

# **Semiotik und Simulation: Fortführung der Schrift ins Dynamische**

**Entwurf einer Symboltheorie der numerischen Simulation und ihrer Visualisierung**

Inaugural-Dissertation  
zur Erlangung des Doktorgrades

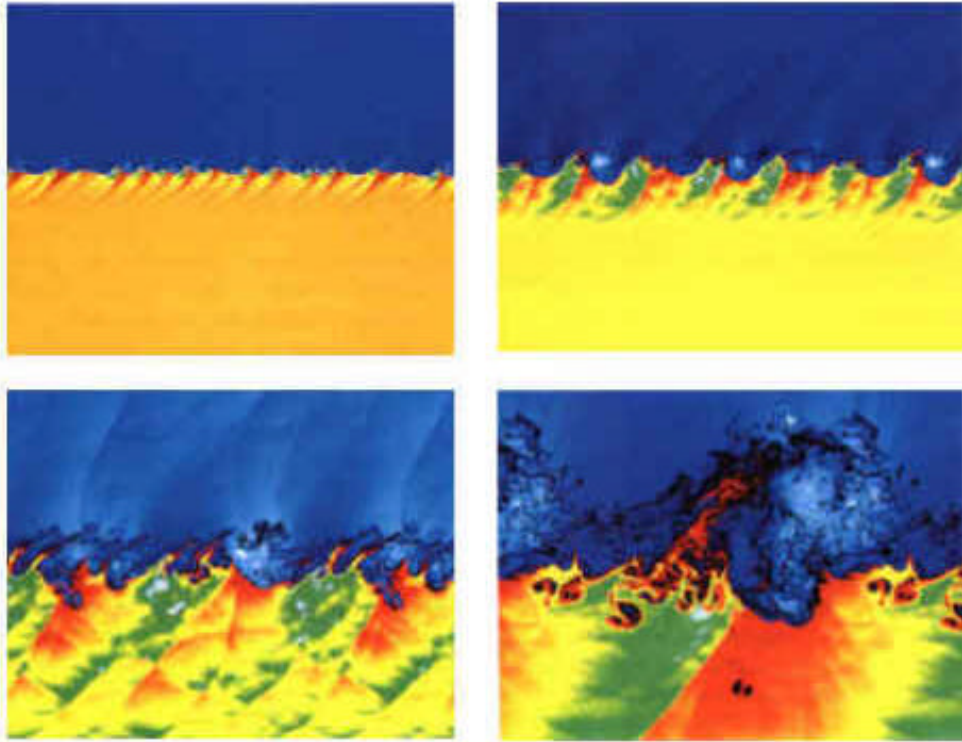
am Fachbereich  
Philosophie und Geisteswissenschaften  
der Freien Universität Berlin

vorgelegt von Gabriele Gramelsberger  
aus München  
Juni 2000

Gutachter:

1. Prof. Dr. Sybille Krämer, Freie Universität Berlin, Institut für Philosophie
2. PD habil. Dr. Oliver Scholz, Freie Universität Berlin, Institut für Philosophie

Tag des Kolloquiums: 15. Juni 2001



*Der Mensch lebt in einem symbolischen und nicht mehr in einem bloß natürlichen Universum. Sprache, Mythos, Kunst und Religion sind Teile dieses Universums. Sie sind die bunten Fäden, die das Symbolnetz weben, das verknotete Gewebe menschlicher Erfahrung. Jeder menschliche Fortschritt im Denken und in der Erfahrung verfeinert und verstärkt dieses Netz.*

