unterstützt werden müssen [75, S. 6]:

Zweck und Adäquatheit eines Modells Modelle können immer nur Ausschnitte, also Teile der Wirklichkeit abbilden. Diese Auswahl wird immer vor der Frage getroffen: Was ist der Untersuchungsgegenstand? Oftmals ist es ausreichend, ein Teilsystem als sogenannte Black-Box mit Ein- und Ausgängen zu modellieren und auf die innere Organisation zu verzichten. In anderen Fällen kann diese Vereinfachung nicht getroffen werden. Realitätsnahe Modellierung ist meistens sehr kompliziert und umfangreich. Ein Modell wird dadurch nicht wahr oder falsch. Was letztlich entscheidet ist die Tatsache, ob ein Modell der Realität entspricht und ob dieses angemessen modelliert wurde.

Modelle sind nicht eineindeutig Ein Prozess kann von verschiedenen Seiten unter Berücksichtigung verschiedener Aspekte betrachtet werden. Deshalb ist es auch möglich, ein und denselben Prozess in unterschiedlichen Modelle abzubilden. Diese Vielfalt führt einerseits zu dem großen Vorteil, dass durch die verschiedenen Sichtweisen ein besseres und umfassenderes Verständnis gewonnen werden kann, andererseits kann es Schwierigkeiten beim Zusammenführen verschiedener kleinerer Modell zu großen umfassenden Modellen geben.

Systemzustände Der Systemzustand ist die Bestandsaufnahme eines Systems zu einem ganz bestimmten Zeitpunkt. Alle Variablen, Parameter und Wahrscheinlichkeitsverteilungen jedes Elements werden dabei eingeschlossen. Von einem Zustand aus kann das System in einen neuen Zustand aus einer Menge von möglichen Zuständen übergehen.

Fixpunkte (Stationäre Punkte, Attraktoren) Asymptotisches Verhalten kann in dynamischen Systemen immer beobachtet werden. Erreichen Zustandsvariablen einen stationären Punkt, so ändern sie sich nicht mehr. Sie verharren auf diesem konstanten Wert. Fixpunkte müssen nicht notwendigerweise einen asymptotischen Zahlenwert darstellen. In der Natur existieren auch Attraktoren, die einen Punkt im Phasenraum darstellen, die durch das dynamische System nicht mehr verlassen werden.

Zeitliche Änderung unterliegt immer einem übergeordneten Maßstab. In der Biologie gibt es kein statisches System, also kein abgeschlossenes System ohne Veränderung. Stationäre Punkte sind somit immer quasi-stationär. Ist der Maßstab für die zeitliche Veränderung sehr lang oder extrem kurz, um adäquat modellierbar zu sein, wird dieser vernachlässigt. Diese Vernachlässigung entspricht einer Vereinfachung, die jedoch notwendig ist, um die auftretenden Probleme mathematisch erfassen und damit rechnen zu können.

Variablen, Parameter und Konstanten Konstanten sind Zahlenwerte mit unveränderlicher Größe, darunter fallen Werte wie π , e , k_B . Variablen hingegen sind Werte mit veränderlichen Größen (Temperatur, pH-Wert, Ladung usw.). Eine Variable kann als Parameter ausgezeichnet sein, um zu verdeutlichen, dass sie einen Einfluss auf Prozesse oder Abläufe besitzt.

Verhalten eines Modells Die Struktur des Systems bestimmt dessen Verhalten. Verschiedene Prozesse können gleiche Wirkungen erzeugen. Deshalb reicht es nicht aus, die Ergebnisse (Wirkungen) eines Systems zu analysieren, um auf die interne Organisation zu schließen.

Klassifizierung eines Prozesses Ein Prozess kann mit verschiedenen Eigenschaften ausgezeichnet sein. Dies könnte zum Beispiel Reversibilität oder Periodizität sein. Des Weiteren spricht man von deterministischen oder nicht-deterministischen (stochastischen) Übergängen. Während eine deterministischer Zustand von den vorhergehenden Zuständen prognostiziert werden könnte, bezeichnet *stochastisch* eine Wahrscheinlichkeit für einen Übergang. Eine genaue Vorhersage ist hier nicht mehr möglich. Eine weitere mögliche Klassifizierung ist die Unterscheidung zwischen diskreten und kontinuierlichen Modellen. Variablen in diskreten Modelle können nur Werte aus einem endlichen Wertebereich annehmen (z.B. Boolesche Modelle). Bei kontinuierlichen Modellen ist dies nicht der Fall.

Nachweis von Wissenslücken Modelle entstehen immer auf Basis von Beobachtungen und Experimenten. Die Abbildung in ein Modell klärt immer auf und zeigt oftmals Lücken zwischen Theorie und Wirklichkeit.

Computersimulation Im Vergleich zu einem Experiment ist ein Modell in der Regel billiger, einfacher handhabbar und umweltfreundlicher. In der Biologie kommt noch hinzu, dass keine Experimente an lebenden Objekten durchgeführt werden müssen. Computermodelle können mit unterschiedlichsten Anfangsbedingungen gestartet und über verschiedene zeitliche Skalen (schneller und langsamer) beobachtet wer-

den. Graphische Aufbereitung und Visualisierung erleichtern zudem das Interpretieren von Ergebnissen.

Der Modellierungsprozess Wie der Modellierungsprozess im Detail auszusehen hat, lässt sich nur schwer verallgemeinern. Klipp et al. stellen einen iterativen 8 Punkte Prozess vor, der von der Auswahl der Daten und des Modells über Sensitivitätsanalyse und Vorhersagekraft geht und schließlich die Adaption und Verbesserung des Modells beinhaltet [75, S. 10].

Obwohl die genannte Punkte alle im engen Zusammenhang mit biologischen Systemen stehen, lassen sich die Anforderungen von der Modellierungssprache auch auf andere Wissenschaften übertragen. Die Punkte sind sehr allgemein gehalten und decken eine Bandbreite an Anforderungen ab. Natürlich existieren auch domänenspezifische Modellierungssprachen, die nur eine Auswahl der angeführten Anforderungen erfüllen, aber vielleicht andere Aspekte beinhalten, die in der obigen Aufzählung nicht enthalten sind.

Die Modellierung von Systemen ist ein breites und gut untersuchtes Feld. Es haben sich zahlreiche Beschreibungssprachen entwickelt, die sich mehr oder weniger gut zur Modellierung eignen. Im Rahmen dieser Arbeit werden einige Sprachen kurz vorgestellt, die aufgrund ihrer Wichtigkeit aus der jeweiligen Disziplin nicht mehr wegzudenken sind. Dazu zählt vor allem SBML in der Biologie (siehe Abschnitt 5.4.3), UML in der Informatik (siehe Abschnitt 11.2) und SysML im Bereich Systems Engineering (siehe Abschnitt 12.4).

2.3. Komplexität in Systemen

Komplexität als emergente Eigenschaft von Systemen lässt sich in vielen, zum Teil sehr unterschiedlichen Bereichen der Forschung beobachten (siehe [91]). Komplexe Zusammenhänge und Phänomene lassen sich in den meisten Systemen beobachten, bei denen sich ein System aus vielen verschiedenen Einzelementen zusammensetzt. Eine große Vielzahl einzelner Elemente ist aber noch nicht hinreichend für Komplexität. Die Beziehung zwischen diesen Einzelementen ist entscheidend. Sind die Elemente miteinander vernetzt und wie sieht die Beziehung zwischen ihnen aus, lauten die bedeutenden Frage. Neben den strukturellen sind auch die dynamischen Eigenschaften bedeutsam. Während sich nämlich strukturelle Aspekte auf Anzahl an Elementen, deren Verschiedenartigkeit und Anordnung beschränkt, stehen bei den dynamischen Aspekten vor allem auch die Beziehungen und Abhängigkeiten in Mittelpunkt. Dynamik zwischen Elementen geht aber weiter als die bloße Identifikation von Verbindungen, wie des beispielsweise bei der Adjazenzmatrix der Fall ist. Dort werden Beziehungen zwischen zwei Knoten einfach dargestellt als eine Eins, falls eine Verbindung besteht, andernfalls null. Die Dynamik liefert eine detaillierte Beschreibung von Beziehungen. Sie ist notwendig, falls man das Entstehen

komplexer Eigenschaften wie beispielsweise Selbstorganisation, Fraktale usw. verstehen möchte.

Dynamik zeichnet sich dabei häufig durch Nichtlinearität aus. Zusammenhänge in der Natur sind viel öfter durch Differential- oder Exponentialgleichungen beschreibbar. Das Bevölkerungswachstum, wie im Übrigen auch viele andere Wachstumsvorgänge in der Natur, wurde beispielsweise sehr früh durch exponentielles Wachstum charakterisiert. Das Wachstum geht früher oder später in eine Sättigung über, in der kein Wachstum mehr stattfindet (siehe Abschnitt 4.3). Die Nichtlinearität von Prozessen verbietet es, die Summe der Ursachen zu überlagern und daraus eine Gesamtwirkung zu berechnen, die der Summe der Einzelwirkungen entspricht. Dieser Spezialfall gilt ausschließlich in linearen Systemen. Gerade deshalb entziehen sich komplexe Phänomene oftmals unserer Intuition und lassen sie als sehr kompliziert erscheinen. Für viele Wissenschaftler ist die mangelhafte kognitive Erfassung komplexer Phänomene ein Grundproblem beim Umgang mit Komplexität (z.B. [31, 125]).

Lineare Denkmuster sind mit Sicherheit ein Teil, die es zu überwinden gilt, wenn man komplexe Systeme adäquat erfassen möchte, doch auch die wissenschaftlichen Methoden müssen angepasst werden. In den Wissenschaften ist es notwendig, sich der Komplexität von Systemen bewusst zu werden, um die Arbeitsweisen darauf einzustellen. Es darf nicht krampfhaft nach linearen Modellen gesucht werden, die das System hinreichend genau beschreiben, sondern andere Modelle mit neuen Ansätze müssen diskutiert und in Betracht gezogen werden, wenn diese die Realität präziser erklären und eine besser Übereinstimmung mit Messdaten liefern. Lineare Modelle beschreiben die Wirklichkeit oftmals nur in kleinen Bereichen. In der Elektrotechnik gibt es beispielsweise den „Arbeitspunkt“ von elektronischen Bauteilen wie dem Transistor. Dort ist die Kennlinie nahezu linear mit konstanter Steigung. Selbstverständlich funktioniert die Verwendung von linearen Ansätzen dort sehr gut und in denselben Maßen können auch lineare Abschnitte in anderen Systemen gefunden werden. Doch das Gesamtsystem ist damit nur ansatzweise beschrieben bzw. annäherungsweise erklärt. Vielfach gibt man sich mit diesen pragmatischen Lösungen zufrieden, weil diese für eine definierte Verwendung ausreichen. Problematisch wird dies allerdings, wenn man auf Unstimmigkeiten trifft, die große reale Folgen nach sich ziehen: Unruhen in der Bevölkerung aufgrund sozialen Unfriedens, der durch herkömmliche soziologische Maßnahmen nicht erklärbar und auflösbar ist, Wirtschaftskrisen aufgrund fehlerhafter Rahmenbedingungen, unsichere Behandlungen von Krankheiten wie Tumore und Demenz durch falsche medizinische Theorien usw. sind mögliche Folgen, die die Menschen treffen.

Der effektive Umgang mit komplexen Systemen ist jedoch möglich, wenn man ihre Gesetze und Gesetzmäßigkeiten verstehen lernt. Es gibt bereits Erklärungsmodelle für das Entstehen von Komplexität, die bereits auf Phänomene der realen Welt angewendet wur-

den. Beispielsweise das „Local Activity Principle“ (siehe [92]). Eine Mathematisierung und genaue Analyse ist also möglich. Die Voraussetzungen dafür ist allerdings ein Akzeptieren der Komplexität anstelle eines Ignorierens und die Bereitschaft, bestehende (lineare) Modelle zu verwerfen und durch neue, der Komplexitätsforschung entsprechenden Modelle zu ersetzen.

2.4. Komplexe Systeme in den wissenschaftlichen Disziplinen

Die Theorie komplexer Systeme erweist sich als eine geeignete Methode, um Probleme zu lösen, die die Moderne vielfach betreffen. Komplexe Systeme lassen sich in nahezu allen Disziplinen der Wissenschaften finden und sind zu den großen Herausforderungen des 21. Jahrhunderts geworden [86]. Mittlerweile haben die Disziplinen die komplexen Systeme identifiziert und arbeiten an deren Erforschung, um ein Verständnis zu entwickeln, das eine Modellierung, Steuerung und Entwicklung erlaubt. Insbesondere die Steuerung, also der kontrollierte Eingriff von außen, um ein festgelegtes Ziel zu erreichen, ist ein erstes großes Anliegen, um Krankheiten, Wirtschaftskrisen, Unruhen, versagenden Infrastrukturen usw. nicht mehr ohnmächtig gegenüber zu stehen.

Disziplin	System	Mikroebene	Makroebene
Soziologie	Gesellschaft	Menschen, einzelne Entscheidungen, Individuen, Gesetze, ...	Gesellschaftsform, Organisationen, Kultur, Verkehr, Wirtschaft, ...
Biologie	Organismen	Zellen, Organe, Organverbände, ...	Zellverbände, Organverbände, Organismen, menschlicher Körper, Organe, (Tier-) Populationen...
Neurologie	Gehirn	Neuronen, Dendriten, Axone, ...	Gehirnfunktionen, Gehirnnareale, (Selbst-) Bewusstsein, ...
Ökonomie	Wirtschaft	Unternehmen, Arbeitnehmer, Arbeitgeber, Gesetze, ...	Wirtschaftssystem (Konjunktur, Rezession, Krisen, Inflation, ...)

Tabelle 2.1.: Übersicht über die Disziplinen und deren komplexe Systeme

In den folgenden Abschnitten wird kurz erläutert, wodurch sich die Komplexität in der jeweiligen Disziplin ergibt und wie diese wahrgenommen wird (siehe auch Tabelle 2.1). Diese Kapitel begründen kurz, warum es sich dabei um komplexe Systeme handelt. Eine ausführliche Diskussion, Analyse und insbesondere die Reaktion der Wissenschaften auf die einzelnen Systeme ist in den Kapiteln von Abschnitt II zu finden.

2.4.1. Soziologie

Für die Soziologie als Wissenschaft des sozialen Verhaltens ist die Frage nach menschlichem Verhalten und den Auswirkungen auf die gesamte Gesellschaft von zentraler Bedeutung. Wie konnten Gesellschaften entstehen? Welche Entscheidungen auf der Ebene der Individuen sind notwendig, um Organisation zu ermöglichen? Welche Rahmenbedingungen sind erforderlich und welchen Einfluss haben Gesetze und Regulierungen auf die Gesellschaften? Diese grundlegenden Fragen nach Ordnungsprinzipien zielen darauf ab, das korrekte Zusammenspiel von Entscheidungen auf Mikroebene und Effekten der Makroebene zu erklären [28, 51, 88].

Menschen als individuelle Entscheidungsträger haben meist mehrere Wahlmöglichkeiten, zum Beispiel im Verkehr, bei der Wahl von politischen Vertretern, im Bereich von zwischenmenschlichen Umgangsformen usw. Diese Entscheidungen prägen jedoch die Gesellschaft maßgeblich mit und sind letztlich von vielen verschiedenen Faktoren abhängig, die nur selten in einem klassischen linearen Zusammenhang stehen. Die Meinungen ganzer Gesellschaften können durch bestimmte Ereignisse, wie beispielsweise nuklearen Katastrophen, schnell kippen und somit ganz empfindlich auf die Stimmung innerhalb einer Bevölkerung drücken. Ausgehend von einzelnen Personen können neuen Ideen und Impulse in die Bevölkerung gelangen, die schlagartig Wirkungen zeigen und zu einem Thema von globalem Interesse werden. Moderne Medien spielen in diesem Zusammenhang durch ihre große Reichweite und ihre Allgegenwart ebenfalls eine große Rolle. Dies lässt sich am Beispiel von politischen Unruhen gut beobachten [38].

Gesellschaftliche Entwicklungen sind geprägt von Übergängen. Politische Systeme sind in der Vergangenheit durch neue Ordnungen abgelöst worden, wobei dieser Wechsel sehr oft von Revolutionen geprägt war. Man brach mit dem bestehenden System und führte eine neues ein, in dem neue Gesetze und zum Teil neue Weltanschauungen galten. Die Transitionen lassen sich nicht als lineare Übergänge darstellen und die Wirkungen zeigen sich oftmals erst, wenn das System bereits am Kippen ist. Ein Eingreifen im Sinne eines Wiederherstellens der bisherigen Zustands ist schwierig, meistens unmöglich. Zusätzlich wird dies erschwert, wenn man versucht, die gesellschaftliche Ordnung als ein lineares und reduktionistisches System mit kausalen Ursache-Wirkung-Relationen zu verstehen.

2.4.2. Biologie

Bei der Erforschung von lebenden Wesen, also Pflanzen, Tieren, Menschen und anderen Organismen, spielt die Frage nach der Komplexität eine große Rolle. Bereits in der Antike suchte die Menschheit nach Antworten, die erklären sollten, was lebende Materie von unbelebter unterscheidet. Dabei wurden Erklärungsmodelle bemüht, die dualistische Weltansichten unterstellten, die den Körper vollständig von der Seele trennten oder Modelle,

die den Menschen und überhaupt alle Lebewesen als seelenlose Maschinen ansahen [91].

Ganz geklärt sind grundlegende Fragen für die Wissenschaft bis heute noch nicht. Triviale Zuordnungen und einfache Lokalisation sind in der Biologie eher umstritten, auch die Entwicklung neuer Lebewesen und Arten ist selbst durch die Evolution und den „zufälligen“ Mutationen nicht restlos geklärt. Vielmehr beginnt man zu verstehen, dass die umfangreichen Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Akteuren in der Biologie denen eines komplexen Systems entsprechen. Diverse Einflüsse unterschiedlicher Komponenten lassen kaum mehr Platz für einfache Kausalketten, lineare Zusammenhänge und streng determinierte Prozesse.

Im Rahmen der Systembiologie wird die Frage nach den komplexen Eigenschaften von biologischen Systemen untersucht. Man setzt dabei sehr stark auf die Erforschung der Zellen, da diese die Grundlage für lebende Organismen sind. Längst hat man verstanden, dass es nicht ausreicht, die Gesetzmäßigkeiten von isolierten Zellen zu verstehen. Man muss die Struktur und die Dynamik von Zellverbänden sowie der Organismen untersuchen, um eine Aussage über das komplexe System treffen zu können [73].

2.4.3. Neurologie

In ähnlicher Weise wie in der Biologie drängt sich die Theorie komplexer Systeme unweigerlich in die Hirnforschung. Das Gehirn als das komplexeste Organ des menschlichen Körpers gibt dem Menschen schon seit Jahren große Rätsel auf. Nicht zuletzt deswegen hat man zwei große Forschungsprojekte ins Leben gerufen, die die Gesetzmäßigkeiten des Gehirns wissenschaftlich untersuchen. Auch für die Medizin sind die Erkenntnisse der Hirnforschung von höchster Bedeutung. Erkrankungen des Gehirns sind vermehrt zu beobachten und die Prognosen versprechen ein rasantes Wachstum in den nächsten Jahrzehnten, sofern man es nicht schafft, adäquat auf die Krankheiten zu reagieren [19].

Das Gehirn besteht im Wesentlichen aus vielen Milliarden Nervenzellen, den sogenannten Neuronen, die miteinander verschalten sind. Die Zellen sind für sich betrachtet verhältnismäßig einfach, denn sie können entweder feuern, wenn ein Aktionspotenzial überschritten ist oder eben nichts tun und Ladung akkumulieren. Die hohe Anzahl an Verschaltung mit anderen Neuronen ermöglichen Prozesse wie Wahrnehmung, Lernen, Vergessen und sind die Grundlage für eines der größten Rätsel der Menschheit: das Bewusstsein.

Triviale Zuordnung von Gehirnfunktion zu einem oder mehreren Gehirnarealen, wie es in der Geschichte geschah, sind nicht möglich. Zwar können einzelne Aktionen bestimmten Regionen zugeordnet werden, eine eindeutige Karte des Gehirns wird es aber nie geben [107]. Die Dynamik und die beispiellose Struktur des Gehirns lassen sich eben nicht durch ein mechanistisches Modell wie bei einem Uhrwerk beschreiben. Das Beobachten der Makroebene, also der Bewusstseinszustände mit zeitgleicher Aufzeichnung von

Gehirnaktivität, wird Aufschluss über die Funktionsweise geben. Die Verknüpfung von Makro- und Mikroebene ist hochkomplex und eben nicht trivial [1].

2.4.4. Ökonomie

Den Ablauf und die Zusammenhänge von ökonomischen Prozessen versucht die Wirtschaftswissenschaft mit wissenschaftlichen Methoden zu hinterfragen. Erste Versuche, ein Wirtschaftssystem auf dieser fundierte Basis zu stellen, stammen von Adam Smith der bereits erkannte, dass einfache Verhaltensweisen auf der Mikroebene zu einem Effekt der Makroebene führen. Den Zusammenhang schrieb er der „unsichtbaren Hand“ zu. Das Wirtschaftssystem ist seit Jahrtausenden von zentraler Bedeutung für die Menschheit. Spezialisierung und Handel ermöglichen Wohlstand und Warenkreisläufe und tragen erheblich zur Ausbildung von Kultur und Bildung bei [14, 112].

Zentral in der Warenwirtschaft ist die Bestimmung des Preises. Einfache Modelle berechnen Angebot und Nachfrage und es ergibt sich ein Gleichungssystem, das einfach zu lösen ist. Das System ist aber nicht ganz so einfach. Subventionen, Steuern, Zinsen, Inflation, Deflation, Spekulation, Preisabsprachen, Krisen usw. führen zu einer Verschiebung des Preises, die sich nicht mehr bestimmen lässt. Die Ökonomen des 20. Jahrhunderts haben Theorien und Gleichungen aufgestellt, um Preisentwicklungen und Aktienkurse voraussagen zu können, sie scheiterten jedoch immer an der Komplexität des Marktes und somit aufgrund falscher Annahmen. Der Markt folgt den Regeln eines komplexen Systems [93]. Nichtlinearität, Chaos und Dynamik kennzeichnen ökonomische Prozesse.

Das Wirtschaftssystem war noch nie linear und dennoch legte man diese Annahme zugrunde. Dies mag für eine Zeitspanne auch funktionieren, denn für hinreichend kleine Abstände sind Preisentwicklungen linear gut approximierbar, aber für lange Zeit funktioniert dies nicht. Spekulationen am Kapitalmarkt können dann zu hohen Verlusten und weitreichenden Krisen führen. Die falsche Einschätzung des Marktes kann also zu einem großen Risiko für das Finanzwesen und somit für die gesamte Gesellschaft werden.

Teil II.

**Modelle und Analogien komplexer
Systeme**

3. Übersicht

Das Auftreten von Komplexität oder komplexem Verhalten kann in diversen Phänomenen und Erscheinungen rund um den Globus beobachtet werden. Anzeichen, die auf ein komplexes System schließen lassen, finden sich deshalb auch in vielen wissenschaftlichen Disziplinen und Forschungsgegenständen. Die Frage nach dem Wesen der Komplexität ist also eine Frage die früher oder später jeden Forscher berührt. Diese Auseinandersetzung muss nicht notwendigerweise bewusst geschehen. So kann es zu Beginn einer wissenschaftlichen Forschung durchaus sein, dass sich ein Verhalten zeigt oder Beobachtungen gemacht werden, die unerwartet und unerklärlich sind. Resultate wissenschaftlicher Arbeit, die sich mit anerkannten Theorien und Modellen nicht erklären lassen sind in der Geschichte nichts Außergewöhnliches. Sie sind vielmehr ein Anzeichen dafür, dass sich das Theoriegebäude weiterentwickeln muss. Neue Theorien müssen erarbeitet oder bestehende überarbeitet werden um zu neuer wissenschaftlicher Erkenntnis zu gelangen.

Dabei lässt sich keine Disziplin auszeichnen, die die Komplexität als wissenschaftliches Erklärungsmodell entwickelt oder gar „erfunden“ hätte. Zumal eine Formulierung wie „die Komplexität“ nicht unumstritten ist. Man darf davon ausgehen, dass es die eine Komplexität nicht gibt, vielmehr lassen sich komplexe Eigenschaften in unterschiedlichen Situationen ausmachen. Erst die interdisziplinäre Zusammenarbeit von Wissenschaften und Wissenschaftlern, die sich über ihre Fachdisziplin hinaus engagierten, ermöglicht es, ein gemeinsames Verständnis von Komplexität zu entwickeln.

Die Eigenschaften und die Erscheinungsformen sind sehr vielseitig. Während sie sich in sozialen Systemen durch das Auftreten von hierarchische Beziehungen, Gesellschaftsformen und Kulturen äußert (siehe Kapitel 4), treten in der Biologie bereits auf molekularer Ebene Effekten und Eigenschaften zu Tage, die sich am geeignetsten durch die Ansätze der Komplexitätsforschung erklären lassen (siehe Kapitel 5). Das Gehirn, als eines der komplexesten Systeme das wir Menschen kennen, beschäftigt die Hirnforschung nicht erst seit der Initiierung von zwei milliardenschweren Projekten in Europa und den USA. Die Funktionsweise des Gehirns erklären zu können und eine Antwort auf die Frage nach dem Ursprung des Bewusstseins geben zu können, zählt mitunter zu den spannendsten Fragen dieses Jahrhunderts. Und nicht zuletzt ringt die Ökonomie mit dem komplexen Eigenschaften des Wirtschaftssystem und dessen Verhalten.

Komplexe Systeme zeichnen sich durch eine Vielzahl unterschiedlicher Eigenschaften

aus. Wie konnte es zu einem Verständnis für Komplexität und zu dessen Entdeckung in der jeweiligen Disziplin kommen, welche Effekte wurden beobachtet und welche Experimente durchgeführt? Was waren die Meilensteine innerhalb der Disziplinen, die dazu führten Komplexität anzunehmen und diese systematisch zu erforschen? Welche Konsequenzen hat dies für das Selbstverständnis der Disziplinen und wie wird innerhalb dieser damit umgegangen? Grundlegende Umbrüche in der Auffassung einer Disziplin gehen selten mit einem vollständigen Einverständnis aller beteiligten Wissenschaftler und Forscher einher. Vielmehr werden diese Wechsel begleitet von Unbehagen und Unverständnis.

Wie kann Komplexität in Systemen modelliert und dargestellt werden? Welcher Methoden bedient sich dabei die jeweilige Disziplin? Nichtlineare Differentialgleichungen, Phasen- und Bifurkationsdiagramme, Darstellung von Abläufen und eine Abbildung in Modellen und Simulation spielen hier eine zentrale Rolle. Sogenannte Kontroll- und Ordnungsparameter bestimmen das Verhalten maßgeblich und tragen deshalb wesentlich zu einem detaillierten Verständnis über komplexe System bei. Wie können diese also sicher bestimmt und identifiziert werden?

Das Verstehen von Komplexität und den damit verbundenen Eigenschaften und Konsequenzen sind notwendige Voraussetzungen für die Bewältigung von drängenden Probleme. Für viele ist die Komplexität und der Umgang damit eine der großen Herausforderungen des 21. Jahrhunderts. Konsequenzen, die sich durch Komplexität ergeben, können sowohl negativ, im Fall von medizinischen Risiken wie Krebs, ökologische Katastrophen oder wirtschaftliche Krisen, aber auch positiv, wie die Entstehung und der Erhalt von biologischem Leben, die Anpassung an Umweltbedingungen und enorme Problemlösungskapazität, sein. Ein besseres Verständnis kann dazu beitragen die negativen Konsequenzen früher zu erkennen und die positiven Konsequenzen besser zu nutzen.

Die aufgebrachten Fragen werden nun Schritt für Schritt in den einzelnen Kapiteln beantwortet. Dabei wird bei den sozialen Systemen begonnen und über die Biologie und Neurologie der Bogen bis zu der Ökonomie gespannt. Die jeweiligen Abschnitte sind voneinander weitgehend unabhängig und können daher in beliebiger Reihenfolge gelesen werden. Jedes Kapitel beginnt mit einer geschichtlichen Einleitung und skizziert dann die qualitativen Dimensionen von Komplexität in der jeweiligen Disziplin. Am Ende dieses zweiten Teils wird jeweils auf die konkrete Arbeitsweise der Disziplin eingegangen die insbesondere den Modellierungs- und – sofern vorhanden – den Simulationsprozess umfasst. Dieser zweite Abschnitt schließt mit einer kurzen Zusammenfassung der einzelnen Kapitel. Zusätzlich werden die Arbeitsweisen und Methoden ausgearbeitet die wesentlich zu einem Forschungserfolg beitragen und für die genannten Disziplinen aber auch für andere Wissenschaften von Bedeutung sein können.

4. Soziale Systeme

4.1. Historische Entwicklung

Unser Leben scheint immer komplexer zu werden. Dies ist nicht weiter verwunderlich, steigt doch die Anzahl an Berührungspunkten mit Organisationen stetig an. Als Mitglied einer Gesellschaft wird man mit einer Vielzahl von Organisationen konfrontiert: Familie, Freundeskreis, Schule bzw. Universität, Arbeitsstätte und Vereine, aber auch politische Parteien und viele mehr tragen dazu bei, dass man permanent Entscheidungen als ein Bestandteil eines größeren bzw. übergeordneten Systems trifft. Neben der Frage, wie man Entscheidungen in einzelnen Situationen treffen sollte, existieren allgemeinere Fragen: Woher kommen diese zahlreichen Organisationen? Wie konnten diese entstehen? Und nach welchen Prinzipien werden die dort gültigen Handlungsvorschriften festgelegt?

Diese Fragen zielen also auf die Beantwortung der Herkunft von gesellschaftlichen Organisationen und Strukturen, oder, um es auf den Punkt zu bringen, von sozialen Systemen ab. Diese Fragen sind nicht neu, sie finden sich schon bei Platon und Aristoteles wieder. Vor dem Hintergrund der Komplexitätswissenschaften und eines systemisch-holistischen Ansatzes erreichen diese jedoch eine ganz neue Dimension. Menschliche Zivilisation als ein komplexes System zu verstehen, ermöglicht ein tieferes und umfassenderes Verständnis von Organisationen, Gesellschaft und Politik.

Platon beschreibt in seinem Werk *Politeia* die Entwicklung eines idealtypischen Staates. Dabei kommt jedem Bürger eine andere Aufgabe zu, die seinen Fähigkeiten und Begabungen entsprechend bestimmt wird. Aus dieser Arbeitsteilung ergibt sich eine Abhängigkeit und es bedarf der gegenseitigen Hilfe, um grundlegende Bedürfnisse erfüllen zu können. Aus einem primitiven Staat, der lediglich für die menschlichen Grundbedürfnisse Sorge trägt, wird im weiteren Verlauf ein Staat, der kulturelles Leben hervorbringt und Luxusgüter herstellen kann. Um einen Zerfall durch Machtkämpfe und Kriege zu vermeiden, teilt Platon die Bevölkerung in drei unterschiedliche Stände ein: Handwerker und Bauern, Wächter und den Philosophenkönig. Der weiseste aller Bürger, der Philosophenkönig, ist für die Herrschaft über alle bestimmt, während die Aufgabe der Wächter die Sicherstellung der inneren Ordnung und die Staatsverteidigung ist. Die Macht innerhalb des Staates wird also auf einen einzelnen übertragen, dessen Rolle niemand besser ausführen könnte. Der Staat ist also einem Entwicklungsprozess unterworfen, der darin besteht, einem ein-

zeln alle Macht einzuräumen, um für ein harmonisches und ausgeglichenes Zusammenleben aller Mitglieder zu sorgen. Es ist bei weitem nicht jedem Bürger zuzutrauen, dass er die richtigen Entscheidungen treffen kann. Dies würde zwangsläufig zu Chaos und Unordnung führen, so die Vorstellung Platons.

Aristoteles nimmt den Menschen als Ausgangspunkt und vertritt die These, dass dieser ein *zoon politikon* sei. Ein Wesen, das von Natur aus sozial sei und deshalb Gemeinschaften und Gesellschaften ausgebildet habe. Er beschreibt in seinem Werk *Politik*, dass ein Mensch, der den Staat nicht benötigt, entweder ein Gott oder ein Tier sei. Des weiteren bestehe der Staat notwendigerweise schon vor dem Individuum und dem Hausstand, also der Familie [10, S. 9]. Das Ziel, das mit dem Zusammenschluss verfolgt wird, ist die Bedingung für ein glückseliges Leben, das bei Aristoteles das höchste Ziel des Menschen darstellt, zu schaffen. Dies ist jedoch nur möglich, wenn sich die Gemeinschaften zu immer größeren Verbänden zusammenschließen und schließlich in der Polis, einer Art Stadtstaat, ihre Vollendung finden. Das aristotelische Modell von Herrscher und Beherrschtem und die Tatsache, dass diese Ordnung eine naturgegebene ist, wurde zum Leitmotiv für politische Theorien bis in die frühe Neuzeit [91, S. 370].

Der englische Philosoph Thomas Hobbes veröffentlichte 1651 sein berühmtes Werk mit dem Titel *Leviathan oder Stoff, Form und Gewalt eines kirchlichen und staatlichen Gemeinwesens*¹. Dieses ist in vier Kapiteln gegliedert, wobei die ersten beiden Kapitel „Vom Menschen“ und „Vom Staat“ die für die politische Theorie bedeutenden sind. Methodisch orientiert er sich an Galileo Galilei und dessen mechanistischen Erklärungsmodellen [91, S. 371]. Deshalb untersucht er zunächst den Menschen als Individuum und lässt den Staat erstmal außen vor. Er entwirft einen Ursprungszustand, in dem alle Menschen ohne jegliche Gesetze und ohne einen Staat leben. Die Menschen führen darin einen „Krieg aller gegen alle“. Damit stellt er sich gegen die aristotelische Sichtweise des Menschen als *zoon politikon*. Hobbes verweist auf das menschliche Interesse der Selbsterhaltung. Um diese Selbsterhaltung ausführen zu können, sieht er den einzigen Ausweg darin, dass sich Menschen notwendigerweise zu einem Staat zusammenschließen, in dem Recht und Gesetz durchgesetzt werden. Die Umsetzung der Gesetze und die Bestrafung deren Brüche ermöglichen es, den Ursprungszustand zu überwinden. Der Leviathan bezeichnet den Souverän, dem zugunsten alle Menschen ihre politische Freiheit aufgeben und sich einem Gesellschaftsvertrag unterordnen. Erst die absolute Autorität und die Einwilligung in diesen Herrschaftsvertrag ermöglichen den Ausweg aus dem anarchistischen Naturzustand.

John Locke, ein Landsmann von Hobbes, veröffentlicht zehn Jahre nach dessen Tod das Werk *Zwei Abhandlungen über die Regierung*². Der Naturzustand des Menschen in Abwesenheit des Staates ist für ihn, im Gegensatz zu Hobbes, ein Gleichgewichtszustand. Für

¹engl. „Leviathan or the Matter, Forme and Power of a Commonwealth Ecclesiastical and Civil“

²engl. „Two Treatises of Government“

Locke hat jeder Mensch von Natur aus das Recht auf Freiheit und Eigentum. Er wird allerdings durch die Tatsache eingeschränkt, dass auch seine Mitmenschen Anspruch auf diese Rechte haben. Die Legitimität von Regierungen ist bei Locke dadurch gegeben, dass sie die natürlichen Rechte des Menschen schützen. Regierungen werden können illegitim werden, wenn sie diese natürlichen Rechte missachtet. Dadurch würde eine Regierung auch ihre Existenzberechtigung verlieren. Jean-Jacques Rousseau geht in seinem Werk *Vom Gesellschaftsvertrag oder Prinzipien des Staatsrechtes*³ noch weiter. Er fordert ein Ende der Monarchie zugunsten eines „Willens gleichberechtigter Individuen“ (*Volonté générale*) fordert.

In der französischen Revolution sieht Immanuel Kant eine neue Ära für die Menschen eingeläutet. Die freien Bürger würden zu einer harmonischen und ausgeglichenen Gesellschaft zusammenwachsen und somit einen - in einem modernen Sinn - Attraktor darstellen. Andauernde Konflikte und Kriege widersprachen dieser Theorie jedoch und führten dazu, dass Georg Wilhelm Hegel einen dialektischen Prozess vermutete. Diese Dialektik entspricht einem Phasenübergang vom Sein zum Werden. Neue Ordnungen ergeben sich also ständig aufgrund von Spannungen und Konflikten. Diese ermöglichen das Ausbilden neuer Strukturen und Organisationen.

In den Geistes- und Sozialwissenschaften wird zwischen einer biologischen Evolution und einer Evolution der Gesellschaft und Kultur unterschieden. Während die biologische Evolution durch zufällige Mutationen vorangetrieben wird, ist die Entwicklung einer Gesellschaft vor allem durch individuelle Einstellungen, Motivationen und Ansichten bestimmt, die sogenannte Mikroebene. Auf dieser Mikroebene befinden sich Individuen, die durch ihre Gefühle und Ideale angetrieben werden. Organisationsstrukturen oder politische Ordnungen hingegen können nicht als die Summe von einzelnen Absichten aufgefasst werden, aus diesen alleine scheinen sie sich nicht zu ergeben. Soziale, politische, kulturelle und ökonomische Strukturen, die über die Zeit entstanden, zum Teil abgelöst und durch neue ersetzt wurden, waren und sind nicht nur ein bloßes Aggregat individueller Intentionen. Die spannende Frage lautet nun also: Was sind die Gesetzmäßigkeiten, die der Gesellschaft und der gesellschaftlichen Ordnung zugrundeliegen? Gibt es, in Analogie zu den Naturgesetzen, so etwas wie „Sozialgesetze“?

Diese Frage ist nicht neu. Wie der bisherige historische Überblick verdeutlicht, beschäftigte die Frage nach der sozialen Ordnung bereits Philosophen der Antike. Ein bemerkenswerter Punkt wird im Mittelalter mit Thomas Hobbes erreicht. Der Engländer versuchte im 17. Jahrhundert die Staatstheorie mit ähnlichen Mitteln als Wissenschaft zu etablieren, wie es Galilei mit seiner Bewegungslehre in der Physik schaffte. Die damit verbundene Sichtweise des mechanistischen Weltbilds schwappte gewissermaßen von der Naturphilosophie in die Biologie (siehe Kapitel 5) und die Sozialwissenschaften über. Die Grundlage

³im französischen Original „Du Contract Social ou Principes du Droit Politique“

sozialen Verhaltens, so die Vorstellung, waren einfache Gesetzmäßigkeiten. Genauso wie man einfache Eigenschaften in der Physik gefunden hatte, die newtonschen Gesetze. Die separatistische Analyse kleiner und kleinster Einzelemente, die dann isoliert betrachtet werden und aus denen sich die Eigenschaften des Gesamtsystems ergibt, war die Folge. Diese Reduktion war offensichtlich ein wenig zu einfach gedacht und auch nicht ohne Konsequenzen. Die Vorstellung, man könne die Komplexität soweit reduzieren und die Systeme derart vereinfachen, gipfelte darin, dass man annahm, man könne die politische und wirtschaftliche Ordnung vollständig kontrollieren und planbar machen. Karl Marx glaubte an eine deterministische Abfolge der Geschichte. Die Resultate waren instabile Volkswirtschaften und politische Systeme, die großteils im Verlauf des 20. Jahrhunderts zusammenbrachen [91].

4.2. Dimensionen der Komplexität

Komplexität in sozialen Systemen zu vernachlässigen und zu leugnen ist also nicht nur falsch, sondern auch gefährlich. Die Komplexität äußert sich in sozialen Systemen in unterschiedlichen Dimensionen. Eine Identifikation derselben hilft diese besser zugänglich zu machen, um die Komplexität anschließend besser zu analysieren. Helmut Willke hat dazu fünf Dimensionen der Komplexität herausgearbeitet (siehe [131, S. 84]):

Sachliche Komplexität Damit wird die Vielfalt der „Sachen“, die aufeinander wirken, bezeichnet. Es fallen sowohl Gegenstände, aber auch Möglichkeiten darunter. Die Anzahl möglicher Zustände, also das, was in der Physik als Phasenraum bezeichnet wird, wird unter dieser Dimension zusammengefasst. Analytisch betrachtet fallen hierunter unter anderem Anzahl und Dichte der Bevölkerung, damit steigt jedoch auch die Anzahl der Interaktionen zwischen den Einzelementen. Es entstehen immer mehr Systeme und es kommt zu einem Konkurrenzproblem zwischen ihnen. Ausgangspunkt ist die Verteilung von knappen Gütern (Energie, Information, Mitglieder, usw.) auf viele Systeme und Organisationen. Eine Lösung für das Konkurrenzproblem der sachlichen Komplexität stellt die Regelung der Ressourcenverteilung dar. Damit vermeidet man eine weitreichende Entkopplung von der Umwelt und verhindert eine Unabhängigkeit von den umliegenden Systemen.

Soziale Komplexität Der Interaktionszusammenhang, also die Art und Weise der Kommunikation und des Austauschs mehrerer Personen, zwischen mehreren Menschen entwickelt rasch Gewohnheiten und Regeln. Diese Beziehungen werden jedoch für einzelne Personen unüberschaubar. Werden in Interaktionen immer alle Mitglieder eines Systems eingebunden, führt dies unausweichlich zu einem Stillstand. Es ist

also notwendig Organisationen und Rollen zu schaffen und diese auf die Mitglieder zu verteilen. Diese Form der Arbeitsteilung ermöglicht eine Spezialisierung und nicht zuletzt eine Beschleunigung von Prozessen, die notwendig, für den Erhalt des Systems sind (vgl. [84]). Die Kehrseite dieser funktionalen Differenzierung ist die Abhängigkeit (Interdependenz) von anderen. Damit ist eine steigende Vernetzung verbunden, die einen Abstimmungsbedarf nach sich zieht und unweigerlicher zu Kompliziertheit führt.

Zeitliche Komplexität Obwohl Systeme in der Gegenwart existieren, tauchen in ihr verschiedene Zeitdimensionen auf. Während die Wahl von Regierungsmitgliedern nur einen Tag dauert und der vorausgehende Wahlkampf wenige Wochen, wird eine Entscheidung getroffen, die jahrelange Konsequenzen nach sich zieht. Entscheidungen auf der Mikroebene werden in Sekunden gefällt, die Wirkungen sind aber oft über Jahre spürbar. Als komplexes Sozialsystem erscheinen neben aktueller Interaktionen auch die Vergangenheit und die Zukunft. In physikalischen, chemischen oder biologischen Systemen hat die Zukunft keinen Einfluss auf die Gegenwart. Futurität wird somit erst wirksam, sobald der Mensch mit seinen Erwartungen, Hoffnungen und Befürchtungen zum Teil des Systems wird. Die Gegenwart wird vielschichtiger, da sie differenzierte Zeithorizonte und eine Fülle von Möglichkeiten umfasst. Es existieren Prozesse, die innerhalb von Bruchteilen von Sekunden getroffen werden, wohingegen sich andere Abläufe über Jahre und Jahrzehnte erstrecken.

Operative Komplexität Die Erarbeitung der Fähigkeit, Ziele autonom zu setzen und zu verändern, stellt eine weitere Dimension eines sozialen Systems dar. Während einfache Systeme ihre Ziele von dem sie umgebenden System erhalten, wie zum Beispiel Arbeitnehmer oder Arbeitsgruppen in Unternehmen, Schulkinder, ist es ein Merkmal von komplexen sozialen Systemen sich eigenständig neue Ziele zu setzen. Diese Art der Aktion setzt im Gegensatz zur Reaktion voraus, dass Umweltreize nicht nur wahrgenommen, sondern interpretiert werden und bewusste, aktive Reorganisation hervorrufen können. Dazu sind wichtige Konzepte wie Reflexion und Bewusstsein erforderlich.

Kognitive Komplexität Es muss unterschieden werden zwischen der kognitiven Komplexität auf der individuellen Ebene, die vor allem die menschliche Problemlösungskompetenz adressiert und der kognitiven Komplexität auf der Makroebene. Auf individueller Ebene steigt die Fähigkeit zur Reflexion mit dem Aneignen von Wissen und dem Ausbilden neuer kreativer Denkprozesse. Die kognitive Komplexität einer Gesellschaft ist jedoch eine emergente Systemeigenschaft. Sie ist nicht nur das Wissen der Experten, sie zeigt sich im Entwicklungsstand des Wissenschaftssystems, in

den Wirkungen des Ausbildungsniveaus usw. Die Analyse muss über die Aufsummierung und die statistische Aggregation der Individuen hinausgehen. Um in der hochkomplexen Praxis Entscheidungen treffen zu können, müssen adäquate Reflexionsprozesse vorangestellt werden. Die Folgewirkungen und Probleme, die sich ergeben werden, können mit herkömmlichen Entscheidungsprozesse nicht mehr erfasst werden. Für hochkomplexe Bereiche wird das traditionelle Paradigma der Aufsicht, also der Konzentration in einer Person oder in einer kleinen Gruppe von Personen nicht mehr angemessen sein.

Die Unterscheidung der verschiedenen Dimensionen von Komplexität hilft zunächst bei die Analyse von Systemen. Während sich die Sozialwissenschaften um eine derartige Differenzierung bemüht, berücksichtigen andere Disziplinen wie die Mathematik, die Physik, die Biologie, die Informatik oder aber auch die Geisteswissenschaften andere Merkmale von Systemen. Jede Disziplin versucht dabei den Schwerpunkt so zu setzen, dass man einerseits den Erkenntnisgewinn maximiert und andererseits neue Denkansätze schafft, die eine weitere Forschung ermöglichen.

Als mögliche Forschungspraxis hat sich in nahezu allen Bereichen eine nicht notwendigerweise rechnerunterstützte Simulation als sehr hilfreich erwiesen. Eine angemessene Verwendung von Simulationen kann zu neuen Modellen und Theorien der Wirklichkeit führen [49]. Es gibt zahlreiche Vorteile einer Simulation und ebenso zahlreich sind die Methoden und Möglichkeiten, Simulationen durchzuführen. Was alle Simulationen eint, ist die Tatsache, dass es ein zugrundeliegendes Modell gibt, dessen Verhalten in einer Art und Weise beschrieben ist, sodass daraus - in der Regel - zukünftige Ereignisse vorausgesagt werden können. Üblicherweise ist die Beschreibungssprache die Mathematik, also Gleichungssysteme mit Anfangswerten und Randbedingungen.

4.3. Modellierung sozialer Systeme

Wie sieht diese Modellierung also in sozialen Systemen konkret aus? Welcher Methoden und welcher Werkzeuge bedienen sich die Sozialwissenschaften, um zu diskutierbaren Resultaten zu kommen? Schon lange versuchte man, Eigenschaften von sozialen Systemen zu beschreiben und Gesetzmäßigkeiten zu finden. Im 18. Jahrhundert stellte der englische Ökonom Robert Malthus im Rahmen seiner Bevölkerungstheorie eine Gleichung auf, um die Populationsdynamik einer Gesellschaft zu beschreiben. Die einfache Gleichung ist mathematisch gesprochen eine geometrische Folge und lautet: $P(t + 1) = q * P(t)$. Dabei wird jeweils die Populationsgröße zu einem Zeitpunkt $t + 1$ von dem vorhergehenden Zeitpunkt t beschrieben und mit einem Faktor q , die Wachstumsrate, multipliziert. Diese Vorstellung des Wachstums, die aus heutiger Sicht naiv erscheint, wurde später

von dem belgischen Mathematiker Pierre-François Verhulst abgelöst, der das exponentielle Wachstum durch die Einführung mathematischer Terme unterband und so zu einer logistischen Gleichung gelangte, die seither in verschiedenen Bereichen Einzug gefunden hat. Das derzeit verwendete Modell zur Bevölkerungsvorausberechnung wird mithilfe einer Kohorten-Komponenten-Methode vom Statistischen Bundesamt durchgeführt. Dabei werden neben der aktuellen Bevölkerungszahl diverse Faktoren wie durchschnittliche Fruchtbarkeit, durchschnittliche Sterblichkeit und Wanderungen berücksichtigt (siehe [21]).

Die Beschreibung der Größe einer Population ist insofern ein dankbares Unterfangen, weil sie sich, im Gegensatz zu vielen anderen Größen der Sozialwissenschaft, einfach und eindeutig bestimmen lässt. Die moderne Sozialwissenschaft versucht jedoch auch, komplexe gesellschaftliche Ereignisse erklären zu können, wie zum Beispiel das Auftreten von Staus auf Autobahnen oder dichtes Gedränge in Fußgängerzonen, die Entstehung von Unruhen in einer Gesellschaft, die Ausbreitung von revolutionären Ideen und Bürgerinitiativen und schließlich die Bereitschaft von Bürgern, gewaltsam für eine Sache bzw. eine Änderung einzutreten. Schon in dem Wort „Gruppendynamik“ verweist das nominale Grundwort auf die Idee der Dynamik. Wie können Ideen und Wünsche, ausgehend von einzelnen Personen und Individuen, zu einem kollektiven Interesse werden? Diese spannende Frage beschäftigt die Wissenschaftler und führt zu Modellen, mit denen sich zumindest Ansatzweise erklären lässt, wie sich ein soziales System verhält.

Während sich Hartmut Willke noch mit den qualitativen Merkmalen und Dimensionen der Komplexität beschäftigt, sind für die Simulation und Modellierung vor allem die quantifizierten Eigenschaften bedeutend. Die wissenschaftliche Teildisziplin, die sich in diesem Zusammenhang gebildet hat, bezeichnet man auch als mathematische Soziologie. Diese wurde stark von der Synergetik geprägt, da diese wesentliche mathematische Einsichten über Systeme gewinnen konnte. Innerhalb der Soziologie prägten vor allem die Wissenschaftler Dirk Helbing und Wolfgang Weidlich den Begriff der *quantitativen Soziodynamik* und beschäftigten sich mit den Phänomenen der Selbstorganisation, kollektiven Verhaltensmuster und sozialen Strukturen [53].

4.3.1. Quantitative Soziodynamik

Dieses Forschungsgebiet beschäftigt sich mit der Beschreibung von sozialen Phänomenen und zwar in einem Bereich, mit dem sich Soziologen bislang weniger auseinandergesetzt haben: die Mathematisierung sozialer Zusammenhänge. Nicht zuletzt wegen der hohen Komplexität des Forschungsgegenstands hielt man lange Zeit eine mathematische Formulierung als praktisch nicht durchführbar. Bisherige Konzepte konnten die Phänomene nicht beschreiben, weil sie zu einfach waren. Leistungsfähige Methoden erlauben jedoch

eine Beschreibung der Dynamik, der Selbstorganisations- und Strukturbildungsprozesse und der Nichtgleichgewichtsphänomene [53]. Dabei bedient man sich insbesondere an den Konzepten der statistischen Physik und der nichtlinearen Dynamik. Insbesondere Forschungsergebnisse aus der Synergetik, Chaostheorie, Katastrophentheorie, Theorie der Phasenübergänge und kritische Phänomene.

Im Folgenden werden Modelle angeführt, die laut Helbing und Weidlich, „im Zusammenhang mit der quantitativen Soziodynamik eine besondere Rolle spielen“ [53, S. 115].

Das logistische Modell

Für theoretische Wachstumsprozesse, ohne einen natürlichen Feind und unbeschränkte Ressourcen, scheint sich das exponentielle Wachstum empirisch zu bestätigen (siehe oben Bevölkerungsgesetz nach Malthus). In der Realität bewährt sich das logistische Modell nach Verhulst hingegen besser. Dieses hat lediglich zu Beginn ein exponentielles Wachstum, wobei die Wachstumsrate im zeitlichen Verlauf immer geringer wird, bis sie sich das Wachstum schließlich einem asymptotischen Grenzwert annähert, an dem kein signifikantes Wachstum mehr stattfindet. Chemische Reaktionsraten, Wachstum von Tier- und Pflanzenpopulationen, Vergrößerung von Städten und die Ausbreitung von Informationen kann gut beschrieben werden.

Diffusionsmodelle

Die Physik beschäftigt sich schon lange mit Ausbreitungsprozessen. Dabei wird versucht, die Durchmischung von Stoffen unterschiedlicher Konzentration zu beschreiben. Während die Physik versucht, die Ausbreitung von Atomen und Molekülen auf Basis von ungerichteten Zufallsbewegungen und der thermischen Energie zu erfassen, interessiert sich die Soziologie in erster Linie für die Ausbreitung von Information, Gerüchten, Technologien, Waren oder Krankheiten. Steht die räumliche Ausbreitung im Vordergrund, so findet man tatsächlich Ähnlichkeiten zu Diffusionsprozessen in der Physik.

Ungleich schwieriger wird dies allerdings bei inhomogenen Bedingungen, wie zum Beispiel ungleichmäßig verteilte Bevölkerung eines Landes oder Ausbreitung von Information durch Massenmedien. Auch neue Technologien des Internets, Plattformen wie Facebook und Twitter, haben massiven Einfluss auf die Art und Weise, wie sich Informationen und Gerüchte in der Gesellschaft verbreiten. Die Geschwindigkeit und Reichweite, mit der sich Nachrichten ausbreiten, hat in den letzten Jahren zugenommen. Auch die Tatsache, dass praktisch jeder Nutzer selbst zu einer Quelle von Information werden kann, stellt neue Herausforderungen an die Modellierung und lässt bisherige, an die Physik angelehnten Modelle eher fragwürdig erscheinen.

Das Gravity-Modell

Um Austauschprozesse von zum Beispiel Waren oder Umzüge von Bürgern zu beschreiben, bedient man sich der Vorstellung des Gravitationsgesetzes. Dies hängt zum einen von der Masse und zum anderen von der Entfernung der beteiligten Körper ab. Die Masse stellt die Größe der Quelle dar, also etwa die Anzahl der Waren in einem Lager oder die Anzahl der Bürger in einer Stadt und die Entfernung entspricht der räumlichen Nähe der Senke zur Quelle. Die Austauschfähigkeit ist damit umgekehrt proportional zur Entfernung, das heißt je näher die Senke an der Quelle ist desto höher ist die Übergangsrate, sie ist jedoch direkt proportional zur Größe der Quelle. Es liegt hier die Vorstellung zugrunde, dass die Transaktionskosten mit der Entfernung steigen, die Anzahl der in Frage kommenden Austauschgegenstände mit der Größe jedoch zunehmen. Diese Methode ermöglicht auch eine Modellierung von Wettbewerbsverhalten zwischen Unternehmen. Die Konkurrenz zweier Unternehmen ist nicht unerheblich von deren geografischer Entfernung abhängig (siehe [16]).