Ernst Cassirer, On Man, 1944

# INHALTSVERZEICHNIS

<b>0. EINLEITUNG- COMPUTERSIMULATIONEN IN DEN WISSENSCHAFTEN</b>	<b>6 - 10</b>
1. Motivation und Herangehensweise	6
2. Grundlegender Gedankengang	7
3. Bedingungen der wissenschaftlichen Computersimulation	9
4. Aufbau der Arbeit	10
<b>I. ÜBERBLICK - WISSENSCHAFTLICHES RECHNEN</b>	<b>11 - 18</b>
1. Simulation als neue Methode	11
2. Deterministische Simulation als Gegenstand der Arbeit	14
3. Philosophischer Begriff der Simulation	16
<b>II. SEMIOTISCHE ANALYSE - BESCHREIBBARKEIT UND BERECHENBARKEIT</b>	<b>19 - 56</b>
1. Emanzipation der Schrift von der Sprache	19
1.1 <i>Abecedarium Novum Naturae, Charactersitica Universalis, Begriffsschriften</i>	19
1.2 <i>Sprachspiele</i>	20
1.3 <i>Digitale Zeichen und semiotische Partikel</i>	22
2. Zeichensysteme und Zeichen	22
2.1 <i>Typographische Grundeinheiten der Alphabetschrift</i>	22
2.2 <i>Semantische Grundeinheiten geschriebener Sprache</i>	24
2.3 <i>Beschreiben, Registrieren, Zählen</i>	25
2.4 <i>Definition semiotischer Begriffe und Klassen von Zeichensystemen</i>	26
2.5 <i>Konsequenzen der Formalisierung für die Zeichenverwendung</i>	29
2.6 <i>Interpretationsmöglichkeit formaler Zeichensysteme</i>	32
3. Schriftbasierte Zahlensysteme und Zahlen	35
3.1 <i>Zähl- und Ziffernsysteme</i>	35
3.2 <i>Zahlbegriffe und -definitionen</i>	38
3.3 <i>Worte und Werte</i>	42
4. Strukturen und Operationen	44
4.1 <i>Rezept, Algorithmus, Kalkül</i>	44
4.2 <i>Turingmaschine als allgemeines Konzept der Zeichenverwendung</i>	46
4.3 <i>Funktionen als zeichenproduzierende Maschinen</i>	47
4.4 <i>Differentialgleichungen als Strukturen zur Beschreibung veränderlicher Größen</i>	50
5. Von der Beschreibbarkeit zur Berechenbarkeit	53
<b>III. SEMIOTISCHE ANALYSE - SIMULIERBARKEIT</b>	<b>57 - 102</b>
1. Digitalisierte Zeichen	57
1.1 <i>Maschinelle Zeichenverarbeitung</i>	57

1.2 Strom als fluides Trägermedium	61
1.3 Operieren, Speichern, Präsentieren	63
1.4 Bytezahlen und ASCII-Kode	64
1.5 Subsymbolische Ebene digitaler Zeichen	67
<b>2. Form der Simulation</b>	<b>70</b>
2.1 Organisationsprinzip	70
2.2 Überschreiben als neue Technologie	73
2.3 Zeichenmaterial und Umsetzung	75
2.4 Semiotische Interpretation	79
<b>3. Entfaltung der Form - Zeitlichkeit</b>	<b>81</b>
3.1 Raum-Zeit-Raster	81
3.2 Rekursion	84
3.3 Dynamik der Datenstrukturen	85
<b>4. Bildlichkeit der Simulation</b>	<b>88</b>
4.1 Strukturierungen der Datenbasis	88
4.2 Farbdifferenzierung und Gestalt	92
4.3 Animierte Bildobjekte	96
<b>5. Von der Berechenbarkeit zur Simulierbarkeit</b>	<b>98</b>
<b>IV. DISKUSSION – FORTFÜHRUNG DER SCHRIFT INS DYNAMISCHE</b>	<b>103 - 154</b>
<b>1. Erweiterter Zeichenbegriff</b>	<b>103</b>
1.1 Prinzip der Verschriftung	103
1.2 Erweiterung des Zeichenbegriffs	107
1.3 Syntaktische Simulation	116
<b>2. Verlust des Symbolischen</b>	<b>117</b>
2.1 Formen der Bezugnahme	120
2.2 Semiotische Partikel	125
<b>3. Neue Einsichten</b>	<b>127</b>
3.1 Semiotische Fülle	127
3.3 Simulation als neue Zeichenverwendung	133
<b>4. Wissenschaftliche Bilder</b>	<b>135</b>
4.1 Verschränkung von Bild und Theorie	135
4.2 Klassifizierung wissenschaftlicher Bilder	136
4.3 Bildvermittelte Erkenntnis	139
<b>5. Fazit</b>	<b>150</b>
<b>ANHANG</b>	
<b>1. Abbildungsverzeichnis</b>	<b>155</b>
<b>2. Quellenverzeichnis</b>	<b>156</b>
<b>3. Literaturverzeichnis</b>	<b>157</b>
<b>4. Lebenslauf</b>	<b>174</b>
<b>5. Danksagung</b>	<b>175</b>

# 0. EINLEITUNG - COMPUTERSIMULATIONEN IN DEN WISSENSCHAFTEN

## 1. Motivation und Herangehensweise

Der Titel der vorliegenden Arbeit lautet Semiotik und Simulation und der Begriff Simulation meint computerbasierte Simulationen in den Wissenschaften. Die Motivation sich mit diesem Thema auseinanderzusetzen, resultiert aus der zunehmenden Bedeutung der Simulation in den mathematisierten Wissenschaften. Mittlerweile erweitert die Simulation die traditionellen Methoden der Theorie und des Experiments als neue Methode. Doch obwohl die Simulation als Methode neueren Datums ist, ist sie verglichen mit der Computerentwicklung bereits relativ alt. Denn bereits zu Beginn der 50er Jahre des letzten Jahrhunderts hat John von Neuman mit der Differenzenmethode das erste Simulationsverfahren entwickelt und schon damals wies er auf die Bedeutung des wissenschaftlichen Rechnens hin. Heutzutage werden Stimmen in den Wissenschaften laut, welche die der Simulation zugrundeliegende angewandte Mathematik als die Schlüsselressource des neuen Jahrhunderts für die Wissenschaften bezeichnen und mit ihr die Simulation.<sup>1</sup>

Die Wissenschaften verwenden verschiedene Arten der Simulation: Stochastische, quantenmechanische und deterministische Simulationen. Deterministische Simulationen sind numerische Simulationen partieller Differentialgleichungen und werden zur Darstellung strömungsdynamischer Sachverhalte in der Physik oder den Ingenieurwissenschaften verwandt, während quantenmechanische Simulationen im Molecular Modelling der Chemie Anwendung finden. Die vorliegende Arbeit konzentriert sich in erster Linie auf deterministische Simulation, wenn auch das Ziel ist, einen Begriff der Simulation zu erarbeiten, der auf alle wissenschaftliche Computersimulationen angewandt werden kann.

Die Aktualität der Thematik hat jedoch ihren Preis. Bislang liegen weder in der Philosophie, noch in der Wissenschaftstheorie grundlegende Publikationen zur Simulation als neuer Methode vor. Von daher besteht die vordringlichste Aufgabe der Arbeit darin, ein begriffliches Instrumentarium zu erschließen, das den philosophischen Diskurs zu diesem Thema erlaubt. Die der Arbeit zugrunde liegende Frage lautet: Was ist die Simulation? Beziehungsweise was sind die simulativen Momente der Computersimulation als wissenschaftliche Methode? Und die These der Arbeit lautet: Die Computersimulation ist nicht nur eine neue Methode in den Wissenschaften, sondern auch ein neues Symbolsystem, das auf einem neuen Typus von Schriftlichkeit basiert - der digitalen Schrift. Aus dieser These leitet sich die inhaltliche Aufgabe ab, die in der Differenzierung des philosophischen, an Sprache ori-

entierten Schriftbegriffs besteht und neben der phonetischen Schrift eine formale und neu: digitale Schrift identifiziert. Darüber hinaus motiviert die These den semiotischen Ansatz. Stand die Simulation als neue wissenschaftliche Methode im Mittelpunkt meiner Magisterarbeit,<sup>2</sup> so widmet sich die Doktorarbeit ausschließlich der Simulation als neues Symbolsystem.