Die Spieltheorie

Die Spieltheorie ist im Gegensatz zu den bisherigen Ansätzen in der Lage, kompliziertere Phänomene zu beschreiben und wie unter Abschnitt 7.3.3 näher beschrieben. Während es andere Modelle nicht oder nur eingeschränkt zulassen, Konkurrenz zwischen mehreren Individuen zu beschreiben, ist die Spieltheorie dazu in der Lage. Anwendungen dazu finden sich in Biologie, Ökonomie, aber auch in der Verhaltensforschung. Dem Individuum werden dabei mehrere Eigenschaften axiomatisch zugewiesen. So wird zum Beispiel von einem nutzenmaximierenden Handeln ausgegangen. Interessant sind vor allem iterierende Spiele, also wenn die Akteure viele Runden gegeneinander spielen und somit eine Kooperation sinnvoll wäre.

Spieldynamische Gleichungen sind Differentialgleichungen, die es ermöglichen, zu jedem beliebigen Zeitpunkt t eine Entscheidung zu berechnen. Während Spiele in der Regel zeitdiskret ablaufen, stellt dies eine Möglichkeit dar, in der Zeit kontinuierlich ablaufende Entscheidungen zu berechnen. Besonders eindrucksvoll kann damit zum Beispiel das Verhalten von Fußgängern in Fußgängerzonen simuliert werden. Der Erfolg des eigenen Verhaltens ist maßgeblich davon abhängig, wie sich die Menschen in der Umgebung verhalten. Man geht beispielsweise davon aus, dass man die Möglichkeit hat, nach rechts oder nach links auszuweichen, falls man auf einen anderen Menschen trifft. Mit der Zeit zeigt sich, dass es für alle beteiligten besser ist, entweder immer nach rechts, oder immer nach links auszuweichen. Es bilden sich in den Simulationen tatsächlich Ströme, die entweder in die eine oder andere Richtung verlaufen und ein Weiterkommen deutlich erleichtern, eine Art Verhaltenskonvention. Ob sich dabei der übliche Rechtsverkehr einstellt, ist zu Beginn

nicht absehbar. Es handelt sich also um ein deutliches Anzeichen für soziale Selbstorganisation.

Entscheidungsmodelle

Entscheidungsprozesse von Individuen sind in der Regel sehr kompliziert ablaufende Prozesse. Es handelt sich um Situationen, in denen der Entscheidungsträger aus einer Reihe von möglichen Optionen eine auswählt. Dieses Auswählen wird oft von Argumenten, Stimmungslagen und Nutzen der jeweiligen Optionen beeinflusst. Bei den Entscheidungsmodellen versucht man weniger die Einflüsse zu verstehen, sondern ist im Wesentlichen nur an den Resultaten interessiert. Letztlich wird auch hier dem Entscheidenden unterstellt, sich für die Option zu entscheiden, welche ihm den größten Nutzen liefert. Dieser ist oft nicht eindeutig zu bestimmen, weswegen man die Resultate mit einer Wahrscheinlichkeit versieht. Je größer allerdings die Kenntnisse über den Nutzen sind, desto größer ist auch die Wahrscheinlichkeit für die jeweilige Handlungsalternative.

Das Multinomial-Logit-Modell wird oft angewendet, wenn viele Handlungsoptionen zur Auswahl stehen. Aus einer Menge von unabhängigen Faktoren wird dann versucht, eine Verteilung der Entscheidungsergebnisse zu bestimmen und so Entscheidungen von Gruppen modellieren zu können. Wenn man dazu noch die Dynamik betrachtet, also eine Abfolge von Entscheidungen, die voneinander abhängig sind, wird dieses Modell allerdings schon problematisch, weil sich verstärkende Fehler nicht mehr ausgeschlossen werden können.

Methodentransfer statt Modelltransfer: Erkenntnisse aus der statistischen Physik und nichtlinearen Dynamik

Helbing und Weidlich weisen darauf hin, dass die großen Probleme bei der mathematischen Modellierung sozialer Phänomene aufgrund der dort vorhandenen Komplexität entstehen (vgl. [53]). Während diese Probleme eine Mathematisierung bisher als unmöglich erscheinen haben lassen, können Erkenntnisse aus der statistischen Physik und aus dem Gebiet der nichtlinearen Dynamik, insbesondere der Chaostheorie, möglicherweise erfolgreiche Beschreibungen liefern. Es wird ausdrücklich darauf hingewiesen, dass es sich hierbei nicht um einen Modelltransfer in einem „überholten physikalischen Ansatz“ handelt, sondern um einen sogenannten Methodentransfer [53, S. 122]. Ein Modelltransfer würde voraussetzen, dass die betrachteten Systeme gleiche Eigenschaften besitzen, dies ist jedoch in der Realität nicht der Fall.

Statische Physik und stochastische Methoden Die statische Physik beschäftigt sich mit Systemen mit einer großen Anzahl von Teilsystemen. Dabei sind vor allem Systeme

me von Bedeutung, in denen eine Aussage über das Gesamtsystem getroffen wird oder über das Verhalten Teilsysteme eine Unsicherheit besteht, die sich durch unvollständige Information ausdrückt. Die zeitliche Veränderung einzelner Systeme ist nicht so sehr Gegenstand der Betrachtung. Was die Wissenschaft interessiert, ist vielmehr die Verteilung der Zustände des Gesamtsystems.

Die mathematische Methode der Mastergleichung ist von besonderer Bedeutung. Es handelt sich um eine Differentialgleichung, die den zeitlichen Verlauf der Wahrscheinlichkeiten eines Systems beschreibt. Ausgehend von der Information, wie viele Elemente pro Zeiteinheit in einen anderen möglichen Zustand übergehen, kann eine Zustandsverteilung vorausberechnet werden. Für einzelne Element kann so keine Aussage mehr getroffen werden, für das gesamte Ensemble hingegen sehr wohl. Während sich die Mastergleichung gut für die Beschreibung von sozialen Systemen eignet, bleibt das Problem der Bestimmung von Übergangsraten. Man bestimmt innerhalb eines sozialen Systems verschiedene Verhaltenstypen, die jeweils eine Subpopulation darstellen, und weist ihnen die gleiche Wahrscheinlichkeiten zu. Soziale Phänomenen wie Meinungsbildung, Migration oder die Entstehung von Siedlungsstrukturen können damit erklärt werden [53, S. 125]. Für Weidlich existieren drei wesentliche Schritte bei der Modellierung, die Auswahl von Makrovariablen (Alter, Geschlecht, usw.), die Festlegung der Übergangsraten und letztlich die Aufstellung der Mastergleichung für die Makrovariablen auf probabilistischer Ebene (siehe [127, 128]).

Nichtlineare Dynamik Während lineare Systeme in der Natur nur selten und selbst dann nur in isolierten und kleinen Bereichen vorzufinden sind, wie zum Beispiel elektrotechnische Bauteile wie Widerstände, Kondensatoren und Transistoren in einem festgelegten Spannungs- und Strombereich (der sog. Arbeitspunkt), idealisierte Bewegung von Körpern, usw. eignen sich nichtlineare Systeme besser zur Beschreibung von realen Systemen. Die Ausgangsgröße ist nicht proportional zu den Eingangsgrößen. Das Verhalten ist nicht mehr nur die Summe der Überlagerungen der einzelnen Elemente. Rückkopplungseffekte, nichtlineare Kennlinien und zeitabhängige Prozesse tragen dazu bei, dass das — mathematisch ausgedrückt — Superpositionsprinzip nicht länger gültig ist.

Das sogenannte Versklavungsprinzip bezeichnet den Umstand, dass es in einem System oft wenige Variablen gibt, die den Wert aller anderen Variablen bestimmen. Um diese bestimmen zu können, unterteilt man diese in drei Klassen, die jeweils andere Zeitskalen berücksichtigen: Variablen, deren Änderungsgeschwindigkeit, mit der des Systems übereinstimmt (sog. Ordnungsparameter), Variablen die sich deutlich schneller ändern (sog. Fluktuationen) und Variablen die sich viel langsamer

ändern (sog. quasikonstante Parameter). Die Ordnungsparameter bestimmen die viel schneller ablaufenden Fluktuationen, sie werden von ihnen „versklavt“. Hermann Haken leitet daraus ab, dass von den unzähligen Systemvariablen, nur wenige für die „Beschreibung des Wesentlichen“ [53, S. 125] ausreichend seien (siehe [46]).

Abhängig von den Ausgangsparametern ist auch das Ergebnis nichtlinearer Gleichungen nicht notwendigerweise eindeutig. Bereits kleine Änderungen in den Parametern können zu Instabilität führen und aus vormals stationären Zuständen heraus in Oszillation oder sogar ins Chaos führen (siehe [46]). Dieses sehr komplexe dynamische Verhalten ist vermutlich die Ursache für hohe Sensitivität und Unvorhersagbarkeit komplexer sozialer Prozesse.

Überschreiten die Ordnungsparameter kritische Punkte, so entstehen spontan makroskopische Ordnungsstrukturen. Man spricht hier von der Emergenz neuer Systemeigenschaften [88, S. 41]. Diese lässt sich in zahlreichen chemischen und physikalischen Experimenten beobachten, so zum Beispiel dem Rayleigh-Bénard-Experiment (siehe u.a. [105, S. 23] und [91, S. 55]). Auch auf sozialer Ebene lassen sich diese Phänomene unter Berücksichtigung von Tendenzfaktoren bei Modellierungen von Bevölkerungsverteilungen beobachten (siehe [53, S. 131]).

4.3.2. Simulation sozialer Systeme

Zelluläre Automaten

Eine wichtige Fähigkeit lebender Systeme ist die Fähigkeit, sich selbst zu reproduzieren. Der österreichisch-ungarische, später amerikanische Mathematiker John von Neumann konnte für zelluläre Automaten beweisen, dass eine Organisationsstruktur, welche eine vollständige Beschreibung von sich selbst enthält, diese Fähigkeit besitzt [88, S. 59]. Ein zellulärer Automat ist ein System, welches über eine räumliche Ausdehnung verfügt. Jede Zelle des Automaten befindet sich in einem bestimmten Zustand, in der Regel ist dies entweder 1 oder 0. Zudem existiert eine Überföhrungsfunktion und eine Nachbarschaft. Die Simulation läuft dann zeit-diskret ab, wobei in jedem Schritt die Überföhrungsfunktion auf die Zellen und die Nachbarschaft angewendet wird. Der neue Zustand einer Zelle hängt somit von den Zuständen der benachbarten Zellen ab. Sie eignen sich hervorragend, um bestimmte chemische Experimente zu beschreiben oder biologische Formen und Muster zu erklären (siehe [25] und [91, S. 217]).

Berühmt wurde vor allem Conways *Game of Life*. Dabei handelt es sich um einen zweidimensionalen zellulären Automaten, in dem der Zustand jeder Zelle von den acht benachbarten Zellen abhängt. Alle Zellen werden in jedem Schritt gleichzeitig berechnet. Dabei gibt es für eine Zelle genau zwei Zustände, „lebendig“ oder „tot“ und einen Satz

von Regeln. Wird eine Zelle von mehr als drei oder weniger als zwei lebenden Zellen benachbart, so stirbt diese („Überbevölkerung“ bzw. „Einsamkeit“). Hat eine Zelle genau drei Nachbarn, so entsteht eine neue lebende Zelle („Geburt“) und hat sie genau zwei bzw. vier Nachbarn so bleibt ihr Zustand unverändert. Mit dieser einfachen Methode war eine Möglichkeit gegeben, das Wachstum, den Verlauf und auch das Sterben einer Population zu beschreiben. Computersimulationen lieferten überraschende Ergebnisse über den vollständigen Tod einer Population über oszillierende Attraktoren bis hin zu stabilen Lösungen ohne weitere Veränderungen.

Die Idee zellulärer Automaten brachte eine ganze Reihe von tiefgehenden Einsichten in die Berechenbarkeit der Natur. Stephen Wolfram schlug für die Automaten vier Klassen vor, die er aufgrund von Computersimulation ausmachen konnte (siehe [63, S. 12] und [88, S. 61]). Automaten der Klasse 1 gehen bereits nach wenigen Schritten in stabile Endzustände über, sie erinnern dabei an homogene Zustände wie sie auch in der Natur vorkommen. Ein Beispiel wären Flüssigkeiten unterhalb des Gefrierpunkts. Klasse-2-Automaten bilden periodische, wiederkehrende Muster aus, wie die Musterung bei Tierfellen. Klasse-3-Automaten liefern chaotische Muster, die augenscheinlich keine Ordnung besitzen. Bei Oberflächen von Muschelschalen kann man solche Muster in der Natur finden (siehe [25]). Schließlich existieren noch Automaten der Klasse 4, die hochgradig komplexe zusammenhängende Muster ausbilden. Für die ersten beiden Klassen von Automaten sind die Anfangsbedingungen zu einem großen Teil unerheblich, während dies von den beiden Klassen 3 und 4 nicht mehr behauptet werden kann. Kleinste Änderungen der Ausgangslage können hier sehr große Änderungen im Systemverlauf bewirken. Die Muster lassen sich nicht über längere Zeit voraussagen und die zeitliche Entwicklung ist zeitlich nicht reversibel. Somit können die Anfangsbedingungen aus der Beobachtung nie vollständig rekonstruiert werden und die Berechenbarkeit der Prozesse in der Natur bleibt weiterhin verborgen. Klaus Mainzer fasst dies folgendermaßen zusammen: „Selbst wenn wir alle Mikrogesetze von Elementarteilchen kennen und diese berechnen können, so ist damit noch nicht die Berechenbarkeit aller Prozesse der Natur garantiert.“ [88, S. 62]

Multi-Agenten Systeme

Multi-Agenten Systeme können als eine Weiterentwicklung von zellulären Automaten verstanden werden. Einfache zelluläre Automaten stellen eine zustandsbasierte Simulation dar, die zeitlich und räumlich diskret abläuft [35]. Ein Multi-Agenten-System (MAS) hingegen ist ein umfangreicheres Konzept, das letztlich ein Menge von autonomen Agenten (Subsystemen) darstellt, welche miteinander in Beziehung stehen. Es existieren zahlreiche Definitionen, was ein Agent sein kann und was diesen kennzeichnet. Eine sehr gebräuchliche Definition stammt von Franklin und Graeser: „An autonomous agent is a

system situated within and a part of an environment that senses that environment and acts on it, over time, in pursuit of its own agenda and so as to effect what it senses in the future.“ [37]. Entscheidend ist also die Fähigkeit, innerhalb einer Umgebung zu agieren und auf Umwelteinflüsse reagieren zu können. Deshalb ergeben sich für Agenten mehrere charakteristische Eigenschaften [37, 66, 74].

Hier eine Auswahl wesentlicher Eigenschaften:

Situiert Ein Agent befindet sich immer in einer Umgebung und muss sich mit Änderungen in dieser zurechtfinden. Er hat in der Regel die Möglichkeit, die Umwelt über Sensoren zu erfassen und sie mit Aktoren zu verändern.

Reaktiv Ein Agent ist flexibel in seinem Verhalten. Als Ergebnis von Umwelteinflüssen kann er sein eigenes Verhalten ändern und anpassen. Er kann also situationsabhängige Entscheidungen treffen.

Autonom Der Agent bestimmt seine Aktionen selbst. Er hat die Möglichkeit, aus der Vergangenheit zu lernen. Man unterscheidet dabei, ob der Agent seine eigenes Verhalten programmieren oder ob er lediglich die Ausführung sein eigenes Verhaltens steuern kann. Im ersten Fall spricht man von Verhaltensautonomie und im letzten Fall von Kontrollautonomie (siehe [74, S. 15]).

Damit ist der Agent charakterisiert, das gesamte System hingegen erfüllt andere Eigenschaften. Innerhalb des Systems kommunizieren und interagieren die Agenten. Üblicherweise ist in einem System mehr als ein Agent enthalten. Damit kann man diesem folgende Eigenschaften zuordnen [66, S. 17]:

- Die Agenten besitzen kein umfassendes Wissen über ihre Umwelt. Man spricht von sogenannter unvollständiger Information.
- Es gibt keine globale Steuereinheit.
- Daten werden dezentral, das bedeutet bei jedem Agenten lokal gehalten.
- Die Berechnung und damit das Verhalten jedes Agenten läuft asynchron, also parallel und ohne Abstimmung, ab.

Allgemein fasst man das Forschungsgebiet unter dem Begriff der *Distributed Artificial Intelligence (DAI)* zusammen. Man unterscheidet dabei zwischen *Distributed Problem Solving (DPS)* und *Multi-Agent Systems (MAS)* [66, S. 17]. Während sich DPS damit beschäftigt, wie ein bestimmtes Problem bzw. eine Aufgabe durch ein System von Agenten gelöst werden kann, versucht man im Bereich der MAS vor allem das Verhalten der Agenten bei der Problemlösung zu verstehen. Die Fragen, die von großer Bedeutung sind, zielen vor allem

auf das Systemdesign ab. Wie kann und soll ein System beschrieben werden, das aus intelligenten Agenten besteht? Wie und wann können Agenten miteinander kommunizieren? Wie kann man sicherstellen, dass Agenten nicht-lokale Effekte berücksichtigen, schadhafte Aktionen vermeiden und so zu kohärentem Verhalten überhaupt erst in der Lage sind?

Die Fragen sind eng miteinander verknüpft und lassen sich nicht getrennt voneinander beantworten. Die Modellierung und Beschreibung von Agenten beeinflusst die Art und Weise der Kommunikation und diese wiederum hat Auswirkungen auf das kohärente Verhalten und somit auf die kollektive Problemlösungskompetenz.

Mittlerweile existieren zahlreiche Anwendungen und Softwarepakete, die eine Simulation und Modellierung erlauben. Dabei sind in unterschiedlichen Forschungsgebieten unterschiedliche Werkzeuge entstanden, die sich dort mehr oder weniger etabliert haben (siehe [66]). In der Industrie haben sich vor allem in den Bereichen Produktion, Prozesssteuerung, Telekommunikation, Luftraumüberwachung, Transport und Logistik Einsatzgebiete ergeben (siehe [67]). Kommerzielle Anwendungen wie die Informationsverwaltung und -generierung, aber auch elektronische Märkte und Prozessmanagement und -optimierung setzen vermehrt auf Multi-Agent-Systeme um besseren Einblick in das Verhalten zu gewinnen und effektivere Strategien daraus ableiten zu können (siehe [65]). Auch im medizinischen Umfeld, zum Beispiel der Intensivstation oder der Vorsorgeuntersuchung bei Krankheiten haben sich Anwendungsfälle für Multi-Agenten-Systeme ergeben (siehe [56] und [77]).

SeSAm: Shell für simulierte Agentensysteme

Die Abkürzung SeSAm steht für Shell für simulierte Agentensysteme und ist ein Werkzeug zur Simulation komplexer Systeme. Zunächst wurde es vor allem zur Modellierung und Simulation von biologischen Systemen konzipiert, mittlerweile unterstützt es jedoch auch Anwendungsfälle in Logistik, Produktion, Verkehr, Fußgängerzonen, Gesundheitsvorsorge und Stadtplanung⁴. Die Modellierung wird durch eine vollständige graphische Oberfläche unterstützt und ist komplett in Java umgesetzt. Eine Menge an Funktionen ist für die einzelnen Agenten bereits vorhanden. Es ist jedoch auch möglich, diese durch eigene Funktionen zu ergänzen.

⁴<http://www.simsesam.de/>, abgerufen am 9. Juli 2013

5. Biologie

5.1. Historische Entwicklung

Die Frage nach den Grundlagen des menschlichen Lebens beschäftigt den Menschen schon seit Jahrtausenden. Bereits bei den frühen Philosophen finden sich Aufzeichnungen und Spekulationen darüber, was die Grundprinzipien des Lebens sind.

Entscheidend war der Übergang von der Mythologie zur Naturphilosophie und den ersten Naturphilosophen. Während die Mythologie dadurch gekennzeichnet ist, dass Götter und Dämonen in den Erklärungsmodellen einen Platz haben, versucht man in der Naturphilosophie durch Beobachtung der Natur Erklärungen, Ursachen und allgemeine Prinzipien zu finden. Aristoteles schreibt über Thales von Milet, ein Naturphilosoph und einer der ersten Philosophen des Abendlandes, dass für diesen Wasser der Urgrund aller Dinge sei. Andere Naturphilosophen, vor allem Empedokles, entwickeln diese Art des Denkens weiter und versuchen, das Leben zu erklären, indem sie es als eine Kombination aus den Elementen Wasser, Luft, Feuer und Erde verstanden und Transformationen erlauben [91, S. 88]. Für Demokrit besteht die Welt einzig und alleine aus Atomen. Diese sind die kleinsten und unteilbaren Einheiten, aus denen die gesamte Natur besteht. Auch die Existenz einer Seele lässt sich seiner Meinung nach auf Atome zurückführen. Diese Position wird von nachfolgenden Epochen als atomistischer Materialismus bezeichnet werden und stellt eine sehr frühe Methode des Reduktionismus des Lebens auf kleinste Bausteine dar. Auch die Idee Platons, die Grundformen der Natur auf geometrische Körper zurückzuführen, stellt einen reduktionistischen Erklärungsversuch dar. Platon wird somit zu einem Mitbegründer des mathematischen Atomismus [90, S. 67].

Aristoteles hingegen lehnt die Beschreibung der Natur in Form eines atomistischen Reduktionismus stets ab. Er weist darauf hin, dass erst die Anordnung und das Verhältnis der einzelnen Teile zum Ganzen das eigentliche Prinzip der Naturphilosophie sein sollte. „Man muß aber davon ausgehen, daß jemand, der sich über einen (Bestand-)Teil oder Ausrüstungsgegenstand von irgendetwas unterhält, nicht dessen Material im Sinn hat und nicht um seinetwillen spricht, sondern wegen dessen ganzer Gestalt, (...); ebenso muss man davon ausgehen, daß der Naturforscher von der Zusammensetzung und dem Gesamtwesen spricht, aber nicht von denjenigen Dingen, die niemals von ihrer Substanz abgetrennt vorkommen.“ [3, S. 30]

Aristoteles setzt sich mit der Natur auch in praktischen Tätigkeiten auseinander. Er untersucht und beobachtet zahlreiche Tiere und Pflanzen und konnte Merkmale ausmachen, um diese zu unterscheiden und in hierarchischen Beziehungen einzuordnen. Er unterscheidet beispielsweise Tiere nach deren Lebensweise (Nutztier, Wildtier, Wassertier) oder Pflanzen nach deren Wuchsform (Kraut, Staude, Strauch, Baum). Einige der von ihm aufgestellten Merkmale waren sehr einflussreich und sind heute noch Bestandteil der wissenschaftlichen Systematik in der Biologie.

Zentral bei Aristoteles ist auch die Unterscheidung zwischen Lebendem und Artefakten. Während sich Leben dadurch charakterisiert, dass es eine Veränderung aus sich selbst heraus entwickeln kann, ist dies bei einem Artefakt, zum Beispiel einem Stein, nicht der Fall. Hier kann die Veränderung lediglich von außerhalb erfolgen. Leben ist also gekennzeichnet durch das Vermögen, die eigenen Ziele in sich zu haben und aus sich selbst heraus entwickeln zu können. Man bezeichnet dies als Entelechie [114]. Damit ist auch die Vorstellung verbunden, dass jedes Lebewesen ein Ziel besitzt. Diese Zielorientierung ist besser bekannt als Teleologie und kennzeichnend für die aristotelische Sichtweise. Die Entelechie kann auch als ein „final wirkendes Prinzip“ [132, S. 21] angesehen werden, also eine Ursache, die sich aus der Zweckbestimmtheit ergibt, die allen Phänomene der Welt zugrunde liegt [132]. Dieses Verständnis wird in der zweiten Hälfte des 18. Jahrhunderts im Vitalismus aufgegriffen und weiterentwickelt.

In der Renaissance erfahren die Philosophen und Naturwissenschaftler einen Umbruch in der Denk- und Arbeitsweise. Die Mathematik wird zu der Beschreibungssprache *par excellence* für beobachtbare Phänomene in der Natur. Newton veröffentlicht 1687 sein bedeutendes Werk „*Philosophiae naturalis principia mathematica*“¹. Mit Blick auf die vorausgegangenen Ideen und Anschauungen der früheren Philosophen betont er im Vorwort: „Wir aber, die wir nicht die Kunst, sondern die wir die Wissenschaft zu Rathe ziehen, (...) stellen daher unsere Betrachtungen als Mathematische Principien der Naturlehre auf.“ [104, S. 2]

Eine weitverbreitete Anschauung zu damaliger Zeit ist das mechanistische Weltbild. Besonders betont wird diese Anschauung von René Descartes. Dieser lehnt das teleologische Weltbild des Aristoteles ab und beschreibt ein kausalistisches. Dieses Weltbild prägt auch das physiologische Verständnis über organische Vorgänge und Abläufe. Organismen werden auf Mechanik reduziert und deren Körper als ein mechanischer Apparat betrachtet. Während Descartes dem Menschen noch eine unsterbliche Seele, die *res cogitans*, zuschreibt, spricht La Mettrie diese dem Menschen ab. Er hat ein konsequent materialistisch geprägtes Bild vom Menschen. In seinem Werk „*L'Homme Machine*“² kommt er 1748 zu folgendem Ergebnis: „Ziehen wir also die kühne Schlußfolgerung, daß der Mensch eine Maschine ist und daß es im ganzen Universum nur eine einzige Substanz — in unter-

¹ dt. „Mathematische Prinzipien der Naturphilosophie“

² dt. „Die Maschine Mensch“

schiedlicher Gestalt — gibt.“ [79, S. 137]

Im 18. Jahrhundert war es Immanuel Kant, der die Reduktion der Biologie im Sinne einer Newtonschen Mechanik kritisierte: „Ein organisiertes Wesen ist also nicht bloß Maschine: denn die hat lediglich bewegende Kraft; sondern sie besitzt in sich bildende Kraft, (...): also eine sich fortpflanzende (...) Kraft, welche durch das Bewegungsvermögen allein (den Mechanismus) nicht erklärt werden kann.“ [69, §67]. Er weist jedoch auch die Aristotelische Vorstellung und einer Zielgerichtetheit in die Schranken und schreibt, dass es keine hinreichende Berechtigung gebe, eine äußere Zweckmäßigkeit der Naturdinge anzunehmen. Er sieht die Lösung in einem organisierten und sich selbst organisierenden Wesen [69, §67].

Ein großer Rückschlag für den Vitalismus ist die synthetische Herstellung von Harnstoff durch Friedrich Wöhler im Jahre 1828. Die Erzeugung von organischen Substanzen, so nimmt man bis dato an, ist ausschließlich Lebewesen vorenthalten. Denn dazu benötigt man Lebenskraft, die *vis vitalis*. Durch ein chemisches Verfahren mit anorganischen Ausgangssubstanzen organische herzustellen ist für die damalige Ausprägung des Vitalismus nicht ohne Konsequenzen. Auch das Bemühen von Louis Pasteur um eine Erklärung für die spontane Entstehung von Leben blieb vergebens. Pasteur glaubte an eine kosmische asymmetrische Kraft, er war dahingehend ein Vitalist. Die chemischen Fortschritte ließen dem Vitalismus immer weniger Raum. Die Konsequenz war, dass in der Chemie die Lebenskraft als Erklärungshypothese praktisch keine Bedeutung mehr spielte.

Beeinflusst von dem französischen Biologen Jean-Baptiste de Lamarck und dessen Theorie über die Entwicklung von Lebewesen, insbesondere von der Vererbung erworbener Eigenschaften, entwickelte Charles Darwin eine Theorie, in denen die Konzepte von Variation und Selektion von zentraler Bedeutung sind. Während Lamarck noch eine Vervollkommnung der Arten durch Vererbung gegeben sah, verzichtete Darwin vollständig auf ein teleologisches Konzept. Die Variation äußert sich in Form von kleinen Änderungen einer Population zwischen Generationen und ermöglicht erst die Artenvielfalt in der Natur: „(...) such modifications will add to the beautiful and harmonious diversity of nature“ [27, S. 81]. Die Selektion, auch bekannt als natürliche Auslese, beschreibt die Konkurrenz der Arten und Individuen. Im Ringen um das Dasein kann die am besten angepasste Art diesen Kampf für sich entscheiden und wird überleben: „The (...) beings on the face of this earth are enabled to struggle with each other, and the best adapted to survive“ [27, S. 81]. Herbert Spencer prägte 1864, also fünf Jahre nach der Erscheinung der ersten Auflage von Darwins „Entstehung der Arten“, den Ausdruck „Survival of the Fittest“ und brachte damit eine der zentralen These der Darwinschen Evolutionstheorie auf den Punkt. Zwar konnte Darwin durch die Beobachtungen der Natur seine Hypothesen der Variation und der natürlichen Selektion aufstellen, eine Beschreibung im Sinne von physikalischen Gesetzen oder mathematischen Formel lieferte er jedoch nicht [91].

Während das 19. Jahrhundert von der Idee der Evolution geprägt war, machte auch die Physik große Fortschritte. Besonders die Thermodynamik konnte entscheidende Erfolge verbuchen. Ausgehend von dem französischen Physiker Nicolas Léonard Sadi Carnot, der schon vermutete, dass Wärmeenergie in Kreisprozessen nicht verloren gehen kann und dem deutschen Arzt Robert Mayer, der eine erste Variante des Energieerhaltungssatzes aufstellte, konnte der deutsche Physiker Rudolf Clausius die Grundlagen für den zweiten Hauptsatz der Thermodynamik ausarbeiten. Er führte dabei einen Begriff ein, der in Zukunft von entscheidender Bedeutung sein sollte: die Entropie. Während Clausius darunter die nicht nutzbare Energiemenge zusammenfasste, die an die Umgebung abgegeben wird, interpretierte Ludwig Boltzmann, ein österreichischer Physiker und Philosoph, die Entropie als mikroskopische Größe. Zusammen mit James Clerk Maxwell und Josiah Willard Gibbs gilt er als der Mitbegründer der statistischen Mechanik. Seine berühmte Gleichung zur Beschreibung der statistischen Entropie $S = k_B \ln \Omega$ beschreibt die Entropie eines abgeschlossenen Systems, sie besitzt die Einheit: $\frac{J}{K}$ (Joule pro Kelvin). Ω , manchmal auch W , bezeichnet die Anzahl der Mikrozustände. Die Entropie ist abhängig vom Logarithmus der Anzahl der Zustände. Die Proportionalität ergibt sich durch die Boltzmann-Konstante k_B .

Boltzmann versuchte die Erkenntnisse der Thermodynamik auf die Entwicklung von Lebewesen, also auf die Evolution anzuwenden. Die größte Herausforderung war der zweite Hauptsatz der Thermodynamik: eine Beschreibung der Entwicklung der Entropie in abgeschlossenen Systemen. Die zentrale Aussage dabei lautet, dass Entropie in abgeschlossenen Systemen niemals abnehmen, sondern immer nur zunehmen bzw. konstant bleiben kann. Das auf den ersten Blick negative Ergebnis des zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik scheint zunächst unvereinbar mit dem Leben. Während Darwin eine artreiche, vielfältige Natur, die zunehmend komplexer und ausdifferenzierter wird, erklären konnte, scheint dies im direkten Widerspruch mit den Erkenntnissen der Thermodynamik zu stehen. Wie konnte es nun trotzdem zur Ausbildung von Struktur und Ordnung kommen? Warum nähert sich die Erde dem thermischen Gleichgewicht an, also dem Zustand höchster Entropie?

Boltzmann konnte eine Erklärung liefern, indem er die Sonne in seine Interpretation mitaufnahm. Während ein abgeschlossenes System notwendigerweise mit voranschreitender Zeit immer weniger Ordnung aufweist, ist es mit Hilfe der Sonnenenergie in der Lage, Ordnungen aufrechtzuerhalten und neue Strukturen zu entwickeln. Leben ist somit befähigt diesem Zerfall entgegenzuwirken. Die Konsequenzen der Thermodynamik stehen also weder im Widerspruch zum organischen Leben noch zur Darwinschen Evolutionstheorie. Wie lebendige Organismen jedoch zustande kommen, konnte Boltzmann mit der Thermodynamik allerdings auch nicht zufriedenstellend erklären. Zumal sich die Gültigkeit der Hauptsätze der Thermodynamik auf abgeschlossene Systeme beschränkt und die Erde durch die Sonne nicht länger ein isoliertes System ist.

Im 20. Jahrhundert löste die Quantenmechanik die Thermodynamik als Leitdisziplin der Physik ab. Durch Quantenmechanik, die große Erfolge in der Beschreibung physikalischer Phänomene verbuchen konnte, lag es nicht fern, einen physikalischen Reduktionismus anzunehmen, bei dem alle Erscheinungen letztlich auf Eigenschaften von Molekülen, Atomen und Elementarteilchen reduzierbar sind. Jedoch gab es auch Wissenschaftler, die die Idee von Aristoteles aufgriffen und für einen Vitalismus eintraten. Neben dem deutschen Biologen Hans Driesch, der ein zentraler Vertreter dieser Strömung war, zählte auch der englische Philosoph Alfred North Whitehead zu den Unterstützern des sogenannten Neovitalismus. „But even yet we have not exhausted the notion of creation which is essential to the understanding of nature. We must add yet another character to our description of life. This missing characteristic is 'aim'.“ [130, S. 152]

Im Verlauf des 20. Jahrhunderts wurde die Genetik zur Grundlage der modernen Biologie. Der Ausgangspunkt für die Entwicklung von Organismen sind dessen Gene. Darin sind, vereinfacht ausgedrückt, die biologischen Merkmale vorprogrammiert. Die Versuchung legte die Annahme nahe, dass damit die Entwicklung und die Eigenschaften von einfachen Organismen sowie von komplexen Lebewesen erklärbar sei. Es scheint jedoch nicht möglich zu sein, den Phänotyp, also die Menge aller Merkmale eines Organismus, durch seinen Genotypen, also den kompletten Satz seiner Gene, zu erklären. Marc Kirschner, ein Zellbiologe der Harvard Medical School, spricht von einem „molekularen Vitalismus“: „The genotype, however deeply we analyze it, cannot be predictive of the actual phenotype, but can only provide knowledge of the universe of possible phenotypes. Biological systems have evolved to restrict these phenotypes, and in self-organizing systems the phenotype might depend as much on external conditions and random events as the genome-encoded structure of the molecular components.“ [71, S. 87]. Die Bedeutung der Gene und der DNS betonend, stellt Kirschner die Frage, ob die Erkenntnisse der Biologie einen Vitalisten des 20. Jahrhunderts überhaupt überzeugen könnten. Es werden riesige Datenbestände genetischer Fingerabdrücke und diverser Stoffwechselprozesse gesammelt, die ständig weiter wachsen. Die genaue Funktionsweise des kleinsten Bausteins der Organismen, nämlich der Zelle, und die Entwicklung eines Embryos kann dadurch aber nicht erklärt werden. Kirschner betont, dass der Vitalismus mit zunehmender wissenschaftlicher Erkenntnis immer weiter verdrängt wurde, letzte Eigenschaften und Abläufe jedoch nicht durch die genetische Analyse von Proteinen begründbar sei. Es gehe vielmehr darum, die „vitalistischen Eigenschaften“³ von Molekülen, Zellen und Organismen zu untersuchen und zu verstehen.

Welche zukünftigen Positionen sich herausbilden werden bleibt abzuwarten. Eine Entscheidung zu Gunsten des Reduktionismus scheint aber entfernt zu sein. Der Raum, der

³engl. „vitalistic properties“ [71, S. 87]

nicht vom Reduktionismus eingenommen werden kann, wird immer Platz bieten für einen Vitalismus, einer Entelechie.

Dieser historische Exkurs zeigt den ständigen Wandel des Verständnisses von Biologie, Evolution und Leben. Das Selbstverständnis der jeweiligen Disziplin beeinflusst die Forschung und die methodische Arbeitsweise maßgeblich. Während Pasteur noch versuchte, durch das Aufkochen und Mischen diverser toter organischer Materie die Entstehung von organischem Leben zu beobachten, suchen Wissenschaftler heute nach DNS-Spuren, die den Grundbaustein jedes Organismus darstellen. Die Entstehung von Leben oder der Funktionen eines Lebewesens zu erklären, leisten die Ansätze jedoch nicht. Die Biologie hat früh erkannt, dass die Reduktion eines gesamten Organismus auf jede noch so genaue Beschreibung der Einzelteile nicht das Gesamtsystem beschreiben kann. Klaus Mainzer weist darauf hin, dass es bei linearen Systemen möglich wäre, sie als die Summe ihrer Einzelteile zu verstehen. Dies ist jedoch bei Zellen, Organen und Organismen nicht der Fall [89, S. 45]. Rupert Riedl betont, dass die Untersuchung des Gesamtsystems schon seit Beginn eine wesentliche Betätigungsfeld der Biologie war [115, S. 1]. Dieser Versuch, die biologischen System in ihrer Gesamtheit zu verstehen, ordnet man heutzutage dem Bereich der Systembiologie zu. Das Ziel dabei ist es, mithilfe des Wechselspiels zwischen Genomen, Proteom, Organellen, Organsystemen einen Abbildung zu erhalten, in dem die diversen Ebenen eines Organismus enthalten sind und dessen Funktionsweise erklären können. Eine mögliche Definition stammt von Ideker: „Systems biology does not investigate individual genes or proteins one at a time, as has been the highly successful mode of biology for the past 30 years. Rather, it investigates the behavior and relationships of all of the elements in a particular biological system while it is functioning.“ [62].

5.2. Biologische Systeme verstehen

Es muss geklärt werden, was es bedeutet ein biologisches System zu verstehen. Während man in der Geschichte immer wieder davon ausging, verstanden zu haben, welche Funktion dieses oder jenes Organ übernimmt, erkannte man bisher immer, dass man mit seinem Verständnis erst ganz am Anfang steht. Beispielsweise wurde in der Antike von vielen die Funktionsweise des Gehirns als Kühlanlage angegeben und das Herz als der Sitz von Emotionen und der Lebenskraft gedeutet. Während man erkannte, dass dies nicht zutreffend ist und das Gehirn die eigentliche Steuerzentrale des menschlichen Körpers ist, wurde zunehmend deutlich, wie wenig weit die wissenschaftliche Erkenntnis erst reicht. Zwar konnten immer wieder Fortschritte verzeichnet werden, die einen ersten Einblick in die Funktionsweise des Gehirns liefern, von richtigem Verstehen kann jedoch zum gegenwärtigen Zeitpunkt noch keine Rede sein (siehe Kapitel 6). Ein weiteres Beispiel aus dem Bereich der Medizin stellt die Diagnose und Therapie von Tumoren dar. Obwohl es

sich bei den Krebszellen um körpereigene Zellen handelt, die durch den Befall der Krankheit plötzlich umprogrammiert werden und eine ganz andere Aufgabe übernehmen, die unter Umständen schädlich ist, ist immer noch nicht restlos geklärt, wie es zu dieser Entartung kommen kann. Ganz zu schweigen davon, wie diese vermieden und effizient bzw. minimal invasiv behandelt werden kann. Beiden Problemem haftet das Problem an, welches mit dem Begriff *Verstehen* zu tun hat. Was bedeutet, es ein biologisches Problem zu *verstehen* und was beinhaltet dieses *Verstehen*?

Die Festlegung von Zielen, welche durch das Verstehen erreicht werden soll, ist notwendig bei der Erforschung des jeweiligen Systems. Für Hiroaki Kitano kann das Verstehen grundsätzlich nur holistisch geschehen, wie es die Systembiologie beabsichtigt und ist im Wesentlichen in vier Bereich gegliedert [73]:

Struktur des Systems Darunter versteht man die Netzeigenschaften des Systems. Welche Teile sind mit anderen Zellen verbunden und wie ist die Verbindung beschaffen? Die physiologischen Eigenschaften der Verbindungen stehen im Vordergrund. Diese werden intrazellulär, also innerhalb einer Zelle, aber auch in Zellverbänden untersucht.

Dynamik des Systems Das Verhalten eines Systems in Abhängigkeit der Zeit muss verstanden werden. Stoffwechselprozesse, Diffusionsvorgänge, Phasenräume und Bifurkationsdiagramme sollen erklären, wie sich ein System verhält und welche Zustände es in Zukunft einnehmen kann.

Kontrollmethoden Es müssen Mechanismen identifiziert bzw. entwickelt werden, mit denen ein gezielter Eingriff in den Systemzustand vorgenommen werden kann.

Designmethoden Um neue biologische Systeme entwerfen zu können, ist es notwendig, die Designprinzipien bestehender Systeme verstanden zu haben. Die Frage nach Entwurfsregeln steht hier im Vordergrund. Anstelle von blinder Versuch-und-Irrtum-Modellierung soll ein gezielter Entwurf nach dem Vorbild erfolgreicher Systeme ermöglicht werden.

Es ist ein unglaublicher Fortschritt, dass sich die Disziplin eingesteht, das Verstehen von Struktur und die Dynamik eines biologisches System reicht noch nicht aus, um dieses ganzheitlich zu erfassen. Zusätzlich ist der Entwurf von Kontroll- und Designmethoden notwendig, um behaupten zu können, man hätte ein umfassendes Verständnis über ein System. Hier zeigt sich ganz deutlich der Unterschied zu einem mechanischen Weltbild. Dieser Methodenentwurf würde mit dem Verstehen der Struktur und der Dynamik eines Systems zusammenfallen. Bei der reduktionistischen Analyse von Systemen, wie im Falle des mechanischen Weltbilds, muss im Wesentlichen nicht unterschieden werden zwischen

dem Entwurf von holistischen Kontrollmethoden und dem Verstehen der Struktur und der Dynamik des Systems.

5.3. Systembiologie

Das Bewusstsein, dass sich biologische Systeme nicht ohne Berücksichtigung komplexer Verhaltensweisen betrachten lassen, hat sich in der Biologie entwickelt. Eine ganzheitliche Betrachtung der Systeme ist erforderlich, um tiefere und detailliertere Einsichten in die Funktionsweise von Organismen aller Größenordnungen zu erhalten. Die systemische Sichtweise eignet in der Biologie ganz besonders, um das Verhalten besser beschreiben und verstehen zu können. Wissenschaftler heben dabei unterschiedliche Aspekte besonders hervor. Während Hiroaki Kitano vor allem die Struktur und die Dynamik von zellulären und organischen Funktionen betont [73], verortet Levchenko die aussagekräftigeren Fortschritte beim Verstehen von Kommunikation zwischen Einzelelementen, also den Austausch von Informationen und Signalen [81]. Eine Herausforderung ist neben der Identifikation von Funktionen, Verbindungen, Kommunikationsarten und -wege auch eine entsprechende Modellierung derselben. Insbesondere die Abbildung in digitale Rechenanlagen und Software wird immer wichtiger. Die Simulation ist zu einer wichtigen Methode der Biologie geworden. Stoffwechselprozesse, Ionentransport, pH-Regulierung, Zellzyklen uvm. werden zunächst mathematisch beschrieben und dann an Computern simuliert. Kitano weist auf die Bedeutung der Simulierbarkeit und Berechenbarkeit hin: „To understand complex biological systems requires the integration of experimental and computational research“ [72, S. 206].

Zur Beschreibungssprache selbst ließe sich einiges sagen (siehe Abschnitt 2.2). Diese ist keineswegs so eindeutig, wie man es vielleicht vermuten würde. Was sich beobachten lässt, ist ein Übergang von der Beschreibung eines Systems als eine Menge von statischen Zuständen zu dynamischeren Modellen.

Novère betont die Kluft, die in der Biologie zwischen der textuellen Beschreibung und der graphischen Repräsentation vorhanden ist. Er fordert, in Analogie zu Schaltkreisen in der Elektrotechnik und UML⁴ in der Informatik (siehe Kapitel 11.2), eine einheitliche graphische Notation, um komplexe Information besser kommunizieren zu können. Dies führe zu einer Steigerung der Effizienz und Genauigkeit bei der Visualisierung, der Kommunikation von generierter Erkenntnis, beim Austausch und bei der Wiederverwendung von biologischem Wissen auf allen Ebenen [106]. Es sei jedoch ausreichend, sich auf drei Diagrammtypen zu beschränken: Prozessdiagramme, Entity-Relationship-Diagramme und Aktivitätsflussdiagramme.

⁴Unified Modelling Language

Suderman stellt in diesem Zusammenhang fest, dass die Modellierungen zumeist von einer statischen Liste von interagierenden Elementen ausgehen. Dies beschreibt die Realität jedoch nur in einem kleinen Ausschnitt [123]. Er weist auch darauf hin, dass man noch nicht ausreichend Information habe um eine Modellierungssprache festzulegen. Standardisierungen wie die Systems Biology Markup Language, kurz SBML, seien hier eine gute Alternative, um den Erkenntnisfortschritt zu beobachten (siehe Kapitel 5.4.3).

5.4. Modellierung biologischer Systeme

5.4.1. Herausforderungen

Grundsätzlich lässt sich feststellen, dass in biologischen Experimenten sehr große Datenmengen anfallen. Diese Daten werden in Datenbanken gespeichert, die teilweise öffentlich zugänglich sind. Es existieren zahlreiche Datenbanken, in denen Daten aus verschiedensten Experimenten abgelegt sind. In der Meta-Datenbank „MetaBase“ sind über 1800 Datenbanken zu verschiedensten biologischen Bereichen eingetragen⁵. Alleine im Bereich der Molekularbiologie existieren derzeit etwa 1500 Datenbanken⁶.

Diese Datenbestände sind die Grundlage für den Entwurf und die Entwicklung von Modellen. Sie ermöglichen eine fundierte Analyse und erlauben die Formulierung von Hypothesen und Theorien. Dabei haben sich in der Biologie diverse Ansätze etabliert, die jeweils unterschiedlichen Anforderungen gerecht werden. *Matlab* und *Mathematica* sind sehr vielseitige Werkzeuge, die vor allem eine mathematische Analyse erlauben. Berechnung mathematischer Ausdrücke, Simulation und Visualisierung sind die großen Vorzüge dieser Programme. Biologische Abläufe werden meist in Abhängigkeit von Raum und Zeit dargestellt. Dabei werden fast immer Differentialgleichung formuliert, die diese Veränderung beschreiben [75, S. 66]. Deshalb eignet sich *Matlab* und *Mathematica* besonders für das Berechnen und Darstellen einer Änderung und der zugehörigen Änderungsraten. Es kann dabei auch Rücksicht auf die Funktionen und die Anfangsparameter genommen werden. Als nachteilig könnte sich jedoch erweisen, dass die beiden Programme sehr umfangreich sind und zur Lösung von sehr vielen mathematischen Problemen entworfen wurden. Diese Programme sind in der Lage nahezu alles zu modellieren, was in eine mathematische Form gebracht werden kann. Dies ist aufwändig und erfordert Erfahrung im Umgang mit diesen Programmen.

Aus diesem Grund gibt es eigene Software, die sich auf die Modellierung von biologischen Systemen spezialisiert hat [75, Kap. 14]:

⁵<http://metadatabase.org>, abgerufen am 13. Juni 2013

⁶<http://www.oxfordjournals.org/nar/database/a/>, abgerufen am 13. Juni 2013

Gepasi Es handelt sich um ein frei verfügbares Tool zur Visualisierung von biochemischen Reaktionen. Das Programm wurde 1993 erstmals veröffentlicht und im September 2002 erschien die seither letzte der Version: 3.30⁷. Das Modell wird dabei nicht mit Differentialgleichungen beschrieben, sondern als Menge von Reaktionsgleichungen. Diese können diverse kinetischen Eigenschaften annehmen. So zum Beispiel Umkehrbarkeit, Reaktionsgeschwindigkeit, Aktivierungsenergie, u. a. . Mendes und Kell haben 1998 unter Zuhilfenahme von Gepasi die Brauchbarkeit von Simulationen untersucht und Anwendungsfälle von Stoffwechselprozessen und der Schätzung von Parametern aufgezeigt [99].

Gepasi unterstützt Systems Biology Markup Language (SBML) beim Import und Export von Modellen (siehe Kapitel 5.4.3).

E-Cell 1996 an der Keio Universität in Japan entwickelt, dient E-Cell in erster Linie dazu, zelluläre Prozesse darzustellen. Das Ziel ist, früher oder später eine komplette Zelle zu simulieren. Dabei ist es möglich verschiedene biologische Phänomene abzubilden und diese in deterministischen, aber auch als stochastische Prozesse zu definieren. Da vor allem in Prozessen auf Zellebene verschiedene Zeitskalen (von Millisekunden bis Stunden) eine Rolle spielen, werden diese von E-Cell berücksichtigt. Es ist bereits 1997 gelungen, ein Modell einer selbstständig lebenden Zelle zu entwerfen, dass sich selbstständig mit Glykose aus der Umgebung versorgt [124].

E-Cell stellt drei zentrale Elemente für die Entwicklung eines Modells zur Verfügung: Substanz, Reaktor und System. Während Substanzen die Zustandsvariablen darstellen, stellen die Reaktoren die Prozesse dar. Systeme sind Objekte, die sowohl Substanzen, Reaktoren und andere Systeme enthalten können. Diese ermöglichen eine hierarchische Struktur innerhalb der Zelle abzubilden. Dadurch wird es möglich, verschiedene Ebenen der Prozesse zu betrachten und getrennt von einander zu modellieren.

STOCKS 2 Während die Modellierung durch Differentialgleichungen keine Möglichkeit bietet, nicht-deterministische Änderungen abzubilden, stellt STOCKS Methoden bereit, dies zu tun. Die Abkürzung STOCKS steht dabei für STOChastic Kinetic Simulation und stellt ein Programm dar, um den zeitlichen Verlauf von chemischen Reaktionen in einem zusammengesetzten System zu simulieren.

PyBioS Eine webbasierte Alternative zu E-Cell ist PyBioS⁸. Die Software eignet sich, um biologische Systeme auf genetischer und zellulärer Ebene zu entwerfen, zu simulieren und zu analysieren. Es kann auf eine große Menge von vorhandenen Modellen

⁷<http://www.gepasi.org>, abgerufen am 17. Juni 2013

⁸<http://pybios.molgen.mpg.de/>, abgerufen am 17. Juni 2013

zurückgegriffen werden, da das System Zugriff auf vorhandene Datenbanken hat. Für die Modellierung werden verschiedene Objekte angeboten, die miteinander verknüpft und parametrisiert werden können. Es sind folgende Objekte verfügbar: Gene, mRNA, Protein, Complex, Compound, Reaction, Pathway.

Die webbasierte Anwendung verfügt über mehrere Tabs, die jeweils unterschiedliche Interaktionen mit dem Modell ermöglichen. So gibt es jeweils eine angepasste Ansicht für die Modellierung, die Spezifikation von Reaktionen, die Visualisierung und Simulation, die Analyse (mit Fokus auf die Dynamik des Netzwerks und auf strukturelle Aspekte), Import und Export⁹. Es enthält neben der bereits erwähnten Möglichkeit, auf vorhandene Datenbanken zuzugreifen auch die eine Funktion ein SBML-Modell zu exportieren bzw. zu importieren.

Systems Biology Workbench Die bisher vorgestellten Werkzeuge und Ansätze behandeln jeweils immer einen Aspekt oder bieten nur eine Auswahl aus den in Abschnitt 2.2 angeführten Eigenschaften an. Sie sind weder in der Lage noch haben sie den Anspruch, alle Eigenschaften adäquat umzusetzen. Die Lage wird zusätzlich erschwert, weil sich auch die Anforderungen von Fall zu Fall ändern. Durch Erkenntniszuwachs entstehen neue Ideen und Methoden Modelle zu erstellen und diese zu analysieren. Es ist oftmals nur schwer möglich, bestehende Modelle weiterhin zu verwenden, weil neue Werkzeuge oft neue Datenformate mit sich bringen. Die fehlende Abbildung von Modellen auf ein standardisiertes Format und die mangelnde Einbindung neuer Methoden und Analysewerkzeuge führte zu zwei bedeutenden Entwicklungen: der Systems Biology Workbench (SBW) und der Systems Biology Markup Language (SBML).

5.4.2. System Biology Workbench (SBW)

Bei der Systems Biology Workbench handelt es sich um eine Softwareplattform, die eine Kommunikation zwischen verschiedenen Programmen ermöglicht¹⁰. Die erste Veröffentlichung erfolgte 2002. Seitdem erscheinen regelmäßig Erweiterungen und neue Versionen. Technisch gesehen stellt es nicht mehr als ein Framework dar, das Aufrufe und Nachrichten von verschiedenen Modulen entgegennimmt und weiterleitet. Programme, die die SBW unterstützen, können Dienste in Anspruch nehmen, die von anderen Programmen angeboten werden und ihrerseits auch Dienste, Funktionalität und Methoden anbieten. Die Softwareplattform ermöglicht Programmen, die mit unterschiedlichen Programmiersprachen und zu unterschiedlichen Zielen entworfen wurden, einfachen und effizienten Austausch von Daten und Ergebnissen. Dazu stellt es einfach einen Dienst zur Verfügung,

⁹<http://pybios.molgen.mpg.de/Pybios/zpt/tutorial/index.html#tabOption>, abgerufen am 17. Juni 2013

¹⁰<http://sys-bio.org/>, abgerufen am 17. Juni 2013

der sich um die Steuerung des Nachrichtenflusses kümmert und dazu noch Module, die Nachrichten annehmen bzw. diese senden. Die Nachrichten müssen einem bestimmten, jedoch sehr einfachen Format entsprechen, das eine hohe Bandbreite sichert.