## 2. Grundlegender Gedankengang

Beschäftigt man sich mit wissenschaftlichen Computersimulationen, so drängt sich als erstes die Frage auf: Wie muß Wissenschaft strukturiert sein, um eine neue Methode beziehungsweise ein neues Symbolsystem wie die Simulation hervorzubringen? Eine solche Wissenschaft hat Systeme zum Gegenstand, deren strukturelle Zusammenhänge sich in den Wirkungen auf die Elemente des Systems zeigen. Diese Wirkungen lassen sich nicht nur theoretisch beschreiben, sondern formalisieren, indem sie funktionalisiert werden, also indem man bestimmt, wie zwei Wirkungen auf ein Element verrechnet werden - addiert, subtrahiert, multipliziert oder auf Basis komplexerer funktionaler Verknüpfungen. Die basale Annahme einer solchen Betrachtungsweise fordert den Erhalt der konstitutiven strukturellen Merkmale eines Systems im Laufe seiner wissenschaftlichen Verarbeitung: Von der Beobachtung über die theoretische Beschreibung und Formalisierung, bis hin zur Simulation und schließlich Visualisierung.<sup>3</sup> Aus dieser Annahme resultiert das Erkenntnisinteresse der Wissenschaftler an Formalisierungen und Berechnungen.

Eine solche Betrachtungsweise impliziert bereits zwei verschiedene Arten der Schriftverwendung: Eine sprachorientierte, phonetische Schrift für die theoretische Beschreibung und eine formale Schrift für die Formalisierung. Schon an hier muß ein allein an Sprache ausgerichteter Schriftbegriff versagen, schließlich besteht die maßgebliche Leistung moderner Wissenschaft in der Überführung sprachbasierter Zusammenhänge in formalisierte. Oder anders gesprochen: Die maßgebliche Leistung zeigt sich in der zunehmenden semiotischen Fundierung der Wissenschaften aufgrund ihrer Mathematisierung. Und nun - so die These der Arbeit - etabliert die Wissenschaft einen neuen, dritten Typus von Schriftlichkeit, die digitale Schrift, die der Computersimulation zugrunde liegt und um so dringlicher die Differenzierung des Schriftbegriffs erfordert.

---

<sup>1</sup> „Die Komplexität vieler Systeme ... überschreitet bei weitem das Potential konventioneller Verfahren und Rechenanlagen. Diese Situation hat die Entwicklung einer dritten wissenschaftsmethodischen Kategorie erzwungen: die „Computational Science“, die Theorie und Experiment qualitativ und methodisch ... ergänzt.“ Hoßfeld 1991, S. 1

<sup>2</sup> Gramelsberger, G.: Theorie – Simulation – Experiment. Computergestützte Simulation als erkenntnistheoretische Erweiterung der Erklärungs- und Prognosemöglichkeiten in den Naturwissenschaften, Magisterarbeit an der Universität Augsburg 1996. Ziel der Arbeit war es eine Einordnung der Simulation als Methode in ein wissenschaftliches Modell zu erarbeiten sowie die Grenzen der Simulation als finite Approximation aufzuzeigen.

### *- Was ist digitale Schrift?*

Schrift, deren maßgebliches Kriterium nicht mehr die an extrasymbolischen Bezügen orientierte Semantik sein kann, bedarf eines Begriffs, der allein auf der Syntax als Definium basiert. Einen solchen Schriftbegriff hat Nelson Goodman in seiner Symboltheorie formuliert.<sup>4</sup> Schrift grenzt sich laut Goodman als Symbolsystem vom Bild dadurch ab, das es ein syntaktisch disjunktes und differenziertes Symbolschema aufweist im Unterschied zum syntaktisch dichten Symbolschema des Bildes. Ein Schriftbegriff, der auch auf die digitale Schrift anwendbar sein soll, muß diesem Symbolschema gerecht werden. Und dies ist tatsächlich der Fall: Digitale Schrift ist syntaktisch disjunkt - nämlich diskret - und syntaktisch differenziert - nämlich digital differenziert. Das Computeralphabet besteht aus 256 digital unterscheidbaren Zeichen, die aus der Modulation getakteter Maschinenzustände resultieren.<sup>5</sup> Das größte Handicap dieser Schrift ist ihre Unanschaulichkeit, denn sie ist nicht mehr visuell realisiert, sondern allenfalls visuell präsentiert. Aber auch das muß nicht notwendiger Weise der Fall sein, denn getaktete Bitströme lassen sich als Ziffern, Buchstaben, Bildpunkte, Klänge oder mittlerweile als taktile Ereignisse präsentieren. Die Zeichenfunktionen Speichern, Operieren und Präsentieren fallen im Digitalen auseinander.