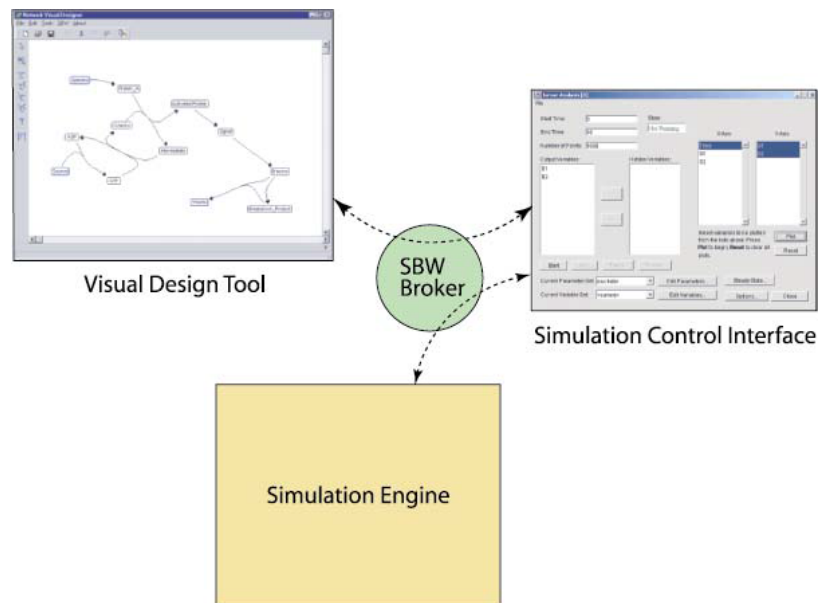


Abbildung 5.1.: Systems Biology Workbench als Plattform für unterschiedliche Dienste. Ein einheitliches Datenformat und Kommunikationsstandard ermöglichen flexible Erweiterung mit neuen Modulen.

Es existieren bereits zahlreiche SBW-fähige Programme, die verschiedene Dienste anbieten. Diese können in unterschiedliche Aufgabenbereiche gegliedert werden:

- Creation
- Simulation
- Analysis
- Database
- Utility

Zu jedem der genannten Aufgabenbereiche existieren zahlreiche Anwendungen, die meist mehrere Punkte aus der Liste anbieten. Eine detaillierte Liste von Anwendungen ist auf der Internetseite der Systems Biology Workbench¹¹ abrufbar und wird ständig aktualisiert.

Standardmäßig wird die SBW mit zahlreichen Modulen ausgeliefert [57]:

¹¹http://sbml.org/SBML_Software_Guide/SBML_Software_Matrix, abgerufen am 17. Juni 2013

¹²<http://128.208.17.26/sbwWiki/sysbio/jarnac>, abgerufen am 17. Juni 2013

Jarnac¹² Es handelt sich um eine Sprache zur Beschreibung und Modellierung von biologischen Systemen. Sie ist außerdem mächtig genug Simulationen und Analyse von Modellen durchzuführen und unterstützt stochastische und kontinuierliche Prozesse.

JDesigner¹³ Eine benutzerfreundliche Alternative zu Jarnac. Das Modul eignet sich besonders, Modelle zu zeichnen und kann diese auch simulieren.

Inspector Tool Es listet alle verfügbaren Module und deren Funktionen auf und hilft, somit den Überblick zu behalten über die installierten Module.

Optimization Tool Die Optimierungssoftware unterstützt die Wissenschaftler, die Parameter und Anfangsbedingungen eines Modells so festzulegen, dass sie mit beobachteten und gemessenen Werten übereinstimmen.

Plotting Module Das Modell wird automatisch visualisiert und die enthaltenen Komponenten mit ihren Abhängigkeiten und Verbindungen dargestellt.

Generic Model Export Liegt das Modell erst einmal in SBML vor, so wird ein Export angeboten, der die Anbindung an gängige Programme wie Matlab unterstützt. Außerdem ist es möglich, die Modelle für Programmiersprachen aufzubereiten. Ein Export für Programmiersprachen wie Java, C++, C# oder Python wird angeboten.

5.4.3. Systems Biology Markup Language (SBML)

Eine Entwicklung, die durch den Austausch von Modellen über verschiedene Module und Plattformen notwendig wurde, ist die Abbildung in ein Datenformat, das das erstellte Modell vollständig beschreibt. Genau das ist das Ziel der Systems Biology Markup Language, kurz SBML. Als Grundlage wird hier auf das etablierte, maschinenlesbare und plattformunabhängige Datenaustauschformat XML¹⁴ zurückgegriffen. Diese SBML-Beschreibungen können nach Belieben gespeichert und geladen werden. In vielen Fällen ist es so, dass Modelle an einer zentralen Stelle erstellt werden, um später von verschiedenen Programmen und Modulen analysiert zu werden [75, S. 442]. Liegt ein Modell erstmal in SBML vor, so kann es von fast allen Programmen importiert werden. Die weiteren Schritte, wie Simulation und Analyse, erfolgen dann in den jeweiligen spezialisierten Programmen. Von über 250 gelisteten Programmen, die innerhalb des Modellierungsprozesses in Frage kommen, existieren nur mehr wenige, die SBML nicht verarbeiten können.

¹³<http://128.208.17.26/sbwWiki/sysbio/jdesigner>, abgerufen am 17. Juni 2013

¹⁴mehr Information unter http://de.wikipedia.org/wiki/Extensible_Markup_Language, abgerufen am 15. September 2013

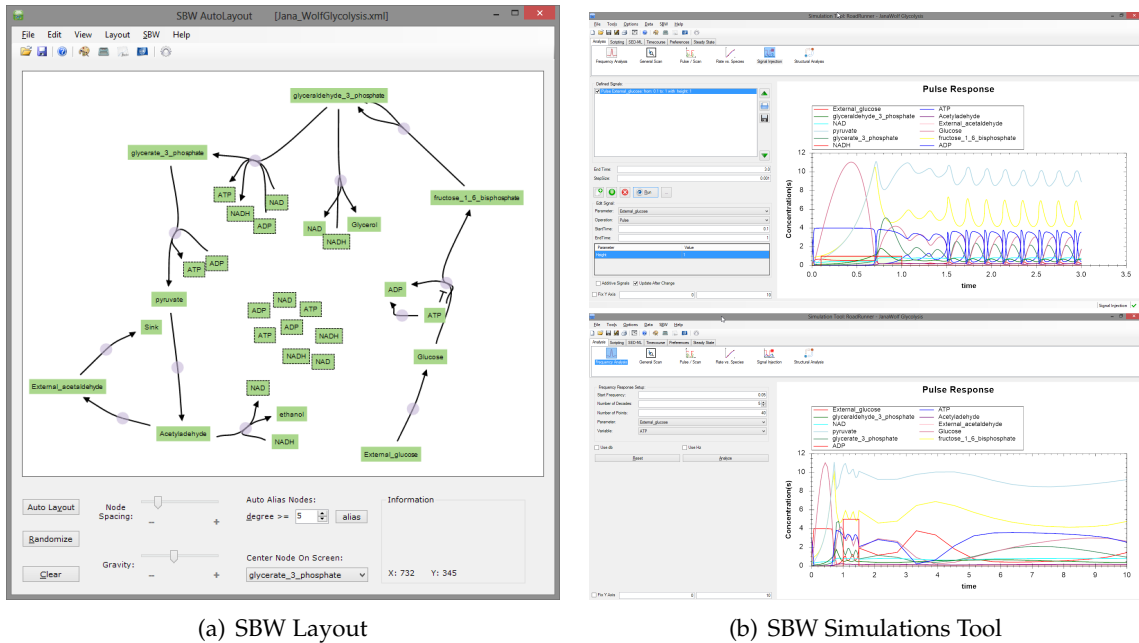


Abbildung 5.2.: Zusammenspiel von zwei System-Biology-Workbench-Programmen. Die Trennung von Entwurf, Simulation und Analyse ist die etablierte Arbeitsmethode in der Systembiologie.

Die meisten davon werden nicht mehr regelmäßig gewartet. So konnte sich die SBML als Standard durchsetzen.

Michael Hucka, der Urheber von SBML, wählt folgende Definition: „SBML is a software-independent language for describing models common to research in many areas of computational biology, including cell signaling pathways, metabolic pathways, gene regulation, and others.“ [58]. Seit der ursprünglichen Definition hat sich SBML weiterentwickelt. Das Grundgerüst ist aber seither unverändert geblieben und in dem XML-Dokument 5.1 dargestellt.

```
<?xml version="1.0"?>
<sbml xmlns="http://www.sbml.org/sbml/level3" level="3" version="1">
  <model id="some_biological_model">
    <listOfFunctionsDefinitions>
      ...
    </listOfFunctionsDefinitions>
    <listOfUnitDefinitions>
      ...
    </listOfUnitDefinitions>
    <listOfCompartments>
      ...
    </listOfCompartments>
  </model>
</sbml>
```



```
<listOfSpecies>
  ...
</listOfSpecies>

<listOfParameters>
  ...
</listOfParameters>

<listOfInitialAssignments>
  ...
</listOfInitialAssignments>

<listOfRules>
  ...
</listOfRules>

<listOfConstraints>
  ...
</listOfConstraints>

<listOfReactions>
  ...
</listOfReactions>

<listOfEvents>
  ...
</listOfEvents>
</model>
</sbml>
```

Listing 5.1: Grundgerüst einer Modellbeschreibung in SBML [59]

Das XML-Dokument beschreibt ein Modell durch Auflistung von Eigenschaften und Parametern:

Functions Definitions Diese Aufzählung ermöglicht die Definition von Funktionen, die vom Entwickler entworfen wurden und innerhalb des Modells genutzt werden können.

Unit Definitions Obwohl im Standardmodell bereits SI-Einheiten wie Kilogramm, Kelvin, Sekunden usw. enthalten sind, ist es möglich, weitere benutzerdefinierte Einheiten anzugeben.

Compartments Durch *compartments* wird die räumliche Aufteilung des Modells beschrieben. Es wird die innere und äußere physiologische Struktur des Modells festgelegt.

Species Als *species* bezeichnet SBML jene Objekte, aus denen das Modell im Wesentlichen besteht. Diese müssen voneinander abgrenzbar sein, können an Reaktionen beteiligt sein und sind räumlich einem *compartment* zugeordnet.

Parameters In jedem Modell können Parameter angegeben werden, um Anfangswerte festzulegen bzw. Konstanten zu definieren.

Initial Assignments Eine Erweiterung zur Bestimmung von Anfangswerten stellen die *initial assignments* dar. Diese erlauben, die Anfangswerte in Abhängigkeit von anderen Parametern zu bestimmen. Möchte man zum Beispiel die Größe eines *compartment*s in Abhängigkeit von der anfänglichen Temperatur festlegen, so wird dies in diesem Abschnitt beschrieben.

Rules Regeln beschreiben die Verknüpfung von Variablen innerhalb eines Modells. Sie stellen eine Erweiterung zu den Reaktionen dar und ermöglichen es, zusätzliche dynamische Eigenschaften eines Modells zu beschreiben. Regeln werden als Gleichungen dargestellt, die von der Zuweisung von konstanten Werten bis hin zur Formulierung von Differentialgleichungen alles erlauben.

Constraints Es ist möglich, innerhalb des Modells Einschränkungen festzulegen, die eingehalten werden müssen. Eine solche Auflage besteht aus einer mathematisierten Bedingung, die wahr sein muss, um das Modell in einem gültigen Zustand zu verwenden. Um auf einen ungültigen Zustand hinzuweisen, wird zusätzlich eine Meldung hinterlegt, die an den User weitergeleitet werden kann, sobald die Bedingung nicht mehr erfüllt ist.

Reactions Die Reaktionen, die innerhalb eines Modells ablaufen, sind neben den Parametern und den *Species* die zentralen Bestandteile eines Modells. Hier werden die wesentlichen Stoffumwandlungen und Interaktionen beschrieben. Ein detaillierter Ablauf kann beschrieben werden, indem man neben allen beteiligten Stoffen und Parametern auch die Möglichkeit hat, die Reaktionskinetik zu beschreiben.

Events Ereignisse beschreiben plötzlich auftretende, nicht kontinuierliche Änderungen innerhalb eines Modells. Dabei kann ein Auslöser angegeben werden, der spezifiziert, wann das Ereignis eintritt und eine Reihe von Anweisungen, die danach sofort oder auch mit zeitlicher Verzögerung ausgeführt werden.

6. Gehirn

6.1. Historische Entwicklung

Von allen Organen eines lebenden Körpers zeichnet sich das Gehirn wohl als dasjenige aus, welches am mysteriösesten erscheint. Dies liegt mitunter an der Tatsache, dass es die Steuerzentrale unseres Körpers ist, in dem Sinneseindrücke verarbeitet werden und Ausgangspunkt unserer Handlungen sind. Diese Handlungen können bewusst ablaufen, wie das Heben eines Arms, oder sie werden unbewusst ausgeführt, wie zum Beispiel das Atmen oder der Lidschlag der Augen. Damit wird auf ein Phänomen referiert das wohl zu den beeindruckendsten zählt, was wir Menschen kennen: das Bewusstsein. Was ist das Bewusstsein? Woher kommt es? Und die für die Wissenschaften spannende Frage, wie entsteht es? Die Fragen nach dem Bewusstsein sind noch viel spannender und bedeutender als man vermuten möchte, schließlich liegt hierin der Schlüssel zu der Frage, was der Mensch ist. Die Bedeutung des Bewusstseins, die Entwicklung eines Ichs und nicht zuletzt die Frage nach der Seele eines Menschen beschäftigt die Menschheit schon seit ihrem Bestehen.

Bereits die Ägypter haben über die Funktionen des Gehirns nachgedacht, wie archäologische Funde, zum Beispiel das Edwin Smith Papyrus, zeigen. Griechische Naturphilosophen hatten bereits ein sehr modernes Verständnis entwickelt, welche Funktionen dem Gehirn zukommt. Sie entdeckten etwa 500 v. Chr. den Sehnerv und andere sensorische Nerven und erkannten, dass diese in das Gehirn führen. Hippokrates von Kos verortete den Sitz von Intelligenz und Emotionen im Gehirn [107]. Aufgrund von Verboten, die vorrangig aus der damaligen Kultur kamen, konnten Autopsien erst viele Jahrhunderte nach ihm durchgeführt werden. Nach etwa 200 Jahre konnte Herophilus von Chalkedon schließlich die Anatomie des Gehirns, des Zentrums von Intelligenz und Bewusstsein, grob beschreiben. Eine Beschreibung, die Aristoteles noch nicht teilte. Dieser vermutete das Gehirn sei lediglich ein Kühlorgan und der eigentliche Sitz des Bewusstseins sei im Herz. Die Naturphilosophen waren sich nicht einig darüber, in welchem Teil des Körpers sich die Seele befindet. Was sie jedoch teilten war die Überzeugung, dass die Seele den Körper des Menschen bei seinem Tod verlässt und das tote Menschen keine Seele mehr besitzen. Der griechische Arzt Galen konnte etwa 200 n. Chr. anhand anatomischer Studien des menschlichen Körpers die Funktionen von einzelnen Nervenbahnen beschreiben

und der Hirnsubstanz eine wichtige Rolle bei kognitiven Prozessen zuweisen [43]. Damit war das Ende der kardiozentrischen These von Aristoteles bestätigt.

In den darauffolgenden Jahrhunderten fand keine nennenswerte Weiterentwicklung der Theorien im europäischen Raum statt. Wohingegen sich in den arabischen und byzantinischen Kulturen durchaus bemerkenswerter medizinischer Fortschritt verzeichnen lässt. Besonders die Erforschung der Hirnnerven, des Nervensystems und die Funktionsweise des Auges mit dem Sehnerven wurde um die Jahrtausendwende von persischen Gelehrten durchgeführt. Im Laufe des Mittelalters wurden in Europa wissenschaftliche Untersuchungen über die Anatomie des Gehirns wieder aufgenommen. Mit zunehmenden Wissen über die Funktionsweisen der unterschiedlichen Organe, insbesondere des Herzens, verlor auch das Gehirn als Organ seine mystische Aura. Der reduktionistische Ansatz von Rene Descartes sah den menschlichen Körper als eine sehr kompliziert arbeitende Maschine. Diese folge den Gesetzen der Mechanik und der Geometrie. Er unterschied sehr streng zwischen dem Körper (*res extensa*) und der Seele (*res cogitans*). Die größte Schwierigkeit bei Descartes Theorie war die Wechselwirkung zwischen dem Bewusstsein, das keine materielle Form besitzt, und dem Körper zu erklären. Dazu verwendete er letzten Endes einen Teilbereich des Gehirns, die Zirbeldrüse. Descartes gilt als der geistige Urheber des Dualismus, eine Vorstellung die weitreichende Konsequenzen bis in die Gegenwart hat. Sein berühmtes „*cogito ergo sum – ich denke, also bin ich*“, gilt als die Zusammenfassung seiner skeptischen Position. Die universellen Grundgesetze erschließen sich dem Menschen aufgrund seines Verstandes, einer rein geistigen Leistung. Die Wahrnehmung der Welt durch unsere Sinne, wie sie der Empirismus postuliert, könne dies nicht zustande bringen dachte Descartes.

Britische Philosophen, allen voran John Locke und David Hume, stellten sich gegen das rationalistische Weltbild von Descartes. Sie versuchten die (Sinnes-)Erfahrung stärker zu betonen und setzten sich für den Empirismus ein. Sinneswahrnehmung ist notwendig, um überhaupt Erkenntnis von der Welt zu erlangen. Innerhalb des Geistes versuchen ständig arbeitende Prozesse die Sinneswahrnehmung einzuordnen und aus ihnen Muster und Verallgemeinerungen abzuleiten. Für Hume gibt es keine vom Körper getrennte Substanz, keine *res cogitans*. Das Gehirn ist in der Lage, aus den Daten, die die menschlichen Sinne liefern, Regelmäßigkeiten abzuleiten. Kant versuchte, den Streit zwischen den Empiristen und den Rationalisten zu schlichten. Er erarbeitet eine Position, die sich mit den Bedingungen der Möglichkeiten für Erkenntnis beschäftigt und identifiziert dabei Kategorien in die unsere Sinneswahrnehmung einzuordnen ist. Raum und Zeit sind Anschauungsformen, außerhalb derer nichts wahrgenommen werden kann und innerhalb dieser findet Erkenntnis nur in den Kategorien statt. Qualität, Quantität, Modalität und Relation sind für Kant die unmittelbaren und apriorisch gegebenen Kategorien (siehe [70]). Diese Einteilung in Kategorien stellt eine Sichtweise dar, auf die moderne Kognitionswissenschaften Bezug

nehmen, obwohl sich die Kategorien natürlich geändert und weiterentwickelt haben [91, S. 129].

Die medizinische Forschung gewinnt immer tieferen Einblick in die Anatomie des Menschen und die Entdeckung der elektrischen Eigenschaften von Nervenbahnen, hier sind vor allem Luigi Galvani und Emil du Bois-Reymond zu nennen. Dies führt zu einem neuen Verständnis über die Funktionsweise des Gehirns. Das Gehirn wird als ein komplexes und sehr kompliziertes System von Nervenzellen verstanden, die miteinander kommunizieren. Kann damit allerdings die Entstehung von Bewusstsein, Gedanken und Gefühlen erklärt werden? Der amerikanische Philosoph William James versuchte, das Auftreten von mentalen Zuständen mit der Funktionsweise des Gehirns und von Netzwerken aus Nervenzellen zu erklären und lieferte dabei die Grundlage für neuronale Netze, wie sie heute in der Mathematik erfolgreich eingesetzt werden [91, S. 131].

Dieses Netzwerk der Nervenzellen stellte man sich als ein kontinuierliches Netz vor. Eine Vorstellung die Ende des 19. Jahrhunderts widerlegt wurde. Der Züricher Anatom und Psychiater Auguste Forel äußerte Bedenken angesichts der Tatsache, dass alle feinen Auswüchse innerhalb des Nervensystems wieder in andere freie Enden finden müssten. Ein kontinuierliches Netz schien deshalb unwahrscheinlich, zumal man aus der Elektrotechnik bereits weiß, dass es auch ohne direkte Verbindung eine Übertragung geben kann. Wie diese Übertragung konkret aussehen könnte, war allerdings noch ungeklärt. Das Phänomen einer elektrochemischen Reaktion wurde nicht in Betracht gezogen. Schließlich stellte der Spanier Santiago Ramón y Cajal fest, dass jedes Element des Nervensystems einen autonomen Bereich einnahm. 1906 erhielt er gemeinsam mit Camillo Golgi, der eine Methode zum Färben von Nerven entwickelt hatte, den Nobelpreis für Physiologie oder Medizin „in Anerkennung ihrer Arbeiten über die Struktur des Nervensystems“ [9]. Der Begriff „Neuron“, der sich als sehr zukunftssträftig erweisen sollte, wurde 1891 von dem Berliner Anatom Wilhelm von Waldeyer aufgebracht, der darunter die Einheit von Nervenzelle, Dendriten und Achsenzylinder (später Axon) verstand (siehe [107]).

Mit zunehmender Zuordnung von Funktionen zu bestimmten Gehirnarealen, versuchten Wissenschaftler Karten anzulegen und jedem Bereich des Gehirns eine Funktion zuzuordnen. Zahlreiche Hirnverletzungen während der Weltkriege und den damit verbundenen Folgen für die betroffenen Personen halfen dabei detaillierte Hirnkarten anzufertigen. Der Neurologe Karl Kleist veröffentlichte 1959 eine Hirnkarte, die in vielen Grundzügen heute noch Gültigkeit hat [107, S. 232]. Er war ein Vertreter der strikten Lokalisationstheorie, eine Hypothese, die annahm, dass alle Persönlichkeitsmerkmale und Eigenschaften des menschlichen Geistes in der Anatomie des Gehirns festgelegt sind. Einer der Initiatoren dieser Strömung war am Anfang des 19. Jahrhunderts Franz Joseph Gall, der davon überzeugt war, die Charakterzüge eines Menschen vollständig einzelnen, scharf voneinander abgrenzbaren Gehirnregionen zuordnen zu können (siehe Abbildung 6.1). Wie Karto-

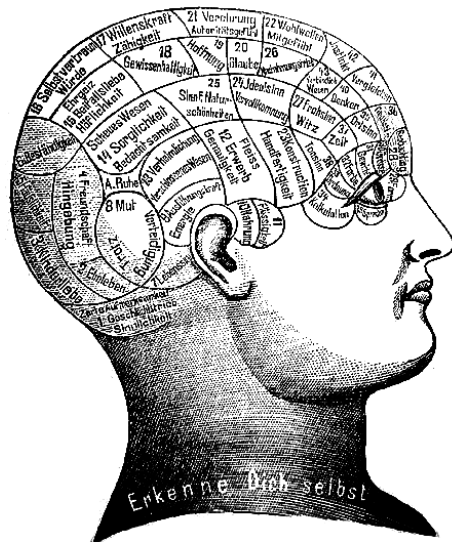


Abbildung 6.1.: Landkarten des Gehirns von 1894 [13].

grafien eine Eins-zu-eins Abbildung einer Landschaft auf einen Karte projizieren und dabei Stück für Stück zu vervollständigen. Dabei muss festgehalten werden, dass es Funktionsareale im Gehirn gibt, die man eindeutig zuordnen kann, die Karte hat somit auch heute noch eine Gültigkeit. Eine Zuordnung von höheren integrativen Leistungen oder von Bereichen, die außerhalb der Großhirnrinde liegen, ist schwierig, die Lokalisationstheorie scheint hier an ihre Grenzen zu stoßen [107].

Wissenschaftler erkennen, dass sich für höhere kognitive Funktionen eine Separierung in autonome Bereiche schwierig gestalten wird. Die Idee einer holistischen Betrachtung des Gehirns mitsamt seiner Areale erscheint sinnvoll. Jacques Loeb wurde deshalb 1900 zu folgender Aussage bewegt: "(...) in processes of association the cerebral hemispheres act as a whole, and not as a mosaic of a number of independent parts." [82, S. 262]. Schärfere Kritiker warfen der Lokalisationstheorie vor, die entworfenen Karten ignorieren wissenschaftliche Fakten. So zum Beispiel, dass sogar innerhalb einer biologischen Art individuelle Unterschiede auftreten, also das Gehirn nicht einmal innerhalb einer Gattung gleich sei. Außerdem seien Erregungsgebiete keineswegs lokal, sondern breiten sich sehr schnell über viele Regionen hinweg aus. In Experimenten mit Ratten zeigte sich, dass es nicht ein einziges Gedächtniszentrum innerhalb des Gehirns gibt, sondern dass Gedächtnisinhalte auf unterschiedliche Art und Weise repräsentiert werden können. Der Traum, eine gewöhnliche „Landkarte“ des Gehirns zu erhalten, scheint somit in weite Ferne gerückt. Die Frage nach dem Wo ist abgelöst durch eine Kombination aus was, in welchem Umfang und wie etwas im Gehirn lokalisiert werden kann (siehe [107, S. 237]).

Diese Fragestellung ist aktueller Forschungsschwerpunkt vieler Arbeitsgruppen und stellt eine Herausforderungen des 21. Jahrhunderts im Bereich der Hirnforschung dar.

Zwei Projekte der Gegenwart im Bereich der Neurowissenschaften haben es sich zur Aufgabe gemacht, diese Fragen zu beantworten. Es handelt sich dabei einerseits um die Brain Activity Map, eine von den USA ins Leben gerufene Initiative, die die Aktivität aller Neuronen im menschlichen Gehirn erfassen soll. Eine große Aufgabe in Anbetracht der über 100 Milliarden Neuronen, die das menschliche Gehirn umfasst. Nicht weniger spannend ist andererseits das aktuelle Forschungsprojekt der EU: das Human Brain Project. Hier versucht man, das gesamte erfahrbare Wissen über das menschliche Gehirn, in Computermodellen abzubilden, um Simulationen durchführen zu können. Dabei erhofft man sich grundlegende Mechanismen besser verstehen und Erkenntnisse für die Medizin, aber auch für die Computerwissenschaften ableiten zu können.

6.2. Was bedeutet, es das Gehirn zu verstehen?

Die wissenschaftliche Erkenntnis von Cajal gipfelt in einer Aussage, über die nachfolgende Wissenschaften diskutieren. Er verweist auf sein Bemühen mit der Beschreibung des Gehirns, insbesondere der Großhirnrinde, und dessen Funktionsweise und hält dazu fest: „Ich wollte soweit wie möglich ihren Grundplan herausarbeiten. Aber leider, mein Optimismus täuschte mich! Denn die unbeschreibliche Komplexität der Struktur der grauen Substanz ist so vertrackt, daß sie der hartnäckigen Neugier von Forschern trotzt und noch viele Jahrhunderte lang trotzen wird.“ (siehe [102, S. 318]). Die Neurowissenschaften konnten seither zahlreiche Erfolge erzielen, indem sie zu einem immer besseren Verständnis über die Abläufe des menschlichen Gehirns gelangen. Jedoch ist vieles noch nicht oder erst in Grundzügen verstanden. Auch im medizinischen Bereiche besteht Interesse, an einem besseren Verständnis des Gehirns, dieses ist also nicht bloß aus wissenschaftlichem Forscherdrang oder Interesse an Grundlagenforschung gegeben. Prognosen zufolge steigt die Anzahl an Menschen, die an Demenz erkrankt sind, auf über 100 Millionen, was zu dem gegebenen Zeitpunkt bedeuten würde, dass eine von 85 Personen von der Krankheit betroffen wäre [19]. Die Ausbildung besserer Diagnosen und neuer Therapien sind daher unerlässlich. Damit verbunden ist jedoch die Forderung nach tieferem Verständnis des menschlichen Gehirns.

Doch was bedeutet es, „das Gehirn zu verstehen“? Diese Frage stellten sich zwei Wissenschaftler in den 1980er Jahren, David Marr und Tamaso Poggio, formulierten vier Fragen, die vier voneinander unabhängige Ebenen des Verstehens referieren (siehe [96] und [102]):

Die Hardwareebene Es es notwendig, zu verstehen, wie das Gehirn Abläufe ausführt. Welche physikalischen Effekte treten auf der Zell- und Neuronenebene auf? Die Frage betrifft die Funktionsweise der Neuronen und ihrer synaptischen Verbindungen.

Die algorithmische Ebene Wie werden die Algorithmen im Gehirn umgesetzt? Auf dieser Ebene versucht man, Operationen und Verschaltungen zu verstehen. Auch die Theorie über neuronale Netze lässt sich hier einordnen.

Die Ebene der Codierung Welcher Möglichkeiten bedient sich das Gehirn, Abläufe zu repräsentieren? Wie werden die entsprechenden Berechnungsvorschriften im Gehirn abgelegt? Die Frage nach der Codierung ist für die Medizin von größtem Wert. Hier können Diagnosen und Therapien ansetzen, um pathologische Änderungen zu behandeln, die nicht auf physiologische Fehlentwicklungen zurückzuführen sind.

Die funktionale Ebene Welche Funktionen erfüllt das Gehirn? Die Transformation von Information aus den Sinneseindrücken auf eine Codierung, die „Sprache“ des Gehirns. Erst das Zusammenführen von Datenströmen aus den Sinnesorganen, Organen und Körperteile ermöglicht es, umfangreiche Abläufe auszuführen. Die Analyse dieser Abläufe ist Aufgabe der vierten Ebene.

Die jeweiligen Ebenen können zwar unabhängig voneinander untersucht werden, Eigenschaften und Merkmale beeinflussen jedoch andere, angrenzende Schichten. Die Tatsache, dass neuronale Netze eine zentrale Rolle bei der Funktionsweise des Gehirns spielen, hat beispielsweise großen Einfluss auf die Codierung der Funktionen.

Diese Separierung erleichtert eine systematische Untersuchung des Gehirns. Die ganzheitliche Betrachtung jedoch muss gewahrt werden, um das Gehirn als komplexes System korrekt zu beschreiben. Die Einsicht, dass es vor allem auf die emergenten Eigenschaften des Systems ankommt, ist ein entscheidender Schritt in die zukünftige Richtung für weitere Forschungsprojekte. Während Cajal und nachfolgende Wissenschaftler versuchten in Gehirnregionen einige wenige Neuronen zu untersuchen arbeiten die aktuellen Forschungsansätze an einer ganzheitlichen und dynamischen Beschreibung des Gehirns. Ermöglicht wurde dies von neuen und innovativen Technologien und Messverfahren, die nicht nur die statischen anatomischen Eigenschaften, sondern auch die dynamischen und zeitlichen Abläufe messen und visualisieren können.

6.3. Computational Neuroscience

Die Neurowissenschaften befasst sich mit dem Aufbau und der Funktionsweise von Nervensystemen bei Lebewesen. Das Nervensystem ist ein unglaublich breiter Forschungsgegenstand. Es umfasst medizinische und biologische Phänomene aber auch Einflüsse der Kognitionswissenschaften, der Philosophie und der Psychologie sind in der Disziplin vorhanden. Als eine Teildisziplin der Neurowissenschaften hat sich die Gehirnforschung entwickelt, welche sich vor allem um die Erforschung des Gehirns von Primaten bemüht.

Die zwei aktuellen und hochdotierten Forschungsprojekte sollen Einsicht in das Gehirn liefern: Die von dem US-Amerikanern initiierte *BRAIN Initiative - Brain Research through Advancing Innovative Neurotechnologies*, auch bekannt als Brain Activity Map, und das europäische Großprojekt *Human Brain Project*. Beide versuchen, über unterschiedliche Methoden die zahlreichen Rätsel des Gehirns auszumachen und zu verstehen. Sie wurden unabhängig voneinander ins Leben gerufen Forschungsfragen sowie die Vorgehensweise autonom festgelegt. Die Projekte starten nach einiger Vorlaufzeit im Jahr 2013 und sind auf eine Laufzeit von zehn Jahren angelegt. Beide Projekte verfügen über eine finanzielle Ausstattung weit über einer Milliarde Euro.

6.3.1. Brain Activity Map

Auf dem Weg das Gehirn in seiner Ganzheit zu verstehen, versuchen Wissenschaftler in den USA im Rahmen der Brain Initiative, die Eigenschaften des Gehirns zu verstehen. Die sogenannte Emergent-level-Analyse beschäftigt sich mit den Phänomenen der emergenten Systemeigenschaften. Emergenz als systemische Eigenschaft konnte in anderen Bereichen viele Erklärungen liefern, beispielsweise im Magnetismus, Supraleitung, aber auch soziologische Phänomene und biologische Prozesse. Man ist davon überzeugt, dass die Emergent-level-Analyse ebenfalls Erklärungen im Bereich der Neurologie liefern kann. Nicht zuletzt erhofft man sich, dass psychologische Erkrankungen wie Schizophrenie oder Autismus, deren Heilung auf Zellebene bisher ohne großen Erfolg blieb, in einem ganzheitlichen systemischen Ansatz verstanden und letztlich geheilt werden kann [1].

Die wissenschaftliche Vorgehensweise sieht vor, jedes Aktionspotenzial von jedem Neuron über eine Zeitspanne zu messen, in der man parallel dazu das Verhalten und die mentalen Zustände bestimmen kann. Aus diesen Aufzeichnungen möchte man die sogenannte *Brain Activity Map* konstruieren und erhält dadurch eine vollständige funktionale Beschreibung des neuronalen Schaltkreises. Damit wäre aber noch kein bedeutender Fortschritt in Hinblick auf die emergenten Eigenschaften gewonnen. Die große Innovation wird die dynamische Abbildung der funktionalen Ebene sein. Die Muster und die Sequenzen neuronaler Aktivität zu messen und in die Karte einfließen zu lassen. Dazu wird der mentale Zustand, der Bewusstseinsinhalt, eingetragen. Erst die Korrelation zwischen den statischen anatomischen Eigenschaften, den dynamischen Prozessen der Verschaltungen und die resultierenden Verhaltensweise und mentalen Zustände erlauben Rückschlüsse auf die Wirkungsweise des Gehirns. Vereinfacht könnte so die Grundfrage für die Brain Initiative lauten: Welche Neuronen müssen in welchem Prozess miteinander interagieren und was ist das Resultat dieser Wechselwirkung? Hat man diese Korrelationen erst einmal gewonnen, kann man krankheits- oder verletzungsbedingte Gehirne untersuchen und Unterschiede ausmachen, aus denen neue Therapien und medizinischen Anwendungen ab-

geleitet werden können.

Eine große Herausforderung stellen die Messverfahren da. Eine Möglichkeit, neuronale Aktivität mit den Ansprüchen einer hohen zeitlichen sowie räumlichen Auflösung zu messen, ist mithilfe von Sensoren auf Nanoebene. Halbleitersensoren werden extrem dicht gepackt hergestellt und drahtlos ausgelesen.

Als Meilensteine hat man für die nächsten fünf Jahre die Rekonstruktion eines kleinen und einfachen Gehirns mit ca. 70000 Neuronen geplant. Innerhalb der nächsten zehn Jahre ist beabsichtigt, ein komplettes Fliegenhirn mit ca. 135000 Neuronen abzubilden. In den nächsten 15 Jahren ist vorgesehen, das Gehirn einer Maus vollständig erfasst zu haben und diese Art der Forschung auf den Primaten auszuweiten [1].

6.3.2. Human Brain Project

Auf europäischer Seite wird im Rahmen des Human Brain Projects versucht, tiefere Einsicht in die Funktionsweise des Gehirns zu gewinnen. Es handelt sich hierbei um ein Großprojekt mehrerer europäischer Länder, die an dem gemeinsamen Ziel arbeiten. Die Arbeit ist in 13 Gruppen geteilt, die jeweils autonom und an verschiedene Teilzielen forschen. So gibt es eine Gruppe für die Erfassung von Daten aus dem menschlichen Gehirn, dem Gehirn einer Maus, für kognitive Architekturen, mathematische und theoretische Grundlagen, Gehirn Simulation und eine Gruppe, die sich mit ethischen und gesellschaftlichen Konsequenzen beschäftigt. Das gemeinsame Ziel wurde wie folgt festgelegt: „The Human Brain Project should lay the technical foundations for a new model of ICT-based brain research, driving integration between data and knowledge from different disciplines, and catalysing a community effort to achieve a new understanding of the brain, new treatments for brain disease and new brain-like computing technologies.“ [95] Das Human Brain Project legt einen großen Fokus auf Informations- und Computertechnologien (ICT). Dies äußert sich unter anderem dadurch, dass die Entwicklung von Plattformen für Neuroinformatik, Gehirnsimulation und Supercomputing zu wichtigen Aspekten des Projekts zählt. Zusätzlich ist die Generierung neuer Behandlungsmethoden für die medizinische Behandlung von Gehirnerkrankungen sowie Erkenntnisse, die zukünftige Entwicklungen von Computersystemen und künstlichen Intelligenzen antreiben, sehr hoch priorisiert.

Das HBP wird durch Sammlung von Daten, Entwicklung neuer Theorien, datenverarb. Plattformen etc. grundlegend für zukünftige Hirnforschung sein.

Die Vorgehensweise ist dabei bestimmt durch die Generierung von Daten auf den verschiedensten Ebenen des Gehirns. Dabei werden ausgehend vom kleinsten Baustein, dem Genom, bis hin zur abstraktesten Einheit, dem Bewusstsein, Daten systematisch erfasst und gespeichert. Es wird prinzipiell zwischen drei Datenquellen unterschieden: strukturelle Daten vom Gehirn einer Maus (MSD), strukturelle Daten vom Gehirn eines Menschen

(HSD) und den funktionalen Daten eines Menschen (HFD). Strukturelle Daten beschreiben die Zustände von Neuronen und Gehirnregionen, während die funktionalen Daten des Menschen vor allem die Bewusstseinszustände wie Lernen, das Treffen von Entscheidungen, Selbstwahrnehmung, usw. repräsentieren. Diese Daten werden in einem weiteren Schritt auf neue Theorien und Modelle, die parallel dazu entwickelt werden, angewandt, um diese zu verifizieren, zu falsifizieren oder zu verbessern. Permanent sollte die wissenschaftliche Forschung das Gehirn als ganzheitliches System betrachten und die Beziehungen und Abhängigkeiten zwischen den unterschiedlichen Ebenen im Fokus behalten. Dazu heißt es in der offiziellen Stellungnahme: „In summary, neuroscience, medicine, and ICT all require an integrated multi-level understanding of the brain.“[95, S. 18]

Es gibt zahlreiche Meilensteine innerhalb des HBP. Für jeden Bereich der vier großen Forschungsgegenstände, Daten, Theorie, ICT Plattformen und Anwendungen, sind mehrere Teilziele für die nächsten zehn Jahre festgelegt worden. So ist nach vier Jahren vorgesehen, dass man in der Lage ist, auf zellulärer Ebene Gehirnregionen zu modellieren und zu simulieren. Nach sechs Jahren soll dies für das gesamte Gehirn möglich sein. Etwa zwei Jahre später soll sich diese Simulation auch auf molekularer Ebene für das Gehirn durchführen lassen und letzten Endes möchte man alle Ebenen des Gehirns in einem Modell vereint haben und somit das Gehirn als Ganzes simulieren.

6.4. Modellierung des Gehirns

Die Modellierung des Gehirns stellt eine der großen Herausforderungen im Bereich der Gehirnforschung dar. Diese ist notwendig, um eine realistische Vorstellung davon zu bekommen, wie das Gehirn arbeitet und um ein gemeinsames und vermittelbares Verständnis des Gehirns und seinen Funktionen zu erhalten. Der Austausch von erarbeiteten Ergebnissen darf keinesfalls unterschätzt werden: Er stellt die Grundlage für den kritischen Diskurs zwischen Wissenschaftlern dar und ist des Weiteren wesentlich bei der Kommunikation mit der Gesellschaft, oder Industrie und anderen Interessensgruppen. Das Human Brain Project setzt bei der Modellierung auf etablierte und offene Software, deren Funktionen durch eigene Implementierungen ergänzt werden müssen. Die Programme, die von Beginn an verwendet werden, dient neben der Modellierung auch der Simulation und bietet Möglichkeiten, Funktionsabläufe zu beschreiben. Dabei wird vor allem Wert darauf gelegt, die Modelle so zu gestalten, dass sie mit wachsender Datengrundlage stetig präziser werden, also sich zunehmend der Realität annähern.

Die verwendete Software des Human Brain Projects wird im Folgenden kurz vorgestellt. Die Darstellung legt besonderen Wert auf die Modellierung des komplexen Gesamtsystems.

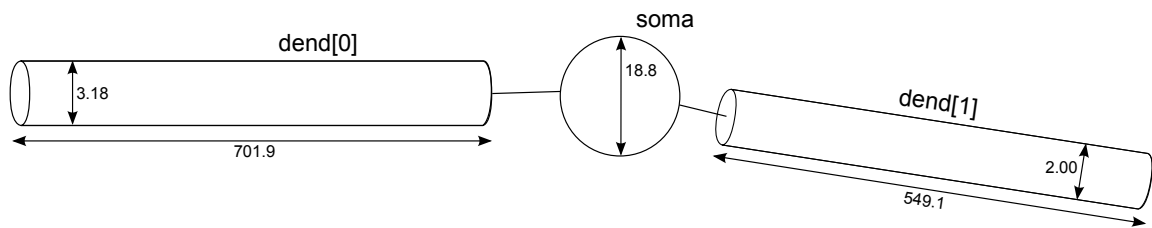


Abbildung 6.2.: Schematische Darstellung eines Neurons mit zwei Dendriten. Ausgewählte anatomische Merkmale werden bei der Modellierung berücksichtigt [41].

NEURON

NEURON¹ ist ein Computerprogramm, das in Zusammenarbeit der Yale University und der Duke University entwickelt wurde [23]. Das Programm bietet drei große Funktionen an: die Modellierung, Modellanalyse und Simulation.

Die Grundidee der Modellierung umfangreicher Modelle von Nervenzellen ist, eindimensionale Abschnitte getrennt voneinander zu modellieren und anschließend nach Belieben zu verknüpfen. Der erste Schritt besteht darin, ein detailliertes morphologisches Abbild eines Neurons zu schaffen. Es werden dabei die räumlichen und individuellen Eigenschaften beschrieben, das heißt Durchmesser, Länge, spezifischer elektrischer Widerstand und weitere Attribute. In einem weiteren Schritt müssen die Membraneigenschaften festgelegt werden. Diese bestimmen, wie ein Abschnitt mit seiner Außenwelt interagieren kann. Während die Membran die Interaktion des gesamten Neurons betrifft, ist es auch möglich, einzelne Punkte eines Abschnitts mit Interaktionsmechanismen auszustatten. Dies ermöglicht beispielsweise die Überwachung einzelner Konzentrationen oder Ladungspotentiale innerhalb eines Abschnitts. Auch die Stimulation einzelner Neuronen kann so initiiert werden, da Objekte modellierbar sind, die in regelmäßigen Zeitabständen einen Impuls von außen in das Neuron einbringen können. Die Abschnitte können mit einer großen Anzahl von Neuronen ausgestattet werden, die mit unterschiedlichen Eigenschaften versehen sind. Einzelne Abschnitte werden dann, wie es auch im Gehirn der Fall ist, miteinander verbunden. Diese sogenannten Dendriten verbinden zwei Abschnitte und müssen auch entsprechend mit Parameter ausgestattet werden. Entscheidend sind vor allem die Anzahl der Segmente, die Länge, der Durchmesser, der spezifische Widerstand und die Eigenschaft der Membran, mit welcher Kontakt zu der Umgebung besteht.

Die Beschreibung eines Neurons ist im Listing 6.1 gegeben. Es besteht aus einem Neuron, das mit zwei Dendriten verbunden ist (siehe Abbildung 6.2).

Zu Beginn der Beschreibung werden zwei Dendriten und ein Neuron erstellt, die dann näher spezifiziert werden. Das Neuron wird intern als ein Segment repräsentiert. Das bedeutet, dass es als eine einzige Einheit modelliert und simuliert wird. Interessiert man sich

¹<http://www.neuron.yale.edu/neuron/>, abgerufen am 27. August 2013

zum Beispiel dafür, wie sich Ladung oder Konzentration innerhalb der Neurone verteilen, müssen mehrere Segmente (Parameter *nseg*) angegeben werden. Segmente regeln die Anzahl der Details, die simuliert werden, dies kann im Verlauf der Modellierung sehr einfach angepasst werden. Wird der Wert allerdings zu hoch angesetzt, wird unnötig Rechenkapazität bei der Simulation aufgewendet.

```

ndend = 2

create soma, dend[ndend]
access soma

soma {
  nseg = 1      // Anzahl der Segmente innerhalb des Abschnitts
  diam = 18.8   // Durchmesser des Neurons
  L = 18.8     // Ausdehnung des Neurons
  Ra = 123.0   // Der spezifische Widerstand
  insert hh } // Membraneigenschaft: das Hodgkin–Huxley–Modell

dend[0] {
  nseg = 5
  diam = 3.18
  L = 701.9
  Ra = 123
  insert pas } // Membraneigenschaft: ein passiver Kanal

dend[1] {
  nseg = 5
  diam = 2.0
  L = 549.1
  Ra = 123
  insert pas }

// Die Endpunkte der Dendriten werden mit Neuron verbunden
connect dend[0](0), soma(0)
connect dend[1](0), soma(1)

// Erzeugung von Aktionspotentialen innerhalb des Neurons
// Alle 300ms wird eine 100ms dauernde Stimulation (0.1nA) angeregt
objectvar stim
stim = new IClamp(0.5)

stim.del = 300
stim.dur = 100
stim.amp = 0.1

```

Listing 6.1: Modellierung der Morphologie eines Neurons [41]

Das Programm NEURON ist somit dazu geeignet, die anatomische und räumliche Anordnung zwischen Neuronen abzubilden. In der Praxis wird die anatomische Beschreibung durch eine graphische Oberfläche unterstützt. Es bietet außerdem eine Möglichkeit, die Modellierung zu simulieren, was jedoch in der Praxis mächtigeren Werkzeugen überlassen wird. NEURON kann Modelle exportieren und sie anderen Programmen zur Verfügung stellen, die dann über umfangreichere Simulationsmethoden verfügen.

NEST

NEST ist eine freie Simulationssoftware, die sich auf die Simulation von großen gepulsten neuronalen Netzen² spezialisiert hat. Hierbei wird der zeitliche Verlauf der Ladung eines Neurons noch stärker in den Fokus gerückt. Während andere Simulationen ein Neuron innerhalb eines bestimmten Zyklus feuern zu lassen, wie es beispielsweise auch dem Modell von Listing 6.2 der Fall ist, hängt die Aktion des Neurons bei SNNs von dem Membranpotential ab. Überschreitet dieses einen Grenzwert, so feuern die Neuronen und leiten einen Impuls an benachbarte bzw. verbundene Neuronen weiter. In den betroffenen Neuronen bewirkt dieser, dass sich das Potential dort erhöht. Die aktuellen Zustände der Aktionspotentiale werden in der Regel durch Differentialgleichungen bestimmt.

Konsequenterweise legt NEST bei den Simulationen mehr Wert auf die Dynamik, Struktur und Größe des neuronalen Netzes als die exakte Morphologie eines Neurons darzustellen [40]. Standardmäßig wird bereits eine große Anzahl verschiedene Modelle von bekannten Neuronen angeboten, die bei der Modellierung verwendet werden können. Auch auf zahlreiche neuronale Verknüpfungen kann zurückgegriffen werden. Der Hauptfokus von NEST liegt in der Simulation großer neuronaler Netze. Zwischen Neuronen können verschiedene Verbindungen bestehen. So können verschiedene Wege zwischen zwei identischen Neuronen modelliert werden. Diese Verbindungen können unterschiedliche Eigenschaften aufweisen, weshalb es nicht ausreicht, diese in einer einfachen Adjazenzmatrix darzustellen. Es muss jede Verbindung zwischen zwei Neuronen entsprechend dargestellt werden.

Für das Human Brain Project ist NEST von großem Wert. Das vollständige neuronale Netz einer Maus und später das eines Menschen abzubilden und simulieren zu können stellt die große Herausforderung des Projekts dar. Keine Recheneinheit wird Netze dieser Größenordnung alleine berechnen können, zumindest nicht in den nächsten Jahren. Deshalb spielt Parallelisierung und verteilte Berechnung eine wichtige Rolle. NEST ist in der Lage, diese Prozesse allesamt zu unterstützen, weswegen für die kommenden Jahre weitere Algorithmen in diesem Bereich erwartet werden können [17, S. 368].

²engl. spiking neural networks (SNNs)

STEPS

Die frei verfügbare Software STEPS (STochastic Engine for Pathway Simulation) wurde vor dem Hintergrund entwickelt, stochastische und Reaktions- und Diffusionsmodelle effizient zu simulieren. Insbesondere in Übergangsbereichen von Neuronen zu anderen Zellen, also dort, wo einzelnen Bereiche räumlich von Membranen abgegrenzt werden, spielt die Konzentrationsverteilung in Volumen eine große Rolle. An diesen Stellen eine homogene Verteilung anzunehmen führt zu Ergebnissen, die der Realität nicht entsprechen [54]. Außerdem muss die Morphologie der Zellen berücksichtigt werden, da diese wesentlichen Einfluss auf die Konzentrationsverteilung von Molekülen hat. STEPS besitzt eine Benutzeroberfläche, die es erleichtert, die angebotenen Funktionalitäten zu nutzen. Außerdem ist es möglich, bestehende SBML-Modelle (siehe Kapitel 5.4.3) und NeuroML-Modelle zu importieren und zu verwenden.

Im Wesentlichen gibt es zwei verschiedene Arten Reaktionsdiffusionsgleichungen stochastisch zu lösen. Eine Möglichkeit ist es, die brownische Bewegung eines jeden Moleküls zu simulieren und die Reaktionen auf Basis der Zusammenstöße zwischen den einzelnen abzuleiten. Eine zweite Möglichkeit stellt die Gruppierung von gleichartigen Molekülen in Subvolumen dar. Deren Verhalten wird mit Hilfe der kinetischen Gesetze als Austausch von Molekülen zwischen den einzelnen Subvolumen beschrieben. Beiden Ansätze liegen stochastische Prozesse zugrunde, die mathematisch beschrieben werden können. Diese Prozesse werden während der Simulation mit einem Algorithmus gelöst, der genaue Ergebnisse effizient berechnet und dabei den Rechenaufwand in einem für die Praxis brauchbaren Rahmen hält.

Die Berücksichtigung diskreter, stochastischer und räumlicher Eigenschaften ist entscheidend bei der Modellierung der Dynamik von zellulären Systemen auf der Ebene von Molekülen. Hier leistet STEPS einen großen Beitrag, da man entsprechende Anordnungen effizient simulieren kann. Die Beschreibung solcher Systeme kann anderen Modellierungsprogrammen überlassen werden, da eine gemeinsame Schnittstelle über die generische Beschreibungssprache SBML existiert.

NeuroML

NeuroML ist eine auf XML basierende Beschreibungssprache, die speziell dafür entworfen wurde, ein einheitliches Datenformat für die Beschreibung und den Austausch von Modellen der computergestützten Neurowissenschaften zu schaffen. Wesentliche Anforderungen an die Sprache umfassen dabei die Abbildung von biophysikalischen, anatomischen und netzwerk-architektonischen Eigenschaften neuronaler Netze unterschiedlichster Skalen und Größenordnungen. Des Weiteren ein einheitliches und in der wissenschaftlichen Disziplin anerkanntes Datenformat, das den Austausch zwischen Forschern ermöglicht

und Transparenz schafft. Dazu soll es auch zahlreiche Computerprogramme geben, die das Arbeiten mit NeuroML ermöglichen und weitestgehend erleichtern. Mittlerweile unterstützen nahezu alle gängigen Softwarepakete NeuroML im Import als auch im Export. Die Entwickler von SBML und NeuroML arbeiten sehr eng zusammen und tauschen sich regelmäßig über gegenwärtige Entwicklungen aus. Es ist also eine Annäherung beider Sprachen zu erwarten, um von den Erfolgen der jeweils anderen Sprache profitieren zu können.

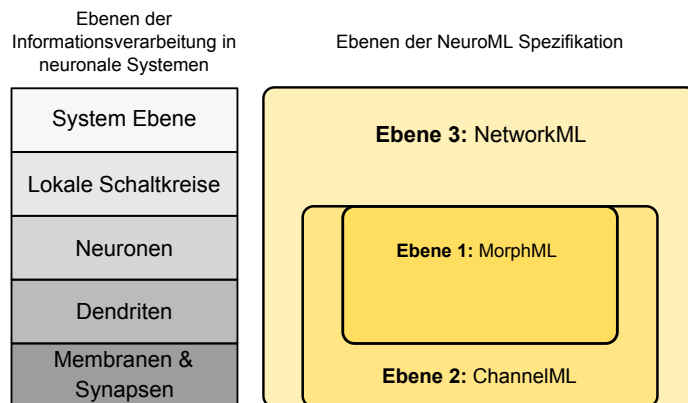


Abbildung 6.3.: Die unterschiedlichen Ebenen von NeuroML umfassen alle zu modellierenden Bereiche eines neuronalen Netzwerks [42]

Die Sprache umfasst drei Ebenen (siehe Abbildung 6.3), die alle biologischen Bereiche beinhaltet, die bei der Verarbeitung von Informationen im Gehirn beteiligt sind. Jede dieser drei Ebenen kann durch eine eigenständige Sprache, die jeweils auf die genauen Erfordernisse angepasst ist, beschrieben werden. Die jeweiligen Sprachen (MorphML, ChannelML und NetworkML) entsprechen den syntaktischen Anforderungen von XML und können daher gemeinsam verwendet werden, erlauben jedoch die Verwendung von spezifischen Attributen und Eigenschaften.

Ebene 1 (MorphML): Hier werden anatomische Eigenschaften (Länge, Ausdehnung, Segmente, usw.) der Neuronen und Dendriten beschrieben.

Ebene 2 (ChannelML): Biophysikalische Eigenschaften der Zellen und die Eigenschaften derer Interaktionsmöglichkeiten werden zu dieser Ebene hinzugefügt.

Ebene 3 (NetworkML): Die Position der Zelle und die Anordnung innerhalb des Netzwerkes wird modelliert. Die Vernetztheit einer Zelle sowie die Analyse auf Netzwerkebene findet hier statt.

Von dieser modularen Anordnung erhofft man sich, den Erstellungsprozess zu vereinfachen, da man die unterschiedlichen Ebenen getrennt von einander (weiter-)entwickeln kann.

7. Ökonomie

7.1. Historische Entwicklung

Überlegungen, wie ein idealer Staat aussehen könnte, finden sich bereits bei den Philosophen der Antike, insbesondere bei Platon und Aristoteles. Sie behandeln neben der Strukturierung und den Aufgaben des Staates auch die Haushaltungskunst, die der Staatskunst wesensverwandt ist. Es werden dabei schon Themen wie Arbeitsteilung, Handel, Tausch und Zinsen diskutiert. Dies kann jedoch nicht als eine Wirtschaftslehre verstanden werden. Auch nach damaliger Auffassung wird dies nicht als eine Wissenschaft angesehen [122, S. 19]. In der darauffolgenden Zeit beschäftigen sich die Menschen immer wieder mit Fragestellungen, die durchaus in die Ökonomie einzuordnen sind. Als Meilensteine für die Ökonomie als Wissenschaft werden zwei Ereignisse angesehen: das 1758 veröffentlichte Hauptwerk des Franzosen François Quesnay „Tableau économique“ und das Werk von Adam Smith aus dem Jahre 1776 mit dem Titel „An Inquiry into the Nature and Causes of the Wealth of Nations“¹.