Visualität scheidet wie zuvor die Semantik als maßgebliches Kriterium für einen differenzierten Schriftbegriff aus, der alle Schriftverwendungen umfassen soll. Übrig bleibt ein, allein an dem Symbolschema orientiertes Schriftverständnis. Die Entkoppelung von der Visualität und die Rückführung auf ein digitales Schema erzeugt ein homogenes Symbolschema, das typisch für die digitale Schrift ist. Anschaulich vergleichen läßt sich das Prinzip der digitalen Schrift mit der Blindenschrift, deren Schema ebenfalls homogen ist, d.h. auf zwei Zuständen basiert – Braillepunkt/keine Braillepunkt.<sup>6</sup> Je nach Konfiguration der Zustände zu Mustern lassen sich verschiedene Zeichen unterscheiden. Die Visualität spielt nur für Sehende eine Rolle, Blinden ist die Schrift allein durch die taktile Erfahrung zugänglich. Die Homogenität bedeutet nicht nur, alle Zeichen aus zwei Zuständen zu erzeugen, sondern auch die Zeichen ineinander überführen zu können. Drauf basiert das Manipulationspotential der Rechner.

### *- Wie ist der Zusammenhang mit der wissenschaftlichen Computersimulation?*

Computersimulationen basieren auf digitaler Schrift, stellen aber eine spezifische Verwendungsweise dar. Andere Verwendungsweisen wären die Textverarbeitung oder die Erzeugung von Grafiken. Die charakteristische Operationalität der wissenschaftlichen Computersimulation ist das Verrechnen der getakteten Maschinenzustände miteinander. Von daher resultiert auch der Name: numerische Simula-

---

<sup>3</sup> Die Problematisierung dieser Annahme, die basal für die Simulation ist und bezüglich Fragen der Linearisierung, Diskretisierung und Endlichkeit heftig diskutiert wird, ist Thema der Magisterarbeit und wird in der vorliegenden Arbeit nicht weiter ausgeführt.

<sup>4</sup> Goodman, N.: Sprachen der Kunst. Entwurf einer Symboltheorie, Frankfurt 1995

<sup>5</sup> Grundlegende Differenzierungseinheit ist das Byte, bestehend aus 8 Bits, das die Modulation 255 verschiedener Zustände erlaubt und Basis der Bytzahlen sowie des ASCII-Kodes ist.

<sup>6</sup> Die Blindenschrift-Zeichen werden aus einem nummerierten Raster von sechs Braillepunkt gebildet.



tion. Die Zeichen werden als numerische Werte gespeichert und verwendet, aber als Bildpunkte präsentiert. Semiotisch läßt sich ein Wert von einem Wort durch die regelbasierte Geordnetheit der semiotischen Basis der Werte differenzieren. Dem Alphabet der Schreibschrift liegt keine regelbasierte Ordnung zugrunde und auch nicht den Buchstabenfolgen der Wörter. Für Werte hingegen läßt sich ein Verfahren zur Erzeugung angeben, wie beispielsweise das Zählkalkül, logische Kalküle oder meßtechnische Relationen. Damit sind Werte auch maschinell erzeugbar, wenn sich die entsprechenden Regeln algorithmisieren lassen. Und: Werte lassen sich regelbasiert ineinander überführen.

### **3. Bedingungen der wissenschaftlichen Computersimulation**

Aus dem skizzierten Ansatz lassen sich Bedingungen ableiten, die zur Kennzeichnung einer wissenschaftlichen Computersimulation notwendig sind. Eine wissenschaftliche Bedingung, welche die formale Erfassung von strukturellen Zusammenhängen und die Funktionalisierung und Quantifizierung der Wirkungen eines Systems voraussetzt. Eine strukturelle Bedingung, welche den Erhalt der konstitutiven strukturellen Merkmale fordert. Eine semiotische Bedingung, welche die charakteristische Operationalität maschinell erzeugbarer und nach definierten Regeln ineinander transformierbarer Zeichen fordert. Und eine mediale Bedingung, welche die Realisierung mit einem syntaktisch disjunkten und differenzierten Symbolschema, das aufgrund seiner Homogenität die Transformation der Zeichen erlaubt, vorsieht. Aus diesen Bedingungen ergibt sich eine Beschreibung der Computersimulation als ein Verfahren zur Darstellung funktionalisierter und quantifizierter Wirkzusammenhänge eines Systems, indem es die verrechenbaren Wirkungen gemäß eines Algorithmus auf den semiotischen Entitäten direkt ausführt. D.h. das Simulative ist die tatsächliche Ausführung also die Nachbildung der Wirkungen eines Systems im Semiotischen und nicht die Beschreibung der Wirkungen, sei dies textlich oder formal. Die Simulation setzt den operativen Symbolismus der formalen Schrift dynamisch um.

- *Was wird sichtbar?*

Als Referenz an unsere Anschauung bedarf es der visuellen Präsentation der numerischen Resultate. Dabei werden zwei weitere Bedingungen für die Simulation notwendig. Zum einen die variable Präsentierbarkeit der Zeichen, wie dies die digitale Schrift gewährleistet. Die Ergebnisse können als Ziffern, Bildpunkte oder Töne dargestellt werden. Zum anderen ein rein quantitativer Effekt auf Basis der rasant anwachsenden Leistungskapazitäten der Rechner. Denn es ist eine Masse an Berechnungen notwendig, um hinreichend komplexe Systeme simulieren zu können und um ausreichend Daten zu erhalten. Die Masse der Daten ist zudem für die Ikonizität der Visualisierung verantwortlich. Die syntaktische Fülle der Simulationsbilder simuliert syntaktische Dichte, die laut Goodman das charakteristische Kriterium für das Symbolsystem Bild ist. Simulationsbilder sind insofern Grenzfälle zwischen Bild und Schrift. Allerdings sind die Simulationsbilder selbst unaussagekräftig. Sie müssen erst mit

Informationen angereichert und mit ihrem theoretischen Kontext verschränkt werden. Dies geschieht mit Hilfe von Verweisungssystemen wie Nummerierungen, Farbwertkodierungen, Legenden, Beschreibungen und mehr. Erst dann entsteht ein komplexes Bild, das als solches für wissenschaftliche Interpretation zu gebrauchen ist.

Der interessanteste Aspekt der Simulationsbilder ergibt sich jedoch aus der Frage: Was wird sichtbar? Lapidar könnte man sagen, die Simulationsbilder sind ikonisch umgesetzte Numerik. Tatsächlich jedoch sehen wir Bilder von Theorien, denn die Visualisierungen zeigen theoretisch formulierte, formalisierte und simulierte strukturelle Aspekte eines Systems beziehungsweise seines dynamischen Verhaltens. Simulationsbilder unterliegen als Bilder von Theorien keiner Begrenzung der Anschauung, sondern allenfalls der Formalisierung und Simulierbarkeit. Sind jedoch keine fiktiven Bilder und sie sind keine Abbildungen. Die wissenschaftliche Computersimulation ist somit ein Symbolsystem das Bereiche, die sich der Anschauung entziehen sichtbar macht, beispielsweise subatomare Bereiche. An dieser Stelle eröffnen sich zahlreiche interessante Aspekte für eine philosophische Diskussion, wie die Frage nach dem Realitätsgehalt der Bilder oder nach dem Anteil der Vorstellungen an den Simulationsbildern, die sich nicht nur aus den Berechnungen ergeben, sondern die in der Theorie verschlüsselt sind.

#### **4. Aufbau der Arbeit**

Dem skizzierten Gedankengang folgend wird im ersten Teil der Arbeit ein kurzer Überblick über den Einsatz des Wissenschaftlichen Rechnens gegeben. Daran schließt sich im zweiten und im dritten Teil eine semiotische Analyse der Zeichensysteme an, die der Entwicklung von der Beschreibbarkeit, über die Berechenbarkeit, hin zur Simulierbarkeit folgt. Abschließend werden im vierten Teil grundlegende Fragen zum Zeichenbegriff, zum Symbolischen und zum epistemologischen Gewinn diskutiert.