Quesnay, der Arzt war, begann sich in seinen späten Jahren mit Wirtschaft und Politik zu beschäftigen. Er versuchte, die Wirtschaft als ein Kreislauf zu beschreiben. So stellt das *Tableau* „das erste vollständige theoretische Modell in der Geschichte der Wirtschaftsanalyse“ dar [122, S. 122]. Das *Tableau* gliedert die an der Wirtschaft teilnehmende Individuen in drei Gruppen: Landwirte, Handwerker & Händler und den Adel, also den Grundeigentümern. Während die Landwirte und Handwerker Nahrungsmittel bzw. Geräte produzieren, stellen die Grundeigentümer das dafür benötigte Land zur Verfügung. Jede Klasse ist auf die Leistungen einer anderen Klasse angewiesen. Die Grundeigentümer müssen selbst jedoch nichts produzieren, sie erhalten den gesamten Überschuss der beiden anderen Klassen, insbesondere den der Landwirte. Genauso wird auch der Preis der einzelnen Güter bestimmt, der dem *Tableau* abzulesen ist.

Wenig später veröffentlicht der schottische Mathematiker und Philosoph Adam Smith sein berühmtes Werk, in dem er die Frage nach der Natur und den Ursachen für Wohlstand stellt. Smith, ursprünglich Professor für Logik und später für Moralphilosophie, verstand es, in einem Modell neben dem Kreislauf- und Wachstumsvorstellungen auch historische Komponenten widerspruchsfrei aufzunehmen. Arbeitsteilung, die zur Steigerung der Pro-

¹dt. „Der Wohlstand der Nationen“

duktivität führt und Interesse nach sozialem und wirtschaftlichem Aufstieg sind die wesentlichen Grundprinzipien seines Modells. Der Preis für Güter beinhaltet demnach alle an der Produktion beteiligten Komponenten, zum Beispiel Boden, Arbeit und Kapital, und hat eine große soziale Komponente, da sich diese auf Rente, Lohn und Gewinn niederschlagen [122, S. 148]. Der Preis wird zum Indikator für die Verfügbarkeit eines Guts. Dieser ist deshalb keineswegs stabil, sondern beweglich und dynamisch, wobei die Einflussfaktoren zahlreich sind. Die „unsichtbare Hand“ wird zur Metapher für die vorhandene Wirkung, die zum Wohlstand führt, so wie Newton die Gravitation als eine unsichtbare Kraft beschrieben hat. Nach der Auffassung von Adam Smith besteht die Ökonomie aus einer Vielzahl kleiner, individueller Mikro-Interessen, aus denen sich im Sinne einer Selbstorganisation eine allgemeine Wohlfahrt, ein Phänomen auf Makroebene, ergibt [91, S. 315].

Im 19. Jahrhundert waren es französische Mathematiker, die versuchten, die Wirtschaftswissenschaften zu mathematisieren. Nicolas Canard und Antoine Cournot, beide stark geprägt von führenden Mathematikern ihrer Zeit, insbesondere Laplace, Lagrange und Poisson, erarbeiteten mathematisch fundierte Theorien. Während die Arbeiten von Canard eher geringe Beachtung fanden, wurden die Werke von Cournot sehr hoch geschätzt. Der nach ihm benannte Cournotsche Punkt und das Nash-Cournot-Gleichgewicht sind immer noch anerkannte Lösungskonzepte in Märkten. Das Instrumentarium der Mathematik in den Wirtschaftswissenschaften anzuwenden stellt eine große Leistung dar, die keineswegs trivial war. Cournot selbst hatte nicht primär alle volkswirtschaftlichen Probleme vor den Augen. Es ging ihm vielmehr um die Probleme, die sich besonders für eine mathematische Bearbeitung eignen [122, S. 252].

John Stuart Mill stellte Überlegungen an, die Kausalität, also das Ursache-Wirkung-Denken, innerhalb der Wirtschaftswissenschaften zu verankern. Dabei hatte er Gesetzmäßigkeiten vor Augen, die an ein mechanistisches Weltbild erinnern, das stark durch die Leistungen von Newton beeinflusst wurde. Seine Aussagen stellen einen „Laplace-Dämon“ der Ökonomie dar, also die prinzipielle Vorhersagbarkeit wirtschaftlicher Entwicklungen bei vollständiger Kenntnis aller Anfangszustände und Bedingungen [91, S. 316]. Die Axiomatisierung der Eigenschaften von Teilnehmern im Wirtschaftsgefüge findet hier also zum ersten Mal Anwendung. Während sich bereits bei Aristoteles eine Charakterisierung vom Menschen findet, der den größtmöglichen Nutzen mit minimalem Aufwand erzielen möchte, hat sich die Bezeichnung des *homo oeconomicus* als Bezeichnung für den rationalen Nutzenmaximierer eingebürgert. Der Ursprung des Begriffs selbst ist nicht eindeutig geklärt (siehe [108]). Die damit verbundene Vorstellung ist jedoch mittlerweile Grundlage für die Modellierung und die Beschreibung von Marktsituationen und Entscheidungen.

Vilfredo Pareto, der italienische Ökonom und Soziologe, leistete Ende des 19. und Anfang des 20. Jahrhunderts große Beiträge in den Wirtschaftswissenschaften, insbesondere

im Bereich der Wohlfahrtsökonomie. Seine Forschungsarbeiten an der Schnittstelle zwischen Ökonomie und Soziologie wurden zur Grundlage für die spätere Disziplin der Ökonometrie. Deshalb wird Pareto auch als der Begründer der Ökonometrie bezeichnet [122, S. 172]. Dabei versucht man, mittels empirisch erhobener Daten wirtschaftstheoretische Modelle zu überprüfen. Phänomene aus der Wirtschaft werden quantitativ erfasst und analysiert. Ganz allgemein gesprochen wird versucht den Einfluss einzelner Parameter auf das Gesamtsystem zu ermitteln. Diese Methodik findet noch immer Anwendung in wirtschaftlichen Analysen, so zum Beispiel bei Konjunkturprognosen für Volkswirtschaften oder mit Zeitreihenverfahren auch in der Betriebswirtschaft. Zahlreiche Nobelpreisträger der Wirtschaftswissenschaften kamen bereits aus dem Bereich der Ökonometrie.

Die Versuche, einzelne Parameter innerhalb des Wirtschaftsgefüges zu separieren, getrennt von diesem zu variieren und dabei Veränderungen zu beobachten, um später verlässliche und belastbare Aussagen auf das Wirtschaftssystem zu machen, werden von Wissenschaftstheoretikern in Frage gestellt [91, S. 319]. Exogenität beschreibt den Umstand, dass ein Parameter nicht mit anderen Parametern eines Systems rückgekoppelt ist. Linearität erlaubt beobachtbare Effekte als die Summe von Wirkungen zu beschreiben, die von unterschiedlichen Ursachen hervorgerufen wurden. Beides sind Annahmen, die insbesondere in komplexen Systemen im Allgemeinen nicht zutreffen. Das Modell wird den Ansprüchen nicht gerecht, die Wirklichkeit adäquat abzubilden. Beschrieben wird höchstens ein Teil des Gesamtsystems, also ein nicht repräsentativer Ausschnitt des Ganzen.

Der französische Mathematiker Louis Bachelier veröffentlichte 1900 seine Doktorarbeit mit dem Titel „Théorie de la Spéculation“ [4]. Eine Arbeit, deren Leistung zu Lebzeiten nicht ausreichend anerkannt wurde. Heutzutage gilt sie jedoch als eine der ersten und wichtigsten Arbeiten im Bereich der Finanzmathematik. Bachelier versuchte, Aktienkursbewegungen zu beschreiben und verwendete dabei eine für diese Wissenschaft neuartige Methode, die später mit Albert Einstein auch Einzug in die Physik halten wird, der *random walk*. Während seine Vorgänger noch bemüht waren, Marktgeschehnisse über die herkömmlichen Methoden zu beschreiben, also Preisänderungen am Markt aufgrund von Ereignissen zu erklären und vorherzusagen, legt Bachelier der Preisentwicklung einen stochastischen Prozess zugrunde. Dieses probabilistische Vorgehen schien für Vorhersagen gut geeignet zu sein. Nicht zuletzt, weil der klassische Ansatz kaum belastbare Ergebnisse lieferte und sich die Identifikation von Einflussparametern bei der hohen Komplexität von Märkten als sehr schwierig herausstellte. In etwa zur gleichen Zeit, also 1908, veröffentlichte der österreichisch-italienische Mathematiker Vincen Bronzin ein ebenfalls bedeutendes Werk unter dem Titel „Theorie der Prämien-geschäfte“. Er verwendetet darin ebenfalls Methoden der Wahrscheinlichkeitsrechnung und rechtfertigt diese dadurch, dass die Ermittlung von Einflussparametern praktisch nicht durchführbar ist: „(...) klar ist es aber auch, daß sich die Ursachen dieser Schwankungen und somit die Gesetze, denen

sie folgen sollten, jeder Rechnung entziehen. Bei dieser Lage der Dinge werden wir also höchstens von der Wahrscheinlichkeit einer bestimmten Schwankung x sprechen können, und zwar ohne hierfür einen näher definierten, begründeten Ausdruck zu besitzen.“ [18, S. 39]. Die Arbeitsweise von Bronzin wurde von Ludwig Boltzmann, bei dem er in Wien Vorlesungen und Seminare besuchte, entscheidend mitgeprägt.

1943 erschien das Buch, das John von Neumann gemeinsam mit Oskar Morgenstern geschrieben hatte, unter dem Titel: „Theorie of Games and Economic Behaviour“. Dieses Buch beschreibt eine neue Möglichkeit, Verhalten von Menschen in Entscheidungssituationen mathematisch zu beschreiben und zu formalisieren. Von Neumann und Morgenstern prägten den Begriff der Spieltheorie und stellten Konzepte vor, die in vielen anderen Disziplinen erfolgreich eingesetzt werden. Ein Spiel besteht dabei aus einer Menge von Spielern, die jeweils mit einer Menge an möglichen Aktionen ausgestattet sind. Während des Spiels trifft jeder Spieler eine Entscheidung, je nach Art des Spiels auch mehrere. Am Ende erhält jeder Spieler einen Lohn, der oft auch als Payoff oder Utility bezeichnet wird. Dieser ist abhängig von der eigenen Entscheidung sowie von den Aktionen der anderen Spieler. In den letzten Jahren wurden zahlreiche Lösungskonzepte erarbeitet, die eine optimale Entscheidung im Vorfeld berechnen. Bekannt ist hier vor allem das sogenannte Maximinkriterium, das Pareto-Optimum oder das Nash-Gleichgewicht. Den Spielern wird bei der mathematischen Beschreibung eine Verhaltensweise zugeschrieben, die an den *homo oeconomicus* erinnert. Der Spieler, in der Spieltheorie bezeichnet man ihn als Agenten, ist rational, dies bedeutet, dass er versucht seine Belohnung (Payoff, Utility) unter den gegebenen Umständen zu maximieren. Eine Unterstellung, die nicht ganz unumstritten ist. Dieser Uneinigkeit sind sich die Autoren durchaus bewusst: „One of the chief difficulties lies in properly describing the assumptions which have to be made about the motives of the individual. This problem has been stated traditionally by assuming that the consumer desires to obtain a maximum of utility (...).“ [103, S. 8].

Nichtsdestotrotz ist die Spieltheorie eine geeignete Möglichkeit, Entscheidungen zu bewerten und verschiedene Entscheidungsszenarien gegenüberzustellen. Diverse unterschiedliche Spielarten (kooperative und nicht-kooperative Spiele, Nullsummenspiele, iterative Spiele, usw.) haben dazu geführt, dass man zahlreiche Anwendungsgebiete entdeckte, in denen die Spieltheorie vieles erklären kann und zu guten Ergebnissen führt, wie zum Beispiel in der Wirtschaft, der Soziologie, der Psychologie, der Biologie oder in der Informatik. Die Leistungsfähigkeit der Spieltheorie darf jedoch nicht überbewertet werden. Viele der axiomatisch festgelegten Annahmen sind umstritten, neben der Rationalität der Spieler auch die Quantifizierung der Belohnung. Für kleine Entscheidungen mit wenig Akteuren mag dies ein gutes Analysewerkzeug sein; das gesamte Wirtschaftssystem wird sich damit jedoch nicht erklären lassen. Zumal sich die Lösungskonzepte nur auf Situationen beziehen, in der längerfristige Folgen und Konsequenzen meistens nicht berücksichtigt werden.

Mitte des 20. Jahrhunderts wurden die Ideen von Bachelier wieder aufgegriffen und weiterentwickelt. Zu den größten Errungenschaften zählen die *Modern Portfolio Theory* (MPT), die *Capital Asset Pricing Method* (CAPM) und die Black-Scholes-Formel. Sie stellen auch heute noch die Grundlage der Finanzmathematik dar und wären ohne entsprechende Vorarbeiten von Bachelier und Bronzin nicht möglich gewesen. Probabilistische Annahmen spielen seither in allen bedeutenden Theorien der Finanzmathematik eine große Rolle. So auch beim Lebenszyklusmodell von Robert Merton, das sich mit der Planung von Finanz- und Humankapital beschäftigt [100]. Die modernen Ansätze der Finanzmathematik beruhen allesamt auf Annahmen über Markteigenschaften, die den realen Finanzmarkt nur in kleinen Ausschnitten und zu bestimmten Zeiten beschreiben, deshalb scheitern diese auch oftmals in der Praxis. Deutlich wird dies vor allem dann, wenn es zu unvorhergesehenen Börsenereignissen kommt. Im Jahr 2008 konnte man an mehreren Tagen Sprünge im Aktienkurs des Dow Jones von über 10% beobachten. Am 9. Oktober 2008 fiel der Kurs um 7.33%, 4 Tage später konnte er wieder um 11.08% zulegen um zwei Tage später wieder um knapp 8% zu verlieren. Insgesamt stellte der Oktober 2008 einen turbulenten Zeitraum für die weltweiten Aktienkurse dar. Der Rekordverlust des Dow Jones vom 19. Oktober im Jahre 1987 stellt aber mit 29.2% nochmal eine andere Dimension dar. Für die auf Bachelier und Bronzin zurückgehenden Annahme des *random walks* und der Brownschen Bewegung sind dies Ereignisse, die sich angesichts der extrem niedrigen Wahrscheinlichkeit praktisch ausschließen lassen [91, S. 345]. Es scheint, als seien die besten uns zur Verfügung stehenden Mathematisierungen der Finanzwelt angesichts der Komplexität inadäquat.

7.2. Qualitative Merkmale ökonomischer Komplexität

Während sich die Wirtschaftswissenschaften bemüht, die Komplexität ökonomischer Systeme zu verstehen, ringt sie vor allem darum, die beobachteten Effekte des Marktes in qualitative Dimensionen einordnen zu können. Die Ursachen, welche zu komplexem Verhalten führen, lassen sich anhand verschiedener Merkmale festmachen. Die Begrifflichkeiten, die dabei verwendet werden stammen vorrangig aus der Physik und der Mathematik und können wie folgt systematisiert werden:

Nichtlineare Dynamik Bei der Analyse von Preisentwicklungen über den gesamten Aufzeichnungszeitraum finden sich Abschnitte, bei denen das Marktverhalten durch lineare mechanistische Modelle nicht erklärt werden konnte. Unregelmäßigkeiten als eine additive Überlagerung von zahlreichen linearen Funktionen darzustellen, die jeweils Wirkungen von verschiedenen Ursachen repräsentieren, konnte nicht gelingen. Die Wissenschaften gelangten nach und nach zu der Einsicht, dass es sich bei dem ökonomischen System um ein nichtlineares handelt [112]. Vor allem das oszillie-

rende Verhalten von Aktienkursen während der Großen Depression im Oktober 1929 konnte nicht in Einklang mit der linearen Theorie, sondern nur durch Nichtlinearität erklärt werden [91, S. 322].

Mittlerweile ist das mechanistische Weltbild überholt und die nichtlineare Modellierung von Märkten in den Wirtschaftswissenschaften vollständig integriert [83].

Interdependenz Wechselseitige Abhängigkeiten bestimmen unsere Wirtschaft maßgeblich. Spätestens durch die Arbeitsteilung sind Menschen von einander — in einem wirtschaftlichen Sinn — abhängig. Doch auch zuvor waren die Menschen auf die Natur angewiesen. Umstände wie Dürreperioden oder Hochwasser, Kälteperioden und Hitzewellen beeinflussen schon immer wirtschaftlichen Ertrag. Mittlerweile ist jedoch auch die Abhängigkeit von anderen Akteure dazugekommen. Unternehmen sind auf andere Unternehmen, aber auch auf jeden einzelnen Arbeiter angewiesen. Regierungsbeschlüsse von Staaten haben Auswirkungen auf die Gesellschaft und Unternehmen. Die Vernetztheit der verschiedenen Akteure innerhalb des Wirtschaftsgefüges ist enorm und nur mehr im Groben zu überblicken. Die Kopplungen können dabei ganz unterschiedlich sein. Für die Ökonomie ist dies von besonderer Bedeutung. Die Identifikation von Abhängigkeiten, also die Interpretation ökonomischer Kennzahlen, die sich wechselseitig beeinflussen, zählt zu den großen Aufgaben und Herausforderungen der Wirtschaftswissenschaften.

Zufall Die Komplexität des menschlichen Handelns auf Mikroebene zu beschreiben, ist nicht trivial (siehe Abschnitt 4). Eine etablierte Möglichkeit stellt die probabilistische Beschreibung dar. Dabei werden individuelle Entscheidungen mit Wahrscheinlichkeiten versehen und das Verhalten auf Makroebene durch die sogenannte Mastergleichung beschrieben [91, S. 330]. Während sich andere Parameter der Wirtschaft leichter bestimmen lassen, z.B. Anzahl oder Preis eines Produkts, sind es vor allem soziale Komponenten, die sich nur schwer quantifizieren lassen. Diese spielen jedoch eine Rolle in Wirtschaftsprozessen. Sie können sich zum Beispiel positiv, aber auch negativ auf die Produktivität eines Unternehmens auswirken. Insgesamt wird das Konzept des Zufalls gerne herangezogen, wenn es wenig aussichtsreich erscheint, alle möglichen Faktoren zu berücksichtigen, die die Auswahl eines möglichen Ergebnisses beeinflussen.

Chaos Chaotische Phänomene können schon bei sehr einfachen nichtlinearen Systemen beobachtet werden und wurden um die Jahrhundertwende von Henri Poincaré beschrieben. Obwohl die Gleichungen, welche das System vollständig beschreiben, zum Teil verhältnismäßig einfach sind, für das klassische Drei-Körper-Problem ist dies der Fall, lässt sich analytisch oft keine Lösung finden. Eine Prognose wird so-

mit schwierig. Längerfristige Vorhersagen sind praktisch nicht mehr durchführbar, da der Aufwand zur numerischen Berechnung ein praktikables Maß übersteigt. Zudem stellt die Sensitivität gegenüber den Anfangswerten eine große Herausforderung dar. Kleinste Änderungen beeinflussen den längerfristigen Verlauf entscheidend, man denke an den sprichwörtlichen Flügelschlag eines Schmetterlings. Insbesondere Modelle der Wirtschaftswissenschaften, die sich mit Konjunkturzyklen oder anderweitig mit Wachstum beschäftigen, zeigen oftmals chaotisches Verhalten (siehe [83, 93]).

7.3. Wirtschafts- und Ökonophysik

Um wirtschaftliche Entwicklungen, insbesondere Preisänderungen an den Börsen, präziser vorherzusagen bzw. rückblickend besser deuten zu können, hat sich die Disziplin „Ökonophysik“ entwickelt. Es handelt sich um ein interdisziplinäres Fachgebiet, dessen Bezeichnung sich aus den zwei Begriffen Ökonomie und Physik ableitet. Eingeführt wurde die Bezeichnung von dem amerikanischen Physiker Harry E. Stanley in den frühen 1990er Jahren [110]. Ziel dabei ist es Verbindung von erfolgreichen physikalischen Methoden mit den Problemfeldern modernen Wirtschaftens. Mittlerweile existiert die Wissenschaftsphysik als eigenständiges Studium, in dem vor allem die Kernfächer Mathematik, Physik, Informatik und Wirtschaftswissenschaften im Studienplan verankert sind [2].

Die Bestrebungen, Naturgesetze zur Beschreibung der Finanzmärkte nach dem Vorbild der drei Newtonschen Axiome zu finden, nimmt in den 1980er Jahren seinen Lauf. Obwohl in der Vergangenheit bereits Bestrebungen unternommen wurden, Phänomene quantitativ zu beschreiben, begannen Physiker erst nach großen Erfolgen im Bereich der nicht-linearen Dynamik und Chaostheorie diese Erkenntnisse auf die Wirtschaftswissenschaften zu übertragen.

7.3.1. Stochastische Prozesse

Random-Walk-Theorie

Der Random Walk stellt die mathematische Modellierung einer Bewegungsabfolge dar, deren Schritte nacheinander und unabhängig voneinander durchgeführt werden. Dabei liegt ein stochastischer Prozess zugrunde. Die zeitliche Abfolge ist folglich sequentiell und diskret. Abbildung 7.1 (a) zeigt einen typischen Verlauf eines Random Walk. Der Start ($t = 0$) erfolgt dabei mit dem Wert 0 und in jedem Schritt wird zu diesem Wert eine Konstante dazu addiert bzw. subtrahiert. Die Entscheidung, ob inkrementiert oder dekrementiert wird, erfolgt zufällig und unabhängig davon was in den vorhergehenden Schritten

der Fall war. Über einen längeren Zeitraum ergibt sich eine Abfolge von Schritten und somit der typische Verlauf, wie er auch in Abbildung 7.1 (a) dargestellt ist.



Abbildung 7.1.: Qualitativer Vergleich zweier Zeitreihen: a) Zufällig generierter random walk und b) zeitlicher Verlauf des Aktienindex Dow Jones im Zeitraum von Oktober 2012 bis September 2013²

Abbildung 7.1 zeigt neben einem Random-Walk auch den zeitlichen Verlauf des Aktienindex Dow Jones. Auffällig ist, dass sich der qualitative Verlauf sehr stark ähnelt. Eine Modellierung des Index durch einen Random-Walk, so wie ihn die Random-Walk-Theorie vorsieht, ist daher zunächst naheliegend. Die Theorie versucht, mit dieser Methode unterschiedliche Preise und Preisentwicklungen vorherzusagen [110, S. 49]. Eine genaue Zeitreihenanalyse zeigt hingegen Schwächen dieses Ansatzes auf. Während dem idealen Random Walk ein sogenanntes weißes Rauschen zugrundeliegt, das heißt, das alle Frequenzen treten zu einem gleichen Anteil auf — man spricht vom konstanten Leistungsdichtespektrum —, ist dies beim Verlauf eines Aktienindex oder der Preisentwicklung nicht der Fall.

Lévy-Prozesse

Viele wichtige Prozesse, wie der Random-Walk, der Wiener-Prozess oder der Poisson-Prozess, sind im Grunde Spezialfälle des Lévy Prozesses. Die nach Paul Lévy, einem französischen Mathematiker des 20. Jahrhunderts, benannten stochastischen Prozessen sind durch einen variablen Zuwachs gekennzeichnet [94, S. 32]. Das bedeutet, dass die Änderungsrate in jedem Schritt nicht mehr konstant ist. Außerdem sind Lévy-Prozesse, im Gegensatz zum Random-Walk, auch nicht mehr zeitdiskret, sondern erlauben eine kontinuierliche Modellierung. Dies spielt jedoch im Bereich der Wertentwicklung von Aktienkursen nur eine untergeordnete Rolle, da die Aktualisierung des Index und die Preisanpassung an der Börse in der Regel auch nicht kontinuierlich erfolgt.

Besonders häufig wird der Wiener-Prozess, der auch als Brownsche Bewegung bekannt ist, verwendet. Er ist die Grundlage zahlreicher stochastischer zeitstetiger Prozesse und wird in vielen Natur- und Wirtschaftswissenschaften verwendet. Die grundlegende Idee geht dabei auf die Leistungen von Bachelier und Einstein zurück (siehe Abschnitt 7.1).

²Quelle: <http://finance.yahoo.de>, abgerufen am 10. September 2013

7.3.2. Korrelation, Autokorrelation und Zeitreihen

Die Daten in der Finanzmathematik liegen üblicherweise in Zeitreihen vor. Dabei werden eine oder mehrere zu beobachtende Variablen über einen bestimmten Zeitraum hinweg aufgezeichnet und schließlich in zeitlicher Abhängigkeit dargestellt. Es handelt sich um eine große Vielzahl von verschiedenen Daten, die aufgezeichnet werden. Arbeitslosenzahlen, Zinsen, Inflationsrate, Investitionen, Aktienkurse, Preise von Rohstoffen uvm. sind mögliche Kennzahlen, die im ökonomischen Umfeld eine Rolle spielen. Man bezeichnet diese ganz allgemein als Wirtschaftsindikatoren. Sind die Daten erst einmal erhoben, so ist es naheliegend, diese in Zusammenhang zu bringen. Welchen Einfluss haben Rohstoffpreise auf den Aktienkurs? Wie verhält sich die Arbeitslosenquote zu der Inflationsrate? Dies sind mögliche Fragestellungen, die sich damit beschäftigen, die Vergangenheit der Finanzwirtschaft zu deuten und daraus Prognosen für die Zukunft ableiten. Das entspricht genau dem Forschungsfeld der Ökonometrie und auch dem der Ökonophysik. Innerhalb der Mathematik beschäftigt sich die Disziplin der Zeitreihenanalyse mit der mathematisch-statischen Betrachtung von Zeitreihen und der Prognose deren Entwicklung.

Echte kausale Beziehung zwischen diesen Indikatoren herzustellen ist in der Regel nicht einfach, zumal die Komplexität des Finanzmarktes dieses Unterfangen soweit erschwert, dass es mittlerweile als nicht durchführbar gilt. Man versucht, sogenannte Korrelationen zwischen den verschiedenen Kennzahlen aufzudecken. Während die Kausalität eine echte Ursache-Wirkungs-Relation ist, stellt die Korrelation zunächst nur einen statistischen Zusammenhang dar. Aus der Kausalität folgt Korrelation der Umkehrschluss ist jedoch nicht gültig.

Der Korrelationskoeffizient ist der Zahlenwert, der am Ende der Berechnungen darüber Auskunft gibt, ob und welche Korrelation vorhanden ist. Es handelt sich üblicherweise um einen Wert in dem Intervall $[-1, +1]$ wobei -1 für einen vollständig negativen und $+1$ für einen vollständigen positiven Zusammenhang steht. Ist der Korrelationskoeffizient gleich 0 , so liegt kein Zusammenhang zwischen den Zeitreihen vor.

Bei der Autokorrelation wird der Zusammenhang von aufeinanderfolgenden Datenpunkten innerhalb einer Zeitreihe analysiert. Autokorrelation lässt sich bei Random Walk erwartungsgemäß nicht ausmachen, wohingegen Finanzmarktdaten existieren, in denen sehr wohl eine Autokorrelation errechnet werden konnte [110, S. 62]. Insgesamt sind in Finanzmärkten jedoch kaum signifikante Autokorrelationen vorhanden und wenn, dann nur für sehr kurze Zeiträume (≤ 20 Minuten) [24].

7.3.3. Spieltheorie

Die Spieltheorie wurde von John von Neumann und Oskar Morgenstern in den 1940er Jahren durch deren berühmtes Werk erstmals einer breiten Öffentlichkeit zugänglich. Mittler-

weile ist sie eine beliebte Methode zur Modellierung und Simulation von Entscheidungssituationen (siehe auch Abschnitt 4.3.1). Ungeachtet der oftmals kontrovers diskutierten Grundannahmen, z.B. der Profitmaximierung der Spieler, leistet die Spieltheorie einen entscheidenden Beitrag für den Wirtschaftswissenschaften. So können zum Beispiel unterschiedliche Szenarien eines möglichen Sachverhalts auf deren Ergebnis hin untersucht werden. Wichtige ökonomische Mechanismen zur Preisermittlung, die Auktionen, bedienen sich häufig an den Konzepten der Spieltheorie, um Ergebnisse und Abläufe zu interpretieren. Das Themenfeld des Marktdesigns beschäftigt sich mit der Frage, wie ein „fairer“ Markt aussieht und welche Eigenschaften dieser erfüllen soll. Man bemüht sich also, die Rahmenbedingungen zu ermitteln, die notwendig sind, um allen Teilnehmern gleiche Chancen am Markt zu ermöglichen. Allerdings sollten die Rahmenbedingungen minimal sein, das bedeutet es soll durch äußere Vorgaben wie Gesetze und Regeln nicht mehr vorgegeben werden als unbedingt nötig. Durch die Spieltheorie konnten bereits Auktionsformate ermittelt werden, die als besonders fair gelten, zum Beispiel die Vickrey Auktion. Auch in dem Bereich der Sozialwahltheorie konnten mithilfe von mathematischen Überlegungen interessante Ergebnisse nachgewiesen werden. Hier sind zum Beispiel das Arrow-Theorem und das Gibbard-Satterthwaite-Theorem zu nennen. Beides sind negative Ergebnisse, die sich mit der Zusammenfassung von Präferenzen von einzelnen Individuen beschäftigen. Die Aggregation von Entscheidungen auf der Mikroebene zu einer kollektiven Entscheidung auf Makroebene ist notwendigerweise mit Einschränkungen verbunden.

Neben diesen sehr theoretischen Überlegungen, die sich mit der Beschaffenheit von Märkten auseinandersetzen, werden Spiele vor allem dann eingesetzt, wenn es darum geht Entscheidungen zu vergleichen. Ein Spiel besteht vereinfacht ausgedrückt aus Spielern, die bestimmte Aktionen ausführen können, und einer Belohnung, die sich aus der eigenen Aktion und den Aktionen der Mitspieler ergibt. Sind die Spieler und die Aktionen erstmal modelliert, so können die verschiedenen Szenarien gegenübergestellt und verglichen werden. Ein sehr berühmtes Beispiel ist das sogenannte Gefangenendilemma (engl. Prisoner's dilemma), siehe Abbildung 7.2.

	Nicht Kooperieren	Kooperieren
Nicht Kooperieren	-1, -1	-10, 0
Kooperieren	0, -10	-5, -5

Abbildung 7.2.: Gefangenendilemma

Es handelt sich um ein Spiel mit zwei Spielern, bei dem jeder Spieler aus zwei möglichen Entscheidungen eine wählen kann. Die zwei Personen werden festgenommen und beschuldigt, eine Straftat begangen zu haben. Sie werden unabhängig voneinander befragt

und können die Aussage entweder verweigern und nicht kooperieren oder die Schuld auf die andere Person schieben, also mit der Polizei kooperieren. Es ergeben sich unterschiedliche Szenarien: Beide Personen kooperieren nicht mit der Polizei, beide kooperieren mit der Polizei oder eine der beiden Personen kooperiert und die andere Person nicht. In jedem der genannten Fälle ergibt sich eine andere Situation, mit jeweils unterschiedlichem Ausgang. Grundsätzlich gilt, dass weniger Jahre im Gefängnis besser sind als mehr. Dadurch äußert sich das Rationalitätskriterium. Kooperieren beide mit der Polizei, beide schieben die Schuld auf die jeweils andere Person, so werden beide zu fünf Jahren Haft verurteilt. Verweigern beide die Aussage, so kann niemand lange festgehalten werden und beide werden nach einem kurzen Gefängnisaufenthalt wieder in die Freiheit entlassen. Kooperiert jedoch eine Person mit der Polizei, während der andere Gefangene schweigt, wird die kooperierende Person sofort entlassen und der Schweigende muss für eine lange Zeit ins Gefängnis. Wie sollen sich jetzt die zwei Personen entscheiden, wo niemand weiß, wie sich der andere verhält und eine Kommunikation zwischen ihnen nicht möglich ist? Man erkennt, dass sich jede Person in einem Dilemma befindet.

Dieses Spiel ist vielfach untersucht und diskutiert worden. Es existieren daher zahlreiche Variationen und unterschiedliche Lösungsstrategien. In der Wirtschaft, aber auch in der Soziologie, sind diese Modelle beliebt. Sie erlauben eine sehr allgemeine Modellierung auf der wirtschaftlichen Mikroebene, wie einzelne Personen, Arbeitnehmer und Arbeitgeber, aber auch auf der Makroebene, wie Abteilungen, Firmen und Nationen.

7.3.4. Simulationen

Monte-Carlo-Simulation

Die Monte-Carlo-Methode ist geeignet zur Simulation von möglichen Verläufen von Preis- und Wertentwicklungen im Bereich der Finanzmathematik. Dabei werden Anfangsbedingungen und Eingangsparameter, die nicht genau bestimmt werden können, auf einen zufällig bestimmten Wert festgelegt und das Ergebnis berechnet. Das Ergebnis, das man erhält wäre nur für den Fall gültig, der durch die Anfangsbedingungen festgelegt wurde. Deshalb sieht die Monte-Carlo-Simulation vor, viele Ergebnisse mit jeweils anderen zufälligen Parametern zu berechnen. Auf Basis dieser Ergebnisse wird ein Mittelwert gebildet. Der Vorteil liegt vor allem in der Berücksichtigung verschiedener Szenarien, die durch Variation von den Anfangsbedingungen mit einer Unsicherheit behaftet sind.

Die zeitliche Entwicklung der jeweiligen Endergebnisse kann während der Simulation oft nicht nachvollzogen werden. Eine Vorhersage ist in den meisten Fällen unmöglich, obwohl die einzelnen Schritte sehr wohl definiert und determiniert sind. Das komplexe Verhalten des Sachverhalts zeigt sich erneut sehr deutlich. Diese allgemeine Methode zur Simulation wird in sehr vielen unterschiedlichen Disziplinen verwendet. Sie geht zurück

auf die Mathematiker Stanislaw Ulam und John von Neumann und wurde in den 1940er Jahren entwickelt [101]. 1977 entwickelte Boyle einen Monte-Carlo-Ansatz um die Wertentwicklung von Optionen zu simulieren [15]. Das Modell von Black und Scholes mit ihrer bekannten Differentialgleichung war nur wenige Jahre zuvor veröffentlicht worden, doch Boyle beschritt einen ganz anderen Weg zur Bewertung und Prognose.

Eine Zielsetzung der Monte-Carlo-Simulation in der Finanzmathematik stellt vor allem auch die Identifikation von „invarianten makroskopischen Observablen“. Während sich die Eigenschaften und Werte auf der Mikroebene bei jedem Simulationsdurchlauf ändern, sucht man gezielt nach Mustern und Variablen in den Ergebnissen, die sich bis auf kleine, vernachlässigbare Abweichungen über die unterschiedlichen Simulationsdurchläufe nicht unterscheiden [110, S. 169]. Ebenso ist es denkbar, *slaving* Parameter zu identifizieren, also Parameter, die in der Lage sind, mit ihren Zuständen die Werte anderer Parameter zu bestimmen.

Multiagentensysteme

Das Multiagentensystem ist ein Konzept aus dem Bereich der Informatik, das verwendet wird, um eine Problemstellung zu bearbeiten an deren Lösung viele verschiedene, autonom handelnde Einheiten (sog. Agenten) beteiligt sind. Man unterscheidet dabei zwischen homogenen und heterogenen Multiagentensystemen, wobei in dem ersteren nur eine einzige Art von Agenten und in dem letzteren verschiedene Agenten vorkommen. In der Regel ist ein Agent ein Softwareprogramm, welches ein bestimmtes Verhalten aufweist. Das Multiagentensystem ist ein Oberbegriff für eine große Bandbreite an verschiedenen Simulationsmöglichkeiten. Mit Erfolg werden sie auch in der Soziologie eingesetzt. Grundlagen und Beispiele sind auch in Kapitel 4.3.2 zu finden.

Mit Hilfe dieser Systeme kann man beispielsweise den Verkehr in Städten simulieren. Dabei wird für jede Klasse von Verkehrsteilnehmern ein Agententyp modelliert. Es ist möglich, zwischen Autofahrern, Radfahrern und Fußgänger und weiteren Typen zu unterscheiden. Wichtig ist, dass die Steuerung des zu modellierenden Systems nicht an einer zentralen Stelle erfolgt, sondern dass die Intelligenz in den autonom handelnden Agenten implementiert ist. Die Agenten verfügen über Sensoren, das heißt sie können die Außenwelt wahrnehmen. Des Weiteren können sie die erhaltenen Daten und Informationen verarbeiten und mit Hilfe von Aktoren eine Aktion einleiten. Zum Beispiel abbremsten und stehen bleiben, falls man auf eine rote Ampel zusteuert oder beschleunigen, für den Fall, dass die Ampel auf Grün umschaltet. Es sind auch Implementierungen möglich, die nicht nur auf einen Impuls von der Außenwelt warten. Agenten können auch von sich aus Aktionen starten und einleiten, beispielsweise einen Spurwechsel auf einer Autobahn. Man bezeichnet diese Agenten dann als sogenannte proaktive und reaktive Agenten [116, S. 13].

Im wirtschaftlichen Umfeld könnte man das Verhalten der Agenten entsprechend anders konfigurieren. Die Aktionen werden nicht durch Ampeln oder andere Verkehrsteilnehmer ausgelöst, sondern durch den Anstieg oder Fall von Aktienkursen. Die Reaktionen darauf wären dann im einfachsten Fall „kaufen oder verkaufen“. Es können damit auch umfangreichere Situationen modelliert werden wie zum Beispiel Auktionen, Preisverhandlungen oder andere Marktmechanismen [110]. Insgesamt bieten die Multiagentensysteme eine gute Möglichkeit, Entwicklungen innerhalb eines Marktes zu beobachten. Softwarebasierte Agenten können schneller und rationaler handeln als Menschen, deshalb werden sie in den Bereichen von Transport, Logistik und Produktionssteuerung oftmals verwendet [116]. Der Ansatz könnte sich auch eignen um Marktverhalten von Unternehmen zu simulieren, neue Kooperationspartner zu finden oder Nischen für Geschäftsmodelle zu entdecken (siehe [85]).

Die Anwendungsfälle für Multiagentensysteme sind vielzählig. Die Wechselwirkungen autonomer Systeme, die mit etwas Intelligenz ausgestattet sind, zu beobachten, zu analysieren und davon etwas für die Praxis zu lernen, ist der Wunsch vieler. Die Vorstellung, die Realität mit allen Beteiligten und Akteuren in einem Computersystem abzubilden, welches dann optimale Strategien und Handlungsanweisungen berechnet, wäre nicht nur für wirtschaftliche Situationen von großem Interesse. Es ist davon auszugehen, dass dieses Forschungsfeld noch lange nicht vollständig ausgearbeitet ist und sich noch zahlreiche weitere Anwendungen ergeben, in denen Multiagentensysteme eine große Rolle spielen werden.

7.4. Modellierung komplexer ökonomischer Systeme

Die Modellierung von ökonomischen Systemen erfolgt in der Regel durch Zeitreihen und Regressionsmodelle, die den quantitativen Zusammenhang zwischen gemessenen bzw. beobachteten Variablen herstellen. Eine graphische Visualisierung von Abhängigkeiten ist in den Wirtschaftswissenschaften nicht verbreitet. Anders als in den Neurowissenschaften oder der Biologie sind Versuche, komplexe Zusammenhänge graphisch darzustellen, eher die Ausnahme. Sie stellen gerade deshalb eine große Herausforderung dar. Das *Observatory of Economic Complexity* nimmt sich dieser Herausforderung an und versucht, die Zusammenhänge der Marktwirtschaft zu veranschaulichen. Es handelt sich gewissermaßen um Pionierarbeit, die die Wissenschaftler am Center for International Development an der Harvard University leisten und in den MIT Media Labs leisten.

7.4.1. The Observatory of Economic Complexity

Diese Initiative versucht, die komplexen Zusammenhänge der Marktwirtschaft zu erfassen und möchte mit Hilfe großer Datenmengen und einer geeigneten graphischen Darstellung diesem Ziel näher kommen. Ausgehend von den verschiedenen Produkten, die weltweit hergestellt werden, werden Volkswirtschaften bewertet und ein Komplexitätsindex berechnet. Die Idee dahinter ist, dass fortgeschrittene Industrieländer, wie etwa Deutschland oder Japan, nicht nur eine Menge Güter produzieren, sondern sie sind auch in der Lage eine große Bandbreite an Gütern herzustellen. Es handelt sich um viele verschiedene Produkte, aus nahezu allen Wirtschaftsbereichen. Die Palette umfasst dabei einfache Werkzeuge und Nahrungsmittel, veredelte Rohstoffe und High-Tech-Produkte für Luft- und Raumfahrt. Der Komplexitätsindex, *Economic Complexity*, wird für jede Volkswirtschaft getrennt berechnet. Er setzt sich aus der Anzahl der verschiedenen, hergestellten Gütern zusammen und wie viele andere Länder in der Lage sind, die entsprechenden Güter ebenfalls zu produzieren. Dies bedeutet konkret, dass der Index hoch ist, wenn ein Land zum einen sehr viele Güter herstellt und zum anderen Güter herstellt, die wenig andere Länder herstellen. Je höher der Index, desto höher die Komplexität der Volkswirtschaft. Besonders interessant ist, dass die Komplexität, die oftmals als eine negative Eigenschaft angesehen wird, in diesem Fall etwas Positives ist.

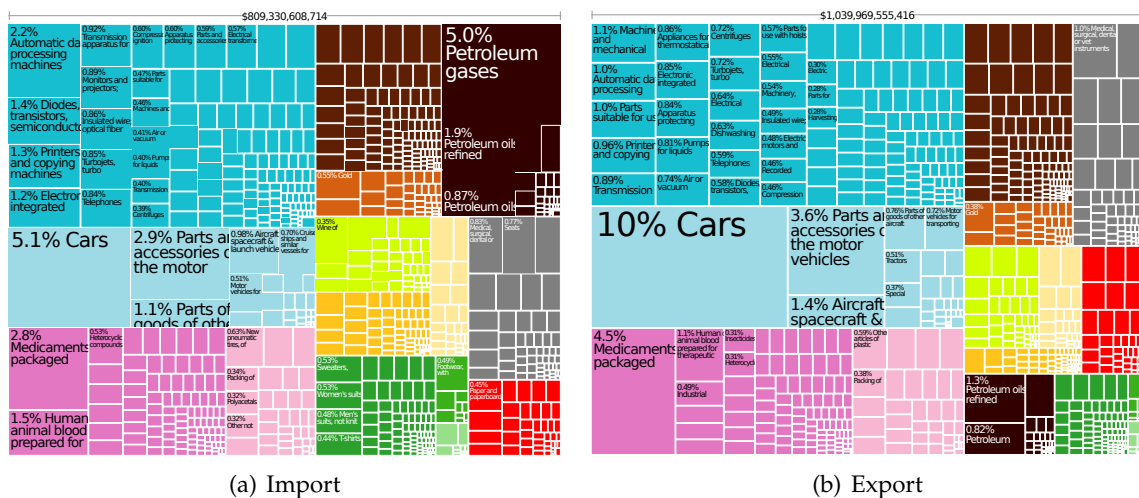


Abbildung 7.3.: Interaktive Übersicht des deutschen Warenimports (a) und Warenexports (b) im Jahr 2009. Erstellt vom *Observatory of Economic Complexity*³.

Die Datenbasis, mit der die *Economic Complexity* berechnet wird, reicht zurück bis in das Jahr 1978 und beinhaltet auch aktuelle Daten über die Produktionen der einzelnen Länder. Abbildung 7.3 zeigt eine Visualisierung des Imports und des Exports von Gütern

³Quelle: <http://atlas.media.mit.edu/>, abgerufen am 11. September 2013

in Deutschland aus dem Jahr 2009. Güter werden entsprechend ihrer Anzahl in farbigen Bereichen dargestellt. Je größer ein Bereich, desto größer die Anzahl der exportierten bzw. importierten Güter. Außerdem sind Güter aus demselben Wirtschaftssektor mit der gleichen Farbe zusammengefasst. Dies erleichtert das Erfassen der Grafik und erhöht zudem den Informationsgehalt. Der Produktraum umfasst insgesamt 34 verschiedene Wirtschaftssektoren von Elektronik, Maschinenbau, Schiffe über Medizin, Petrochemie, Milch und Käse, Früchte bis hin zu Textilien, Erdöl und Bergbau. Insgesamt sind über 800 verschiedene Produkte in den 34 Kategorien enthalten [50].

In den Onlineversionen sind die Visualisierungen interaktiv, das bedeutet wenn man sie auswählt, werden weitere Informationen darüber angezeigt. Die vorhandene Information kann nach verschiedenen Dimensionen angeordnet werden. Man kann sich die Informationen einzelner Länder anzeigen lassen, aber auch die Anordnung nach Produkten ist möglich. Abbildung 7.4 zeigt den weltweiten Export von Autos einzelner Ländern.

Zusätzliche Aussagekraft erhofft man sich durch eine genaue Analyse der Nähe von Produkten innerhalb eines Landes. Unter der Nähe von zwei Produkten ist deren gemeinsames Auftreten als Exportgüter eines Landes zu verstehen. Werden zwei Produkte sehr oft paarweise aus einem Land exportiert, so ist dies ein Anzeichen dafür, dass sich diese Produkte in sachlicher Beziehung zueinander stehen. Das bedeutet, die Produktionslinien überlagern sich in weiten Teilen oder sind sehr eng miteinander verknüpft. Je enger der gesamte Produktraum verknüpft ist, desto höher ist seine Komplexität. Die *Product Complexity* ist der arithmetische Durchschnitt der Entfernung aller paarweise auftretenden Produkte. Produkte innerhalb der Gruppe des Maschinenbaus treten sehr häufig als gemeinsame Exportgüter auf, ihre Nähe ist sehr gering, es ergibt sich eine hohe Komplexität. Wohingegen Produkte wie Baumwolle, Reis oder Sojabohnen nur selten gemeinsam als Exportgut erscheinen, sie ergeben also eine geringe *Product Complexity*. Sie ist sozusagen ein Maß für die Vielfalt der Produktpalette und die Fähigkeit einer Volkswirtschaft, Produkte aus einer Branche herzustellen. Berechnet man die Produktkomplexität für jedes Land, so fällt bei einer näheren Betrachtung auf, dass dieser positiv mit dem Wirtschaftswachstum korreliert. Eine hohe Produktkomplexität wird bei Ländern mit einem hohen Wirtschaftswachstum beobachtet.

Insgesamt verfügen die beiden berechneten Komplexitätsmaße durchaus über Aussagekraft. Die Möglichkeiten des Wachstums einer Nation in Abhängigkeit von der Anzahl und den Produkten, die es erzeugt, abzuleiten, ist eine Möglichkeit, sich wirtschaftliches Wachstum zu erklären und zu prognostizieren (siehe Abbildung 7.5). Stellt man geeignete Berechnungen zwischen den Parametern an, so zeigt sich, dass durchaus Beziehungen vorhanden sind: „Countries whose economic complexity is greater than what we would

⁴Quelle: <http://atlas.media.mit.edu/>, abgerufen am 11. September 2013

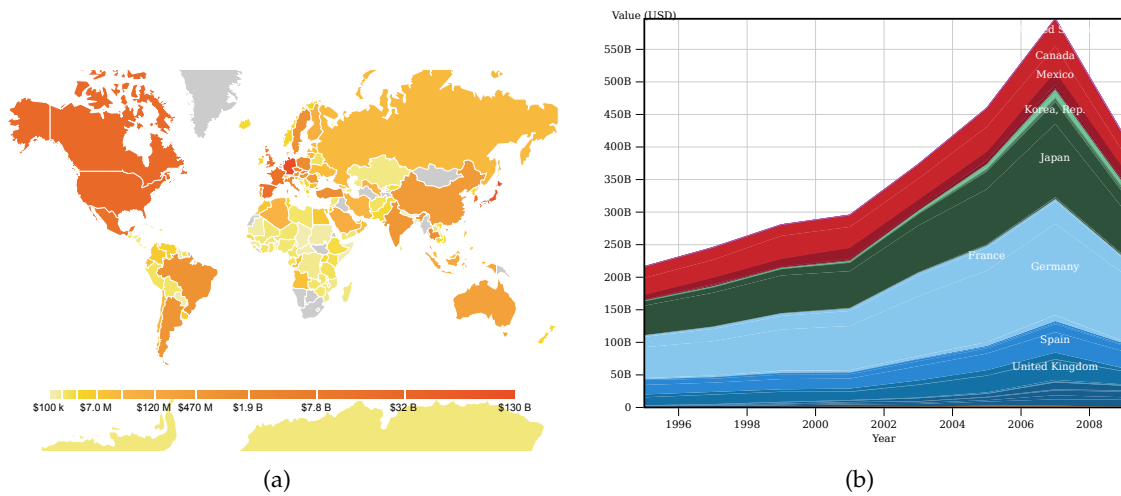


Abbildung 7.4.: Visualisierung des Exports von Automobilen. a) zeigt die geografische Zuordnung der exportierten Menge und b) den zeitlichen Verlauf des Exports im Zeitraum 1995 - 2009. Erstellt vom *Observatory of Economic Complexity*^A.

expect, given their level of income, tend to grow faster than those that are 'too rich' for their current level of economic complexity. In this sense, economic complexity is not just a symptom or an expression of prosperity: it is a driver.“ [50, S. 27]. Außerdem stellt die *Economic Complexity* ein repräsentatives Maß für die Entwicklung der Wirtschaftsleistung eines Landes dar: „(...) economic complexity matters because it helps explain differences in the level of income of countries, and more important, because it predicts future economic growth.“ [50, S. 29]

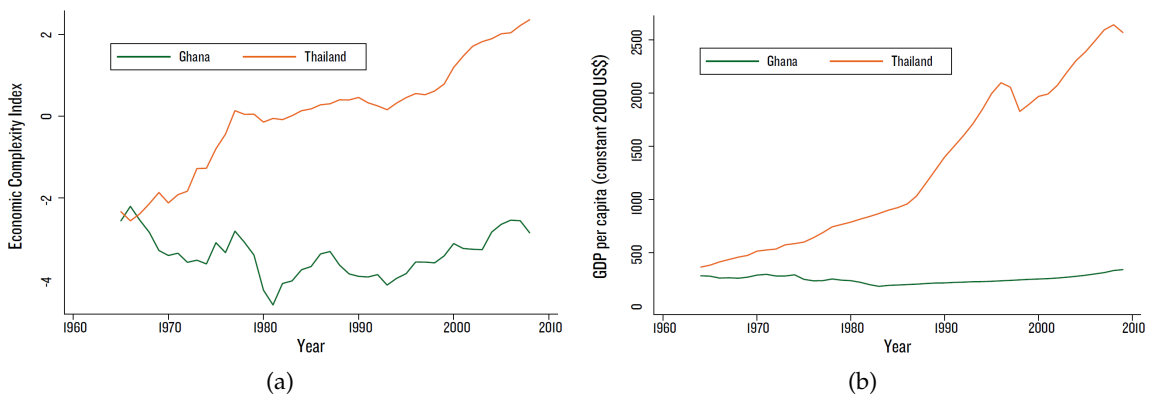


Abbildung 7.5.: Gegenüberstellung der Entwicklung der *Economic Complexity* und des Bruttoinlandsprodukts von Thailand und Ghana seit 1960. Erstellt vom *Observatory of Economic Complexity* [50, S. 36].

Aus der *Product Complexity* lässt sich ableiten wie breit die Produktpalette eines Landes ist. Diese Palette gibt Auskunft über zukünftige Entwicklungen. Das Wissen um die Produktion von komplexen Gütern aus dem Bereich Maschinenbau, Chemie oder Elek-

tronik ist eng verbunden mit dem Wissen um die Herstellung einfacherer Güter, die in Prozessen weiterverarbeitet werden. Es braucht also eine ganze Bandbreite an Gütern, die ein Land in der Lage sein muss zu produzieren, um High-Tech-Produkte selbst entwerfen zu können. Die spannende Frage, warum Produkte vorzugsweise in bestimmten Ländern hergestellt werden wird also um eine Dimension reicher: „(...) a country's position in the product space determines its opportunities to expand its productive knowledge and increase its level of economic complexity. But the product space is highly heterogeneous, placing countries in radically different settings. Ultimately, development is the expression of the total amount of productive knowledge that is embedded in a society. But the process by which this knowledge is accumulated has a structure that we are only now starting to understand.“ [50, S. 48].

Eine große und kontinuierlich zugängliche Datenmenge ermöglicht präzise Aussagen über die gegenwärtige wirtschaftliche Lage eines Landes. Geeignete Visualisierung und Repräsentation erlauben es, verschiedene Länder miteinander zu vergleichen bzw. den zeitlichen Verlauf zu analysieren. Auf Basis dieser Daten können mit geeigneten Kennzahlen Vorhersagen getroffen werden, die die Genauigkeit andere Indikatoren übersteigt. Die Komplexität zeigt sich in der Vielschichtigkeit der ineinandergreifenden Abhängigkeiten von Produkten, Produktionslinien, nationalen Entwicklungen und dem Handel zwischen den Nationen. Während bisherige Indikatoren immer versuchten, die Wechselwirkungen auf der Mikroebene zu erfassen, stellen die beiden Komplexitätsmaße *Economic Complexity* und *Product Complexity* jeweils holistische Maße dar, die das Phänomen auf der Makroebene beschreiben.

8. Zusammenfassung und Diskussion

8.1. Übersicht

Die in den Kapiteln 4 bis 7 dargestellten Entwicklungen und Inhalte sind in Tabelle 8.1 übersichtlich dargestellt. Dort sind die betrachteten Disziplinen jeweils nebeneinander angeordnet, was einen Vergleich erleichtert, der allerdings oft nicht aussagekräftig ist. Die unterschiedlichen Arbeitsweisen, in der Modellierung als auch in der Simulation, werden Abschnitt 8.4 noch einmal zusammengefasst. Das ein biologisches System nicht mit demselben Modell beschrieben werden kann wie ein soziales oder ökonomisches System ist offensichtlich. Es geht vielmehr darum sich um einen Methodentransfer anstelle eines Modelltransfers zu bemühen (siehe dazu auch Kapitel 4.3.1 Abschnitt „Methodentransfer statt Modelltransfer“).