# I. ÜBERBLICK – WISSENSCHAFTLICHES RECHNEN

## 1. Simulation als neue Methode

Bevor die Simulation als neues Symbolsystem untersucht wird, soll zuvor die Bedeutung der Simulation für die Naturwissenschaften skizziert werden. Denn als neue Methode erweitert sie aktuell die traditionellen Methoden der Theorie und des Experiments. Der Begriff Simulation kann sich dabei auf verschiedene Bereiche beziehen, denn im naturwissenschaftlichen Kontext wird zwischen der theoretischen Simulation mathematischer Systeme, der experimentellen Simulation materialer Systeme im Labor und der Computersimulation unterschieden. Während experimentelle Simulationen die materiale Beschaffenheit des simulierten Systems oder zumindest deren konstitutiven Eigenschaften erhalten, basieren theoretische Simulationen auf rein symbolischen Modellen. Diese können deterministisch, probabilistisch oder stochastisch, kontinuierlich oder diskret sein.<sup>1</sup> In der Enzyklopädie Philosophie und Wissenschaftstheorie wird darauf hingewiesen, daß theoretische Simulationen mit Hilfe des Computers ausgeführt (numerische Simulation) zur Darstellung der Zeitentwicklung von Systemen dienen, „... die so komplex sind, daß exakte mathematisch-analytische Methoden scheitern ...“,<sup>2</sup> daß sie zunehmend eine heuristische Rolle in den Wissenschaften spielen und darüber hinaus reale Experimente ersetzen. In diesem wissenschaftlichen Umfeld wird die Simulation als ein Verfahren der theoriegestützten Deduktion betrachtet, deren Geltung aus der Korrektheit der Annahmen sowie der Zuverlässigkeit der Ableitungsverfahren resultiert.<sup>3</sup> Die VDI Richtlinie 3633 beschreibt die Simulation als „... das Nachbilden eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierfähigen Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind.“<sup>4</sup>

Die numerische Simulation findet neben der Mathematik in jenen Wissenschaftsbereichen Anwendung, die eine Mathematisierung ihrer Theorien vorweisen, wie etwa in der quantitativen Soziologie, der Chemie oder der Physik.<sup>5</sup> Als Ort des Simulationsgeschehens dienen in der Regel Institutionen

---

<sup>1</sup> Eine andere Einteilung schlägt Friedemann Mattern vor: ereignisorientierte -, transaktionsorientierte -, prozeßorientierte -, zeitgesteuerte- und stochastische Simulation. [Quelle 2: Mattern, F.: Modellbildung und Simulation, 1995, S. 4f]

<sup>2</sup> Blasche, S./Mittelstraß, J. (Hg.): Enzyklopädie Philosophie und Wissenschaftstheorie, 1995, Bd.3, S. 808

<sup>3</sup> Allerdings ist die theoriegestützte Deduktion im strengen Sinne nur für lineare Systeme möglich. Im Bereich nichtlinearer Systeme kommen Heuristiken hinzu.

<sup>4</sup> Zitiert nach [Quelle 2: Mattern, 1995, S. 1]

<sup>5</sup> Das Spektrum der Simulationen zeigt sich exemplarisch im Jahresbericht des Höchstleistungsrechenzentrums HLRZ Jülich für die Jahre 1992 und 1993: Es werden 81 Projekte aus der Vielteilchenphysik, 25 Projekte aus der Elementarteilchenphysik, 38

der Angewandten Mathematik mit angeschlossenen Rechenzentren.<sup>6</sup> Seit den 50er Jahren hat sich die Bezeichnung des *Wissenschaftlichen Rechnens* (scientific computing) für die Methode der numerischen Simulation durchgesetzt. Und bereits 1954 wies John von Neumann in seinem in Deutschland gehaltenen Vortrag *Entwicklung und Nutzung neuerer mathematischer Maschinen* auf die Bedeutung des Wissenschaftlichen Rechnens hin.<sup>7</sup> Diese neueren mathematischen Maschinen müssen leistungsstarke Großrechner sein, die sich in ihrer Architektur und Software grundlegend von gängigen PCs unterscheiden.<sup>8</sup>