Die Tabelle listet zu jeder Disziplin die Forschungsrichtung auf, die sich vorrangig mit der Modellierung und Simulation von komplexen Systemen beschäftigt. Außerdem werden die Ebenen des Verstehens der jeweiligen Disziplin angeführt. Diese erlauben eine Diskussion der Modelle unabhängig von deren Parametrisierung. Auf deren Basis kann darüber entschieden werden, ob eine Modellierung grundsätzlich den Ansprüchen genügt, die aufgrund der Komplexität erforderlich sind. Darunter fallen die qualitativen Dimensionen der Komplexität.

Etablierte Methoden der Modellierung und der Simulation sind ebenfalls in der Tabelle enthalten. Hier gibt es mitunter Überschneidungen. Beispielsweise sind Multi-Agenten-Systeme und die Spieltheorie sehr allgemeine Ansätze, die sich als geeignet herausgestellt haben, um eine Vielzahl von Problemen zu lösen. Sie könnten bis zu einem bestimmten Grad vermutlich sogar in allen angeführten Disziplinen verwendet werden. Die Zuordnung entspricht den in den jeweiligen Abschnitten identifizierten Arbeitsweisen und wurde so in die Tabelle übernommen.

Zuletzt wurden noch exemplarisch Gegenstände und Elemente der Modellierung erwähnt. Diese sollen mehr den Grundgedanken wie die Mikroebene der Modellierung aussehen könnte skizzieren und weniger Anspruch auf eine vollständige Auflistung von möglichen Komponenten haben.

	Soziale Systeme	Biologie	Gehirn	Ökonomie
Teildisziplin(en)	quantitative Soziodynamik	Systembiologie	Neuroscience Human Brain Project Brain Activity Map	Ökonophysik Ökonometrie
Qualitative Ebene des Verstehens	sachlich sozial zeitlich operativ kognitiv	strukturell und dynamisch; Kontroll- und Designmethoden	Hardwareebene algorithmische Ebene Ebene der Codierung funktionale Ebene	Nichtlinearität Interdependenz Zufall Chaos
Methoden der Modellierung	logistische Regression Diffusionsmodelle Gravity-Modelle Spieltheorie Entscheidungsmodelle Mastergleichung	SBML stochastische Prozesse Reaktionsgleichungen Datenbanken	anatomische Abbildung neuronale Netze stochastische Prozesse	Zeitreihenanalyse (Auto-)Korrelation Levy-Prozesse Random Walk Black-Scholes-Formel Spieltheorie
Methoden der Simulation und Prognose	zelluläre Automaten Multi-Agenten-Systeme ...	Differentialgleichungen Puls-Antworten kont. & diskrete Sim. ...	NEURON NEST NeuroML ...	Monte Carlo Simulation Multiagentensysteme Zeitreihprognosen holistische Kennzahlen ...
Modellierungs- und Simulationselemente	Menschen Verkehrsteilnehmer Wege und Straßen	Zellen und Zellverbände chemische Reaktionen	Neuronen Neuronale Netze Gehirnareale gesamtes Gehirn	Preisentwicklungen Aktienkurse Optionen (call & put)

Tabelle 8.1.: Zusammenfassung der betrachteten Disziplinen und Darstellung wesentlicher Merkmale im Umgang mit Komplexität.

8.2. Ein integrales Verständnis von Komplexität

Komplexität ist keine Eigenschaft, die sich in der Mikroebene verorten lässt. Sie ist vielmehr eine Eigenschaft der System- oder Makroebene. Das Zusammenspiel von (trivialen) Einzelelementen ermöglicht komplexes Verhalten. Ein Verhalten, das nicht der Summe der Aktionen der Mikroebene entspricht, sondern noch mehr ist als dieses. Dieses Zusammenspiel wird durch strukturellen Eigenschaften des Systems, also viele Individuen die miteinander in Beziehungen stehen ermöglicht (Neuronen über Axonen und Dendriten, Zellen durch Stoffwechselbeziehungen, Menschen über Kommunikationsmedien, Unternehmen über Waren- und Informationsflüsse). Genauso wie die strukturellen Eigenschaften bewirken die dynamischen Eigenschaften dieses Austauschs das Zustandekommen von komplexen Phänomenen. Nichtlineare Beziehungen, Phasenübergänge, seltsame Attraktoren und chaotisches Verhalten sind notwendige Voraussetzungen für Komplexität. Beide Bereiche, die Struktur und die Dynamik, können zwar getrennt voneinander untersucht werden, Erklärungsmodelle müssen jedoch beide Aspekte berücksichtigen, um dem Wesen der Komplexität gerecht zu werden.

Dieses integrale Verständnis von Komplexität lässt sich in allen vorgestellten Disziplinen beobachten. Es ist gewissermaßen das Ergebnis von Forschung das sich mit demselben Phänomen in unterschiedlichen wissenschaftlichen Richtungen gezeigt hat. Holistische, das heißt ganzheitliche Ansätze sind notwendig, um Systemverhalten zu verstehen. Die Erklärung makroskopischer Phänomene kann gelingen, wenn die entscheidenden Faktoren identifiziert und die Zusammenhänge und Beziehungen auf Systemebene korrekt beschrieben sind. Ein Reduktionismus im Sinne eines mechanistischen Weltbilds ist überholt.

8.3. Konsequenzen des Komplexitätsparadigmas

Jedes Kapitel der betrachteten Disziplinen, Soziologie, Biologie, Gehirnforschung und Ökonomie, beginnt mit einer historischen Einordnung. Es wird dabei im Besonderen auf die geschichtlichen Entwicklungen und wissenschaftlichen Fortschritte eingegangen, die von größerer Bedeutung für die Entwicklung des Verständnisses von Komplexität in der jeweiligen Wissenschaft waren.

Was die Disziplinen gemeinsam haben, ist die Tatsache, dass Wissenschaftler über eine bestimmte Zeit hinweg immer mit etablierten Methoden und Vorgangsweisen ihre Forschungen vollzogen. Dabei stießen sie früher oder später auf Erklärungsnot. Sie beobachteten ein Verhalten oder entdeckten Effekte, die sie mit den herkömmlichen Theorien nicht erklären konnten. Ein Beispiel aus der Physik ist die Ablenkung von Licht an massereichen Objekten. Diese konnte mit der Newtonschen Theorie nicht, mit dem Einsteinschen Modell jedoch korrekt erklärt werden. Solche Probleme zwingen die Wissenschaften früher

oder später bekannte Theorien und Vorstellungen aufzugeben und neue Theorien zu erarbeiten bzw. diese zuzulassen. Diese neuen Theorien erlauben eine zutreffendere Beschreibung der Wirklichkeit. Sie ermöglichen eine den Problemen der Realität angebrachtere Arbeitsweise. Bei der Entdeckung komplexer Phänomene war es ganz ähnlich. Das Auftreten sozialer Ordnungen, das Entstehen von Leben, die Ausbildung eines Bewusstseins und Turbulenzen in der Marktwirtschaft sind Phänomene, die sich mit den zur der gegebenen Zeit vorhandenen Theorien nicht erklären ließen. Neue Methoden für eine adäquate Beschreibung der Probleme mussten in aufwendiger Arbeit entwickelt werden. Die Entwicklung geeigneter Methoden ist noch längst nicht abgeschlossen.

Aus den angesprochenen wissenschaftlichen Disziplinen entstanden Teildisziplinen, welche sich mit dem Aufkommen von Phänomenen der Komplexität im Speziellen beschäftigt. Im Fall der Biologie ist dies die Systembiologie, für die Soziologie die Soziodynamik, im Bereich der Gehirnforschung die *Computational Neuroscience* und für die Wissenschaftstheorie die Ökonophysik und die Ökonometrie. Von einem praktischen Standpunkt aus ist es notwendig, weitgehend autonome Bereiche innerhalb der großen Wissenschaften zu schaffen, in denen die Komplexitätsaspekte systematisch erforscht werden können, während andere Teilbereiche ihre Ausrichtung und die herkömmliche Arbeitsweise beibehalten, sofern dies möglich ist. Die Ergebnisse, die in der Komplexitätsforschung erzielt werden, können der gesamten Disziplin helfen, um auftretende Probleme zu erklären und mit diesen umzugehen. Von besonderer Bedeutung ist der Austausch innerhalb hochspezialisierter Wissenschaften sowie der interdisziplinäre Austausch über den gesamten Wissenschaftskanon. Während Komplexitätsforscher versuchen, Methoden zu entwickeln, die das Wesen der Komplexität besser erklären, müssen diese Methoden dann auch auf konkrete Problemfelder angewendet werden. Dabei zeigt sich erst, welche Lösungskompetenz den einzelnen Methoden zukommt und ob sie zur Bewältigung von Problemen geeignet sind. So sind die Erfolge der Neurowissenschaften, insbesondere des Human Brain Projects und der Brain Activity Map, trotz ihrer innovativen Arbeitsweise zum gegenwärtigen Zeitpunkt noch nicht absehbar.

Es ist anzunehmen, dass auch jene Disziplinen, die bisher keine Erfahrungen mit Komplexität gemacht haben – falls es solche überhaupt noch gibt –, früher oder später mit ihr in Berührung kommen. Auch für sie wird es konsequenterweise, wie in den Leitdisziplinen zuvor, zu Problemen beim Finden einer wissenschaftlichen Erklärung ergeben. In diesem Fall lohnt es sich, von den Fortschritten, die man bereits in der Komplexitätsforschung gemacht hat, Gebrauch zu machen und eine interdisziplinäre Arbeitsweise anzustreben. Erkenntnisse im Bereich der nichtlinearen Dynamik, Selbstorganisation und der Chaostheorie sind keineswegs bestimmten Forschungsgegenständen vorbehalten. Sie ermöglichen eine Anwendung innerhalb vieler Bereiche des wissenschaftlichen Forschens. Wie die Mathematik eine Möglichkeit zur formalen Beschreibung von Problemen

gibt, liefern die Erkenntnisse aus dem Bereich der Komplexitätsforschung Möglichkeiten zur Beschreibung, deren Durchführung mit herkömmlichen Methoden nicht möglich gewesen wäre. Die Komplexität ist nicht nur ein eigenständiger Forschungsgegenstand, sondern sie zeigt sich in verschiedenen Phänomenen des täglichen Lebens. Sie durchdringt gewissermaßen die Realität bzw. liegt ihr wie eine elementare Eigenschaft zugrunde. Vor diesem Hintergrund macht es auch wenig Sinn sie zu ignorieren oder sie zu leugnen, denn damit ignoriert und leugnet man einen Teil der Realität. Dies kann für gewisse Ausschnitte störungsfrei funktionieren, längerfristig führt dies jedoch zu Problemen. Des Weiteren würden die Wissenschaften ihrem Wahrheitsanspruch nicht mehr gerecht werden.

Die großen Disziplinen haben im Verlauf immer wieder Rückschläge hinnehmen müssen. Gescheiterte Erklärungsmodelle blieben oft nicht ohne Konsequenzen für die Menschen. Beispiele stellen die Krisen als Konsequenzen von Turbulenzen an Börsen oder die Zerstörung von Naturräumen bei Eingriffen in empfindliche Ökosysteme dar. Mittlerweile haben die Disziplinen eigenständige Teildisziplinen geschaffen, die sich mit dem neuen Paradigma der Komplexität auseinandersetzen, was als Indikator für das Erkennen ihrer Bedeutung gesehen werden kann. Die Arbeitsweisen innerhalb dieser wissenschaftlichen Fachgebiete weisen Ähnlichkeiten auf, zeigen jedoch auch deutliche Differenzen in der Wahl des Forschungsschwerpunkts. Soziologen sehen andere Aspekte von Komplexität als beispielsweise Mathematiker oder Biologen. Es kommt zu einer Identifikation anderer Eigenschaften, obwohl das zugrundeliegende Problem dasselbe ist. Komplexität kann nie unmittelbar sondern immer nur mittelbar durch Experimente und Versuche beobachtet werden. Nichtsdestotrotz ist es notwendig sich über die Arbeitsweisen und die verwendeten Methoden Gedanken zu machen, diese zu reflektieren und für die eigene Disziplinen einen Beitrag zum Umgang mit Komplexität zu leisten.

8.4. Arbeitsweisen und Methoden

8.4.1. Arbeitsteilung und Kollaboration

Betrachtet man die Arbeitsweisen und Methoden, so fällt auf, dass Arbeitsgruppen geschaffen werden, deren Fokus unabhängig voneinander bearbeitet werden kann. Dieses Prinzip der Arbeitsteilung ist in den Wissenschaften nicht neu. Bemerkenswert dabei ist vor allem der Sachverhalt, dass diese Trennung durch die Computerunterstützung eine neue Dimension erreicht. Kein Wissenschaftler ist in der Lage seine Aufgaben ohne spezialisierte Software effizient durchzuführen. Angefangen bei umfangreichen Messungen, die fast nur noch an Rechnern erfasst werden, bis zur Auswertung und Analyse der Messwerte ist eine Unterstützung durch Computer nicht mehr wegzudenken. Die Innovation ist dadurch gegeben, dass sich für spezielle Aufgaben auch spezielle Programme etabliert

haben.

Die anatomische Beschreibung von Neuronen wird beispielsweise in einem anderen Programm durchgeführt als die Simulation von einzelnen Neuronen oder Neuronenverbände (siehe Abschnitt 6.4). Diese Entkopplung der Aufgaben ist sinnvoll, weil die Aufgaben für sich schon eine sehr große Herausforderung stellen und hochspezialisierte Software notwendig machen. Um die Arbeitsteilung effizient nutzen zu können, ist es erforderlich, dass die einzelnen Teilergebnisse wieder zusammengeführt werden können. Ein einheitliches Datenformat ist unumgänglich. Die Initiativen von SBML in der Biologie und NeuroML in der Gehirnforschung sind Ergebnisse dieser Entwicklung. Beschreibungssprachen in der alle Teilergebnisse adäquat beschrieben werden können – man nennt diese auch generische Beschreibungssprachen – werden dann von allen verwendeten Programmen unterstützt und erlauben somit größere Effizienz und schnellere Generierung von Ergebnissen. Die Wissenschaftler, die sich um die genaue Beschreibung der Architektur der Mikroebene bemühen, können unabhängig von den Wissenschaftlern arbeiten, die die Makroebene, also das Zusammenspiel von Elementen der Mikroebene, erforschen. Dies könnte beispielsweise so ausgestatten sein, dass neue Forschungsergebnisse die Arbeitsweise einer Zelle detaillierter beschreiben als der bisherige Forschungsstand. Dieses neue Modell wird dann der Arbeitsgruppe, die für die Simulation von Zellenverbänden zuständig war, übermittelt und ersetzt dort sofort das bis dato verwendete Modell. Ohne großen Aufwand und möglicherweise sogar ohne nachvollziehen zu müssen, was sich tatsächlich geändert hat, kann mit dem aktuellen Forschungsergebnissen anderer Wissenschaftler weitergearbeitet werden.

Diese Arbeitsweise funktioniert prinzipiell in allen vorgestellten Disziplinen, da eine Mikro- und Makroebene praktisch immer vorhanden ist. Die kollaborative Zusammenarbeit muss jedoch durch die Entwicklung neuer Technologien, hier ist insbesondere die Computertechnologie zu nennen, aktiv vorangetrieben werden.

8.4.2. Unterschiede anstelle von Gemeinsamkeiten

Bei der Betrachtung der Disziplinen zeigen sich Unterschiede in den Aspekten, in denen sich Komplexität bemerkbar macht. Obwohl sich alle Akteure um ein umfassendes Verständnis bemühen und sich anerkannten wissenschaftlichen Methoden bedienen, stoßen sie zu zum Teil unterschiedlichen, nicht vergleichbaren, qualitativen Ebenen des Verstehens vor. Man kann dies auf den Punkt bringen und feststellen, dass für einen Biologen die Komplexität anders in Erscheinung tritt als für einen Soziologen oder einen Ökonomen. Sie erkennen die Welt mit anderen Augen und bringen unterschiedliche Voraussetzungen mit, die sich bei der Beschreibung von Komplexität deutlich machen.

Biowissenschaften, die sog. *Life Sciences*, Naturwissenschaften und Geisteswissenschaften

ten, sie alle bestehen innerhalb eines breit aufgestellten Wissenschaftsbetriebs und tragen bei der Erweiterung des Wissens bei. Jede für sich hat eine ganz eigene Arbeitsweise entwickelt, die dem jeweiligen Forschungsgegenstand angepasst ist. Aus dieser individuellen Arbeitsweise können bei der Betrachtung desselben Phänomens aus verschiedenen Perspektiven unterschiedliche Aspekte akzentuiert sein. Während ein Biologe anatomische Eigenschaften und physikalisch messbare Größen stärker in den Vordergrund rückt, versuchen Geisteswissenschaftler unter Umständen ontologische Eigenschaften und Bedingungen für diese oder jenes Phänomens zu erforschen.

Zu fragen, wer von beiden die „richtige“ Sicht auf die Dinge hat, ist unangebracht. Die Frage ist sinnlos, weil die Antwort nicht in einem Ja oder Nein liegt. Die Ergebnisse beider Disziplinen sind nicht vergleichbar, obwohl die Grundfrage vielleicht die gleiche ist. Ein Biologe kann die Gesetzmäßigkeiten für diesen oder jenen Effekt auf Zellebene finden, aber die Interpretation der Ergebnisse, die Konsequenzen oder die Frage nach dem Warum kann so nicht beantwortet werden. Dies wird am Beispiel der Gehirnforschung verdeutlicht. Stellt man einem Philosophen und einem Neurowissenschaftler die Frage „Was ist das Bewusstsein?“, so wird der Neurowissenschaftler versuchen, die Gesetze der Neuronen und des Gehirns zu erklären, er beantwortet die Frage nach dem Wie. Ein Philosoph hingegen würde unter Umständen eine Form des Leib-Seele-Dualismus beschreiben oder Probleme und Eigenschaften des freien Willens und des Bewusstseinsbegriffs zu klären versuchen. Beide hätten recht! Obwohl ihre Antworten unterschiedlicher nicht sein könnten, würden sie beide eine Teilantwort liefern, die sich nicht widerspricht, sondern ergänzt.

Diese Ergänzung ist es auch, welche die Wissenschaften anstreben sollten. Die Suche nach einem größten gemeinsamen Nenner kann nicht das Ziel interdisziplinärer Ansätze sein. Es darf aber auch nicht darum gehen, sich von anderen Wissenschaften abzugrenzen und deren Ergebnisse nicht zu berücksichtigen, sondern kollaborative Beantwortung einer Fragestellung zu forcieren. Deshalb ist es ratsam, die unterschiedlichen qualitativen Aspekte der jeweiligen Disziplin zu betrachten, um so für die eigene Disziplin etwas zu lernen.

8.4.3. Adäquate Beschreibung qualitativer Eigenschaften

Qualitative Ebenen der Komplexität müssen im Lauf der wissenschaftlichen Forschung festgelegt werden. Diese ermöglichen eine Analyse von Modellen und Beschreibungen unabhängig von den Parametern und Anfangsbedingungen. Möchte man beispielsweise ein soziales System modellieren oder simulieren, so muss man sich fragen, wie viele Einzelelemente man mitaufnehmen möchte und mit wie vielen anderen Elementen kann ein Individuum in Kontakt treten usw. Diese Fragen betreffen jedoch lediglich die Parame-

trisierung des Modells. Fragestellungen, die viel grundlegender sind, lauten: Welche zeitlichen und räumliche Skalen sollen betrachtet werden? Handelt es sich um die einzelne, lokale Entscheidungen oder geht es um die Veranschaulichung von Prozessen die international und über lange Zeiträume stattfinden. Welche Ebene des Modells ist Gegenstand der Forschungsfrage? Wird versucht makroskopische Phänomene im Sinne einer Selbstorganisation zu beschreiben oder interessiert man sich für die Interaktion der Agenten mit der Umwelt, wie beispielsweise beim Verkehr oder beim Ausbruch von Panik?

Qualitative Eigenschaften zu finden ist mit Sicherheit keine leichte Aufgabe. Sie müssen im Gegenteil aufwändig erarbeitet werden. In den meisten Fällen sind sie abstrakt und somit nicht unmittelbar zu beobachten. Unterschiedliche zeitliche Skalen zeigen sich durch die Beobachtung und durch Analyse von konkreten Systemen. Während auf einer neurologischen Ebene Prozesse innerhalb einer Mikrosekunde und schneller ablaufen können, existieren Prozesse, die über Wochen und Monate hinweg stattfinden. Ein Beispiel der zeitlichen Dimension, die ein Modell maßgeblich prägt. Nichtsdestotrotz erlaubt die Betrachtung von qualitativen Eigenschaften eine Art Meta-Analyse von Modellen. Sie verharrt nicht auf der quantitativen Optimierung von Parametern, sondern ermöglicht eine Reflexion, in der entschieden werden kann, ob das Modell die Realität adäquat beschreibt.

8.4.4. Bestätigung durch empirische Daten

Neben der qualitativen Überprüfung, ob ein Modell die wirkliche Welt beschreibt ist eine quantitative Überprüfung ebenfalls unerlässlich. Es ist nicht ausreichend, umfangreiche und aufwändige Modelle zu erstellen, wenn diese mit den Vorgängen der Realität nicht übereinstimmen. Die qualitative Adäquatheit und eine quantitative Bestätigung ergänzen sich im Modellierungsprozess.

Ein System wird in der Regel parametrisiert, das heißt mit Anfangsbedingungen und Randwerten versehen, die während eines Experiments der realen Welt entnommen wurden. Ausgestattet mit diesen Kennzahlen stellt ein Modell dann eine vollwertige, wenn auch nicht korrekte, Abbildung dar. Vollwertig in dem Sinn, dass es natürlich seinem Zweck, also einem bestimmten Ziel, genügt. Ein Modell kann und wird immer nur ein Ausschnitt der Wirklichkeit sein, weshalb jede Modellierung zwangsläufig immer mit einer Komplexitätsreduktion verbunden sein wird. Das heißt, es werden für den Zweck relevante Aspekte beschrieben, andere Eigenschaften hingegen vernachlässigt (siehe dazu auch Abschnitt 2.2). Auf Basis der Parameter und des Modells können dann in Simulationen neue Eigenschaften oder Effekte beobachtet werden. Daraus werden dann Prognosen für die Realität abgeleitet.

Ein wichtiger Schritt ist der Abgleich der Vorhersagen mit den Messungen und Beobachtungen der Wirklichkeit. Erst diese Gegenüberstellung entscheidet über den Wahrheits-

gehalt des Modells. Modelle müssen sich, sofern sie den Anspruch haben, zuverlässige Prognosen zu liefern, immer an der Realität messen. Die Verifikation, im negativen Fall Falsifikation, ist ein wesentlicher Schritt und liefert tiefere Einsicht in die Funktionsweise des Modells, aber auch in die der Wirklichkeit. Stimmt eine Prognose nicht mit der Realität überein, so kann man davon ausgehen, dass die Wirklichkeit anders beschaffen ist als die künstlich geschaffene Abbildung und kann dadurch eine Möglichkeit ausschließen.

Modelle müssen sich an der Wirklichkeit orientieren, sofern sie den Anspruch haben, diese abzubilden. Diese Orientierung wird einerseits durch geeignete Beschreibung der qualitativen Eigenschaften, aber auch durch die richtige Parametrisierung und Überprüfung mit der Realität sicher gestellt. Die Bestätigung der Modelle durch empirisch erhobene oder gemessene Daten ist in allen vorgestellten Disziplinen üblich und notwendig.

Teil III.

Komplexität in der Informatik

9. Allgemeines

Die Idee des „Computers“ (engl. für „Rechner“) geht zurück auf den Wunsch, mathematische Berechnungen automatisiert durchführen zu können. Rechenhilfen, wie der Abakus oder der Rechenschieber, zeugen von dem Versuch, mathematische Operationen maschinengestützt zu berechnen. Die ersten Rechenmaschinen, die eine Berechnung durchführen konnten, waren mechanisch realisiert. Mit Hilfe von Zahnrädern und Sperrklinken, wie in einem Uhrwerk, konnte man einfache Operationen wie z.B. die Grundrechnungsarten umsetzen. Ausgangspunkt dieser Entwicklungen waren vor allem Wilhelm Schickard und Blaise Pascal. Bedeutende Initiatoren bei der Entwicklung des modernen Verständnisses eines Computers waren insbesondere das Dualsystem von Gottfried Wilhelm Leibniz und die Erfindung der Programmsteuerung von Charles Babbage im 17. bzw. 18. Jahrhundert [87]. Beide Innovationen legten den Grundstein für heutige Rechensysteme. Das Dualsystem ermöglichte den Übergang von mechanischen und analogen Technologien zur Digitaltechnik und die Programmsteuerung stellt eine erste noch sehr einfache Realisierung von Algorithmen bei Maschinen dar.

Algorithmen oder Berechnungsvorschriften spielen eine große Rolle in der heutigen Informatik. Sie bilden die Grundlage, um Rechenprobleme überhaupt erst lösen zu können. Ein Algorithmus ist nichts anderes als eine schrittweise Handlungsvorschrift, die ein bestimmtes Problem löst. Diese Probleme können von Berechnungen von einfachen mathematischen Termen über umfangreiche Datenbankabfragen bis hin zur Simulation des Wetters auf Basis von vielen Differentialgleichungen sein. Es stellt sich also die grundlegende Frage, welche Probleme ein Computer lösen kann und welche nicht. Was sind die Grenzen der computergestützten Berechenbarkeit? Diese Frage zählt zu den Inhalten der theoretischen Informatik und ist schon seit vielen Jahren Forschungsschwerpunkt. Seither konnte man viele Einblicke in grundlegende Probleme gewinnen und erhielt zusätzlich tiefe Einblicke in Zusammenhänge und Lösungen. Prinzipielle Einschränkungen konnten nachgewiesen und unterschiedliche Grade der Entscheidbarkeit oder Berechenbarkeit angegeben werden. Ein Problem heißt entscheidbar, wenn es einen Algorithmus gibt, der als Ausgabe eine klare Ja- oder Nein-Antwort liefert. Zur Veranschaulichung soll ein Gleichungssystem als Beispiel dienen. Man könnte die Frage formulieren, ob es zu einem gegebenen Gleichungssystem eine Lösung gibt oder nicht. Der Algorithmus würde versuchen, das Gleichungssystem zu lösen und für den Fall, dass er eine Lösung findet, „Ja“ ausgeben,

andernfalls „Nein“. Nun gibt es auch Probleme, für die dies nicht mehr so einfach zu berechnen ist. Beispielsweise kann ein Algorithmus nicht entscheiden, ob ein Programm auf eine gewisse Eingabe hin immer zu einem Ergebnis kommt, das heißt terminiert. Dies ist eine vereinfachte Formulierung des sogenannten Halteproblems. Ein weiteres Beispiel ist das Äquivalenzproblem. Dabei befragt man einen Algorithmus, ob zwei Programme die gleiche Funktion erfüllen. Auch dieses Problem kann kein Algorithmus im Allgemeinen mit „Ja“ oder „Nein“ beantworten [120].

Neben diesen theoretischen Problemen und negativen Resultaten, die für die Praxis durchaus von Bedeutung sind, gibt es auch noch weitere Forschungsfelder, die im Zusammenhang mit Algorithmen bedeutsam sind. Diese betreffen die Komplexität von Algorithmen. Komplexität wird in diesem Zusammenhang nicht als eine emergente Systemeigenschaft aufgefasst, sondern betrifft den Ressourcenverbrauch von Algorithmen (siehe Abschnitt 10.1) bzw. den Informationsgehalt von Daten (siehe Abschnitt 10.2). Die Komplexität von Algorithmen analysiert den Rechenaufwand oder Speicherbedarf von Algorithmen, während die Datenkomplexität der Frage nach Komprimierbarkeit von Daten nachgeht.

Diese Komplexität ist dahingehend mit dem Komplexitätsverständnis in anderen Disziplinen nur schwer vergleichbar und stellt eine weitere Erscheinungsform dar. Fehlende Prognostizierbarkeit wie das allgemeine Halteproblem findet sich auch bei Ergebnissen der Chaosforschung. Obwohl man die beschreibenden Gleichungen kennt, also das Programm vollständig determiniert ist, kann man keine zuverlässige Aussage über die möglichen Entwicklungen treffen. Hier zeigen sich ganz eindeutig Verbindung beider Sichtweisen von Komplexität.

Verlässt man die Ebene der traditionellen Komplexitätstheorie der Informatik und untersucht, die Bedeutung komplexer Systeme im Systementwurf, also im Software Engineering und im Bereich der IT-Landschaften, so zeigt sich, dass auch hier komplexe Phänomene zutage treten (siehe Kapitel 11). Die bekannteste IT-Landschaft ist mit Sicherheit das Internet. Was als kleines Forschungsprojekt begann und anfangs nur ein kleines Netzwerk darstellte, ist heute ein riesiges, weltumspannendes Geflecht, für das das Nervensystem des Menschen als Metapher dient. Man bezeichnet es auch schon als „das Nervensystem des 21. Jahrhunderts“.^{1,2,3} Die ungeheure Dynamik, die im Internet vorhanden ist, lässt sich kaum mehr nachvollziehen. Der hohe Grad der Vernetztheit, die verschiedenartigsten Wege der Kommunikation, die große Anzahl an heterogenen Einzelelementen und ständige Entwicklungen und Anpassungen tragen dazu bei, dass mit herkömmlichen re-

¹<http://www.heise.de/newsticker/meldung/re-publica-Das-Internet-als-Nervensystem-des-21-Jahrhunderts-pflegen-1859791.html>, abgerufen am 19. September 2013

²<http://www.datev.de/portal/ShowPage.do?pid=dpi&nid=79737>, abgerufen am 19. September 2013

³<http://www.taz.de/1/archiv/archiv/?dig=2003/01/30/a0158>, abgerufen am 19. September 2013

duktionistischen Methoden nur kleinste Ausschnitte beschrieben werden können. Von der Vorstellung eines ganzheitlichen Verstehens, Nachvollziehens und Prognostizierens muss Abschied genommen werden. Methoden und Denkansätze aus der Komplexitätsforschung scheinen noch am ehesten geeignet, um dieses System holistisch analysieren zu können. Auch in einem kleineren Maßstab wird die IT-Landschaft zu einem immer größeren Problem. Unternehmen kämpfen mit den eigenen IT-Architekturen. Über die Jahre hat sich die IT-Landschaft in vielen Firmen zu einem schwer überschaubaren und noch schwerer kontrollierbaren System entwickelt. IT ist als notwendige Voraussetzung nahezu aller Firmen und Betriebe nicht mehr wegzudenken. Ein Ausfall bringt in vielen Fällen einen Ausfall von Geschäftseinheiten mit sich und zieht längerfristige Folgen in Form von Stillstand, Umsatzeinbrüchen und nicht zuletzt Schließung von Abteilungen und bis hin zu ganzen Firmen nach sich. Enterprise Architecture Management (EAM) untersucht IT-Systeme in Unternehmen und beschäftigt sich mit dem Verstehen, der Gestaltung und der prospektiven Planung derselben (siehe Kapitel 12).

10. Klassische Komplexitätstheorie

10.1. Komplexität von Algorithmen

Inhalt der klassischen Komplexitätstheorie in der Informatik ist die Analyse von Algorithmen, insbesondere im Hinblick auf deren Ressourcenverbrauch. Dabei unterscheidet man im Wesentlichen zwischen zwei verschiedenen Ressourcen: Rechenzeit und Speicherbedarf. Der Bedarf der entsprechenden Ressource wird in der Regel in Abhängigkeit von der Anzahl der zu verarbeitenden Datenwerte angegeben. Möchte man zum Beispiel eine beliebige Zahlenfolge mit 100 Zahlen der Größe n nach sortieren, so versucht man den Aufwand auf Basis der 100 Datenwerte zu beschreiben. Die Laufzeit wird somit maßgeblich von diesem Wert bestimmt. Es existieren noch andere Faktoren, die eine Rolle spielen, wenn man an der exakten Laufzeit eines Algorithmus interessiert ist, die verfügbare Hardware oder die verwendete Programmiersprache des Algorithmus zum Beispiel. An konkreten Zeitwerten ist man im Allgemeinen nicht interessiert. Diese sind von vielen Parametern abhängig. Außerdem lassen sich die Einflüsse meistens nur schwer formalisieren und unterliegen einer permanenten Änderung. Deshalb wird Laufzeit eines Algorithmus in Abhängigkeit von der Größe seiner Eingangsdaten untersucht als „Zeitkomplexität von Algorithmen“ bezeichnet [113, S. 50].

Die Zeitkomplexität fasst die Anzahl der charakteristischen Operationen eines Algorithmus zusammen. Jede Operation wird dabei als ein Schritt des Algorithmus gezählt. Interessiert man sich für die Anzahl der Buchstaben eines Wortes oder Satzes, so benötigt man genauso viele Operationen wie Buchstaben vorhanden sind, also n für beliebige Eingaben der Länge n . Möchte man hingegen alle Buchstaben alphabetisch aufsteigend sortieren, das bedeutet von a bis z, wird man mehr Operationen benötigen als Buchstaben vorhanden sind. Wie viel mehr man brauchen wird, lässt sich zu Beginn nicht exakt sagen. Das hängt davon ab, welches Wort sortiert werden soll und welcher Algorithmus eingesetzt wird. Um dieses Problem der Vorhersage für konkrete Fälle zu umgehen, unterscheidet man verschiedene Fälle:

Bester Fall (best case) Wie lange braucht der Algorithmus im besten Fall? Für das Sortierproblem würde das bedeuten, dass die Eingabe bereits sortiert ist und keine zusätzliche Operation erforderlich ist. Der Algorithmus muss jedoch zumindest ein-

mal jedes Element betrachten, um dies festzustellen. Also werden n Operationen benötigt.

Mittlerer Fall (average case) Wie lange braucht der Algorithmus im Durchschnitt? Alle mögliche Eingaben werden mit Wahrscheinlichkeiten ausgestattet, die ihr Auftreten repräsentieren. Für jeden Fall wird die Laufzeit bestimmt und schließlich ein gewichtetes Mittel berechnet.

Schlechtester Fall (worst case) Wie lange braucht der Algorithmus im schlechtesten Fall? Man überlegt sich die ungünstigste Eingabe und ermittelt die Laufzeit dafür. Dies ist gleichzeitig eine obere Laufzeitschranke für den Algorithmus, das heißt er ist immer mindestens so schnell wie dieser Wert, aber auf keinen Fall langsamer.

Üblicherweise vergleicht man Algorithmen immer nach ihrem worst-case-Wert. Das Ermitteln des mittleren Falls ist oftmals sehr aufwändig und nicht eindeutig durchführbar und der beste Fall meist nicht sehr repräsentativ und für die Praxis eigentlich nicht bedeutend [113, S. 61].

Um die Laufzeit eines Algorithmus in Abhängigkeit der Größe seiner Eingangsdaten n abschätzen zu können, bedient man sich der Fallunterscheidung. Um verschiedene Algorithmen hinsichtlich eines Problems jedoch besser vergleichen zu können, verwendet man die sogenannten Landau-Symbole. Sie ermöglichen es, die Algorithmen in Klassen einzuordnen. Ein berühmtes Beispiel: die \mathcal{O} -Notation. Es existieren viele verschiedene Klassen. Die berühmteste und gängigste Klasse, die \mathcal{O} -Notation, beschreibt die asymptotische obere Schranke. Das bedeutet, wenn die Laufzeit eines Algorithmus ein Element der Klasse ist, dann ist seine maximale Laufzeit nach oben durch die Klasse beschränkt. Veranschaulichen lässt sich das wie folgt: Ein Algorithmus f braucht für das Zählen der Buchstaben in einem Wort immer n Schritte, also auch im schlechtesten Fall. Seine Laufzeit ist linear wachsend mit der Eingangsgröße n , er ist also ein Element der Menge, die alle Algorithmen linearer Zeitkomplexität umfasst, mathematisch ausgedrückt $f \in \mathcal{O}(n)$. Die Notation kann beliebige Klassen beschreiben wie $\mathcal{O}(n^2)$ oder $\mathcal{O}(2^n)$, die jeweils die Algorithmen mit quadratisch bzw. exponentiell wachsender Zeitkomplexität umfasst.

Das berühmte P-NP-Problem der Informatik beschäftigt sich mit zentralen Frage der Komplexität von Algorithmen und dem Vergleich der P-Klasse mit der NP-Klasse. Dieses Grundproblem fragt, ob die Klasse der deterministisch in Polynomialzeit entscheidbaren Sprachen gleich der nichtdeterministische entscheidbaren Sprachen ist, also ob $P = NP$ gilt oder nicht. Vereinfacht ausgedrückt bedeutet dies, ob zu jedem Problem mit einem Algorithmus mit exponentieller Zeitkomplexität ein Algorithmus existiert, dessen Komplexität polynomiell beschränkt ist. Exponentiell wachsende Algorithmen sind ein großes Problem, da diese für praktische Anwendungen sehr schnell unbrauchbar werden. Die

Zeit, die bei der Berechnung benötigt wird, steigt mit zunehmender Eingabe dermaßen an, dass auch die leistungsfähigsten Computer schnell an ihre Grenzen stoßen. Rechenzeiten von Jahren und Jahrzehnten sind dabei keine Seltenheit. Nur für sehr wenige Anwendungen ist dies brauchbar. Verschlüsselungsverfahren hingegen arbeiten jedoch genau nach diesem Prinzip. Viele verschlüsselte Nachrichten im Internet könnten theoretisch entschlüsselt werden. In der Praxis wird die Laufzeit der Algorithmen zur Primfaktorzerlegung zum limitierenden Faktor.

Diese Überlegungen des Wachstums können neben der Laufzeit auch für benötigten Speicher oder Prozessoren angestellt werden. Das Grundprinzip bleibt jedoch gleich. Man versucht, die Änderungsrate, also den Mehraufwand, in Abhängigkeit des Eingangs zu beschreiben und zu klassifizieren. Damit erhält man eine geeignete Methode, um Algorithmen zu vergleichen bzw. diese zu bewerten.

Andere Größen, um Algorithmen oder Programme zu bewerten, sind sogenannte Softwaremetriken (siehe Kapitel 11.3). Diese haben jedoch nur mehr in einem entfernteren Sinne etwas mit der klassischen Komplexitätstheorie der Informatik zu tun.

10.2. Komplexität von Information

Zusätzlich zur Betrachtung von Laufzeit- und Speicherverhalten von Algorithmen ist die Komplexität von Information ein weiterer Forschungsgegenstand der klassischen Komplexitätstheorie. Die Komplexität von Information beschäftigt sich primär mit dem Informationsgehalt von Datenpaketen. Es gibt viele Wissenschaftler, die sich mit dieser Fragestellung auseinandergesetzt haben. Besonders erwähnenswert ist vor allem der amerikanische Mathematiker Claude Shannon, der als ein Gründer der Informationstheorie angesehen werden kann, und der russische Mathematiker Andrey Kolmogorov, der Hervorragendes leistete im Bereich der Wahrscheinlichkeitstheorie, der Topologie und der algorithmischen Komplexitätstheorie.

Bei der Komplexität von Daten unterscheidet man im Wesentlichen zwischen drei Ansätzen: der Informationsgehalt nach Shannon, die Kolmogorow-Komplexität und die algorithmische Tiefe. Der erste Ansatz von Shannon ist ein Maß für die Komprimierung von Daten. Der zweite Ansatz stellt die Frage nach dem kürzesten Programm, das eine ausgewählte Zeichenfolge darstellen kann und der dritte untersucht das Laufzeitverhalten, das benötigt wird, um eine Datenfolge zu erstellen. Von großem Interesse ist dies vor allem, weil die algorithmische Komplexität ein Maß für den Aufwand ist, der für die Erzeugung von Daten notwendig ist.

Informationsgehalt nach Shannon

Claude Shannon entwickelte ein Maß für den Informationsgehalt von Nachrichten [117]. Er fragte sich, wie viel Information in einer Nachricht übertragen wird? Dabei untersucht er den Informationsgehalt jedes einzelnen Zeichens. Die Summe über alle Zeichen stellt für ihn den Informationsgehalt einer Nachricht dar. Er definierte den Informationsgehalt eines Zeichens, dessen Einheit in *Bits* angegeben wird, wie folgt: $I(p_x) = \log_a \frac{1}{p_x}$. p_x stellt dabei die relative Häufigkeit des Zeichens x dar und a die Größe des zugrundeliegenden Alphabets. Für das Binärsystem gilt $a = 2$. Jetzt müssen die Werte für die einzelnen Zeichen aufsummiert werden. Es ergibt sich folgende Summe: $\sum_{k=1}^n I(p_k)$. Dieser Fall gilt unter der Annahme, dass die Zeichen voneinander unabhängig sind. Für einen Text ist dies allerdings eine fragwürdige Annahme, da bestimmte Buchstaben sehr häufig paarweise auftreten (z.B. 'sch', 'ie', 'au', ...). Dieser Umstand lässt sich aber noch vermeiden, wenn man mit sogenannten bedingten Wahrscheinlichkeit rechnet. Ein anderes Problem ist, dass der Ansatz von Shannon lediglich den Informationsgehalt auf der Ebene der Zeichen untersucht. Es geht ihm nicht um Bedeutung, also nicht um die semantische Ebene der Information. So ist der Informationsgehalt von „11111111110000000000“, „101010101010101010“ und „10010111010110001010“ identisch. Alle Datenpakete enthalten zehn '1'-Zeichen und zehn '0'-Zeichen. Wobei man vermuten könnte, dass die inhaltliche Dichte der zweiten Nachricht nicht so gehaltvoll sein kann wie der der dritten Nachricht. Dort handelt sich ja um ein sich wiederholendes Muster von „10“ Kombinationen.

Andere Ansätze berücksichtigen dieses Auftreten von Regelmäßigkeiten und wiederkehrender Muster, was sich dann in dem Komplexitätsgehalt widerspiegelt. Insgesamt ist der Informationsgehalt nach Shannon ein Ansatz, der vor allem bei der Datenkompression und Kodierung eine Rolle spielt. Mit der Komplexität als emergente Systemeigenschaft hat er allerdings kaum etwas gemeinsam.

Kolmogorow-Komplexität

Im Gegensatz zum Informationsgehalt Shannons stellt die Kolmogorow-Komplexität eine abstraktere Beschreibung der Komplexität von Information dar. Während Shannon versucht, den Informationsgehalt anhand der darin enthaltenen Zeichen zu bestimmen, beschreibt das nach Kolmogorow benannte Maß die Strukturiertheit einer Zeichenkette. Es geht dabei um die Frage nach den Regelmäßigkeiten, also gewissermaßen um die Gesetzmäßigkeiten, die einer Nachricht zugrunde liegen [76].

Am Beispiel der bereits bekannten Zeichenfolgen „11111111110000000000“, „101010101010101010“ und „10010111010110001010“ kann dies nachvollzogen werden. Während die ersten beiden eine sehr leicht zu erkennende Struktur haben, scheint es, als besitze die letzte Zeichenfolge keine Regelmäßigkeit. Sie wirkt eher zufällig oder chaotisch. Möchte

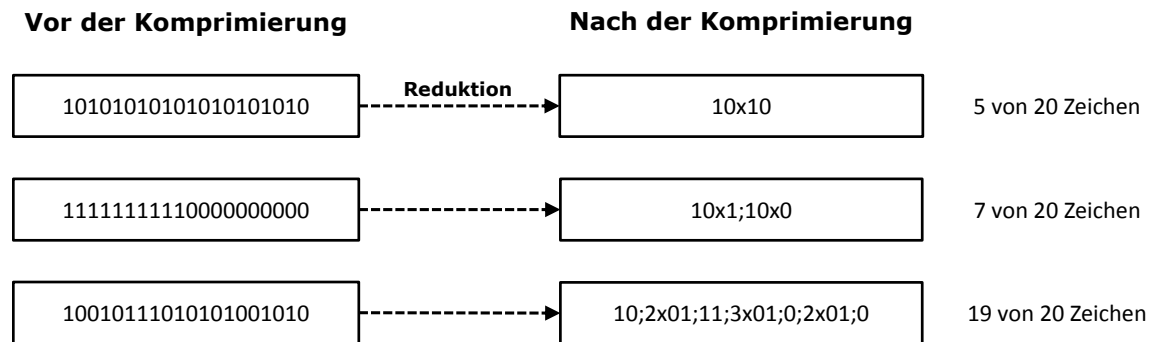


Abbildung 10.1.: Beispielhafte Reduktion von Zeichenfolgen

man die ersten beiden Zeichenfolge beschreiben, könnte man dies sehr kurz formulieren, beispielsweise „10*1;10*0“ bzw. „10*10“. Die Beschreibung der dritten Folge wäre aber deutlich länger, da sich kein einfacher Aufbau ausmachen lässt (siehe Abbildung 10.1). Die Komplexität nach Kolmogorow ist in diesem dritten Fall deutlich höher. Erwähnenswert ist, dass sie unabhängig von der Programmier- bzw. Beschreibungssprache ist.

Diese Größe ist per definitionem also auch ein Maß für die Zufälligkeit und der Abwesenheit von Gesetzmäßigkeit. Deshalb findet sich neben der Datenkompression eine häufige Anwendung bei der Bestimmung der Zufälligkeit von Zeichenfolgen.

Algorithmische Tiefe

Das Konzept der Algorithmischen Tiefe oder *logical depth* wurde 1988 von Charles Bennett veröffentlicht. Es handelt sich dabei um ein Komplexitätsmaß das weder zufällige noch triviale Zahlenfolgen als komplex auszeichnet [8]. Dabei argumentiert er, dass es für einen Algorithmus kein Problem ist, eine zufällige Zeichenfolge zu generieren. Genauso einfach ist es, für einen Algorithmus triviale Zeichenfolgen, die lediglich aus einem Zeichen bestehen, zu erstellen. Möchte man hingegen einen Algorithmus, der die Kreiszahl π auf beliebig viele Stellen berechnet, so ist dies nicht mehr so einfach umzusetzen. Bennett bezeichnet Objekte, die hohen Aufwand bei der Berechnung haben, als tiefe Objekte (*deep objects*) und jene Objekte, die wenig Aufwand erfordern, als sogenannte flache Objekte (*shallow objects*). Die *logical depth* ist dabei der zeitliche Mehraufwand, der benötigt wird, um ein Objekt (z.B. die ersten 1000 Stellen von π) zu erstellen, verglichen mit einer beliebigen zufälligen Ausgabe.

Bennett zeigte, dass die Algorithmische Tiefe maschinenunabhängig ist und tiefe Objekte weder zufällig, und somit schnell, noch von flachen Objekten über deterministische Prozesse hergestellt werden können. Der einzige Weg, um tiefe Objekte zu erstellen, ist der langsame. Deshalb stellt dies seiner Ansicht nach ein geeigneteres Maß für die Beschreibung von Komplexität dar als beispielsweise die Kolmogorow Komplexität.

10.3. Zusammenfassung

Die klassische Komplexitätstheorie versteht ihre Aufgabe darin, die stark formalisierte Tradition der Berechenbarkeit und der Informatik fortzuführen und untersucht Algorithmen auf prinzipielle Möglichkeiten bzw. Unmöglichkeiten. Welche Probleme sind berechenbar, welche entscheidbar? Wie lassen sich Probleme in Klassen einordnen? Was haben die Probleme gemeinsam? Welche Eigenschaften lassen sich über eine ganze Klasse von Problemen aussagen? Lassen sich die Probleme ineinander überführen? Diese Fragen prägen die Arbeitsweise und die Ergebnisse der Komplexitätstheorie in der Informatik.

Mit zunehmendem Verlauf erkannte man die gesellschaftliche Relevanz der Informatik. Computerunterstützung war ab Mitte der 90er Jahre nicht mehr auf große Forschungseinrichtungen beschränkt. Die Technologien wurden erschwinglich für kleinere Firmen und nicht zuletzt auch für Privatpersonen. Das Internet, ein die Welt umspannendes Netzwerk, prägt die Art der Kommunikation und Interaktion auf nationaler und internationaler Ebene. Das tägliche Lebens ist von der Informationstechnologie durchdrungen. Waschmaschinen, Kühlschränke, Fahrzeuge, Arbeitsplätze usw. sind in den entwickelten Industrieländern nicht mehr ohne Computerunterstützung vorstellbar. Das Internet der Dinge (engl. „Internet of things“) ist längst keine ferne Vision mehr, sondern vielmehr eine Beschreibung der Gegenwart. Automatische Identifikation durch Strichcodes oder kleine Chips, sogenannte RFIDs die sich überall anbringen lassen, die umfassende Durchdringung von Rechnern und die Vernetzung derselben haben gesellschaftliche Konsequenzen. Cyber-Physical Systems (CPS) verbinden die digitale Welt mit der physikalischen [20, S. 21] (siehe Kapitel 12.2). Software erlaubt die raffinierte Verknüpfung von Vorgängen und Ereignissen und wird zunehmend wichtiger. Software wird zum Erfolgsfaktor und zur Schnittstelle zwischen der physikalischen Welt und der Gesellschaft.

Der hohe Grad der Interaktion und die daraus resultierenden (Rück-)Kopplungen, die immer weiter voranschreitende Vernetzung der Menschheit, die zunehmende Kontrolle über die Umwelt und Software als Funktionsdefinition führt zu einem veränderten Verständnis der Informatik. Informatik ist nicht mehr erweiterte angewandte Mathematik, sondern spielt eine Schlüsselrolle in der Bewältigung zukünftiger Probleme. Bewältigung komplexer Herausforderungen werden sowohl im Softwareentwurf (siehe Kapitel 11) als auch im Bereich der Erstellung und Verwaltung von IT-Architekturen zunehmend wichtiger (siehe Kapitel 12). Diese Neuartigkeit der Aufgaben verlangen nach neuen Lösungskonzepten für Wirtschaft und Gesellschaft.

11. Komplexität in der Softwaretechnik

11.1. Software Engineering

Die Entwicklung großer Softwareprojekte, an denen mehrere hunderte, zum Teil über tausend Menschen beteiligt sind, bedarf neben einer ausgeprägten Organisation und Spezifikation eines strukturierten Vorgehensmodells. Es muss sichergestellt werden, dass die Arbeitskräfte so effizient wie möglich arbeiten. Die Umsetzung von Softwareprojekten hat mit einer Großbaustelle vergleichbare Kosten. Große Projekte erfordern viele Arbeitsjahre bei der Realisierung, dies gilt sowohl für die Softwareentwicklung als auch für die Bauindustrie. Innerhalb der Informatik hat sich die Disziplin der Softwaretechnik (engl. Software Engineering) entwickelt, die sich auf die Planung, die Steuerung und die Realisierung von Softwareprojekten konzentriert. Es existieren zahlreiche Definitionen, was Software Engineering ist und was zu den Kernaufgaben zählt. Eine gängige Definition lautet: „Zielorientierte Bereitstellung und systematische Verwendung von Prinzipien, Methoden und Werkzeugen für die arbeitsteilige, ingenieurmäßige Entwicklung und Anwendung von umfangreichen Softwaresystemen. Zielorientiert bedeutet die Berücksichtigung z. B. von Kosten, Zeit, Qualität.“ [6, S. 17].

Die Softwaretechnik zählt zu den praktischen, ingenieurwissenschaftlichen Teilbereichen der Informatik und beschäftigt sich mit Softwareentwurf, Softwaremanagement und Softwarequalitätsmanagement. Sie deckt damit ein sehr großes und vielfältiges Aufgabenspektrum ab. Softwaretechnik beschäftigt sich mit der Ermittlung der Anforderungen, die verschiedene Nutzer eines Systems haben (engl. Requirements Engineering) über die Implementierung des Systems bis hin zur Sicherstellung der Qualität und Einhaltung von Normen und Vorschriften mit den unterschiedlichsten Ansprüchen und steht somit nicht nur vor technischen, sondern auch vor organisatorischen und nicht zuletzt auch vor sozialen Herausforderungen. Es reicht nicht mehr, dass eine softwarebasierte Anwendung modernste technische Innovationen und Neuerungen bietet, sondern auch die Bereiche der Benutzerfreundlichkeit und der Bedienbarkeit zählen zu notwendigen Voraussetzungen für Softwaresysteme. Neben der Anwenderebene existiert auch eine Entwicklerebene, für die vor allem der Entwicklungs- und Wartungsprozess von Software im Vordergrund steht. Für die Entwicklung stehen mehrere Vorgehensweisen zur Verfügung, die jeweils Vor- und Nachteile besitzen. Während manche Arbeitsweisen einen strengen Arbeitsab-

lauf fordern und die einzelnen Schritte sehr strikte vorgeben, wie beispielsweise das Wasserfallmodell, erlauben andere Vorgehensmodelle eine gelockerte Organisation ohne strenger Aufgabenteilung (XP - Extreme Programming). Alle Herangehensweisen versuchen, einen Zugang zu finden um den umfangreichen Anforderungen gerecht zu werden.

Die Softwaretechnik versucht, auf wissenschaftlich fundierter Weise Basistechniken zur Verfügung zu stellen, damit alle Anforderungen adäquat erfüllt werden können und unterstützt somit den gesamten Entwicklungsprozess von Software. Dabei unterscheidet man grundsätzlich drei Basistechniken [6]:

Prinzipien Grundsätze, nach denen vorgegangen werden sollte. Diese werden in der Regel aus der Erfahrung und der Erkenntnis hergeleitet. Zum Beispiel: Abstraktion, Strukturierung, Modularisierung, usw. Prinzipien sind nicht voneinander unabhängig und spielen eine große Rolle bei der Spezifikation, dem Entwurf und der Implementierung.

Methoden Systematisches und planmäßiges Vorgehen kann das Ergebnis und die Effizienz der Softwareentwicklung positiv beeinflussen. Grundsätzlich lassen sich die Methoden in zwei Klassen einteilen: Bei dem Top-Down Ansatz beginnt man bei dem allgemeinen Problem und arbeitet sich Schritt für Schritt zu dem spezielleren Problem vor. Der Bottom-Up Ansatz löst das Gesamtproblem ausgehend vom Speziellen und die Gesamtlösung ergibt sich aus den Teillösungen.

Werkzeuge Bei der Lösung von konkreten Problemen ist es notwendig, sich gewisser Werkzeuge und Technologien zu bedienen. Diese bestimmen das Ergebnis in einem erheblichen Maße mit. Die Werkzeuge unterstützen die Akteure in unterschiedlichsten Bereichen, von der Modellierung bis hin zur Dokumentation und Wartung.

Ein wichtiger Punkt des Entwurfs ist die Abbildung von Information in eine Notation, das heißt in eine Darstellung. Diese Darstellung kann ganz unterschiedliche Formen haben. Textuelle Beschreibungen, formalisierte logische Bedingungen und grafische Darstellungen von Abhängigkeiten und Abläufen sind mögliche Arten, dies umzusetzen. Die Aufteilung erfolgt dabei nach textuellen und grafischen bzw. zwischen informellen und formalen Konzepten.

Als Modellierungsstandard hat sich in den letzten Jahren die Beschreibungssprache UML (Unified Modelling Language) durchgesetzt, die von der OMG (Object Management Group) entwickelt wurde. Die Ursprünge der Sprache gehen dabei auf die 1990er Jahre zurück. Seither wurde sie weiterentwickelt und umfasst in der aktuellen Version 14 Diagramme (siehe Abbildung 11.1), die das Kernstück ausmachen. Diese Diagramme stellen Betrachtungsweisen dar, unter denen Softwaresysteme analysiert werden können. Diese

Gesichtspunkte, man könnte sie auch qualitative Aspekte nennen, unterscheiden zwischen der Struktur (der Statik), dem Verhalten (der Dynamik) und der Logik eines Softwaresystems. Dabei fungiert UML als der Vermittler zwischen den Sichtweisen: „Diese verschiedenen Sichten sind nicht unabhängig voneinander. (...) Die UML ermöglicht es, verschiedene Konzepte zu integrieren.“ [6, S. 102].

Statik Der statische Aufbau eines Softwaresystems, also die Struktur und Eigenschaften von Objekten und Modulen, stehen im Vordergrund. Aber auch Eigenschaften der Funktionalität und Datenstrukturen sind Betrachtungsgegenstände.

Dynamik Das dynamische Verhalten, also die Abläufe und Wechselwirkungen zwischen Modulen des Systems, werden untersucht. Hierin wird weiter unterschieden zwischen fachlichen Aspekten wie Kontrollstrukturen und Zustände und Zeitaspekten wie zeitliche Interaktion und Sequenzen.

Logik Diese Sichtweise stellt die logischen Abhängigkeiten zwischen den Elementen in den Mittelpunkt. Diese gelten unabhängig von der Dynamik und der Struktur und erlauben logische Schlüsse zu vollziehen bzw. Widersprüche aufzudecken. Besonders spannend ist dies für die automatische Verifikation von Systemen.

Die Teildisziplin der Informatik Software Engineering beschäftigt sich neben der Implementierung und Modellierung von Softwaresystemen mit vielen Aspekten, die dazu beitragen, qualitative hochwertige Programme, die den ermittelnden Anforderungen entsprechen, effizient zu entwickeln. Dazu zählen auch Prozess-, Qualitäts- und Softwaremanagement. Hierunter versteht man Strategien zur Verwaltung von Software wie IT-Recht, Outsourcing, Industrialisierung usw. Auf wissenschaftlicher Basis werden Vorgehens- und Qualitätsmodelle sowie Prüfmethode analysiert. Neben der qualitativen Analyse ist auch die quantitative Untersuchung von Software, also die zahlenmäßige Erfassung von Einflüssen entscheidend. Neben dem Verständnis, warum Softwaresysteme immer komplizierter, umfangreicher und komplexer werden, interessiert man sich auch dafür in welchem Maße die Kompliziertheit von Softwaresystemen steigt. Konkrete Messungen und Berechnungen sollen hierüber Aufschluss geben. Sogenannte Metriken und Indikatoren spielen hier eine große Rolle. Die Vermessung von Software geht bereits zurück auf die Anfangsjahre professioneller Softwareentwicklung. Sie ermöglicht den Vergleich von verschiedenen Softwaresystemen und erlaubt Rückschlüsse auf den Umfang und den Aufwand der zu entwickelnden Software. Dies ist vor allem für die wirtschaftlichen Aspekte von großer Bedeutung. Es gibt zahlreiche Beispiele für fehlgeschlagenen Kostenschätzungen und sonstige gescheiterte IT-Projekte¹. Die Webanwendung A2LL zur Umsetzung der Hartz-IV-Gesetzgebung wurde 2004 in mehreren deutschen Großstädten eingeführt und 2008 -

¹<http://www.devtopics.com/20-famous-software-disasters/>, abgerufen am 8. Oktober 2013

nach zahlreichen Ausfällen und katastrophalen finanziellen Folgen² - von der Bundesagentur für Arbeit aufgegeben. Der Versuch, mit FISCUS ein einheitliches Softwaresystem in Deutschland einzuführen, lieferte nach 13 Jahren Entwicklungszeit und Kosten von 400 Millionen Euro kein nennenswertes Ergebnis und wurde 2006 eingestellt [22]. Auch Projekte von kleinerem Umfang geraten immer wieder in Schwierigkeiten und enden in einem finanziellen Chaos für alle Beteiligten. Fehleinschätzungen, zu starke Vereinfachung bei den Planungen und falsche Annahmen führen zwangsläufig zu Misserfolgen, die vermeidbar gewesen wären.

Die Softwareentwicklung hat große Fortschritte gemacht und trotzdem scheitern IT-Projekte immer noch aufgrund von Fehlern, die man im Vorfeld bereits beseitigen hätte können. Zu starkes monokausales Denken, also klassischer Reduktionismus und mechanistische Sichtweisen, führen zu Schwierigkeiten, die nicht intendierte Nebenfolgen und Auswirkungen haben. Es werden zwar immer umfangreichere Verfahren und Modelle (z.B. V-Modell, CMMI und modellgetriebene Softwareentwicklung) entwickelt oder iterative Ansätze, die in jedem Durchlauf das Ergebnis verfeinern (z.B. Spiralmodell), doch das Grundproblem scheint dadurch nicht gelöst werden zu können. Insgesamt wird das ingenieurwissenschaftliche Vorgehen immer umstrittener. So werden auch Ansätze diskutiert, die stark von der Chaostheorie geprägt sind und somit von der Komplexitätsforschung beeinflusst werden. Man spricht von einem „New Software Engineering Paradigm“ und versucht die Erkenntnisse von Nicht-Linearität, Dynamik, Nicht-Determiniertheit sowie der Sensitivität gegenüber kleinsten Änderungen („Schmetterlingseffekt“) in der Softwareentwicklung zu nutzen (siehe [133] und Kapitel 11.4).

Worin bestehen die Probleme, die sich mit den herkömmlichen Methoden ergeben? Modellierungsversuche mit UML, die Bewertung von Software anhand von Metriken, Bottom-Up- bzw. Top-Down-Schätzungen für Aufwände und Kosten und weitere etablierte Methoden scheinen für manche Projekte zu funktionieren, für andere hingegen sind sie inadäquat. Sie führen zu finanziellen und organisatorischen Problemen, die den Projektverlauf negativ beeinflussen oder das Projekt scheitern lassen können. In den seltensten Fällen handelt es sich um nicht berücksichtigte technische Schwierigkeiten. Das bedeutet, dass Unzulänglichkeit einer Programmiersprache oder nicht ausreichende Programmierkenntnisse der Entwickler praktisch ausgeschlossen werden können. Vielmehr scheint es, dass grundlegende organisatorische Schwierigkeiten noch nicht erfasst sind und dass herkömmliche Bewertungsmethoden doch nicht ausreichen, diese zu erfassen und zu berücksichtigen.

Im Folgenden werden zwei gängige Methoden der Modellierung und der Bewertung von Software vorgestellt: UML und Softwagemetriken zur Abschätzung von Komplexität

²<http://www.heise.de/newsticker/meldung/Hartz-IV-Software-230-Millionen-Euro-Zusatzkosten-162983.html>, abgerufen am 2. Oktober 2013

in Softwaresystemen. Beides sind etablierte Standards innerhalb der Softwaretechnik, die seit Jahren verwendet und weiterentwickelt werden. Besondere Aufmerksamkeit wird dabei auf deren Aussagekraft über Komplexität gelegt und prinzipielle Schwachstellen aufgezeigt.

11.2. UML – Unified Modelling Language

Die Unified Modelling Language, kurz UML, wurde in 1990er Jahren entwickelt und diente dazu, Modelle von Softwaresystemen zu erstellen. Sie wurde als vereinheitlichte (engl. *unified*) Sprache entworfen, die alle Bereich technischer Systemmodellierung abdecken soll [129, S. 215]. Mittlerweile es sie zum Industriestandard geworden, nicht zuletzt durch das Softwarekonsortium OMG (Objekt Management Group). Die Sprache befindet sich in stetiger Weiterentwicklung, wobei Einflüsse führender Hersteller von Modellierungswerkzeuge und großen Unternehmen zu finden sind. UML möchte praxistauglich sein und orientiert sich daher an der Industrie. Sie lebt von Impulsen und Anregung der Anwender. Jeder kann Wünsche und Ideen formulieren und diese der OMG mitteilen, die dann darüber berät, unter Umständen berücksichtigt und in einer neuen Revision mitaufnimmt.

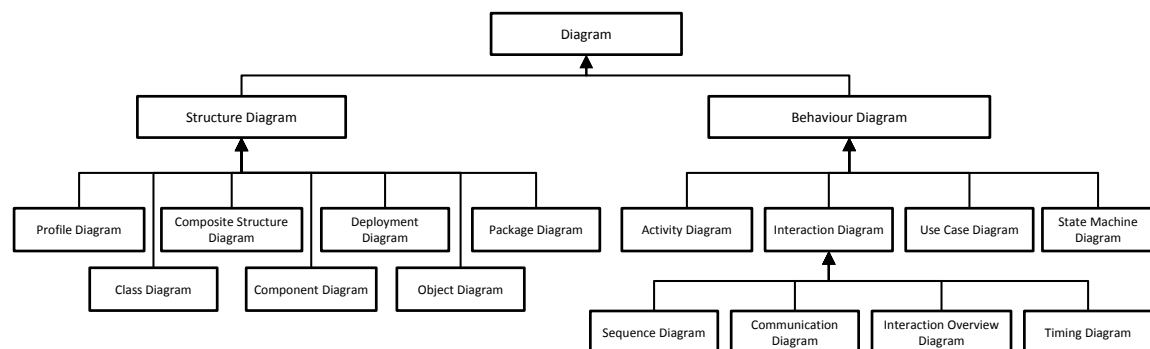


Abbildung 11.1.: Taxonomie der Struktur- und Verhaltensdiagramme in UML Version 2.2 [45]

Grafische Notationen in der Softwaremodellierung und die Darstellung von Software als Bausteinen ist weit verbreitet und wurde von Informatikern bereits früh propagiert. Dabei versuchte man, neben einer einheitliche Notation, die allen Anforderungen gerecht wird, eine geeignete Methodik zu finden. Die korrekte Anwendung der Notation wird dabei sichergestellt. UML wurde im Wesentlichen von den drei Amerikanern Grady Booch, Ivar Jacobson und James Rumbaugh entworfen und setzte sich aus mehreren Notationen und Methoden zusammen. Begünstigt wurde die Notation durch die Tatsache, dass objektorientierte Programmiersprachen, wie beispielsweise C++, immer bedeutender wurden. Objektorientierung als Programmierparadigma bedeutet, dass Funktionalität von Softwa-

re immer in Objekte, sogenannten Klassen, gekapselt ist. Diese werden einmal entworfen und können nach belieben wiederverwendet werden.

UML besteht grundsätzlich aus zwei Elementen: Modell und Diagramm. Während das Modell die vollständige Beschreibung eines Systems enthält, visualisiert ein Diagramm immer nur eine Sichtweise des Systems. Diese Unterscheidung wird jedoch vielfach nicht berücksichtigt: „Im allgemeinen Sprachgebrauch werden die Begriffe Diagramm und Modell (...) Synonym verwendet.“ [129, S. 220]. Deshalb werden Modellierungen in UML fast ausschließlich durch Diagramme repräsentiert. Es gibt in UML 2.2 eine Vielzahl von Diagrammtypen. Insgesamt handelt es sich um 14 verschiedene Diagramme, wobei jeweils sieben der Beschreibung von Struktur und sieben der Beschreibung des Verhaltens eines Systems zukommen. Abbildung 11.1 zeigt die Hierarchie der UML-Diagramme.

Beispielhaft sollen im Folgenden zwei Diagrammartentypen aus beiden Bereichen, also Struktur- und Verhaltensdiagramm, kurz vorgestellt werden. Es werden dabei bei Weitem nicht alle Möglichkeiten und Konzepte zur Modellierung und Annotation vorgestellt. Diese können der Spezifikation [45] oder anderen Quellen entnommen werden (z.B. [129]), jedoch soll die Arbeitsweise der Modellierung mit UML verdeutlicht werden.

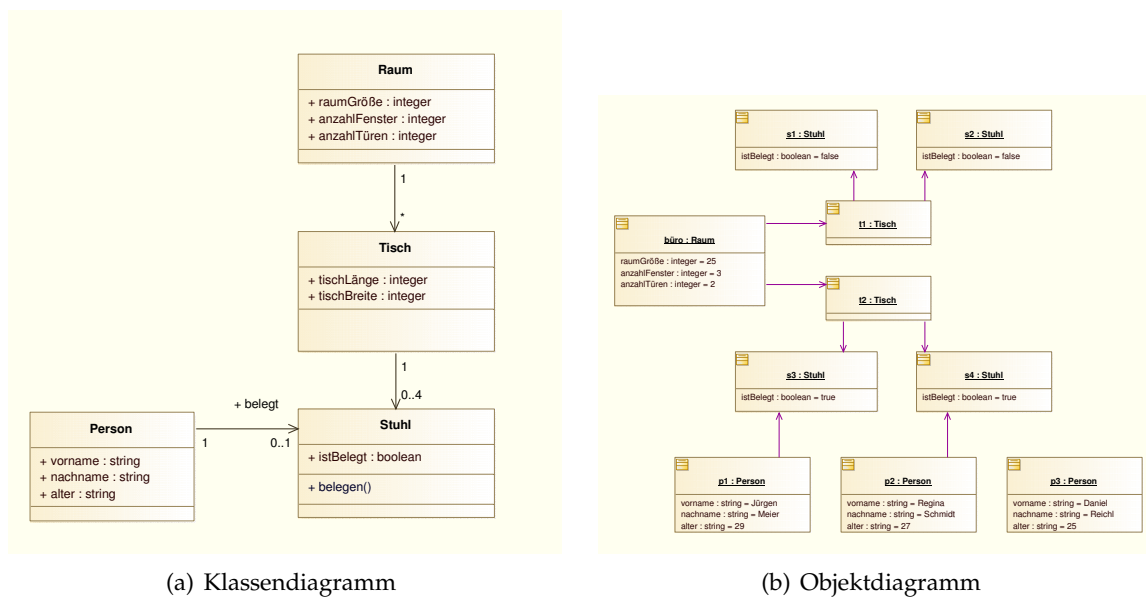


Abbildung 11.2.: UML Strukturdiagramme

Klassendiagramm (Class Diagram) Das Klassendiagramm ist eines der geläufigsten Diagrammtypen bei der Anwendung von UML. Nachdem Klassen die zentralen Elemente der Softwareentwicklung in wichtigen Programmiersprachen (wie Java, C++ und C#) sind, wird das Klassendiagramm zu der zentralen Abbildung des Softwareprojekts. Dabei handelt es sich um eine Beschreibung eines Systems, das alle vor-

kommenden Komponenten als Klassen repräsentiert. Beispielsweise könnte man das Zimmer eines Hauses als eine Menge von Objekten wie Raum, Tische, Stühle und Personen darstellen. Abbildung 11.2 (a) zeigt ein mögliches Klassendiagramm dazu. Ein Raum kann beliebig viele Tische enthalten (durch einen Stern ausgedrückt) und jedem Tisch sind dabei null bis vier Stühle zugeordnet. Ein Raum wird durch die Raumgröße, die Anzahl der Fenster und Türen beschrieben. Ein Stuhl kann von einer Person besetzt werden, die durch Vor- und Nachname sowie durch ihr Alter beschrieben wird. Eine Person kann maximal einen Stuhl belegen, muss dies aber nicht tun (0..1). Die Angabe von Multiplizitäten (1, 0..4 und *) erlaubt die Spezifikation von oberen und unteren Schranken.

Objektdiagramm (Object Diagram) Das Objektdiagramm beschreibt spezifische Ausprägungen eines Systems. Abbildung 11.2 (b) zeigt ein mögliches Objektdiagramm, das konform zu dem Klassendiagramm in a) ist. Die Attribute und Eigenschaften sind jeweils mit konkreten Werten belegt. Das Beispiel ist grundsätzlich sehr einfach zu verstehen: Der Raum „Büro“ ist 25 Einheiten groß, besitzt drei Fenster und zwei Türen. Er beinhaltet zwei Tische t1 und t2 mit jeweils zwei Stühle und so weiter.

Auch dieses Strukturdiagramm trifft, wie auch das Klassendiagramm, nur eine Aussage über die Struktureigenschaften des Systems bzw. die Beschaffenheit und Ausprägung zu einem bestimmten Zeitpunkt.

Aktivitätsdiagramm (Activity Diagram) Das Aktivitätsdiagramm ist ein sehr gebräuchliches Verhaltensdiagramm in UML. Es beinhaltet die möglichen Aktionen eines Objekts und beschreibt die Ausführung von Anwendungsfällen. Das Diagramm beinhaltet einen Start- und einen Endknoten, mit denen eine Aktivität beginnt bzw. zu ende ist. Aktivitäten werden als Rechtecke mit abgerundeten Ecken dargestellt und die Übergänge mit Pfeilen. Insgesamt erinnert die Notation stark an die schon lange bekannten Petrinetze, erlaubt jedoch viele Möglichkeiten zur Darstellung von Abläufen. Angefangen von If-Verzweigung über Schleifenabläufe und ereignisbasierte Abläufe ist nahezu alles möglich. Ebenso kann zwischen Objekt und Informationsflüssen unterschieden werden. Ein einfaches Beispiel ist in Abbildung 11.3 (a) dargestellt.

Sequenzdiagramm (Sequence Diagram) Das Sequenzdiagramm stellt eine weitere Möglichkeit dar, das Verhalten eines Systems darzustellen. Die Leserichtung erfolgt dabei von oben nach unten und jedes konkrete Objekt ist durch seine Lebenslinie repräsentiert. Die Interaktion zwischen Objekten wird durch Pfeile dargestellt und durch textuelle Beschreibung näher spezifiziert. Funktionen, die in den jeweiligen

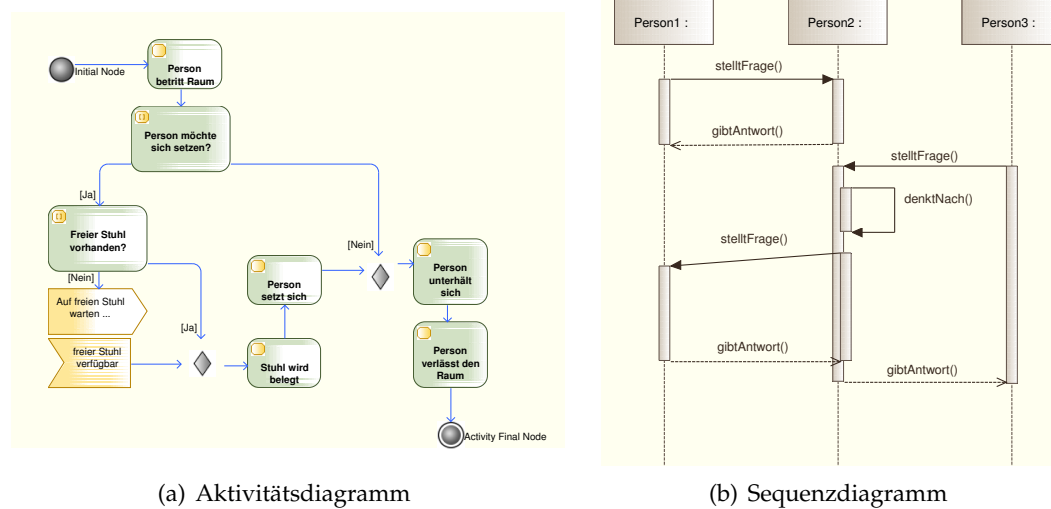


Abbildung 11.3.: UML Verhaltensdiagramme

Objekten aufgerufen werden, sind durch Rechtecke gekennzeichnet. Es kann unterschieden werden zwischen synchronen und asynchronen Aufrufen. Während bei synchronen Aufrufen der Sender auf eine Antwort des Empfängers wartet, werden asynchrone Aufrufe vom Sender gestartet und die Verbindung dann aufgelöst. Liegt das Ergebnis der Funktion vor, benachrichtigt der ursprüngliche Empfänger den Sender. Es erfolgt also kein sogenanntes aktives Warten.

UML ist eine mächtige Modellierungssprache, die nicht grundlos zum Industriestandard geworden ist. Die Vielzahl der Möglichkeiten die Struktur sowie das Verhalten von Systemen zu beschreiben ist über die Jahre gewachsen und die Notationen ständig überarbeitet worden. Positiv anzumerken ist außerdem, dass man konsequent weiter an der Entwicklung neuer Standards arbeitet. UML wird nicht statisch von einem Gremium von oben herab diktiert, sondern enthält Impulse aus der Industrie, die dann von Experten diskutiert und eingearbeitet werden. Insgesamt stellt UML eine pragmatische Beschreibungssprache dar, die vorrangig zur anschaulichen Darstellung von praktischen Problemen verwendet wird. Gute Lesbarkeit und hervorragende Computerunterstützung machen UML zu einem Standard moderner Modellierung. Nicht zuletzt die Biologie verweist auf die Erfolge der Informatik im Bereich der Modellierung und hofft, daraus für die eigene Disziplin einen Erkenntnisgewinn ableiten zu können (siehe [106]).

Was unterschiedliche Aspekte der Modellierung betrifft, ist UML mit seinen 14 Diagrammen breit aufgestellt. Dabei entfallen je sieben auf die Beschreibung des Verhaltens und je sieben auf die Beschreibung der Struktur. UML ist jedoch auch sehr softwarelastig und eignet sich vorrangig zur Beschreibung von Problemen und Lösungen, die mittels

objektorientierter Programmierung gelöst sind bzw. gelöst werden können. Die Interaktionen und Strukturen können dabei nahezu beliebig genau abgebildet werden und Freitextnotationen erlauben sogar Anmerkungen anzubringen, für die der Standard keinen eigenen Platz einräumt. Die UML-Spezifikation ist zwar sehr streng gehalten, die meisten Werkzeuge zur Modellierung erlauben jedoch Abweichungen davon und benachrichtigen den User mit Warnungen, falls diese nicht eingehalten werden. Der Austausch von Modellen ist mittels XMI-Standard (XML Metadata Interchange), der ebenfalls von der OMG entworfen wurde, zwischen Werkzeugen verschiedenster Anbieter einfach möglich (vgl. dazu SBML Kapitel 5.4.3 in der Biologie).

UML setzt im Bereich der Modellierung neue Maßstäbe. Keine andere graphische Beschreibungssprache von Modellen ist so weit verbreitet und akzeptiert. Die eingearbeiteten Konzepte sind mittlerweile schon so zahlreich, dass es immer schwieriger wird, diese zu überblicken und korrekt anzuwenden. Computerprogramme erleichtern dies nur bedingt. UML wurde ursprünglich zur Modellierung von Softwareprogrammen entworfen und dazu eignet sie sich auch am besten. Die Modellierung von kleinen Details in großen Programmen ist kein Problem, da man die Diagramme verschachteln kann. Jedes Diagramm betrachtet einen anderen Aspekt und leistet so einen Beitrag zur Modellierung, sie repräsentieren so unterschiedliche Aspekte des Systems.

UML und Komplexität

Die Unified Modelling Language UML ist zweifelsfrei der Standard im Bereich der Modellierung von Softwaresystemen. Die Sprache hat über die Jahre alle Möglichkeiten entwickelt, die man in der Industrie für notwendig erachtet hat. Bei der Umsetzung wurde vorrangig auf die Praxistauglichkeit geachtet. Man hat sich somit eine sehr pragmatische Beschreibungssprache von Systemen geschaffen. UML kann auf verschiedenen Ebenen angewendet werden. Dabei können gesamte Systeme mit derselben Notation abgebildet werden wie einzelne kleine Funktionen und kurze Algorithmen. Dies gilt sowohl für die Struktur als auch für das Verhalten.

Welcher Beitrag ist nun aus komplexitätstheoretischer Sicht zu erwarten? Inwieweit lässt UML Aussagen über die entstehende Komplexität von großen Softwaresystemen zu? Die Sprache erlaubt detailreiche Modellierung und umfangreiche Diagrammtypen decken das breite Spektrum ab, das zum Gegenstand der analytischen Betrachtung gemacht werden kann. Der Arbeitsweise der Ingenieure, die Softwaretechnik (engl. Software Engineering) spricht vom Software-Ingenieur (engl. Software Engineer), entspricht es, selbst die kleinsten Teile von Systemen zu erfassen und detailgenau in ein Modell abzubilden. Deshalb kann UML als eine ingenieurwissenschaftliche Leistung angesehen werden. Durch das große Angebot der zur Verfügung stehenden Mittel ist man zu der Annahme verleitet, dass

UML ausreichend ist um ein System ganzheitlich zu erfassen. Es zutreffend, dass Systeme komplett, also ohne ein Detail weglassen zu müssen, in UML beschrieben werden können. Emergente Systemeigenschaften, die das Wesen der Komplexität repräsentieren, werden jedoch nicht sichtbar. Diese zeigen sich erst in der Praxis.

UML verschleiert diesen Sachverhalt vermutlich unbewusst und deshalb ist es umso wichtiger, sich dies bewusst vor Augen zu führen. Zwar erkennen erfahrene Software-Ingenieure sehr wohl Nichtlinearitäten und chaotische Zusammenhänge in Programmen und können diese auch modellieren, doch wird die reduktionistische Sichtweise dabei nie wirklich verlassen. Erst in der Praxis, in der das System ganzheitlich mit der Realität konfrontiert wird, ergibt sich das Zusammenspiel und das Ergebnis sich überlagernder Effekte zeigt sich. Aus der Physik weiß man, dass obwohl Gesetzmäßigkeiten bekannt und sehr einfach sein können, Vorhersagen nicht möglich sind (Doppelpendel, n-Körper-Problem, usw.). Ähnlich verhält es sich auch in der Informatik. Die noch so detaillierte Abbildung von Systemen lässt noch keinen allgemeinen Schluss auf das Gesamtsystem zu. Natürlich gibt es genügend Projekte für die UML und der herkömmliche Softwareentwurf funktioniert, doch für große Systeme, die über viele Jahre wachsen und eine große Anzahl an Abhängigkeiten haben, gestaltet sich dies schwieriger.

UML ist das Ergebnis eines jahrelangen Entwicklungsprozesses und wird sich mit Sicherheit noch weiter entwickeln. Früher oder später wird man mit UML alles beschreiben können, was im Bereich der Softwareentwicklung denkbar ist. Doch über die Gesetzmäßigkeiten des Softwareentwurfs kann damit noch nichts gesagt werden. Wie das Wissen um die Funktionsweise eines einzelnen Neurons noch nicht erklärt, wie das Bewusstsein entsteht oder wie das Verhalten eines einzelnen Menschen das Auftreten komplexer Gesellschaften und Kulturen nicht erklären kann, kommt die Erklärung der Probleme und Konsequenzen im Bereich der Softwareentwicklung auch nicht Hand in Hand mit der Erklärung der kleinsten Details von Softwareprogrammen. Eine holistische Sichtweise ist gefragt, die sowohl die notwendigen Details berücksichtigt, aber das System als Ganzes in den Fokus rückt. Das System ist mehr als die Summe seiner Klassen und Nachrichten zwischen ihnen. Dieses Mehr wird sich auch durch immer detaillierteres Darstellen und Abbilden nicht zeigen.

Das wahllose und immer noch genauere Abbilden eines Systems kann keine Einsichten in die Komplexität gewähren. Die Identifikation der entscheidenden Werte ist notwendig und die detailgetreue Abbildung derselben führt zu einem Verständnis emergenter Systemeigenschaften und stellt letztlich die Grundlagen für das Verstehen der komplexen Dynamik dar, die neben der Struktur den Schlüssel zu den komplexen Systemen darstellt.

11.3. Komplexitätsmetriken

Ein beliebtes Maß für die Bewertung von Softwaresystemen ergibt sich aus der Code-Analyse. Diese kann automatisiert oder manuell durchgeführt werden und besteht im Wesentlichen aus einer Begutachtung des Quelltexts eines Softwareprogramms. Deshalb kann sie immer erst nach der Entwicklung von Programmen oder Abschnitten angewendet werden. Dabei werden verschiedene Aspekte eines Programms systematisch erfasst und quantifiziert. Sie erlauben eine objektive Beurteilung von Kriterien und Qualitätsmerkmalen von Software und werden schon lange als Indikatoren für Komplexität angesehen [26].

Die Anzahl an verschiedenen Metriken ist über die Jahre sehr stark gewachsen, es scheint als folge man hier dem Motto von Galilei, indem versucht wird, alles zu messen, was messbar ist. Drei sehr frühe Metriken sind die Lines of Code (LOC), die Halstead Complexity Metric (HCM) und McCabes Cyclomatic Complexity Metric (CCM) [136].

Lines of Code (LOC) Das einfachste Maß für die Größe eines Softwareprogramms ist die Anzahl der Programmzeilen (engl. Lines of Code). Dabei werden alle Zeilen eines Computerprogramms gezählt und man erhält Einsicht über die Größe und das Wachstum eines Programms. Große Softwaresysteme haben mehrere Millionen Zeilen Programmcode, während kleine Programme oft nur über wenige Zeilen verfügen. Es haben sich auch zahlreiche Varianten von LOC gebildet, etwa ob Kommentar- oder Leerzeilen mitgezählt werden oder nicht. Insgesamt dient diese Metrik als Anhaltspunkt für den Aufwand, der für die Erstellung notwendig war und für die Wartung nötig sein wird. Da die Anzahl der verwendeten Programmzeilen sehr stark von dem jeweilige Programmierer und natürlich der Programmiersprache abhängig sind, ist LOC als absolutes Maß umstritten und erlaubt nur grobe Vergleiche zwischen Programmen.

Auch die Vorstellung, dass ein langes Programm komplizierter oder schwerer zu verstehen sei, stimmt im Allgemeinen nicht. Ausschließlich auf Basis der Länge eines Programms kann noch nichts darüber ausgesagt werden, ob eine komplexe Funktion wahrgenommen wird oder nicht.

Cyclomatic Complexity Metric (CCM) 1976 stellte Thomas McCabe die zyklomatische Komplexität vor, die er aus graphentheoretischen Überlegungen ableitete [98]. Die grundlegende Idee dabei ist, alle möglichen Pfade zu zählen, die ein Programm während seiner Ausführung durchlaufen kann. Die Komplexität ist dabei nicht abhängig von der Länge, sondern von der Anzahl und Art der Unterscheidungen, die in dem Programm getroffen werden. Daraus folgt, dass die zyklomatische Komplexität steigt, wenn innerhalb des Programms eine Unterscheidung zwischen zwei

Ausführungsteilen erfolgt. Möchte man beispielsweise bestimmen, ob eine Zeichenfolge einen Monat im Jahr bezeichnet, so kann man den Namen jedes Monats mit der Zeichenfolge vergleichen und das Komplexitätsmaß erhöht sich um zwölf. Insgesamt ist dies kein für den Menschen intuitives Maß, da man triviale Unterscheidungen, wie die des Monatsnamen, nie als sehr komplex einstufen würde. Jedoch stellt die von McCabe eingeführte Metrik eine obere Schranke für alle möglichen Programmverläufe dar. Die Metrik entspricht somit auch der maximal notwendigen Testfälle um eine vollständige Zweigüberdeckung zu erreichen.

Es stellt ein anderes Maß dar, die Anzahl der Verzweigungen zu berücksichtigen, als lediglich die Anzahl der Programmzeilen zu berücksichtigen. Genauso wie ein langes Programm sehr kompliziert sein kann, kann auch ein Programm mit sehr vielen unterschiedlichen Verläufen sehr kompliziert und schwierig zu warten sein. Aber wiederum gilt es im Allgemeinen nicht, dass eine hohe zyklomatische Komplexität notwendigerweise ein kompliziertes Programm beschreibt.

Halstead Complexity Metric (HCM) Maurice Halstead stellte 1977 Überlegungen an, um Software zu vermessen und daraus verschiedene Eigenschaften zu berechnen. Er verwendete vier unterschiedliche Basismaße, die er in den von ihm entwickelten Formeln verwendete. Die Anzahl der unterschiedlichen Operatoren η_1 und Operanden η_2 und die Anzahl der insgesamt verwendeten Operatoren N_1 und Operanden N_2 sind zentral. Aus diesen ermittelten Größen kann die Halstead Länge $HL = \eta_1 \cdot \log_2 \eta_2 + \eta_2 \cdot \log_2 \eta_1$ und das Halstead Volumen $HV = (N_1 + N_2) \cdot \log(\eta_1 + \eta_2)$ berechnet werden. Es existieren noch weitere Kennzahlen, die aus den Basiswerten berechnet werden können wie beispielsweise der Aufwand, die Schwierigkeit das Programm zu schreiben oder die Implementierungszeit [47].

Genauso wie McGabes Komplexitätsmaß ist auch der Ansatz von Halstead grundsätzlich unabhängig von der Länge des Programms, was entscheidet ist die Anzahl an Operatoren und Operanden. Die HCM zählt auch zu den statischen Komplexitätsmaßen, da sie lediglich die Struktur des Programms, also einzig dessen lexikalischen Eigenschaften untersucht.

Export Object Coupling (EOC) & Import Object Coupling (IOC) Im Gegensatz zu den bisherigen drei Metriken stellen die EOC und die IOC dynamische Metriken dar. Dynamisch bedeutet, dass das Verhalten eines Objekts und nicht die strukturellen Eigenschaften im Vordergrund stehen. Es geht nicht darum wie viele von diesem oder jenem Objekt existiert, sondern wie ein Objekt mit seiner Umwelt interagiert. EOC ist definiert als die Anzahl an Nachrichten, die ein Objekt o_i an ein Objekt o_k sendet im Verhältnis zu allen Nachrichten, die gesendet werden. In umgekehrter

Weise ist nun IOC die Anzahl der Nachrichten, die ein Objekt erhält [134]. Beide Kennzahlen beschreiben die dynamische Kopplung zwischen Objekten, wobei sie die Anzahl der ausgetauschten Nachrichten betrachten.

In der Praxis sind dynamische Kennzahlen deutlich schwieriger handhabbar. Sie können erst bei der Ausführung bestimmt werden, denn der sich ergebende Nachrichtenaustausch ist kaum absehbar. Hier könnten Simulationen helfen, einen Einblick zu gewinnen.

Die Bewertung von Komplexität auf Basis einiger weniger Indikatoren wurde bereits vor vielen Jahren als problematisch angesehen. Die zugrundeliegende Frage formuliert der Informatiker Laszlo Belady folgendermaßen: „How can we capture, possibly numerically, properties of text and other software documents, to help predict development cost, schedule, and the reliability of the final product or to help evaluate the impact of new tools and techniques?“ [7]

Die Quantifizierung der Komplexität von Software ist ein großer Traum, den viele Wissenschaftler mit unterschiedlichen Methoden näher zu kommen versuchen. Mittlerweile ist man zu der Einsicht gekommen, dass das bloße Messen von Quelltexteigenschaften, wie dies McCabe und Halstead versuchten, nicht viel über die Komplexität des Systems aussagt. Man gelangt lediglich zu einer Aussage über die Beschaffenheit der Software, also wie groß der Quelltext des Programms ist, wie viele Möglichkeiten der Ausführung existieren, wie viele Klassen und Funktionen implementiert sind, wie groß die Vererbungshierarchie ist, usw.

Der Engländer Norman Fenton beschreibt die Situation folgendermaßen: „(...) what they really mean is the need to measure a number of internal, structural product attributes“ [36, S. 153]. Er kommt zu dem Entschluss, dass man trotzdem unterschiedliche Komplexitätsmaße braucht, die teilweise nicht miteinander verglichen werden können und auch nicht zu einem einzigen Maß zusammengerechnet werden dürfen: „Hence it is impossible to define a set of consistent axioms for a completely general view of complexity. It is better to concentrate on specific attributes...“ [36, S. 155]

Aus wissenschaftstheoretischer Sicht ist zusätzlich anzumerken, dass auch in der Informatik über den Begriff Komplexität von Software keine eindeutige und akzeptierte Definition existiert. Die IEEE³, einer der großen Verbände der Normierung und Standardisierung in der Informatik, setzte anfangs die Komplexität eines Systems mit dessen Komplikation gleich, die sich aus der Anzahl von Schnittstellen, Anzahl der Verzweigungen usw. ergeben. Später wurde diese Definition revidiert und überarbeitet: „Complexity is the degree to which a system or component has a design or implementation that is difficult to understand and verify.“ [60]. Die Anfangs noch sehr mechanistische Sichtweise wurde ersetzt

³Institute for Electrical and Electronic Engineers

durch eine Sichtweise, die vor allem auf das Verstehen durch den Menschen abzielt. Man könnte geneigt sein, alles, was der Mensch nicht oder nur sehr schwer verstehen kann, als komplex anzusehen. Diese Definition ist nicht gerade konstruktiv und insgesamt oberflächlich.

Hinter der Idee einer Quantifizierung von Komplexität liegt stillschweigend die Annahme, dass es ausreichen könnte, die Software mit einer Hand voll ausgeklügelter Maßzahlen zu analysieren und eine Aussage über die Komplexität machen zu können. Dieser Versuch wird jedoch immer mit großen Schwierigkeiten behaftet sein. Die Motivation für viele, die Komplexität eines Softwaresystems zu bestimmen, ist oftmals wirtschaftlich geprägt. Man erhofft sich, eine Aussage über den Aufwand der Erstellung und der Wartung eines Softwaresystem ist, um die entstehenden Kosten besser einschätzen zu können. Dieser Versuch ist verständlich und doch tut sich hier eine sehr deutliche Kluft zwischen dem Komplexitätsverständnis in den Life Sciences, wie Biologie und Neurologie, und der Informatik auf. Dort, wo Komplexität als eine emergente Systemeigenschaft behandelt wird, eine Eigenschaft, die dem gesamten System anhaftet und erst dadurch entsteht, hat man längst eingesehen, dass Komplexität durch eigene Gesetzmäßigkeiten beschrieben werden kann und nicht durch die Summe von einzelnen Komponenten, Klassen und Funktionen. So gesehen lässt sich Komplexität auch nicht reduzieren. Definiert man die Komplexität eines Systems durch die Anzahl von Zeilen, Klasse, Funktionen usw. neigt man leicht dazu, eine Reduktion dergleichen anzustreben. Bei der Softwareentwicklung hängt noch immer an der Vorstellung, es reiche, die Anzahl von Zeilen, Klassen und Funktionen zu reduzieren, und dadurch erhalte man ein weniger komplexes System. Diese Vorstellung ist problematisch, denn sie adressieren nicht das Wesen der Komplexität. Deshalb wird es auch notwendig, zwischen verschiedensten Arten von Komplexität zu unterscheiden. So existiert beispielsweise strukturelle, konzeptionelle und algorithmische Komplexität, Graphenkomplexität, beherrschbare und unbeherrschbare Komplexität, Codekomplexität, Entwurfskomplexität, Anforderungskomplexität, Problemkomplexität usw. (siehe [119, S. 45]). Allesamt Begriffe, die sich teilweise überdecken und ergänzen sollen. Wenn man das Komplexitätsverständnis mit der Anzahl der verschiedenen Klassen eines Systems gleichsetzt, dann reduziert man trivialerweise die Komplexität des Systems, indem man auf Klassen verzichtet bzw. Klassen zusammenfasst. Dieser Ansatz ist aber eine Ad-Hoc-Lösung und kein Beitrag zu einem Komplexitätsverständnis.

Grundsätzlich ist es natürlich richtig, dass Software aufgrund der zahlreichen Berührungspunkte mit unterschiedlichen Akteuren mit diversen Interessen wie Programmierer, Benutzer, Administratoren, Unternehmen, usw. unter vielen Gesichtspunkten betrachtet werden kann. Ein starke Differenzierung und Abgrenzung zwischen einzelnen Positionen ist jedoch notwendig. Wieder ergibt sich das Problem, dass es kein einheitliches Verständnis von Komplexität gibt und deshalb viele Ergebnisse wissenschaftlicher Forschung als kom-

plex deklariert werden, die im allerhöchsten Fall kompliziert und nicht-trivial sind. Diese werden dann unnötig hochstilisiert und unter dem Gesichtspunkt der Komplexitätsforschung subsumiert.

Strukturelle Aspekte sind mit Sicherheit ein nicht zu vernachlässigender Faktor, wenn es um die Beschreibung von Softwaresystemen geht. Sie eignen sich besonders deshalb hervorragend, weil sie relativ einfach zu messen, objektiv und gut vergleichbar sind. Denn sind sie erst mal definiert, so ist eine automatische Berechnung und Gegenüberstellung kein Problem mehr. Sie beschreiben jedoch nur einen Aspekt möglicher Komplexität und betrachten die Dynamik von Systemen nur ansatzweise. Zwar können Abhängigkeiten und mögliche Interaktionspartner von Funktionen, Klassen und sonstigen Modulen und Schnittstellen exakt ermittelt werden. Die genaue Interaktion zu ermitteln ist jedoch nicht Gegenstand der Analyse. Wer beeinflusst wen, lautet die Frage. Entscheidend ist jedoch auch das Wie. Wer beeinflusst *wen* und *wie*? So müsste die Frage lauten, wenn man die Dynamik mit berücksichtigen möchte. Dadurch eröffnet sich eine ganz neue Perspektive auf der Suche nach dem Wesen der Komplexität.

Tabelle 11.1 zeigt diverse Softwaremetriken und unterscheidet zwischen statischen und dynamischen Kennzahlen. Dynamische Kennzahlen haben meist die Eigenschaft, dass sie sich auf das Zählen von Nachrichten, Interaktionen oder sonstigen Aktionen zur Laufzeit beschränken. Echte Dynamik im Sinne von Übergangsraten und Verläufen, also klassische Differentialgleichungen, werden nicht erfasst. Die Darstellung des zeitlichen Verlaufs in Zeitreihen ist nicht üblich [55].

Die Unterscheidung zwischen Metriken der Mikroebene, wie bei Halstead und McCabe, ist notwendig, da die Metriken auch immer nur eine begrenzte Aussagekraft über die Komplexität des Gesamtsystems haben. Dies gilt gleichermaßen auch für andere, nicht erwähnte Metriken, die die Felder der statischen Codeanalyse nicht verlassen. Neben den Metriken der Mikroebene ist es auch notwendig, die Makroebene der Metriken zu untersuchen. Diese Frage schwingt jedoch schon implizit bei vielen Fragestellungen mit. Welchen Einfluss hat die Entwicklung von sehr umfangreicher Software also vieler Codezeilen auf das Management? Welche Kosten kann man für das Testen einplanen, wenn man auf Mikroebene eine hohe zyklomatische Komplexität, also viele Ausführungspfade, identifiziert hat? Was hier passiert, ist der Versuch, Indikatoren der Mikroebene in Zusammenhang mit Merkmalen der Makroebene zu bringen. Dies kann funktionieren, muss aber nicht. Natürlich kann man immer Korrelationen zwischen Merkmalen berechnen, so wie man dies auch im Bereich der Ökonomie (siehe Korrelation 7.3.2) oder in der Neurologie versuchte (siehe Brain Activity Map 6.3.1). Eine Erklärung ist dies allerdings noch nicht. Denn ein Softwaresystem welches viele Codezeilen umfasst, ist nicht notwendigerweise komplexe Software, genauso wenig wie ein System mit wenig Codezeilen nicht notwendigerweise nicht-komplex ist.

Verhalten	Name	Beschreibung	Art
statisch	LOC	Anzahl der Zeilen im Quelltext	Codemetrik
	Halstead	Lexikalische Analyse des Programms	
	McCabe	Anzahl der verschiedenen Pfade eines Programms	
	OV	Anzahl Variablen eines Objekts	Komponentenmetrik
	CV	Anzahl Variablen einer Klasse	
	NOA	Anzahl der Attribute einer Klasse	
	DOI	Tiefe der Vererbungshierarchie	
	NOD	Anzahl der abgeleiteten Klassen	Strukturmetrik
	Fan-In	Anzahl der Klassen die auf ein Objekt zugreifen	
Fan-Out	Anzahl der Objekte auf die eine Klasse zugreifen		
dynamisch	EOC	Anzahl der Nachrichten die eine Klasse einer anderen Klasse sendet	Kopplungsmetrik
	IOC	Anzahl der Nachrichten die eine Klasse von einer anderen Klasse erhält	
	CBO	Anzahl der Attribute einer fremden Klasse, auf die zugegriffen wird	
	R _{LCOM}	Anzahl der Variablen die zur Laufzeit tatsächlich aufgerufen werden	Kohäsionsmetrik
	RW _{LCOM}	Verfeinerung von R _{LCOM} , durch prozentuelle Gewichtung	

Tabelle 11.1.: Auflistung verschiedener statischer als auch dynamischer Softwaremetriken. Während statische Metriken die Komponenten und Struktureigenschaften berücksichtigen, beschreiben dynamische Metriken Kopplungs- und Kohäsionseigenschaften. Metriken nach [55, 78, 118, 119, 134].

Die Vermessung statischer Eigenschaften von Software ist mit Sicherheit ein wesentlicher Punkt bei der Beschreibung der Komplexität von Software. Neben der Struktur ist jedoch auch die Dynamik entscheidend. Ohne sie gäbe es keine Komplexität. Dies hängt natürlich von dem verwendeten Komplexitätsverständnis ab. Dieses entspricht hier dem sich aus Teil II ergebenden Untersuchungen. Erst das Zusammenspiel von Struktur und Dynamik ermöglichen ein komplexes Verhalten, das sich durch Nichtlinearität, Selbstorganisation und Chaos zeigt. Untersuchungen über dynamische Metriken (siehe oben EOC und IOC), die die Interaktion von Funktionen und Klassen festhalten, existieren bereits. Leider sind diese nicht so komfortabel auf Software anwendbar, wie man es von statischen Metriken kennt. Die dynamischen Metriken können erst zur Laufzeit gemessen werden. Weitere Forschung, das Abstimmen statischer und dynamischer Eigenschaften sowie der Abgleich mit der Wirklichkeit, also der Wirklichkeit, könnte sich als zukunftsfruchtig erweisen.

11.4. NSE und das neue Verständnis von Softwaretechnik

Herkömmliche Methoden und Verfahrensweisen sind für viele Wissenschaftler bereits weit erforscht worden. Zu weit, wenn es nach der Meinung Jax Xiong geht. Er plädiert für ein neues Paradigma, eine neue Denk- und Arbeitsweise in der Softwaretechnik: NSE - Non-linear Software Engineering. In seinem Buch *New Software Engineering Paradigm Based on Complexity Science* beginnt er damit, bestehende Methoden der Softwaretechnik zu analysieren und deren Unzulänglichkeit in vielen Bereichen nachzuweisen. Einfachen Wasserfallmodelle, iterative Modelle und agile Methoden des Softwareentwurfs unterliegen laut Xiong dem Prinzip des konstruktiven Holismus (engl. constructive holism), bei dem die Komponenten zuerst erstellt werden und das System dann ganzheitlich zusammengestellt wird. Software wird dabei immer noch wie eine Maschine angesehen, deren Bauteile ganz unabhängig voneinander gebaut werden und zusammengesetzt ein Ganzes ergeben. Er hingegen spricht sich im NSE für einen generativen Holismus (engl. generative holism) aus. Hier entsteht Software vermehrt wie ein biologisches System. Er vergleicht das System Software auch mit einem Embryo, der nach und nach wächst [133, S. 45].

Herkömmliche Methoden sind nicht ausreichend, die Komplexität umfangreicher Softwareprojekte zu erfassen und die linearen und monokausalen Methoden der Modellierung begünstigen und verstärken dies sogar noch eher als es zu vermeiden. Die bisher verwendeten Begriffe und Vorstellungen von Software sind längst nicht mehr zeitgemäß. Dies gilt sowohl für die Begriffe der Softwareprozesse und der Softwareentwicklung, zwei wichtige Bereiche der aktuellen Softwaretechnik. Auch inkrementellen Modellen des Softwareentwurfs haftet die Linearität an. Es handelt sich um eine Serie von Wasserfällen und somit wieder um ein fortgeschrittenes lineares Denken, das sich anfangs allerdings nicht als ein solches zeigt.

Das von ihm vorgestellte NSE bemüht sich um ein umfassendes Zusammenspiel aller Prozesse, die in diesem Zusammenhang natürlich nicht mehr in der herkömmlichen Art und Weise gedacht werden dürfen. Auch sie werden von ihm anders definiert. Er schreibt dazu: „The essential difference between the old-established software engineering paradigm and NSE is how to handle the relationship between the whole and its parts of a software system.“ [133, S. 49]. Außerdem fordert er, Software nicht länger als Maschine anzusehen, sondern als ein komplexes adaptives System, dessen Verhalten sich nicht aus dem Verhalten der vielen kleinen Einzelteile abgeleitet werden kann, sondern sich aus der Interaktion der Einzelteile als Emergenz zeigt.

Problematisch sieht Xiong auch alle bisherigen Visualisierungsmethoden in der Softwaretechnik [133, S. 135]. Er unterstellt ihnen verhältnismäßig viele negative Eigenschaften, die mit Sicherheit einer eingehenderen Überprüfung bedürfen. Der Grundton, dass die Ansätze neu gedacht werden müssen, stimmt jedoch auch mit den Konsequenzen aus Ka-

pitel 11.2 überein. Lineares Denken, Reduktionismus und das Superpositionsprinzip sowie nicht holistische Sichtweisen prägten die herkömmlichen Ansätze und stoßen an ihre Grenzen.

Insgesamt zeigt sich, dass Denkansätze aus der Komplexitätsforschung in den Bereich der Softwaretechnik vorgedrungen sind und dort von erfahrenen Informatiker akzeptiert werden. Auch auf sprachlicher Ebene lässt sich eine ablehnende Haltung des traditionellen Verständnis von Softwaresysteme ausmachen. Bei kleinen Systemen spricht man noch von „bauen“ und „konstruieren“, während andere Systeme hingegen „wachsen“. Die von Xiong vorgestellten Methoden und Werkzeuge sind ein erster Schritt in eine neue Richtung. Die Probleme, die in Zukunft immer dringender werden, können vermutlich nicht endgültig gelöst werden.

11.5. Zusammenfassung

Softwaretechnik als Wissenschaft hat zweifelsfrei Großartiges geleistet im Bereich des Softwareentwurfs, des Softwaremanagements und bei Prozesssteuerung und Qualitätssicherung. Sie brachte Erkenntnisse und Einsichten, die die Entwicklungen moderner Softwaresysteme überhaupt erst ermöglichten. Die Größenordnungen neuer Softwaresysteme beträgt viele Arbeitsjahre und Entwicklungskosten im Milliardenhöhe. Und doch scheint es, dass die herkömmlichen Management- und Entwicklungsparadigmen vor Problemen stehen, die immer größer zu werden scheinen. Man fühlt sich insgesamt mit der Organisation von großen Projekten überfordert und bisherige Methoden der Softwareentwicklung stoßen an ihre Grenzen. Dies zeigt sich daran, dass Großprojekte immer öfter auf Probleme stoßen, die kaum mehr zu bewältigen sind. Datenpannen bei Krankenkassen, Sicherheitslecks bei führenden sozialen Netzwerken, Hackerangriffe auf Kreditkarten- und Bankinstitute. Was folgt, ist ein wirtschaftlicher Verlust und ein sinkendes Vertrauen in der Bevölkerung vor Softwarelösungen im Allgemeinen. Die Gesellschaft verliert ihre Zuversicht angesichts der Fehlleistungen moderner Systeme und das nicht ohne Grund, denn es sind schließlich sensible Daten von Personen, die betroffen sind (vgl. Kapitel 12).

Obwohl die technische Realisierung von Großprojekten gelingt, treten immer wieder Nebenfolgen auf, die nicht absehbar waren. Diese können einerseits positive Aspekte mit sich bringen wie eine stärkere Vernetztheit der Weltbevölkerung (das Internet) oder Vereinfachung des Zahlungsverkehrs (durch Onlinebanking). Aber auch negative Konsequenzen sind damit verbunden: Datenmissbrauch und Datenpannen, Scheitern von Projekten mit finanziellem Schaden, gesellschaftliches Unbehagen durch steigende Abhängigkeit von Softwaresysteme in allen Bereichen des täglichen Lebens wie Energieversorgung, sozialen und finanziellen Infrastrukturen, Gesundheitswesen usw.

Softwareentwickler sind angesichts der ungeheuren Komplexität überfordert und sind

sich bewusst, dass bisherige Denkansätze zwar immer weiter verbessert und angepasst werden können. Noch größere Sicherheitsmagen, größere Buffer, mehr Testfälle, weitere Redundanzen und erhöhte Ausfallsicherheit schieben das Problem jedoch nur weiter hinaus und verzögern es. Die hochkomplexe Dynamik von Softwaresystemen, insbesondere in Verbindung mit der Gesellschaft, gilt es allerdings zu akzeptieren und zu verstehen. Sie nicht zu beachten und zu ignorieren führt zu immer tieferer Ohnmacht. Komplexität ist die Herausforderung, die es zu bewältigen gilt und die bewältigt werden kann. Komplexität mit einer Krankheit zu vergleichen, die sich wie Typhus immer weiter ausbreitet (siehe [119, S. 50] und [80, S. 54]), führt zu einer falschen Vorstellung der Wirklichkeit und letztlich zu einer verzerrten Wahrnehmung der Realität.

Bisherige Maßnahmen sind nicht in der Lage, alle Aspekte der Komplexität adäquat abzubilden, was nicht bedeutet, dass dies prinzipiell unmöglich ist. Softwaremetriken, die eine Messung der Komplexität versprechen und die Vorstellung, dass es reicht, diese zu senken lösen die Probleme nur bedingt. Richtig ist, dass sowohl die Wissenschaft als auch die Praxis die Quantifizierung von Softwareprogrammen antreibt, um Fehlentwicklungen frühzeitig zu erkennen, prospektive Aussagen treffen zu können ist jedoch immer schwierig. Prognosen auf Basis von Indikatoren und Kennzahlen können funktionieren, bedürfen jedoch neben der bloßen Messung auch die Erkenntnis der zugrundeliegenden Gesetzmäßigkeiten, um echte Vorhersagen treffen zu können. Nicht zuletzt ist auch der Abgleich mit der Realität, also die Überprüfung der Hypothesen über das Gesamtsystems, notwendig.

Genauso wenig wird eine noch so exakte, aber reduktionistische Modellierung die Probleme nicht lösen können. Ebenso wie in anderen Disziplinen, wie beispielsweise der Neurologie und Soziologie, reicht ein noch so detailliertes Modell nicht aus für das Verstehen komplexer Systeme. Die verschiedenen Ebenen der Modellierung, also die Trennung von Struktur und Verhalten (siehe Abbildung 11.1), kann auch nicht so streng gedacht werden wie es die Spezifikation vorsieht. Beide Aspekte bedingen sich gegenseitig, das bedeutet, dass die Struktur einen Einfluss auf das Verhalten hat und umgekehrt. Erst das umfassende Verständnis der Dynamik komplexer Systeme, das Struktur und Verhalten gleichermaßen berücksichtigt, kann einen entscheidenden Beitrag dazu leisten, dass zukünftige (Software-)Projekte effektiv und effizient bearbeitet werden können.

Wie dies im Detail aussehen kann, bleibt an dieser Stelle offen. Hilfreich kann sich mit Sicherheit eine Orientierung an anderen Disziplinen erweisen, die genauso mit der Komplexität von Systemen ringen, wie es in der Informatik der Fall ist. Qualitative Beschreibung von Systemeigenschaften (siehe Kapitel 8.4.3) sowie holistische Betrachtungen von Systemen (siehe Kapitel 7.4.1) und das Akzeptieren komplexer Phänomene anstelle eines Ignorieren sind auf jeden Fall hilfreiche Maßnahmen.

Entscheidend wird zunächst die Analyse von Eigenschaften auf System- bzw. Makro-

ebene sein. Deren Entstehung muss auf Basis von lokalen Ereignissen, also Ereignissen der Mikroebene, erklärt werden können [92].

Eine detailgetreue Abbildung von Softwaresystemen ist wichtig, doch sie alleine reicht nicht aus, wenn es darum geht, ein Verständnis der Dynamik zu gewinnen. So wie Biologen nach einem „high degree of biological detail“ [42] streben, müssen auch in der Informatik strukturelle Eigenschaft klar erfasst und konsistent sein. Die Kombination mit der zeitlichen Veränderung des Systems und die ganzheitliche Betrachtung sind jedoch notwendig, um das System als solches verstehen zu können. Das richtige Maß der Abstraktion ist hier entscheidend. Während Ingenieure die Prozesse und Abläufe im Entwicklungsprozess gut verstanden haben und ausgezeichnet modellieren können, fehlt die Möglichkeit, eine adäquate Verknüpfung zur Makroebene herzustellen. Man versucht über mehr oder weniger triviale Kennzahlen und Korrelationen Gesetzmäßigkeiten herzuleiten. Konkrete und wahre Aussagen über die Zukunft zu machen bleibt trotzdem unmöglich. Die Identifikation signifikanter Parameter und die Beschreibung von Änderungsraten in allgemeine Gesetze – unter Berücksichtigung von Erkenntnissen nicht linearer und chaotischer Gesetze – könnte dies möglicherweise leisten.

12. Komplexität in IT-Landschaften

12.1. Einleitung

Das menschliche Leben wird zunehmend komplexer und die Anzahl der Alternativen, für die sich ein Mensch entscheiden kann, wächst zusehends. Der Bürger ist in der Lage, sein Leben weitgehend selbst zu bestimmen. Er hat politische, gesellschaftliche und ökonomische Rechte und Wahlmöglichkeiten, was keine Selbstverständlichkeit ist. Mit Blick auf die Geschichte oder auf die gegenwärtige Situation in Ländern, die durch gesellschaftliche Unruhen und diktatorische Systeme gekennzeichnet sind, wird klar, dass der Mensch auf die ihn umgebende Welt angewiesen ist und diese seinen Handlungsspielraum bestimmt. Dieser Handlungsspielraum wird durch die uns umgebenden Systeme geprägt.

In der modernen Gesellschaft wird man von vielen Systemen umgeben, die das tägliche Leben stark beeinflussen und verändern. Das Verkehrssystem mit öffentlichen Infrastrukturen verändert unsere Art und unser Verständnis von Mobilität. Das Gesundheitssystem ermöglicht uns ein Leben in noch nie dagewesener flächendeckender medizinischer Versorgung mit hochqualifizierten Medizinerinnen. Logistik- und Transportzentren versorgen uns mit Gütern und stellen die Grundversorgung mit Nahrungsmitteln und anderen Gütern des täglichen Bedarfs sicher. Infrastrukturen zur Gewährleistung der kontinuierlichen Versorgung mit Energie zählen längst zu Selbstverständlichkeiten in der modernen Welt und sind Grundlagen für Arbeit, Innovation und überhaupt für das moderne Leben. Systeme umgeben uns und beeinflussen unseren Zu- und Umgang mit der Welt.

Ein System, das dies seit Jahren mitbestimmt, ist das weltumspannende Kommunikationsnetzwerk Internet. Was als ein militärisches Projekt zur Sicherstellung der Kommunikation begann (ARPANET, engl. *Advanced Research Projects Agency Network*), wurde durch die Verschmelzung mit der Hypertext-Technologie von Tim Berners-Lee zur Grundlage moderner Kommunikation. Die Geburtsstunde des World Wide Web lässt sich wohl am ehesten auf das Jahr 1989 datieren, als am CERN die Grundlagen dafür geschaffen wurden. „[V]ague but exciting...“, ein Kommentar, der handschriftlich auf der originalen Publikation von Berners-Lee vermerkt wurde [11]. Spannend ist nicht nur die Idee des WWW selbst, sondern auch der Siegeszug, den das Internet in den darauffolgenden Jahren antrat. Mittlerweile ist das Internet nicht mehr wegzudenken. Es wurde zu der Grundlagentechnologie

nologie für viele Innovationen und Hochtechnologien des 21. Jahrhunderts. Der sekundenschnelle Datenaustausch und die weltweite Vernetzung sind die Basis moderner Kommunikation. Nicht ohne Grund wird das Internet als künstliches Nervensystem oder als *Extended Mind* bezeichnet (siehe [89, S. 180]).

Als physikalische Voraussetzung für das Internet ist eine Infrastruktur notwendig, die sowohl das Netzwerk zum Datenaustausch als auch Rechner, Verteiler und Vermittler von Daten zur Verfügung stellt. Diese Infrastruktur umfasst mittlerweile weit mehr als Datenleitungen und Datenvermittler, die sogenannten Router. Sie besteht aus einer hochgradig vernetzten digitalen Welt und umfasst eine Vielzahl verschiedener Geräte, Technologien und Akteure. Riesige Serverfarmen, lokale Computer, mobile Endgeräte und verteilte Cloudspeicher interagieren miteinander in einer Geschwindigkeit, die kaum vorstellbar und auch schwer nachzuvollziehen ist. Mit der zunehmenden Digitalisierung von Alltagsgegenständen und der Ausstattung mit winzigen Rechnern, die eine Anbindung an das Internet ermöglichen, wird die Anzahl der beteiligten Akteure noch weiter ansteigen. Das *Internet of Things* ist längst keine Fiktion mehr, sondern wird zu Realität. Die Kommunikation mit Kollegen, Freunden und Familie über den gesamten Erdball ist längst Alltag für viele und die Steuerung und die Überwachung der Wohnung bzw. des Hauses von nahezu jedem beliebigen Punkt der Erde technisch bereits realisierbar (siehe Kapitel 12.2).

Das Internet ist die Grundlage für die oben angesprochenen Infrastrukturen wie Gesundheitssysteme, Energieversorgung, Transport- und Logistikeinrichtungen, Verkehr, Arbeits- und Produktionsstätten. Sie alle verlassen sich auf die zur Verfügung gestellten Dienste und Anwendungsmöglichkeiten des World Wide Web, sie sind angewiesen auf ein „funktionierendes“ Internet. Ein Ausfall der Infrastrukturen würde schnell zu einer Katastrophe führen. Nicht funktionierende Heizungen, leere Einkaufsregale, versagende medizinische (Not-)Versorgung und stillstehender Verkehr betreffen sowohl einzelne Bürger, als auch die Gesellschaft als Ganzes.

Die Sicherstellung der korrekten Funktionsweise des Internets sowie aller damit verbundenen Systeme ist also kein Wunsch, sondern notwendige Voraussetzung für das moderne Leben. Und in demselben Maß, wie die Bürger auf die Infrastrukturen angewiesen sind, sind auch die wirtschaftlichen Unternehmen auf die Infrastrukturen angewiesen. Kommunikation, Warentransport und Mobilität spielen eine zentrale Rolle in Unternehmen. Betriebe und Firmen haben eigene lokale Netzwerke geschaffen, um den wirtschaftlichen Herausforderungen begegnen zu können. Über die Jahre sind diese Netzwerke, dem Internet gleich, angewachsen und haben eine eigene Dynamik entwickelt. Obwohl sie um Größenordnungen kleiner sind als das Internet, arbeiten sie nach dem gleichen Prinzip und stellen genauso ein komplexes Wechselwirken zwischen Hardware

und Software dar. Die Gesamtheit dieser Infrastruktur bezeichnet man als IT-Landschaft¹ (siehe Kapitel 12.3).

Die Verwaltung und die Weiterentwicklung der IT-Infrastruktur stellt große Herausforderungen an Unternehmen. Die angepasste und korrekte Entwicklung der IT-Infrastruktur ermöglicht kurz- und langfristige Wettbewerbsfähigkeit und kann ein Überleben sicherstellen. Unzureichende, falsche oder ausbleibende Entwicklung birgt die große Gefahr, dass Firmen über kurz oder lang nicht mehr konkurrenzfähig sind und ihren Betrieb einstellen müssen. Die Folge ist wirtschaftlicher Ruin mit allen damit verbundene, auch gesellschaftlichen und sozialen, Konsequenzen. Die Informatik bemüht sich daher um eine prospektive Planung, die einen adäquaten Umgang mit der IT ermöglicht. Das Verstehen, Planen, Umsetzen und Pflegen der IT sind erklärte Ziele des sogenannten Enterprise Architecture Managements EAM (siehe Kapitel 12.5).

Die Methoden der Modellierung und das Wiederverwenden von Erfolgsmethoden zählt hier zu den aktuellen Arbeitsweisen. So wie auch die Softwareentwicklung vor größeren Herausforderungen steht (siehe Kapitel 11), wird der Umgang mit komplexen Systemen auch für das IT-Management zunehmend bedeutender. Erkenntnisse der Modellierung und der Handhabung komplexer Systeme kann hier Bedeutsames leisten und die Zukunft von Unternehmen sichern.

12.2. CPS – Cyber-Physikalische Systeme

Die weltweite Vernetzung und das dadurch gegebene Kommunikationsmedium ermöglicht die Übertragung von Information innerhalb von Bruchteilen einer Sekunde rund um den Globus. Diese Information auch genutzt, um physische Geräte miteinander zu verbinden und um Kommunikation und somit Steuerung zwischen ihnen zu ermöglichen. Die Handlungen, die von solchen Geräten ausgeführt werden, umfassen sowohl einfache als auch komplexe Tätigkeiten und erfordern zunehmende Intelligenz. Zuverlässige medizinische Systeme [64], Fahrerassistenzsysteme für Automobile [126] und IT-Verkehrssteuerungs- und Verkehrslogistiksysteme [61] sind Aufgaben, die in Zukunft von Technologien bewältigt werden können und aufgrund der hohen Komplexität bewältigt werden müssen. Die Fähigkeiten moderner Systeme, die miteinander vernetzt sind und autonom handeln können, werden früher oder später eine Vielzahl an Aufgaben erledigen, die ein einzelner Mensch oder auch eine Gruppe von Menschen nicht oder nur ansatzweise vollbringen könnte. Die digitale Verknüpfung von Dienstleistungen und Infrastrukturen wird also zunehmend wichtiger. Dies gilt für die Medizin (*Smart Health*), die Energienetze (*Smart Grid*), die Mobilität (*Smart Mobility*) und die vernetzte Produktion (*Smart Factory*).

¹IT bezeichnet die Informationstechnik und ist ein Oberbegriff für Informations- und Datenverarbeitung

Es hat sich bereits der Begriff *Smart City* herausgebildet. Dabei werden die wesentlichen Bereiche des menschlichen Lebens nach und nach von sogenannten cyber-physikalischen Systemen (engl. Cyber-Physical Systems), kurz CPS, durchdrungen. Mobilität, Gesundheit, *Governance*, Gebäudemanagement, Produktion und Logistik sind Domänen, die von der Entwicklung betroffen sein werden [39].

Die kontinuierlich fortschreitende Verschmelzung der Welt mit Innovationen der Informationstechnik führt zu einem steigenden Bedarf an sowohl verlässlicher als auch leistungsfähiger Technologien. Manfred Broy beschreibt die cyber-physikalischen Systeme folgendermaßen: „Cyber-Physical Systems adressieren die enge Verbindung eingebetteter Systeme zur Überwachung und Steuerung physikalischer Vorgänge mittels Sensoren und Aktuatoren über Kommunikationseinrichtungen mit den globalen digitalen Netzen.“ [20, S. 17] Die steigende Abhängigkeit von der Netzwerktechnologie Internet steigt immer weiter an. Das Internet und somit praktisch jede Vernetzung von Akteuren, ist kein Selbstzweck. Es ist längst zu der Schlüsseltechnologie und zum *Enabler* von notwendigem technischen Fortschritt geworden. Technische und gesellschaftliche Bedürfnisse können durch Innovationen befriedigt werden, die man auf der Basis von CPS entwickelt. Die drastische Umkehrung scheint sich auch zu bewahrheiten. Die Zentralisierung, also die Bündelung der Steuerung an einer Stelle, kann keine zufriedenstellenden Lösungen liefern. Ein Ausfall der Steuerzentrale oder der Kommunikationskanäle legt das gesamte System lahm. Das System bleibt in Sachen Störanfälligkeit weit hinter den modernen Möglichkeiten zurück. Dasselbe gilt für Agilität, also die Fähigkeit, auf rasche Änderungen der Umwelt und Systembedingungen zu reagieren, Fehlertoleranz, Verarbeitungsgeschwindigkeit, usw. Das Gesamtsystem kann nur so intelligent und leistungsfähig sein, wie seine Steuereinheit, die stellt den limitierende Faktor dar, sie wird zum Flaschenhals (engl. bottleneck).

Netzausfälle sind fatal, sie führen, wenn sie längere Zeit andauern, zu Ausfällen anderer Infrastrukturen und somit zu nicht absehbaren Zuständen. Ein CPS ist auf die Interaktion und die Kommunikation zwischen einzelnen Netzwerkakteuren angewiesen. Sie haben dabei den großen Vorteil, dass sie nicht zentral reguliert und gesteuert werden. So können Teile des Netzwerks ausfallen, ohne das Gesamtsystem zu gefährden, zumal das Internet durch seine Struktur und Organisation eine größtmögliche Störanfälligkeit bietet. Fallen Teile des Netzwerks aus, erkennen die Transporteinheiten dies sofort und leiten die Datenpakete um. Über alternative Wege gelangt die Information schließlich an ihr Ziel. Die Information über diesen Ausfall wird lokal erkannt und anderen, benachbarten Systemen mitgeteilt. In Anlehnung an die biologischen Vorbilder wie Ameisen und Bienen, nimmt ein Einzelelement die Veränderung wahr und sorgt für die Verbreitung der Information. Dies erfolgt rasch und effizient. Dieses Grundprinzip wird auch bei den zukünftigen und vielversprechenden Lösungsansätzen für *Smart Grids*, *Smart Health*, *Smart Mobility* und

Smart Production eingesetzt. Die *Smart*-Lösungen bezeichnen die ganzheitliche, verteilte, adaptive und intelligente Organisation von Systemen und stellen wie CPS die Antwort auf die immer komplexer werdenden Systeme und Herausforderungen der Menschheit dar [89]. Selbstorganisation und verteilte Intelligenz werden zu Lösungsstrategien für die komplexen Probleme der Zukunft.

Die strikte Trennung von klassischen Computersystemen einerseits und der Umwelt andererseits wird durch die Einbettung von leistungsfähigen Systemen mit sensorischen und motorischen Fähigkeiten aufgelöst. Das Verhältnis von Menschen, Technik und Umwelt muss neu gedacht werden. Die damit verbundene Abhängigkeit verlangt komplexe Problemlösungskompetenzen und erfordert die Neu- bzw. Weiterentwicklung von bisherigen Methoden, Arbeitsweisen, Technologien und Prozesse.

Die ganzheitliche Organisation lenkt dabei sehr stark den Fokus auf die holistische Betrachtung des Systems. Die Einzelelemente sind für sich genommen lebensfähig und agieren ohne zentrale Steuerung. Zusammen ergeben sie jedoch mehr als nur die Summe ihrer Einzelleistungen. Sie ermöglichen die adaptive Steuerung hochkomplexer Systeme, die sich gegenüber zentralisierter Steuerung vor allem durch Ausfallsicherheit, Fehlertoleranz und Echtzeitfähigkeit abgrenzen. Die systemweite Analyse von Verhalten und Funktionsweise ist typisch für Komplexitätstheorie und in vielen Fällen die einzige Betrachtungsweise, die komplexe Phänomene erklären und komplexe Probleme lösen kann.

12.3. IT-Landschaften

Informationsverarbeitende Infrastrukturen sind zu einem zentralen Bestandteil der Gegenwart geworden. Ununterbrochen werden Daten erhoben und gemessen, die anschließend computergestützt verarbeitet werden. Die elektronische Datenverarbeitung zählt zu einem sehr frühen Einsatzgebiet von Computern. Diese haben den Vorteil, dass sie nicht nur viel schneller, sondern im Normalbetrieb auch fehlerfrei rechnen, Daten verarbeiten können. Durch die rasant steigende Datenmenge und dem damit verbundenen erhöhten Verarbeitungsaufwand sind nicht nur schnellere Rechner, sondern auch leistungsfähigere Netzwerke usw. erforderlich. Das gesamte System der an der Datenverarbeitung beteiligten Komponenten muss wirkungsvoller arbeiten können. Dies betrifft jeden Baustein des Systems für sich, aber auch die gesamte Anordnung muss überwacht und kontrolliert werden. Mittlerweile grenzt man die elektronische Datenverarbeitung (EDV) von dem weiter gefassten Begriff Informationstechnik (IT) ab. Häufig verwendet man beide Begriffe jedoch synonym.

Ein IT-System kann sehr unterschiedliche Erscheinungen haben. Eine Definition, die wesentliche Eigenschaften betont, stammt von Gernot Dern und lautet: „Ein IT-System ist ein maschineller Aufgabenträger, der sich aus einer Menge von Softwarebausteinen

konstituiert. Die Softwarebausteine verarbeiten Information zum Zwecke der Kommunikation oder zur Bereitstellung fachlicher Funktionalität (...). Die Softwarebausteine operieren innerhalb einer Laufzeitumgebung, die durch Hardwaresysteme unter Nutzung von Systemsoftware bereitgestellt wird.“ [29, S. 27]. Das IT-System übernimmt Aufgaben und ist zunächst nur ein Softwarekonstrukt. Die Hardware stellt die Umgebung bereit, auf der diese Software operiert und ihre Funktionen ausführt. Im Wesentlichen erfüllt ein IT-System die Aufgabe, die prinzipiell auch ein Mensch erledigen könnte. Dieser hat jedoch nicht die erforderliche Geschwindigkeit und auch nicht die Effizienz eines elektronisch arbeitenden Rechners. Aus der Sichtweise eines Unternehmens verschmelzen die Tätigkeiten des Menschen und der Maschine immer weiter. Sowohl Menschen als auch IT-Systeme erledigen Aufgaben, autonom oder mit Unterstützung des jeweils anderen. Die Zuständigkeiten lassen sich gut voneinander abgrenzen, man ist deshalb geneigt Flussdiagramme wie bei UML (siehe Kapitel 11.2) zu entwerfen um die Prozesse eindeutig zu beschreiben. Hier entsteht erneut eine sehr mechanistische Sichtweise, die den Eindruck vollständiger Planbarkeit und Berechenbarkeit erweckt. Umfangreiche Prozesse, die eine Zusammenarbeit von Maschinen und Menschen umfassen, können jedoch sehr schnell komplex werden, ohne dass dies in der Planungsphase absehbar ist.

Nun ist es in der Praxis so, dass nicht nur einige wenige Aufgabe abzuarbeiten sind, sondern es handelt sich meistens um eine Vielzahl von verschiedenen Aufgaben, die innerhalb eines Unternehmens übernommen und bearbeitet werden müssen. Dies macht den Einsatz mehrerer IT-Systeme meistens unumgänglich. Man subsumiert diese Systeme dann nicht zu einem großen IT-System, sondern spricht von der IT-Landschaft eines Unternehmens. Gernot Dern definiert IT-Landschaften wie folgt: „Die IT-Landschaft eines Unternehmens ist die Gesamtheit aller IT-Systeme, die als maschinelle Aufgabenträger (...) die Verarbeitung von Information übernehmen, um den Informationsbedarf der menschlichen Aufgabenträger des Unternehmens zu befriedigen.“ [29, S. 30] Bemerkenswert ist hier vor allem die Zusammenfassung als „Ganzheit aller IT-Systeme“. Hier ist man bereits auf der begrifflichen Ebene an einem Punkt, in der die „Summe“ nicht mehr angebracht erscheint. Als sei man sich bereits bewusst, dass die IT-Landschaft mehr als die Summe der IT-Systeme sein könnte.

Die IT-Landschaft umfasst ein großes Spektrum an physischen Gegenständen, elektronischen Datenströme und immateriellen Konzepten. Zu den wesentlichen Bestandteilen der IT-Landschaft zählen nach Dern [29]:

- Die Informationsverarbeitung, die in den IT-Systemen stattfindet.
- Die Informationsflüsse zwischen den IT-Systemen einer IT-Landschaft.
- Die Informationsflüsse zwischen einer IT-Landschaft und ihrer Umgebung (in der

Regel andere IT-Systeme, IT-Landschaften). Also sowohl In- als auch Output.

- Basistechnologien und -systeme, die eine grundlegende Infrastruktur darstellen.

Die Informationsverarbeitung wird in der Regel durch ein Programm oder eine Anwendung repräsentiert, die über eine herkömmliche Netzwerkverbindung Daten von anderen Systemen empfängt oder sendet. Die Programme können auf verschiedene Geräten ausgeführt werden. Hochleistungsrechner, normale Arbeitsstationen oder mobile Endgeräte zählen dabei zu den gängigsten Gegenständen in der IT. Insgesamt umfasst die IT-Landschaft alle denkbaren Gegenstände, die im Rahmen der Informationsverarbeitung entwickelt wurden. Server, Desktop-PCs, Notebooks, Smartphones, Tablets, Drucker, Scanner, Faxgeräte, (Netzwerk-)Speichermedien, Softwareprogramme, Datenbanken, verteilte Cloud-Anwendungen, E-Mail und andere (Nachrichten-)Dienste und weitere Geräte, die an der Vernetzung teilhaben können, usw. Die Anzahl an möglichen Geräten ist zahlreich und diese Vielzahl an unterschiedlichen Technologien führt zu Systemen, die nur noch schwer handhabbar sind. Die Zusammenarbeit wird durch die Definition von Schnittstellen sichergestellt. An diese Schnittstellenvereinbarungen müssen sich die Geräte halten, weil sich das restliche System darauf verlässt. Andernfalls wird eine Kommunikation und eine ordnungsgemäße Zusammenarbeit unmöglich. Nur wenn sich die Geräte eines Netzwerks an die Netzwerkprotokolle, wie beispielsweise TCP und IP², halten, können sie miteinander kommunizieren und Daten austauschen. Nicht nur die vielen unterschiedlichen Geräte, sondern auch die hohe Anzahl unterschiedlicher Protokolle zum Informationsaustausch bzw. -verarbeitung, die innerhalb einer IT-Landschaft vorkommen, sorgen dafür, dass die Zusammenhänge, Abhängigkeiten und Interaktionen nicht leicht erfasst werden können.

Insgesamt ist der Begriff der IT-Landschaft als die Gesamtheit aller IT-Systeme sehr breit gefasst und beschreibt einen wichtigen Bereich von Unternehmen, der nicht mehr wegzudenken ist. IT-Landschaften von Unternehmen sind zum Teil über viele Jahre entstanden. Sie sind in der Regel auch nicht statisch. Das bedeutet, dass sie üblicherweise initial geplant sind. Aber nicht alle Funktionen und Anforderungen, insbesondere die zukünftigen, können von Anfang an festgelegt werden. Sie werden zu sorgfältig entwickelt und dann immer weiter ausgebaut und erweitert. Neue Anforderungen und Aufgaben erfordern neue IT-Systeme und weitere Komponenten in ohnehin schon großen IT-Landschaften. Normalerweise können solche Systeme auch nur weiterwachsen und kaum kleiner werden. In den seltensten Fällen kann man auf bereits etablierte und verwendete Funktionen verzichten. Die Umverteilung von Aufgaben zieht meistens eine große Umstrukturierung nach sich und ist nicht leicht zu bewerkstelligen, zumal ein Ausfall der Infrastruktur im-

²Das Transmission Control Protocol (TCP) und das Internet Protocol (IP) stellen elementare Protokolle zum Transport und Zustellung von Daten über Netzwerke dar.

mer problematisch ist. Die Vorstellung, ein Unternehmen müsse einen Tag auf beispielsweise E-Mail oder Telefonverkehr verzichten, verdeutlicht die Ausmaße.

Erschwerend kommt hinzu, dass die Entwicklungen einer IT-Landschaft unsystematisch und praktisch ohne Koordinierung erfolgt [30]. Die über Jahre immer umfangreicher gewordenen IT-Landschaften in Unternehmen, öffentlichen Institutionen und Behörden wurden ohne einen langfristigen Plan immer weiterentwickelt. Die Ausrichtung an Zielen und die Orientierung an Methoden ist jedoch notwendig, um langfristig konkurrenzfähig zu bleiben, am Markt überleben zu können und notwendige Infrastrukturen und Dienstleistungen zur Verfügung stellen zu können. IT-Abteilungen in Unternehmen beschäftigen sogenannte IT-Architekten, die sich um die prospektive Planung und Erstellung neuer Vorgaben und Systeme kümmern. Diese Vorgaben werden auf Basis bewährter Methoden, wie beispielsweise den Referenzarchitekturen oder *Best Practices* (siehe Kapitel 12.5.1), erstellt und sollen die Probleme vermeiden, die durch unkontrolliertes Wachstum entstehen. Eine IT-Architektur ist die Abstraktion von bestehenden und geplanten IT-Systeme, die eine umfassende Analyse und Diskussion auch auf Systemebene ermöglicht. Obwohl der Begriff des Architekten sehr stark an den eines Ingenieurs und Modellbauers im herkömmlichen Sinn erinnert, ist die Rolle des IT-Architekten von modernen Aspekten komplexer Systeme geprägt. Man hat verstanden, dass das komplexe System „IT-Landschaft“ nicht mit reduktionistischen und mechanistischen Methoden der Erstellung und der Planung adäquat zu verwalten ist. Bereits bei der Betrachtung der IT-Architektur wird schon zwischen statischen und dynamischen Sichten unterschieden [30, S. 19]:

- **Statische Sicht:** Hier werden die Elemente der IT-Systeme betrachtet. Im Zentrum der Sicht stehen die Komponenten und Bestandteile der Informationssysteme sowie deren Verknüpfungen und Abhängigkeiten.
- **Dynamische Sicht:** Diese Betrachtungsweise nimmt den Prozess der Analyse und der Änderung von IT-Systemen in den Mittelpunkt. Erforderliche Aktivitäten und Artefakte des Softwareentwicklungsprozesses werden hier festgelegt, die Vorgehensweise der Beschreibung, Implementierung und Freigabe bestimmt.

Obwohl beide Sichtweisen selbstverständlich berechtigt sind, unterscheiden sich die Arbeitsweisen von denen anderer Disziplinen, beispielsweise der Neurologie (siehe Kapitel 6). Die Informatik versucht hier, Anleitungen für die bestmögliche Änderung bestehender Prozesse und Integration neuer Systeme in die bestehende Landschaft zu geben. Die dynamische Sicht versucht die Arbeitsschritte festzuhalten, die notwendig sind, um einen reibungslosen und verlustfreien Übergang in einen neuen Zustand zu gewährleisten. Welche Vorarbeiten müssen erledigt, welche Bedingungen erfüllt sein? Diese Fragen stehen hier im Zentrum. In Anlehnung an biologische Systeme könnte man sagen, dass man ver-

sucht die Evolution von IT-Systemen, -Landschaften und -Architekturen zu bestimmen und zu steuern. Die Dynamik des Systems, also die systemweite Interaktion der Elemente zu beschreiben, wie es ein Biologe oder Neurowissenschaftler versteht, steht hier nicht im Vordergrund.

Die Dynamik der Anwendungen wird bei Dern nicht explizit erwähnt und höchstens im statischen Teil hineingedacht. Eine Berücksichtigung in der Planung des IT-Systems kann somit nicht aktiv stattfinden. Die für komplexe Systeme typischen Effekte wie Nichtlinearität, Sensitivität gegenüber Anfangsbedingungen („Schmetterlings-Effekt“) und seltsame Attraktoren spielen in dieser Planungsphase praktisch keine Rolle. Deshalb orientiert man sich in ganz pragmatischer Art und Weise an Erfolgsmethoden aus anderen Projekten. Der Grundannahme, die hier unterschwellig anklingt, lautet: Was bei anderen, ähnlichen Projekten funktioniert hat, wird auch dieses mal funktionieren! Diese Denkweise ist nicht ungefährlich. Sie berücksichtigt die erwähnten Phänomene nur bedingt und geht nur soweit darauf ein, wie es das ausgewählte Modell erlaubt.

Insgesamt wird versucht, die Zuständigkeiten sowie die Vorgehensweisen soweit als möglich festzulegen. Man unterscheidet diverse Sichtweisen auf die Architekturen, definiert unterschiedliche IT-Architekturebenen, die aufeinander aufbauen und weitgehend voneinander entkoppelt sind, verknüpft Anforderungen an Systeme mit zahlreichen Benutzerrollen, erarbeitet systemweit geltende Architekturprinzipien (sog. Leitplanken), die die Entwicklung in eine Richtung lenken sollen und formuliert Strategien die auch Leitlinien für die Entwicklung darstellen. Allesamt Maßnahmen, durch die man sich einen kontrollierten Umgang mit IT-Landschaften erhofft [30, 29]. Die ganzen Schritte zielen ganz darauf ab, das Unternehmen und seine Leistungen für die Zukunft zu rüsten: „Die Unternehmens-IT wird als komplexes, offenes, dynamisches Teilsystem des Unternehmens verstanden, das (...) einen essenziellen Beitrag zur Sicherstellung der Lebensfähigkeit des Unternehmens leistet.“ [30, S. 74]

Die Sicherstellung des Unternehmens garantiert gleichzeitig die Sicherstellung der von ihm erbrachten Dienstleistung. Dabei handelt es sich um Leistungen, die angesichts ihrer Dringlichkeit nicht zu vernachlässigen sind. Energieversorgung, Gesundheits- und Krankensystem, Kommunikationsnetze, Infrastruktur für Logistik und Transport, uvm. sind auf Informationsverarbeitung und somit auf IT angewiesen. IT als Schlüsseltechnologie steht jedoch vor großen Herausforderungen, die es zu bewältigen gilt. Dabei geht es nicht nur darum, ein profitables Unternehmen in die Zukunft zu führen, sondern auch um die Anforderungen der Zukunft zu meistern. Die Konfrontation mit komplexen Systemen ist hier unausweichlich. Diese verfügen einerseits über größtmögliches Potential die Probleme und Schwierigkeiten zu lösen, bedürfen jedoch andererseits ein Umdenken in Bereichen der Planung, Steuerung und Entwicklung des jeweiligen Systems. Erste Schritte sind bereits gemacht: holistische Modellierung des Systems mit SysML (siehe Kapitel 12.4)

und EAM, eine Disziplin, die sich mit umfassendem Management von IT-Architekturen beschäftigt (siehe Kapitel 12.5), sind definitiv die Schritte in die richtige Richtung.

12.3.1. IT-Landschaft: ein komplexes oder ein kompliziertes System?

Die Auseinandersetzung mit der Komplexität von umfangreichen Systemen ist angesichts deren Allgegenwart notwendig. Möchte man sich bestmöglich für zukünftige Herausforderung rüsten, ist ein umfassenderes Verständnis von Komplexität unausweichlich. Vielfach wird Komplexität zu einer Metapher und zu einem Modewort, das in sehr vielen Bereichen mit unterschiedlicher Bedeutung verwendet wird. Komplexität wird als Synonym für Kompliziertheit verwendet. Man klassifiziert komplizierte Systeme als komplex, ohne dass wesentliche Eigenschaften für Komplexität erfüllt sind. Nicht-Linearität und hohe Konnektivität von unterschiedlichen Akteuren sind beispielsweise zwei notwendige Eigenschaften für das Zustandekommen von komplexen Phänomenen. Vielfach versteht man die Zufälligkeit bzw. die fehlende Determiniertheit von Ereignissen schon als hinreichendes Kriterium für Komplexität. Dies ist jedoch nicht der Fall. Während der Wurf einer Münze oder das Werfen eines Würfels ein *zufälliges* Ergebnis liefert, besteht kein komplexer Prozess. Das Doppelpendel hingegen, das durch zwei Differentialgleichungen eindeutig beschrieben werden kann, entzieht sich längerfristigen Vorhersage durch das Fehlen einer analytischen Lösung. Es ist vollständig determiniert und es besteht kein zufälliges Moment. Das exakte Verhalten kann jedoch nicht prognostiziert werden. Das Doppelpendel ist als Experiment sehr einfach und da es nur zwei verbundene Pendel und eine Aufhängung gibt, gilt es als nicht kompliziert, obwohl es komplex ist.

Komplexität und Kompliziertheit sind keine rivalisierenden Eigenschaften eines Systems. Ein System ist nicht entweder komplex oder kompliziert. Beide Eigenschaften beziehen sich auf einen anderen Aspekt des Systems (siehe Abschnitt 1.3). Obwohl natürlich große Systeme, wie es bei modernen IT-Landschaften meist der Fall ist, dazu neigen, sowohl kompliziert als auch komplex zu sein, sind diese Zuschreibungen nicht logisch ineinander überführbar.

Komplizierte Systeme, die nicht komplex sind, zeichnen sich dadurch aus, dass man mit herkömmlichen Methoden der Modellierung und durch Identifikation von monokausalen Zusammenhängen einen tiefen Einblick in das Wesen des Systems bekommt. Komplexe Systeme lassen sich jedoch nicht durch monokausale Zusammenhänge, lineare Interaktion und einer noch so detaillierten Beschreibung von Einzelelementen adäquat erfassen. Es müssen die Ergebnisse und Erkenntnisse der Komplexitätsforschung berücksichtigt werden: Die Struktur und die Dynamik eines Systems sind von großer Bedeutung!

Dern schlägt als Maß für die „Komplexität der Gesamtheit der IT-Systeme“ ein Maß (KGI) vor, das alle Informationsflüsse (ein- und ausgehend) von den IT-Systemen addiert

und mit der Anzahl ähnlicher Informationssysteme (sog. Anwendungstypen) multipliziert [29, S. 185]. Dies stellt wiederum nur einen Teilaspekt der Komplexität dar. Wie auch zahlreiche Metriken des Software Engineerings (siehe Kapitel 11.3), werden nur strukturelle Eigenschaften berücksichtigt. Es ist als würde man in einem Graphen, dessen Knoten IT-Systeme und Kanten Informationsflüsse darstellen, die Anzahl aller Kanten zählen und mit der Anzahl von Clustern des Graphen, der Klassifizierung in Anwendungstypen, multiplizieren. Doch über die Art und Weise des Informationsflusses wird nichts ausgesagt. Diesbezüglich leistet das Komplexitätsmaß wenig. Als Gedankenexperiment wäre folgende Situation vorstellbar: Man hätte sehr viele, sehr einfache informationsverarbeitende Systeme, die nur einen Eingang und einen Ausgang haben, der entweder null oder eins liefert. Analysiert man im Gegensatz dazu ein System, das aus weniger Elementen besteht, dafür stärker miteinander vernetzt ist, so könnte das erste System, im Sinne dieser Metrik, dennoch komplexer sein als das letztere System. Die Vernetzungen selbst sind möglicherweise sogar noch anders geartet als bloße Zeichen eines Binärsystems, doch das findet keine Berücksichtigung.

Abbildung 12.1 zeigt zwei mögliche IT-Systeme, die jeweils eine unterschiedliche Komplexität nach Dern aufweisen. Während (a) verhältnismäßig linear aufgebaut ist, sind die Abhängigkeiten in System (b) schon vielschichtiger und netzartiger. Unter der Annahme, dass beide die gleiche Anzahl an Anwendungstypen haben, besitzt (a) eine KGI von 16 und (b) eine KGI von 15. Diese Werte sagen absolut betrachtet noch nichts aus und aus dem Vergleich mit anderen Systemen, beispielsweise in Abbildung 12.1 zwischen (a) und (b), kann auch nicht viel gewonnen werden. Das Komplexitätsmaß KGI trifft keine Aussagen über die Linearität von Beziehungen oder sonstigen Eigenschaften (zeitliche Verzögerung, Zustandsabhängigkeit, ...). Die Metrik verbleibt somit auf der Ebene der statischen Graphanalyse.

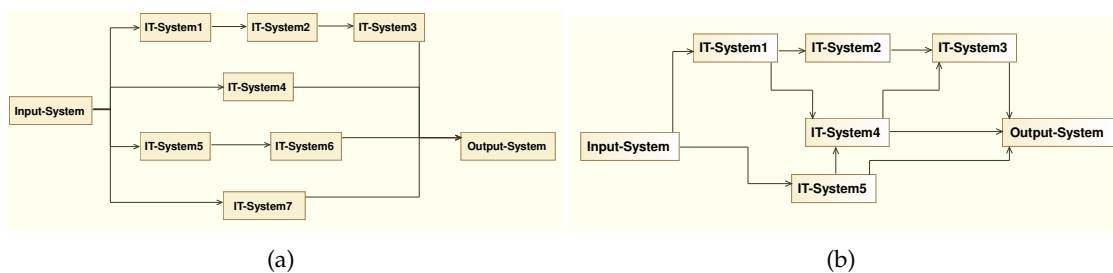


Abbildung 12.1.: Zwei mögliche IT-Systeme unterschiedlicher Komplexität.

Obwohl man sich der Komplexität bewusst ist und sich auch im Klaren darüber ist, dass diese wesentlich durch die Interaktionen von Systemen geprägt wird, berücksichtigt man dies kaum in der Definition von Komplexitätsmetriken. Statische Metriken, die aus der Analyse von Graphen gewonnen werden können, sind viel beliebter, obwohl ihre Aussa-

gekraft deutlich geringer ist und Komplexität im Allgemeinen nicht bzw. nur ansatzweise erfasst.

Dynamische Metriken zur Berücksichtigung der Interaktionen und vor allem den Änderungsraten des Nachrichtenaustauschs wären hier hilfreich. Nicht statt der statischen Analyse sondern ergänzend zu ihr. Sowohl die Struktur als auch die Dynamik sind bei komplexen Systemen entscheidend. Dies gilt in der Biologie, der Ökonomie, im Gehirn und auch in komplexen Systemen der Soziologie. Somit also auch erst recht bei komplexen Phänomenen in der Informatik, wo der Fluss von Information, Artefakten, Dokumenten und anderen Daten zentraler Gegenstand der Wissenschaft ist.

12.4. SysML – System Modelling Language

Um mit Systemen umgehen zu können, ist eine Modellierung unumgänglich. Ungeachtet der Probleme und der Herausforderungen, die ein Modell immer mit sich bringt, bleibt es immer nur ein Ausschnitt der Wirklichkeit. Man versucht, im Systems Engineering Systeme in ihrer Ganzheit zu erfassen und zu modellieren. Eine gängige Definition für Systems Engineering lautet: „Das Systems Engineering konzentriert sich auf die Definition und Dokumentation der Systemanforderungen in der frühen Entwicklungsphase, die Erarbeitung eines Systemdesigns und die Überprüfung des Systems auf Einhaltung der gestellten Anforderungen (...)“ [129, S. 11]. Der Fokus liegt also im Bereich der Modellierung von Systemen und begrenzt sich im Gegensatz zum Softwareengineering nicht auf die Modellierung von Softwareanwendungen. Zu den Hauptaufgaben des Systems Engineering zählt Projektmanagement, Anforderungsanalyse, Anforderungsmanagement, Systemdesign, Systemverifikation, Systemvalidierung, Systemintegration, Anforderungsdefinition und Risikomanagement [129].

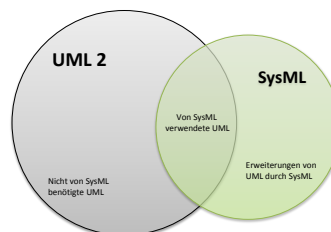


Abbildung 12.2.: Zusammenhang zwischen UML und SysML [44]

Zentraler Gegenstand des Systems Engineering ist die Modellierung von Systemen, wozu eine Modellierungssprache notwendig ist. Während sich im Bereich der Softwaretechnik UML (siehe Kapitel 11.2) durchgesetzt hat, hat man vieles von UML aufgegriffen und

zur Systems Modeling Language (SysML) weiterentwickelt. UML zeichnet sich vor allem durch stärkere Softwarezentriertheit als SysML aus. Sie wird seit dem Jahr 2001 durch das *International Council on Systems Engineering* (INCOSE) und der *Object Management Group* (OMG) ständig weiterentwickelt und steht unter einem praxisorientierten Einfluss aus der Wirtschaft. Abbildung 12.2 zeigt den Zusammenhang der beiden Sprachen UML und SysML. Während sich große Teile der SysML bereits in UML finden, wurde SysML um viele Bestandteile erweitert.

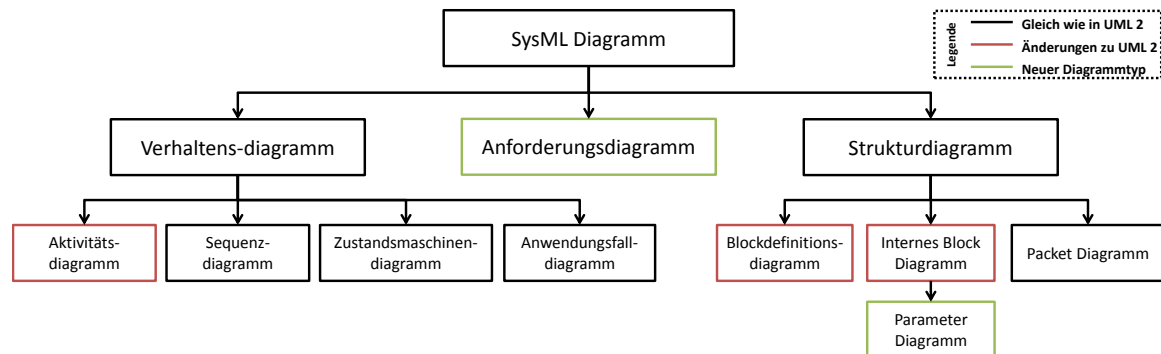


Abbildung 12.3.: Taxonomie der Struktur- und Verhaltensdiagramme in SysML-Version 1.3 [44]

Der Dreh- und Angelpunkt für die Modellierung sind wiederum die Diagramme, auf die man bereits in UML sehr stark setzt. Im Wesentlichen ist die Aufteilung der Diagramme wieder in Strukturdiagramme einerseits und Verhaltensdiagramme andererseits gegliedert. Abbildung 12.3 zeigt alle in SysML verfügbaren Diagramme. Die Diagramme, die sich von UML abgrenzen, weil sie entweder neu hinzugekommen oder geändert wurden, sind hervorgehoben. Zur Modellierung können dann jeweils verschiedene Objekte verwendet werden [44]. Objekte, die zur Modellierung der Struktur eingesetzt werden, sind:

- **Modellelemente (Model Elements):** Ein Grundbaustein in Modellen und Diagrammen. Kommentarfelder, Abhängigkeitspfeile, usw. Praktisch alles, was nicht spezifisch für ein Diagramm ist.
- **Block (Blocks):** Blöcke sind die modularen Einheiten in Diagrammen und Modellen. Diese werden mit Abhängigkeiten und Verbindungen in eine Beziehung gesetzt und ergeben somit das Grundgerüst für Modelle.
- **Tore und Flüsse (Ports and Flows):** Diese spezifizieren die Ein- und Ausgänge aus Blöcken. Kommunikation kann nur über sie stattfinden.
- **Bedingungsblock (Constraint Block):** Bedingungen können mathematisch logisch formuliert werden und erlauben umfangreiche Gleichungen, die die Zuverlässigkeit und die Effizienz überwachen.

Ergänzend existieren die Objekte, die bei der Modellierung des Verhaltens genutzt werden:

- **Aktivitäten (Activities):** Aktivitäten stellen den Grundbaustein für die Modellierung von Verhalten in Systemen dar. Sie beschreiben den Fluss von Daten und Informationen zwischen Blöcken.
- **Interaktionen (Interactions):** Interaktionen sind auf Nachrichten basierte Aktivitäten, die vor allem in Sequenzdiagrammen dargestellt sind (siehe dazu auch Abbildung 11.3 (b) in UML).
- **Zustandsmaschinen (State Machines):** Beschreiben gültige Systemzustände und den Übergang zwischen diesen. Zustandsbasiertes Verhalten kann so dargestellt werden.
- **Anwendungsfälle (Use Cases):** Stellen die möglichen Interaktionen mit einem System auf sehr abstraktem Level dar. Es geht um die Beschreibung, welche Interaktion mit dem System möglich ist, ohne darstellen zu müssen, wie diese im Detail aussieht.

Zu einer dritten Klassen von Objekten zählen jene, die sowohl zur Beschreibung der Struktur als auch zur Beschreibung des Verhaltens verwendet werden können:

- **Zuordnung (Allocations):** Hier werden Systemelemente einander zugeordnet. Es bietet eine Möglichkeit, Abhängigkeiten und Beziehungen auf einer abstrakten, systemweiten Modellierung darzustellen.
- **Anforderungen (Requirements):** Sie stellen Anforderungen an das System dar, die erfüllt werden müssen. Diese können entweder funktional oder nicht-funktional, beispielsweise Anforderungen an die Performanz, sein.
- **Profil- & Modellbibliotheken (Profiles & Model Libraries):** Zusätzliche Bibliotheken und Bausteine für spezielle Bereiche wie Automobilindustrie oder Militär können separat hinzugefügt werden. Innerhalb einer Domäne schafft man somit eine konsistente Modellierung und bleibt dennoch flexibel für Anforderungen.

Es zeigt sich, dass SysML starke Einflüsse von UML besitzt. SysML ermöglicht jedoch allgemeinere und weniger softwarelastige Modellierung und ist zugleich weniger auf Objektorientierung ausgerichtet, wie dies bei UML der Fall ist. Der Systems-Engineering-Prozess kann nach dem sogenannten SIMILAR-Prozessmodell ablaufen (siehe Abbildung 12.4 und [5, 129]). Der Modellierungsprozess bei Systems Engineering ist bereits fortgeschritten, da er sich von frühen Modellierungsprozessen dahingehend abgrenzt, dass eine wiederkehrende Evaluierung erfolgt. Er stellt einen schrittweisen Ablauf dar, der immer wieder von vorne beginnen kann bzw. beginnt. Es ist ein sogenannter iterativer Prozess. Es ergibt sich folgendes Schaubild:

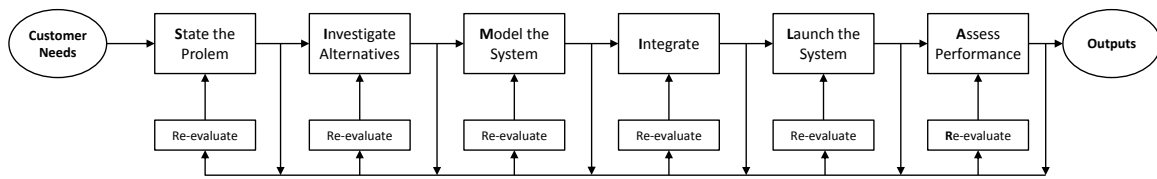


Abbildung 12.4.: Der SIMILAR Prozess nach Bahill und Gissing [5]

Die Abbildung 12.4 verdeutlicht, dass nach einer Evaluierung erneut Probleme aufzeigt und formuliert werden. Er stellt somit scheinbar einen zyklischen Verlauf dar, ist jedoch immer linear. Die Schritte laufen nacheinander ab, haben klar definierte Grenzen und der Kreislauf wird immer wieder angestoßen. Iterative Vorgehensmodelle sind auch in der Softwaretechnik bekannt. Diese unterscheiden sich natürlich grundsätzlich von jenen Modellen, die nur ein einziges Mal durchlaufen werden, wie beispielsweise das Wasserfallmodell. Man erhofft sich durch das permanente Wiederholen eine Optimierung in jedem Schritt. Die Maßnahmen prospektiv zu bewerten, bleibt immer mit einer Unsicherheit behaftet. Ob sich tatsächlich eine Verbesserung eingestellt hat oder nicht, zeigt sich erst im Nachhinein.

SysML und Komplexität

Ist SysML nun zur Modellierung von Komplexität und komplexer Systeme geeignet? SysML ist geeignet, um sehr umfangreiche Systeme detailgetreu abzubilden. Diese können unterschiedlich geartet sein, ob es sich um ein Flugzeug, einen Flughafen oder um weltweiten Flugverkehr handelt. Es ist eine Sprache, die komplizierte Systeme sehr gut erfassen und abbilden kann. Dies ist jedoch nicht ausreichend um auch die Komplexität von Systemen zu beschreiben. Die Komplexität, die neben einer adäquaten Beschreibung der Struktur auch die der Dynamik erfordert, kann von SysML, wie auch bei UML, nur bedingt dargestellt werden.

In UML hat man Probleme, die Dynamik eines Systems ausreichend genau darzustellen. In gleicherweise sind die Probleme auch in SysML vorhanden. Während in UML noch sieben Diagramme zur Beschreibung des Verhaltens vorhanden sind (siehe Abbildung 11.1), sind in SysML nur noch 4 Diagramme vorhanden. Diese bloße Reduzierung ist aber noch nicht weiter problematisch. Viel problematischer wird es jedoch, wenn man diesen Trend genauer analysiert. Einerseits versucht man, die Modellierung einfacher zu machen, indem man weniger Diagramme zur Verfügung stellt, andererseits nimmt man sich Möglichkeiten, das zeitliche Verhalten eines Systems zu spezifizieren. Der Trend zu einem immer größer werdenden Fokus der strukturellen Beschreibung des Systems ist offensichtlich. Bei der Modellierung von Softwareprogrammen hat man umfangreiche Möglichkeiten, zeitliche Ab- und Verläufe zu beschreiben. Bei der Modellierung von ganzen Systemen

hingegen nicht mehr. Um die Komplexität eines Systems jedoch beschreiben zu können, können diese Verläufe nicht ignoriert werden. Ganz im Gegenteil, sie müssen noch viel stärker berücksichtigt werden und im Modellierungsprozess noch viel stärker ausgeprägt sein.

Das System wird, ganz wie bei UML, in Einzelteile zerlegt, die dann als Summe wieder das Ganze ergeben. SysML sollte hingegen versuchen, das System in seiner Ganzheit von Anfang an zu erfassen und weniger dazu neigen reduktionistischen Methoden anzuwenden. Holistische Sichtweisen anstelle von adaptierten Diagrammtypen, Phänomene der Makroebene zu untersuchen anstatt das System immer noch detaillierter und umfangreicher darzustellen und eine angebrachte Kombination der Untersuchung von Struktur und Dynamik des Systems, könnten sich hier als hilfreich erweisen.

12.5. EAM – Enterprise Architecture Management

Unternehmen sind auf wirtschaftlichen Erfolg angewiesen. Ein erfolgreiches Unternehmen garantiert sich mit Umsatz und Gewinn ein langfristiges Bestehen und ist in der Lage, diesen wirtschaftlichen Erfolg an die Arbeitnehmer weiterzugeben. Bestehende Arbeitsplätze werden gesichert, neue Arbeitsplätze geschaffen und die Grundlagen für innovative Produkte und Dienstleistungen gelegt. Unternehmen stehen vor der Aufgabe, die Herausforderungen eines immer schneller agierenden Marktes und der immer weiter voranschreitenden Globalisierung anzunehmen und diese zu bewältigen. Wettbewerbsfähigkeit ist für moderne Unternehmen eine Eigenschaft, die es zu entwickeln und zu bewahren gilt. Dies ist kein statischer Zustand nach dem Motto: Wer einmal wettbewerbsfähig ist, bleibt dies auch. Es ist vielmehr ein permanentes Weiterarbeiten und ein kontinuierliches „Sich-Entwickeln“.

Innovationen spielen eine große Rolle in Unternehmen, sie sichern Fortschritt und erlauben es, neue Produkte und Dienste anzubieten und sich somit von der Konkurrenz abzuheben. Doch ist von Innovation nicht nur die Neuartigkeit von Produkten betroffen, sondern auch bestehende Produkte können effizienter hergestellt werden, wenn man den Produktionsablauf überarbeitet. Das Überarbeiten bestehender Prozesse und der Neuentwurf von Produkten ist in der heutigen Zeit ohne Computerunterstützung kaum mehr vorstellbar. Software erlaubt die Modellierung von Prozessen und Abläufen, die Visualisierung von Abhängigkeiten und Voraussetzungen, die Simulation von Arbeitsschritten und die Überwachung bzw. das Monitoring von Produktionsfortschritte. Für die Unternehmen spielt deshalb die IT, also die rechnergestützte Informationsverarbeitung, eine große Rolle. Die Kommunikation von Daten und Nachrichten in Bruchteilen einer Sekunde, der Zugriff auf Internetdienste, die Abfrage von Informationen aus Datenbanken usw. sind wesentliche Schritte bei der Steuerung und Überarbeitung von bestehenden Prozes-

sen. Die produktiven Abläufe stellen das Kernstück der Unternehmen dar. Sie sind die Grundlage für den überlebenswichtigen Erfolg von Unternehmen. Umso entscheidender ist es, dass IT das Unternehmen in seinem Vorhaben bestmöglich unterstützt und somit einen Beitrag zur Wertschöpfung und -sicherung liefert.

Das Sicherstellen der Unterstützung des Unternehmens durch die IT ist keine triviale Angelegenheit. Die IT-Landschaft eines Unternehmens muss permanent auf dem Laufenden gehalten werden. Nur so kann das Risiko für einen Ausfall minimiert werden. Der Ausfall von Dienstleistungen der IT eines modernen Unternehmens ist ein Horrorszenario mit weitreichenden wirtschaftlichen Folgen. Man kann sich leicht vorstellen, was passiert, wenn ein international agierendes Unternehmen plötzlich nicht mehr in der Lage ist, intern oder mit Kunden per Mail oder Telefon zu kommunizieren oder wenn Datenbanken, die wichtige Geschäftsdaten beinhalten, nicht verfügbar sind. Produktionslinien oder Betriebe bleiben stehen oder geraten in kritische Zustände, weil Netzwerkdienste nicht mehr erreichbar sind. Dies sind mögliche Szenarien, die eintreten könnten, wenn Informationsinfrastrukturen ausfallen oder zusammenbrechen. Doch die IT-Landschaften sind in Unternehmen mittlerweile große Systeme mit zahlreichen Anwendungen, Diensten und Gegenständen, die jeweils für sich wiederum ein Subsystem mit Komponenten und Abhängigkeiten darstellen.

IT muss bestehende Prozesse unterstützen und robust genug sein, um das Ausfallrisiko minimal bzw. auf ein tolerierbares Maß zu halten. IT muss aber auch flexibel genug sein, um neue Prozesse zuzulassen und Innovationen zu ermöglichen. Beide Anforderungen, die Robustheit und Fehleranfälligkeit einerseits und die Agilität und Offenheit andererseits, erfüllen zu können, sind nicht notwendigerweise gleichzeitig erfüllbar. Sichert man sein Unternehmen durch Firewalls ab und verbietet jegliche Kommunikation, die nicht explizit erlaubt ist, so können neuen Systeme oft erst mit deutlicher Verzögerung eingeführt werden oder sind in der Funktionsweise eingeschränkt.

Mit den Herausforderungen der IT-Landschaften in Unternehmen und deren adäquater Integration in die Unternehmensstruktur und -kultur beschäftigt sich das sogenannte *Enterprise Architecture Management*, kurz EAM. EAM ist Bestandteil eines Steuerungskonzepts, das aufgrund der zahlreichen Herausforderungen und komplizierten Anforderungen an die Unternehmens IT-Landschaft notwendig ist. EAM als Steuerungskonzept muss schrittweise in einem Unternehmen integriert werden. Es geht darum, Prozesse und Methoden zu installieren, die eine prospektive Optimierung der bestehenden IT-Landschaft ermöglichen, bestehende Prozesse robuster und effizienter machen und neue Prozesse effektiv, effizient und zeitnah zu erstellen.

Die IT-Abteilungen in Unternehmen kämpfen nicht selten um ihre Daseinsberechtigung. In vielen Firmen wird der Nutzen und die Wertschöpfung von der IT leicht übersehen. Nicht zuletzt deswegen, weil man das Ergebnis nur sehr schwer quantifizieren kann. Be-

sonders jene Unternehmen, bei denen das Kerngeschäft, also das eigentliche Geschäftsfeld, nichts oder nur sehr wenig mit IT zu tun hat, schätzen den Wert gut funktionierender IT oft zu gering. Man neigt daher dazu, das Budget tief anzusetzen bzw. dieses zu kürzen. EAM ist daher auch bemüht, bereits die Aufwände und den Nutzen von IT frühzeitig darzustellen und somit sichtbar für die Entscheidungsträger zu machen. Dazu müssen bestehende Daten zeitnah bereitgestellt und Kosten angemessen abgeschätzt werden [48, S. 26].

Die Arbeitsweise von EAM lässt sich gut verstehen, wenn man sich das jeweilige Ziel vor Augen hält. Inge Hanschke definiert dies so: „Enterprise Architecture Management stellt Hilfsmittel bereit, um die Komplexität der IT-Landschaft zu beherrschen und die IT-Landschaft strategisch und business-orientiert weiterzuentwickeln.“ [48, S. 12] Das übergeordnete Ziel lautet also Beherrschung der Komplexität und die strategische und business-orientierte Weiterentwicklung der IT-Landschaft. Die angesprochene Weiterentwicklung ist wohl angesichts der oft unzureichenden Kontrolle über die IT die daraus resultierende Herausforderung. Eine Neuausrichtung wird schwierig, wenn das bestehende System nicht mehr verstanden wird und Änderungen nicht effizient umgesetzt werden können, weil nicht intendierte Nebeneffekte auftreten und weitreichende Abhängigkeiten eine Modifikation heikel machen. Zur Hauptaufgabe von EAM zählt somit, eine Transparenz herzustellen über das bestehende System. „Die IT-Komplexität wird z.B. durch Visualisierung der IT-Systeme und deren Schnittstellen offensichtlich“ [48, S. 12].

Es geht EAM aber nicht darum, nachzuweisen, dass es sich bei IT-Landschaften um ein komplexes System handelt, sondern um die Steuerung und Optimierung hinsichtlich wirtschaftlicher Anforderungen. Zu den wirtschaftlichen Anforderungen zählen dabei nicht nur die kurzfristige Gewinnsteigerung, sondern die langfristige Sicherstellung der Lebensfähigkeit angesichts drängender zukünftiger Probleme. Deshalb stehen hier staatliche Institutionen, die beispielsweise Verkehrs-, Energie- und Gesundheitssysteme zur Verfügung stellen, vor den gleichen Herausforderungen, vor denen auch private Unternehmen stehen. Es geht um eine effektive und möglichst effiziente Lösung von Problemen, die ihren Ursprung nicht nur in technischen Umsetzung, sondern auch auf gesellschaftlicher und sozialer Ebene haben. Technologischer Fortschritt und der Einsatz innovativer Technologien muss angemessen erfolgen, denn diese verfügen über das bessere Potential die Probleme der Zukunft zu bewältigen.

Für eine schnelle Umsetzung und um erste Erfolge im Bereich von EAM zu garantieren, versucht man sogenannte Erfolgsmethoden (engl. *Best Practices*) zur Verfügung zu stellen. Dabei handelt es sich um Maßnahmen, die sich bei anderen Unternehmen mit gleichen oder ähnlichen Problemen bewährt haben und deshalb vermutlich auch wieder funktionieren können. Langfristig ist es natürlich notwendig, sich nicht nur auf die Reproduktion von bestehenden Lösungen zu versteifen, sondern entsprechende Methoden zu installieren, die es erlauben, individuelle Lösungen für die individuellen Probleme zu erarbei-

ten. Im Zentrum muss der Methodentransfer stehen und nicht der Modelltransfer. Das bloße Kopieren von Lösungen aus einem Standardkatalog wird an seine Grenzen stoßen, spätestens wenn man vor Problemen steht die in ihrer Größenordnung und Art einzigartig sind, wie zum Beispiel das Gesundheitssystem einer großen Nation oder die Umstellung der Energieversorgung auf intelligente, *smarte* Systeme.

12.5.1. Erfolgsmethoden – Best Practices

Bewährte und erfolgreiche Methoden werden Erfolgsmethoden bzw. *Best Practices* genannt. Dabei handelt es sich vorrangig um Vorgehensweisen in Unternehmen, die sich als besonders zielführend erwiesen haben. Sie sind zum Teil in vielen Anwendungsfällen erprobt und deshalb weitgehend akzeptiert. Man könnte sich vorstellen, ein Unternehmen möchte die Effizienz für einen bestimmten Prozess erhöhen. Dann könnten die Verantwortlichen versuchen zu verstehen, wie andere Unternehmen vor ihnen die Effizienz dieses Prozesses gesteigert haben, in der Hoffnung, dass dieses Vorgehen auch für das eigene Unternehmen funktionieren wird. Dieses Vorgehen ist auch in der Softwaretechnik sehr beliebt. Etablierte Standards und Vorgehensweisen zu benutzen, bedeutet immer, auf vergangene Projekterfahrung zurückzugreifen. Fehler, die viele bereits gemacht und aus ihnen gelernt haben, können vermieden werden – so zumindest die Erwartung.

Best Practices gibt es in unterschiedlichen Bereichen der Informatik. Im Bereich der Softwaretechnik haben sich Modelle und Prozesse etabliert, die über viele Jahre entwickelt wurden und sich schließlich als effizienter, robuster und agiler erwiesen haben als andere Methoden. Die Verwendung von iterativen Modellen bei der Planung, Implementierung und Wartung hat gegenüber dem einfachen Wasserfallmodell, das einen Schritt nach dem anderen vollzieht ohne nennenswert auf Änderungen reagieren zu können, große Vorteile. Es kann auf die Dynamik, also die Änderungen in Anforderungen und Rahmenbedingungen reagieren. Auch im konkreteren Fall der Implementierung von Software, also der Umsetzung von Ideen in ausführbaren Programmcode, gibt es Erfolgsmethoden. Zahlreiche Probleme wurden in der Informatik bereits sehr oft gelöst, z.B. Sortieren von Listen, Abfragen von Daten aus Datenbanken oder das Erstellen von Benutzeroberflächen. Es gibt viele Methoden und konkrete Umsetzungen, die sich aus verschiedenen Gründen besser bewähren als andere.

Im Bereich des EAM haben sich mittlerweile auch manche Arbeitsweisen als sehr zielführend erwiesen und sind zu Erfolgsmethoden bzw. *Best Practices* herangereift. Diese haben den Anspruch, die Arbeitsweisen für Architekturmanagement in einer Art zu beeinflussen und in eine Richtung zu lenken, dass diese die besten Voraussetzungen haben, zu gelingen. „EAM Best Practices helfen (...) EAM möglichst schnell und erfolgreich aufzusetzen und kontinuierlich auszubauen.“ [48, S. 45]. Nicht selten ist die Einführung neuer Pro-

zesse und Arbeitsweisen in Unternehmen mit Problemen verbunden. Durch die neu eingeführte Arbeitsweise entstehen Rollen, Verantwortlichkeiten und Abläufe, die nur in seltensten Fällen abrupt eingeführt werden können und dabei keine Probleme hervorrufen. Diese Umstellung muss deshalb Schritt für Schritt erfolgen und benötigt notwendigerweise eine gewisse Zeit bis sie vollzogen ist. Das *Best Practice* Verständnis von Inge Hanschke zielt deshalb auf die erfolgreiche Einführung und kontinuierliche Verbesserung ab. Das Ziel wird dabei wie folgt festgelegt: Die Best-Practice-EAM „hilft Ihnen dabei, Transparenz über Ihre Ausgangslage zu schaffen und die Weiterentwicklung der IT-Landschaft strategisch zu planen und zu steuern.“ [48, S. 46].

Grundsätzlich ist die systematische Arbeitsweise nach untersuchten Modellen nicht neu, so existieren zahlreiche Ansätze, die EAM unterstützen (siehe [97]). Im Folgenden werden zwei Ansätze vorgestellt, die jeweils eine Plattform darstellen, die EAM im Unternehmen ermöglichen:

Zachman EA Framework John Zachman veröffentlichte 1987 ein umfassendes Rahmenmodell, das die Grundlagen für eine Modellierung und Implementierung darstellen soll. Es handelt sich um Leitlinien, die es erlauben, unterschiedliche Sichten auf eine IT-Architektur einzunehmen. Jede Sicht stellt eigene Anforderungen, es entsteht ein pluralistisches Modell, das die verschiedenen Sichten berücksichtigt und möglichst keine Anforderungen vergisst oder unbeachtet lässt.

Dazu wurde eine Tabelle erstellt, die verschiedene Rollen und verschiedene Perspektiven beinhaltet (siehe Abbildung 12.5). Jeder Kombination aus Rolle und Perspektive wird ein Betrachtungsgegenstand zugewiesen. Es ergibt sich eine 6x6-Matrix, aus den Rollen Planer, Besitzer, Designer, Builder, Programmierer und Nutzer, dazu kommen noch die Perspektiven Daten, Funktion, Netzwerk, Personen, Zeit und Motivation [121, 97].

Das Modell stellt keine Methode und keinen Prozess zur Verfügung. Es soll die Ontologie, also die Beschaffenheit und das Wesen von IT-Landschaften in Bezug auf Unternehmen darstellen [135]. Ob dies geglückt ist und ob dies überhaupt durch Betrachtung von Rollen und Perspektiven gelingen kann, ist fraglich. Insgesamt bleibt das von Zachman vorgeschlagene Modell sehr allgemein und ein wenig vage. Es erlaubt viele, zum Teil mehrdeutige Interpretationen und auch die Modellierung selbst wird nur im Allgemeinen skizziert. So wird zwar zwischen konzeptionellen, logischem und physischem Datenmodellen unterschieden, die Grenzen zwischen ihnen werden aber nicht genauer erläutert.

Das ganze Framework stellt somit einen guten Leitfaden und eine umfangreiche Sammlung verschiedener Aspekte von Unternehmen und Sichtweisen dar. Konkrete

	Daten	Funktion	Netzwerk	Personen	Zeit	Motivation
Umfang (Planer)	Liste von Objekten	Liste von Prozesse	Liste von Einheiten	Liste von Organisationen	Liste von Ereignissen	Liste von Zielen
Unternehmen (Besitzer)	Datenmodell (konzeptionell)	Prozesse des Unternehmens	Logistisches Netzwerk	Arbeitsablauf (Organigramm)	Ablaufplan	Geschäftsplan
System (Designer)	Datenmodell (logisch)	Datenströme in Unternehmen	Verteilte Anwendungen	Human Interface Architektur	Prozessstruktur	Geschäftsregelmodell
Technologien (Builder)	Datenmodell (physisch)	Strukturübersicht	Systemarchitektur	Mensch Maschine Interaktion	Kontrollstruktur	Regelentwurf
Komponenten (Programmierer)	Datenschema	Programm	Netzwerkarchitektur	Sicherheitsarchitektur	Zeitplan	Regeldefinition
Implementierung (Nutzer)	Datenbank (Nutzung)	Funktion	Netzwerk	Organisation	Zeitplan (operativ)	Strategie

Abbildung 12.5.: Übersicht über das Zachman Framework [121, 97].

Hilfe bei der Lösung von Problemen oder prospektiven Planungen bietet es allerdings nur bedingt.

TOGAF (The Open Group Architecture Framework) Neben dem Zachman EA Framework existieren zahlreiche Erfolgsmethoden. Diese sind nicht nur auf Basis von wissenschaftlicher Forschung, sondern auch durch den Einsatz in der Praxis erprobt worden. Ein Vorgehensmodell zur Bewältigung der Herausforderungen beim Umgang mit Unternehmensarchitekturen ist TOGAF. TOGAF steht für The Open Group Architecture Framework und wurde im 1995 veröffentlicht. Seither bemüht sich die *Open Group* um kontinuierliche Weiterentwicklung, was dazu führt, dass TOGAF mittlerweile in der 9. Version erschienen ist. TOGAF ist wie UML und SysML kostenfrei. Es existieren jedoch zahlreiche kostenpflichtige Werkzeuge und Programme, die einen Einsatz deutlich erleichtern.

TOGAF basiert auf einem umfassenden Verständnis der Unternehmensarchitektur, die drei verschiedene Architekturen umfasst und einer Methodik, die Planung, Entwurf, Umsetzung und Wartung vorgibt. Die vier nach TOGAF relevanten Architekturen sind von unterschiedlicher Abstraktion [68]. Dabei handelt es sich um die folgenden:

- **Geschäftsarchitektur (Business Architecture):** Die Unternehmensstrategie und wichtige Geschäftsprozesse sowie das Kerngeschäft eines Unternehmens sind hier angesiedelt.

- **Datenarchitektur (Data Architecture):** Hier werden die Datenstrukturen sowie die Ressourcen zur Datenverwaltung betrachtet.
- **Anwendungsarchitektur (Application Architecture):** Die Anwendungen, die von den Geschäftsprozessen sowie von unterstützenden Prozessen benötigt werden, sind dieser Ebene zugeordnet. Auch die Verbindung und die Abhängigkeiten der Anwendungen werden berücksichtigt.
- **Technologiearchitektur (Technology Architecture):** Die verbleibende Architektur fokussiert konkrete Software- und Hardwarefähigkeiten, aber auch deren Abhängigkeiten von Ressourcen und Technologien. Die technischen Grundlagen für IT, also Kommunikation, Netzwerke und Infrastruktur stehen im Zentrum der Technologiearchitektur.

Diese Art der Betrachtung von IT-Landschaften ist eine übliche Trennung in unterschiedlich abstrakte Dimensionen. Während die Geschäftsarchitektur noch eine sehr abstrakte Betrachtung ist, stellt die Technologiearchitektur ganz konkrete Gegenstände und Ressourcen in den Mittelpunkt. Diese analytische Trennung von Abstraktion ist eine verbreitete Methode und in der Informatik sehr beliebt. Die Gefahr hierbei ist wiederum, dass diese Art der Modellierung verleitet, die einzelnen Architekturen isoliert voneinander zu betrachten. Aus der Komplexitätsforschung ist jedoch bekannt, dass genau diese Art des Reduktionismus das System eben nicht ausreichend beschreibt. Nicht in der getrennten Betrachtungsweise besteht die Problematik, sondern in dem Bewusstsein, dass die Schichten getrennt voneinander existieren und sich nur minimal über wohl definierte und klar erkennbare Schnittstellen beeinflussen.

Neben den vier Architekturen existiert noch die sogenannte *Architecture Development Method* (ADM) als ein Vorgehensmodell, das von TOGAF empfohlen wird. Es handelt sich um eine Methode, um unternehmensspezifische Architekturen zu erstellen und diese an die individuellen Anforderungen anzupassen. Es ist ein erweitertes iteratives Modell, das im Wesentlichen acht Phasen umfasst (siehe Abbildung 12.6). Zu Beginn ist man in einer Vorlaufphase, in der die notwendigen TOGAF-Prozesse in einem Unternehmen umgesetzt und eingeführt werden. Es folgt die erste Phase A, in der vor allem die am Projekt Beteiligten identifiziert und die Architekturvisionen festgelegt werden. Es folgen drei Phasen B-D der Implementierung der unterschiedlichen Architekturen. In Phase E werden die erstellten Ergebnisse gesammelt und zusammengefasst. Die nächste Phase F analysiert die Kosten und Risiken, die bei der Auslieferung und Inbetriebnahme auftreten können, außerdem wird ein umfangreicher Migrationsplan erstellt. Phase G stellt sicher, dass die erstellte Architektur mit den Regeln und Vorschriften bestehenden Anwendungslandschaft zusam-

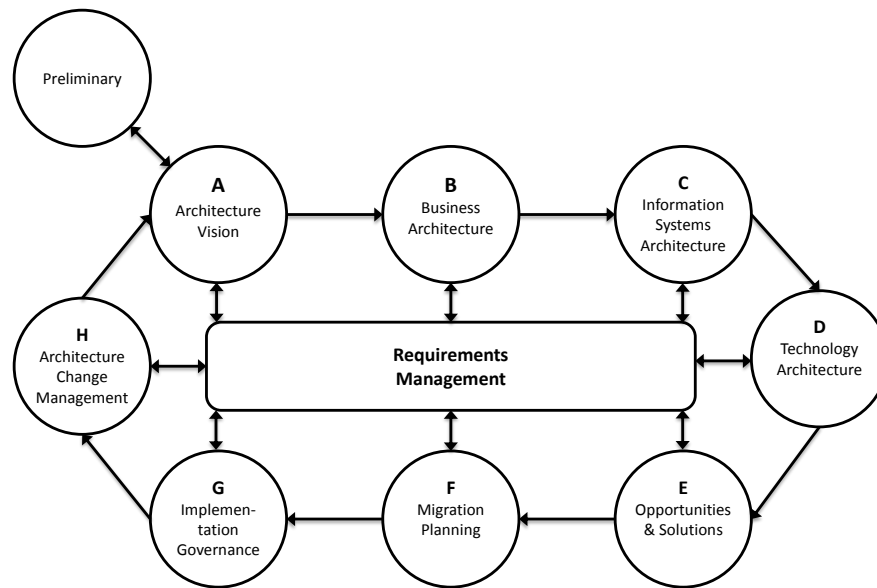


Abbildung 12.6.: Die in TOGAF vorgeschlagene Methode zur Entwicklung von IT-Architekturen (siehe [68, S. 8]).

menstimmt. Übereinstimmung mit Architekturprinzipien muss gewährleistet sein. Die letzte Phase sammelt Ergebnisse und mögliche Änderungen. Sie stellt den Ausgangspunkt für den Neuanfang bei Phase A dar. Jede Phase steht permanent mit der Anforderungsverwaltung in Verbindung. Dort wird sichergestellt, dass die Arbeiten in den Phasen mit dem übergeordneten Plan und den Erwartungen des Unternehmens übereinstimmen.

Neben TOGAF und dem Zachman EA Framework haben sich über die Jahre viele verschiedene Rahmenwerke entwickelt, die helfen sollen, ein erfolgreiches EAM in Unternehmen umzusetzen. Sie sind stark geprägt von analytischem und reduktionistischem Vorgehen. Man modelliert sehr detailreich und schafft sich verschiedene Abstraktionsebenen, um möglichst alle Aspekte abzudecken, die IT in einem Unternehmen bedeuten kann. Wie auch in anderen Disziplinen sollte der Fokus nicht zu stark darauf liegen, immer neue und noch umfangreichere Modelle und Vorgehensweisen zu entwickeln und versuchen, deren Realitätsnähe wissenschaftlich zu untersuchen. Unternehmen und deren IT-Landschaft als komplexe Systeme zu verstehen und von den Erkenntnissen der Komplexitätsforschung zu profitieren, wird sich höchstwahrscheinlich als hilfreich erweisen. Die Systemeigenschaften lassen sich nicht aus der Summe der Einzelemente und der Überlagerung von Ursachen und deren Wirkungen ableiten. Die hohe Interdependenz und die Nichtlinearität, also Eigenschaften der Struktur und der Dynamik, führen dazu, dass eine reduktionistische Sichtweise sehr schnell stark vereinfachend wird und das System nicht ganzheit-

lich beschreibt. Durch die Identifikation von Ordnungsparametern und die Überwachung und Steuerung derselben kann ein System adäquater und präziser beschrieben werden als durch herkömmliche lineare Modelle und Vorgehensweisen.

12.6. Zusammenfassung

Die moderne Gesellschaft ist geprägt von der Interaktion mit den sie umgebenden und durchdringenden Infrastrukturen. Durch die Infrastrukturen wird dem Menschen ein Handlungsspielraum eröffnet, der beispiellos in seiner Geschichte ist. Verkehrssysteme erlauben uns ein Höchstmaß an individueller Mobilität. Das Gesundheitssystem mit all seinen Facetten versorgt uns mit lebensrettenden Maßnahmen, behandelt und versorgt Verletzungen und Krankheiten und fördert und erhält die Gesundheit der gesamten Gesellschaft. Logistik- und Transportsysteme versorgen uns mit Gütern des täglichen Bedarfs und mit anderen Konsum- und Luxusgütern. Die zum Leben notwendige Energieversorgung ist durch ein weiteres System sichergestellt. Es existieren daneben noch zahlreiche Infrastrukturen, die aus dem Alltag nicht mehr wegzudenken sind, ohne die ein so harmonisches und selbstbestimmtes Leben nicht möglich wäre. Diese Infrastrukturen sind für viele längst zu einer Selbstverständlichkeit geworden und ein Ausfall zieht oftmals weite Kreise und führt über kurz oder lang zu Unmut in der Bevölkerung und zu ernsthaften Krisen. Umso wichtiger ist es, dass die korrekte Funktionsweise sichergestellt ist. Die Korrektheit definiert sich über die Anforderungen an das jeweilige System. Während man sich Gesundheitssystem erwartet, dass es bedarfsgerecht, leistungsfähig, aber auch wirtschaftlich ist, spielen bei der Energieversorgung andere Faktoren eine wichtigere Rolle, beispielsweise Ausfallsicherheit, Effizienz und Ökologie. Als Basistechnologie für alle genannten Systeme ist die Informationsverarbeitung nicht mehr wegzudenken. IT ist zu einer Grundlage und zu einer notwendigen Voraussetzung für viele Technologien des 21. Jahrhunderts geworden. Die sekundenschnelle Datenübertragung und die nahezu echtzeitfähige Übertragung von Nachrichten in beliebige Orte der Welt ermöglichen eine Steuerung und eine Kommunikation in noch nie dagewesener Weise. Es ergibt sich ein großes Spektrum an Möglichkeiten für alle Infrastrukturen.

Nicht ganz unproblematisch ist die steigende Abhängigkeit von IT. Eine korrekte Funktionsweise muss garantiert sein damit steht und fällt ein Großteil der von den diversen Systemen zur Verfügung gestellten Funktionalität. Fallen beispielsweise die zentralen Ampelsteuerungen von Großstädten und somit der gesamte Ampelbetrieb aus, führt dies zu einem Verkehrschaos. Versagen die Überwachungen und Serviceleistungen eines Krankenhauses, so kann dies zum einem Stillstand bei Behandlungen und der Versorgung von kranken Menschen führen und verursacht Leid. Die Szenarien, die sich beim Ausfall von IT ergeben, sind zahlreich. Sie führen aber immer zu einer Einschränkung und zu vermin-

derter Leistungsfähigkeit eines Systems und betreffen früher oder später den Menschen und die Gesellschaft. Diese negativen Konsequenzen können und müssen vermieden werden.

Die Informatik als wissenschaftliche Disziplin, der die Informationsverarbeitung und die IT zuzuschreiben ist bemüht sich daher um die Sicherstellung der korrekten Funktionsweise und die Adäquatheit von IT. Es muss einerseits garantiert sein, dass das IT-System robust genug ist, um eine Ausfallsicherheit auf ein tolerierbares Maß zu halten und andererseits muss es an die jeweiligen Anforderungen angepasst sein, damit die geforderte Funktionalität und Wirtschaftlichkeit erreicht wird. Die Infrastrukturen sind wirtschaftlichen Unternehmen dahingehend sehr ähnlich, dass beide gleiche Erwartungen und Anforderungen an IT haben. Für beide sind Ausfälle und Fehlverhalten nicht akzeptabel, da sie die von ihnen erwarteten Leistungen nicht erfüllen können und über kurz oder lang zu wirtschaftlichem Verlust oder zur Einbuße des Vertrauens führen. Dies ist nicht akzeptabel in einem System, in dem sich am Ende Unternehmen durchsetzen, die eine ausreichende Wettbewerbsfähigkeit und Innovationskraft entwickeln können. Umso wichtiger ist es, dass die IT als Basistechnologie und als Grundlage für viele Prozesse das Geschäftsfeld bestmöglich unterstützt und an den Unternehmenszielen ausgerichtet ist.

Die Informatik beschäftigt sich mit den Herausforderungen der Planung, Implementierung und Weiterentwicklung von neuen und bestehenden IT-Infrastrukturen. Die Gesamtheit von bestehenden IT-Infrastrukturen, also alle Komponenten, die sich darin befinden, bezeichnet man als IT-Landschaft. Eine IT-Landschaft umfasst Hardwarekomponenten wie Desktop-PCs, Netzwerke, Drucker, Server, mobile Geräte, usw., aber auch Softwarekomponenten aller Art wie beispielsweise diverse Informations- und Verwaltungssysteme, Nachrichtendienste, SAP Module, usw. Es wird schnell klar, dass Unternehmen schnell eine große IT-Landschaft mit vielen unterschiedlichen Anwendungen, Diensten und Geräten entwickeln werden. Die gegenseitige Abhängigkeit von IT-Systemen und deren Einfluss auf die Organisation und Prozesse führen dazu, dass triviale Ansätze zur Verwaltung und prospektiven Steuerung versagen und zu einem Scheitern führen. Wie kann nun die Fähigkeit zur Steuerung maximiert und die IT-Landschaft bestmöglich gestaltet werden? Der Schlüssel liegt im Verstehen der IT-Landschaft. Es reicht nicht nur die IT-Landschaft zeichnen und detailliert modellieren zu können. Die Abhängigkeiten und Interaktionen zwischen beteiligten Akteuren, sowie die wesentlichen Struktureigenschaften müssen identifiziert und zu einem ganzheitlichen Verständnis der IT in einem Unternehmen verbunden werden. Die Erkenntnisse aus der Komplexitätsforschung können hier entscheidend weiterhelfen. Eine IT-Landschaft ist mehr als nur die Summe von Hard- und Software. Holistische Ansätze, die das System in seiner Gesamtheit betrachten, scheinen sinnvoller und aussichtsreicher zu sein, als reduktionistische Systeme die immer nur Teilspekte analysierend und dann auf das Gesamtverhalten schließen. Die Gesetzmäßigkeiten

großer IT-Landschaften können sich erheblich von denen einzelner Anwendungen bzw. Teilsysteme unterscheiden. Genauso ist es möglich, dass die Gesetzmäßigkeiten nur bis zu bestimmten Grenzen gelten, nach sogenannten Phasenübergängen aber ganz andere Regelmäßigkeiten und Ordnungsprinzipien das System beschreiben.

Die Antwort der Informatik auf die Herausforderungen ist einerseits SysML, eine Modellierungssprache, die sich besonders dazu eignet Systeme in ihrer Ganzheit abzubilden, (siehe Kapitel 12.4) und EAM, ein Prozess und Forschungsrichtung, der die Anpassung von IT-Landschaften an die Zielvorgaben des Unternehmens sicherstellen soll (siehe Kapitel 12.5).

SysML ist eine an UML angelehnte Modellierungssprache, deren Kernelemente, genauso wie bei UML, Diagramme darstellen (siehe Kapitel 11.2). Im Gegensatz zu UML ist SysML weniger softwarelastig und eignet sich daher besser für die Modellierung von Systemen, die nicht dem Bereich der Software zuzuordnen sind. Systems Engineering als die Disziplin zur ganzheitlichen Modellierung von Systemen fußt auf SysML und stellt einen interdisziplinären Ansatz dar, technische Systeme und ihre Komplexität abzubilden.

EAM ist im Gegensatz dazu die Methode, die sich ganz besonders auf das Management von Unternehmensarchitekturen stützt. Dazu ist es bis zu einem gewissen Grad notwendig, das IT-System mit seinen Eigenschaften verstanden zu haben. Hierfür gibt es verschiedene Methoden. Kennzeichnend ist jedoch die Aufteilung der Unternehmensarchitektur in verschiedene und getrennte Schichten bzw. Ebenen, die sich gegenseitig beeinflussen und wechselwirken. Eine bekannte Methode ist TOGAF (The Open Group Architecture Framework) die mittlerweile in Version 9 vorliegt (siehe Kapitel 12.5.1). Dort wird zwischen vier Architekturen unterschieden, die jeweils eine unterschiedliche Abstraktion der IT-Landschaft vornehmen. Außerdem wird eine iterative Methode zur Entwicklung der Gesamtarchitektur vorgeschlagen. Das Arbeiten nach Erfolgsmethoden ist – wie in der gesamten Informatik – auch im Bereich von EAM nicht unüblich. Bereits bewährte Methoden werden wiederverwendet, um effizient und effektiv zu Ergebnissen zu kommen. So stellen TOGAF und andere Arbeitsweisen jeweils Methoden dar, die sich über die Jahre entwickelt und in vielen anderen Betrieben und Unternehmen bewährt haben.

Insgesamt muss jedoch festgehalten werden, dass die bloße Wiederverwendung von bereits Bewährtem noch keine Garantie für das Gelingen von Architekturmanagement in Unternehmen ist. Die IT-Landschaften als komplexe Systeme verlangen zudem nach zugeschnittenen und adäquaten Lösungsansätzen bei der Bewältigung von auftretenden Problemen. Unter Zuhilfenahme von Erfolgsmethoden kommt man nur soweit wie es eben diese Methode zulässt. Es gibt Unternehmen, für die das ausreicht, für manche hingegen wird dies nicht genügen. Infrastrukturprobleme, die auf mangelhafte IT zurückzuführen sind, sind oftmals von einer anderen Größenordnung als die von Unternehmen. Das oben genannte Beispiel der kompletten IT-Infrastruktur eines Gesundheitssystems hat andere

Anforderungen und Eigenschaften als die eines mittelgroßen IT-Unternehmens. Ob diese durch eine Erfolgsmethode abgedeckt werden können, bleibt offen. Festzuhalten ist, dass das Ignorieren von komplexen Eigenschaften, die auf Systemebene entstehen, zu einem Fehlverhalten und nicht gewünschten Effekten führen kann und das Management zunehmend erschwert. Die Identifizierung von Ordnungsparametern und die korrekte Verknüpfung von Ursachen auf der Mikroebene und den zugehörigen Effekten der Makroebene, wie es zentraler Bestandteil der Komplexitätsforschung ist, können hier zu besseren Ergebnissen führen und die Sicherstellung von notwendigen Dienstleistungen auch unter erschwerten Bedingungen gewährleisten.

Literatur

- [1] A. Alivisatos u. a. „The Brain Activity Map Project and the Challenge of Functional Connectomics“. In: *Neuron* 74.6 (2012), S. 970–974.
- [2] Joachim Ankerhold. *Studiengang Wirtschaftsphysik*. Techn. Ber. Universität Ulm, 2012.
- [3] Aristoteles. „Über die Teile der Lebewesen“. In: *Aristoteles Werke in deutscher Übersetzung, Band 17: Zoologische Schriften II*. Hrsg. von Hellmut Flashar. Berlin: Akademie Verlag, 2006.
- [4] Louis Bachelier. *Théorie de la spéculation*. Annales scientifiques de l'École Normale Supérieure, 1900.
- [5] A. Terry Bahill und B. Gissing. „Re-evaluating systems engineering concepts using systems thinking“. In: *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews* 28.4 (1998), S. 516–527.
- [6] Helmut Balzert. *Lehrbuch der Softwaretechnik: Basiskonzepte und Requirements Engineering*. Spektrum Akademischer Verlag, 2009.
- [7] L. A. Belady. „Complexity of Large Systems“. In: *Software Metrics: An Analysis and Evaluation*. Hrsg. von Alan Perlis, Frederick Sayward und Mark Shaw. Cambridge, Massachusetts, und London, England: MIT Press, 1981.
- [8] Charles H. Bennett. „Logical Depth and Physical Complexity“. In: *The Universal Turing Machine A Half-Century Survey*. Hrsg. von Rolf Herken. Oxford: Oxford University Press, 1988, S. 227–257.
- [9] Marina Bentivoglio. *Life and Discoveries of Santiago Ramón y Cajal*. 1906.
- [10] Jacob Bernays. *Aristoteles' Politik, erstes, zweite und drittes Buch*. Hertz, 1872.
- [11] Tim Berners-Lee. *Information Management: A Proposal*. Techn. Ber. CERN, 1989.
- [12] Ludwig van Bertalanffy. „An Outline of General System Theory“. In: *The British Journal for the Philosophy of Science* (1950).
- [13] Friedrich Eduard Bilz. *Erkenne dich selbst*. 1894.
- [14] Jean-Philippe Bouchaud. „Economics needs a scientific revolution“. In: *Nature* 455.7217 (2008), S. 1181–1181.

- [15] Phelim P. Boyle. „Options: A Monte Carlo approach“. In: *Journal of Financial Economics* 4.3 (1977), S. 323–338.
- [16] Dan Braha, Blake Stacey und Yaneer Bar-Yam. „Corporate competition: A self-organized network“. In: *Social Networks* 33.3 (2011), S. 219–230.
- [17] Romain Brette u. a. „Simulation of networks of spiking neurons: A review of tools and strategies“. In: *Journal of Computational Neuroscience* 23.3 (2007), S. 349–398.
- [18] Vinzenz Bronzin. *Theorie der Prämien­geschäfte*. Wien, Leipzig: Deuticke, 1908.
- [19] Ron Brookmeyer u. a. „Forecasting the global burden of Alzheimer’s disease“. In: *Alzheimer’s & dementia : the journal of the Alzheimer’s Association* 3.3 (2007), S. 186–191.
- [20] Manfred Broy. „Cyber-Physical Systems - Wissenschaftliche Herausforderungen bei der Entwicklung“. In: *Cyber-Physical Systems - Innovation durch softwareintensive eingebettete Systeme*. Hrsg. von Manfred Broy. Springer, acatech, 2010.
- [21] Statistisches Bundesamt. *Modell der Bevölkerungsvorausberechnung*. Techn. Ber. 2010.
- [22] Bundesrechnungshof. *Modernisierung der Software für das Besteuerungsverfahren in den Finanzämtern verzögert sich*. Techn. Ber. Bundesministerium der Finanzen, 2012.
- [23] N.T. Carnevale und M. L. Hines. *The NEURON Book*. Cambridge: University Press, 2006.
- [24] Rama Cont. „Empirical properties of asset returns: stylized facts and statistical issues“. In: *Quantitative Finance* 1 (2001).
- [25] Stephen Coombes. *The Geometry and Pigmentation of Seashells*. Techn. Ber. Department of Mathematical Sciences, 2009.
- [26] Bill Curtis. „The Measurement of Software Quality and Complexity“. In: *Software Metrics: An Analysis and Evaluation*. Hrsg. von Alan Perlis, Frederick Sayward und Mark Shaw. Cambridge, Massachusetts, und London, England: MIT Press, 1981.
- [27] Charles Darwin. *On the Origin of Species*. London: John Murray, 1859.
- [28] M. DeLanda. *A New Philosophy of Society: Assemblage Theory and Social Complexity*. Bloomsbury Academic, 2006.
- [29] Gernot Dern. *Integrationsmanagement in der Unternehmens-IT*. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2011.
- [30] Gernot Dern. *Management von IT-Architekturen*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2009.
- [31] Dietrich Dörner. *Die Logik des Misslingens: Strategisches Denken in komplexen Situationen*. Reinbek bei Hamburg: Rowohlt, 2003.

-
- [32] Duden. <http://www.duden.de/node/644216/revisions/1123334/view>. November 2013.
- [33] Duden. <http://www.duden.de/node/646938/revisions/1120361/view>. November 2013.
- [34] Duden. <http://www.duden.de/node/650843/revisions/1150302/view>. November 2013.
- [35] G. B. Ermentrout und L. Edelstein-Keshet. „Cellular automata approaches to biological modeling“. In: *Journal of Theoretical Biology* 160.1 (1993), S. 97–133.
- [36] Norman E. Fenton. *Software metrics - a rigorous approach*. London: Chapman & Hall, 1991.
- [37] Stan Franklin und Art Graesser. *Is it an Agent, or Just a Program?: A Taxonomy for Autonomous Agents*. Proceedings of the Workshop on Intelligent Agents III, Agent Theories, Architectures, and Languages. Springer, 1997.
- [38] Alexander Gard-Murray und Yaneer Bar-Yam. *Complexity and the Limits of Revolution: What Will Happen to the Arab Spring?* 2012.
- [39] Eva Geisberger und Manfred Broy. *Integrierte Forschungsagenda Cyber-Physical Systems*. Techn. Ber. Springer, acatech, 2012.
- [40] Marc-Oliver Gewaltig und Markus Diesmann. „NEST (NEural Simulation Tool)“. In: *Scholarpedia* 2.4 (2007), S. 1430.
- [41] Andrew Gillies und David Sterratt. *Neuron Tutorial*. 2013.
- [42] Pdraig Gleeson u. a. „NeuroML: A Language for Describing Data Driven Models of Neurons and Networks with a High Degree of Biological Detail“. In: *Computational Biology* 6.6 (2010), e1000815.
- [43] Charles M. Goss. „On anatomy of nerves by galen of pergamon“. In: *American Journal of Anatomy* 118.2 (1966), S. 327–335.
- [44] Object Management Group. *OMG Unified Modeling Language™ (OMG SysML), Version 1.3*. New York: OMG, 2009.
- [45] Object Management Group. *OMG Unified Modeling Language™ (OMG UML), Superstructure Version 2.2*. New York: OMG, 2009.
- [46] Hermann Haken. *Synergetik*. Bd. 3. Berlin: Springer, 1990.
- [47] Maurice H. Halstead. *Elements of software science*. Elsevier, 1977.
- [48] Inge Hanschke. *Enterprise Architecture Management – einfach und effektiv: Ein praktischer Leitfaden für die Einführung von EAM*. München: Carl Hanser Verlag, 2012.
- [49] Stephan Hartmann. „The World as a Process: Simulations in the Natural and Social Sciences“. In: *Simulation and Modelling in the Social Sciences from the Philosophy of Science Point of View* (1996).
-

- [50] R Hausmann u. a. *The Atlas of Economic Complexity*. Cambridge MA: Puritan Press, 2011.
- [51] Dirk Helbing. „Managing Complexity in Socio-Economic Systems“. In: *European Review* 17.02 (2009), S. 423–438.
- [52] Dirk Helbing. *Pluralistic Modeling of Complex Systems*. 2010.
- [53] Dirk Helbing und Wolfgang Weidlich. „Quantitative Soziodynamik“. In: *Kölner Zeitschrift für Soziologie und Sozialpsychologie* 47 (1995).
- [54] Iain Hepburn u. a. „STEPS: efficient simulation of stochastic reaction-diffusion models in realistic morphologies“. In: *BMC Systems Biology* 6.1 (2012), S. 36.
- [55] Dirk W. Hoffmann. *Software-Qualität*. Berlin Heidelberg: Springer, 2013.
- [56] J. U. N. Huang, N. R. Jennings und John Fox. „An Agent-based Approach to Health Care Management“. In: *Applied Artificial Intelligence* 9.4 (1995), S. 401–420.
- [57] M. Hucka u. a. „THE ERATO SYSTEMS BIOLOGY WORKBENCH: ENABLING INTERACTION AND EXCHANGE BETWEEN SOFTWARE TOOLS FOR COMPUTATIONAL BIOLOGY“. In: *Proceedings of the Pacific Biocomputing Symposium* (2002).
- [58] M. Hucka u. a. „The systems biology markup language (SBML): a medium for representation and exchange of biochemical network models“. In: *Bioinformatics* 19.4 (2003), S. 524–531.
- [59] Michael Hucka u. a. *The Systems Biology Markup Language (SBML): Language Specification for Level 3 Version 1 Core*. Techn. Ber. California Institute of Technology, 2010.
- [60] *IEEE Standard Glossary of Software Engineering Terminology*. Techn. Ber. IEEE, 1990.
- [61] Fraunhofer-Verbund IUK-Technologie. *Auf dem Weg in die »Cyber-Physical Gesellschaft«*. Techn. Ber. Fraunhofer-Verbund Informations- und Kommunikationstechnologie, 2012.
- [62] Trey Ideker, Timothy Galitski und Leroy Hood. „A new approach to decoding life: Systems Biology“. In: *Annual Review of Genomics and Human Genetics* 2.1 (2001), S. 343–372.
- [63] A. Ilachinski. *Cellular Automata: A Discrete Universe*. World Scientific Publishing Company Incorporated, 2001.
- [64] Lee Insup und O. Sokolsky. „Medical Cyber Physical Systems“. In: *Design Automation Conference*. 2010, S. 743–748.
- [65] N. R. Jennings u. a. „Agent-based Business Process Management“. In: *International Journal of Cooperative Information Systems* 05.02n03 (1996), S. 105–130.

-
- [66] Nicholas R. Jennings, Katia Sycara und Michael Wooldridge. „A Roadmap of Agent Research and Development“. In: *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems* 1.1 (1998), S. 7–38.
- [67] Canino José Miguel u. a. „A Multi-Agent Approach for Designing Next Generation of Air Traffic Systems“. In: 2012.
- [68] Andrew Josey, Rachel Harrison und Paul Homan. *TOGAF Version 9: A Pocket Guide*. Berkshire: The Open Group, 2009.
- [69] Immanuel Kant. *Kritik der Urteilkraft*. Bd. 3. Insel-Verlag, 1790.
- [70] Immanuel Kant. *Kritik der reinen Vernunft*. Berlin: Ausgabe der Preußischen Akademie der Wissenschaften, 1787.
- [71] Marc Kirschner, John Gerhart und Tim Mitchison. „Molecular Vitalism“. In: *Cell* 1.100 (2000), S. 79–88.
- [72] Hiroaki Kitano. „Computational systems biology“. In: *Nature* 420.6912 (2002), S. 206–210.
- [73] Hiroaki Kitano. „Systems Biology: A Brief Overview“. In: *Science* 295.5560 (2002), S. 1662–1664.
- [74] Franziska Klügl. *Multiagentensysteme: Konzepte, Werkzeuge, Anwendungen*. München: Addison-Wesley, 2001.
- [75] E. Klipp u. a. *Systems Biology in Practice*. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2005.
- [76] A. N. Kolmogorov. „On Tables of Random Numbers“. In: *Sankhya: The Indian Journal of Statistics* 25.4 (1963), S. 369–376.
- [77] Johannes Krampf u. a. „An Agent Based Pervasive Healthcare System: A First Scalability Study“. In: *Electronic Healthcare*. Hrsg. von Patty Kostkova, Martin Szomszor und David Fowler. Bd. 91. Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social Informatics and Telecommunications Engineering. Springer Berlin Heidelberg, 2012, S. 128–137.
- [78] Jitender Kumar Chhabra und Varun Gupta. „A Survey of Dynamic Software Metrics“. In: *Journal of Computer Science and Technology* 25.5 (2010), S. 1016–1029.
- [79] Julien Offray de La Mettrie. *Die Maschine Mensch*. Hamburg: Meiner, 1748.
- [80] L.M. Laird und C. Brennan. *Software Measurement and Estimation: A Practical Approach*. Wiley-IEEE Computer Society Press, 2006.
- [81] Andre Levchenko. „Dynamical and integrative cell signaling: challenges for the new biology“. In: *Biotechnology and Bioengineering* 84.7 (2003), S. 773–782.
-

- [82] Jacques Loeb. *Comparative physiology of the brain and comparative psychology*. New York: Putnam, 1900.
- [83] Hans-Walter Lorenz. *Nonlinear Dynamical Economics and Chaotic Motion*. Springer, 1993.
- [84] Niklas Luhmann. *Soziologische Aufklärung - Aufsätze zur Theorie sozialer Systeme*. Wiesbaden: Westdeutscher Verlag GmbH, 1970.
- [85] M. Lurgi und F. Estanyol. „MADBE: A Multi-Agent Digital Business Ecosystem“. In: *Digital Ecosystems and Technologies*. 2010, S. 262–267.
- [86] Klaus Mainzer. „Challenges of Complexity in the 21st Century. An Interdisciplinary Introduction“. In: *European Review* 17.02 (2009), S. 219–236.
- [87] Klaus Mainzer. *Gehirn, Computer, Komplexität*. Berlin Heidelberg: Springer, 1997.
- [88] Klaus Mainzer. *Komplexität*. Stuttgart: UTB, 2008.
- [89] Klaus Mainzer. *Leben als Maschine? Von der Systembiologie zur Robotik und Künstlichen Intelligenz*. Paderborn: mentis, 2010.
- [90] Klaus Mainzer. *Symmetrien der Natur: Ein Handbuch zur Natur- und Wissenschaftsphilosophie*. Berlin: de Gruyter, 1988.
- [91] Klaus Mainzer. *Thinking in Complexity: The Computational Dynamics of Matter, Mind, and Mankind*. Berlin Heidelberg: Springer, 2007.
- [92] Klaus Mainzer und Leon Chua. *Local Activity Principle*. Cambridge: Imperial College Press, 2013.
- [93] Benoit B. Mandelbrot und Richard L. Hudson. *Fraktale und Finanzen: Märkte zwischen Risiko, Rendite und Ruin*. Piper, 2009.
- [94] Rosario N. Mantegna und Eugene H. Stanley. *An Introduction to Econophysics: Correlations and Complexity in Finance*. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.
- [95] H. Markram u. a. *The Human Brain Project: A Report to the European Commission*. Techn. Ber. HBP-PS Consortium, 2012.
- [96] David Marr und Tomaso Poggio. *From Understanding Computation to Understanding Neural Circuitry*. Techn. Ber. Massachusetts Institute of Technology, 1976.
- [97] Dirk Matthes. *Enterprise Architecture Frameworks Kompendium: Über 50 Rahmenwerke für das IT-Management*. Berlin Heidelberg: Springer, 2011.
- [98] Thomas McCabe. „A Complexity Measure“. In: *IEEE Transactions on Software Engineering* 2.4 (1976).

-
- [99] P. Mendes und D. Kell. „Non-linear optimization of biochemical pathways: applications to metabolic engineering and parameter estimation“. In: *Bioinformatics* 14.10 (1998), S. 869–83.
- [100] Robert C. Merton. „Lifetime portfolio selection under uncertainty: The continuous-time case“. In: *Review of Economic and Statistics* 51.3 (1969).
- [101] Nicholas Metropolis. *The beginning of the Monte Carlo method*. Techn. Ber. Los Alamos Science, 1987.
- [102] Walle Nauta und Michael Feirtag. *Neuroanatomie*. Heidelberg: Spektrum der Wissenschaft, 1990.
- [103] John von Neumann und Oskar Morgenstern. *Theory of Games and Economic Behavior*. Princeton: Princeton University Press, 1953.
- [104] Isaac Newton. *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*. 1687.
- [105] Grégoire Nicolis und Ilya Prigogine. *Die Erforschung des Komplexen*. München: Piper, 1987.
- [106] Nicolas Le Novère u. a. „The Systems Biology Graphical Notation“. In: *Nature* 27.8 (2009), S. 735–741.
- [107] Erhard Oeser. *Geschichte der Hirnforschung: Von der Antike bis zur Gegenwart*. Bd. 2. Darmstadt: WBG Wissenschaftliche Buchgesellschaft, 2010.
- [108] Joseph Persky. „The Ethology of Homo Economicus“. In: *Journal of Economic Perspectives* 9.2 (1995), S. 221–231.
- [109] Henry Poincaré. *Wissenschaft und Methode: Autorisierte deutsche Ausgabe mit erläuternden Anmerkungen*. B. G. Teubner, 1914.
- [110] Tobias Preis. *Ökonophysik*. Wiesbaden: Gabler Verlag, 2011.
- [111] Ilya Prigogine und Isabelle Stengers. *Dialog mit der Natur*. München: Piper, 1990.
- [112] Artem B. Prokhorov. *Nonlinear Dynamics and Chaos Theory in Economics: a Historical Perspective*. Techn. Ber. 2001.
- [113] Harald Reß und Günter Viebeck. *Datenstrukturen und Algorithmen*. München Wien: Carl Hanser Verlag, 2000.
- [114] Wulff D. Rehfus. *Handwörterbuch Philosophie*. Göttingen: Vandenhoeck & Ruprecht, 2003.
- [115] Rupert Riedl. *Strukturen der Komplexität*. Springer, 2000.
- [116] Stefan Sackmann. *Bilaterale Preisverhandlungen von Software-Agenten: ein Modell und System zur Analyse des marktplatzspezifischen Verhandlungsspielraumes*. Wiesbaden: Deutscher Universitäts-Verlag, 2003.
-

- [117] Claude E. Shannon. „A Mathematical Theory of Communication“. In: *The Bell System Technical Journal* 27 (1948).
- [118] Yu Sheng und Zhou Shijie. „A survey on metric of software complexity“. In: *Information Management and Engineering*. 2010, S. 352–356.
- [119] Harry M. Sneed, Richard Seidl und Manfred Baumgartner. *Software in Zahlen: Die Vermessung von Applikationen*. München: Carl Hanser Verlag, 2010.
- [120] Rolf Socher. *Theoretische Grundlagen der Informatik*. München Wien: Carl Hanser Verlag, 2003.
- [121] J. F. Sowa und J. A. Zachman. „Extending and formalizing the framework for information systems architecture“. In: *IBM Systems Journal* 31.3 (1992), S. 590–616.
- [122] Joachim Starbatty. *Klassiker des ökonomischen Denkens: Von Platon bis John Maynard Keynes*. Hamburg: Nikol Verlag, 2012.
- [123] Matthew Suderman und Michael Hallett. „Tools for visually exploring biological networks“. In: *Bioinformatics* 23.20 (2007), S. 2651–2659.
- [124] M. Tomita u. a. „E-CELL: Software Environment for Whole Cell Simulation“. In: *Genome Information Workshop* 8 (1997), S. 147–155.
- [125] Frederic Vester. *Die Kunst vernetzt zu denken: Ideen und Werkzeuge für einen neuen Umgang mit Komplexität ; der neue Bericht an den Club of Rome*. München: Deutscher Taschenbuch Verlag, 2002.
- [126] Christian Weiß. *Sichere intelligente Mobilität: Testfeld Deutschland*. Techn. Ber. 2010.
- [127] Wolfgang Weidlich. „Das Modellierungskonzept der Soziodynamik: Was leistet die Synergetik?“ In: *Komplexe Systeme und Nichtlineare Dynamik in Natur und Gesellschaft*. Hrsg. von Klaus Mainzer. Berlin Heidelberg: Springer, 1999.
- [128] Wolfgang Weidlich. „Sociodynamics - A Systematic Approach to Mathematical Modelling in the Social Sciences.“ In: *Nonlinear phenomena in complex systems* 5.4 (2002), S. 9.
- [129] Tim Weilkiens. *Systems Engineering mit SysML/UML: Modellierung, Analyse und Design*. Heidelberg: dpunkt.verlag, 2006.
- [130] Alfred North Whitehead. *Modes of Thought*. New York: Macmillan, 1938.
- [131] Helmut Willke. *Systemtheorie I: Grundlagen*. Stuttgart: Lucius & Lucius, 2005.
- [132] Franz M. Wuketits. *Biologie und Kausalität*. Paul Parey, 1981.
- [133] Jay Xiong. *New Software Engineering Paradigm Based on Complexity Science*. Springer, 2011.

- [134] S. M. Yacoub, H. H. Ammar und T. Robinson. „Dynamic metrics for object oriented designs“. In: *Software Metrics Symposium, 1999. Proceedings.* 1999, S. 50–61.
- [135] John A. Zachman. *Zachman International: Enterprise Architecture.* 2008.
- [136] Horst Zuse. *A Framework of Software Measurement.* Berlin, New York: de Gruyter, 1998.