Um die entsprechenden Programme für die Simulation einer spezifischen Aufgabenstellung zu schreiben, bedarf es etlicher Monate, meist Jahre der Vorbereitung.<sup>9</sup> An diesem Prozeß sind in interdisziplinärer Zusammenarbeit Naturwissenschaftler, Mathematiker und Informatiker beteiligt. Beginnend mit der Formalisierung der theoretischen Grundlagen des Objektbereiches und der Ausarbeitung der mathematischen Modellierung, folgt die Strukturierung des Berechnungsgitters, die Diskretisierung der Gleichungen sowie die Formulierung der Algorithmen und Programme.<sup>10</sup> Schließlich kann die Berechnung für ausgewählte Werte der Parameter, Anfangs- und Randbedingungen beginnen, die sich an experimentellen Befunden oder theoretischen Annahmen orientieren. Zu guter Letzt werden die umfangreichen Berechnungsdaten ikonisch visualisiert, denn aufgrund der Masse der Daten bieten diese Bilder einen wichtigen Zugang zu den Simulationsergebnissen. Typische Zielrichtungen der Simulation sind dabei die Prognose von Systemverhalten sowie in technischen Kontexten deren Optimierung, die Validierung von Systemen, die Überprüfung von Theorien, die Veranschaulichung von Zusammenhängen sowie die Trainingsunterstützung in diversen Ausbildungsbereichen.<sup>11</sup> Die Simulation bietet Einsichten in Bereiche, die zu klein oder zu groß, zu schnell oder zu langsam, zu gefährlich oder aus ethischen Gründen experimentell nicht zugänglich sind.

---

Projekte aus der Chemie, 14 Projekte aus der Strömungsforschung, 11 Projekte der Nichtlinearen Dynamik, 14 Projekte aus der Astrophysik, 22 Projekte aus der Kernphysik, Geophysik/Meteorologie, Plasmaphysik und sonstiger Gebiete, aufgelistet. Kremer, M. (Hg.): Supercomputing Center '94, HLRZ Jülich, 1994

<sup>6</sup> Führende Institutionen in Deutschland sind beispielsweise das ZAM-Zentralinstitut für Angewandte Mathematik im Forschungszentrum Jülich oder das SCAI-Institut für Algorithmen und Wissenschaftliches Rechnen der GMD-Gesellschaft für Mathematik und Datenverarbeitung in St. Augustin. Beide unterhalten als Partner das HLRZ-Höchstleistungsrechenzentrum, das Großrechner an verschiedenen Standorten mit Hilfe von Datenleitungen verbindet.

<sup>7</sup> Vgl. Hoßfeld, F.: Partielle Differentialgleichungen: Die permanente Herausforderung, 1996, S. 1f. John von Neumann hat nicht nur entscheidende Arbeiten zur sogenannten von-Neumann-Architektur der Computer geleistet, sondern auch die Methode der numerischen Simulation durch die Entwicklung des Differenzenverfahrens (von-Neumann Methode) auf den Weg gebracht.

<sup>8</sup> In der Regel werden Parallelrechner oder Vektorrechner verwendet, wohingegen PCs seriell arbeitende Rechner sind. Weltweit gibt ein Ranking der Großrechner den aktuellen Stand der Technologie in der computergestützten Forschung wieder. [Quelle 3: Meuer, H.-W.: Top 500, 1998]

<sup>9</sup> Dies hat zur Folge, daß fertiggestellte Simulationen, wenn sie zum Einsatz kommen, in ihren mathematischen und algorithmischen Methoden bereits veraltet sind.

<sup>10</sup> Die Triade Modell – Algorithmus – Programm bildet das Kernstück der numerischen Simulation. Helmut Neunzert bezeichnet diese als die „MAP der Wirklichkeit in Computern“. Neunzert, H.: Mathematik und Computersimulation: Modelle, Algorithmen, Bilder, 1995, S. 50

<sup>11</sup> Beispiele wären die Wettervorhersage, die Optimierung von Materialbelastungen, die Validierung von Schaltungen oder die Flugsimulation zu Trainingszwecken.

In den Blick der Öffentlichkeit dürften Computersimulationen erstmals mit den sozialwissenschaftlichen Simulationen der 60er und 70er Jahre gerückt sein.<sup>12</sup> Die spektakulären Szenarien zu Fragen der Weltsituation sowie der aufkommende Planungswille in der Politik fanden in den beiden Studien des Club of Rome *Die Grenzen des Wachstums* (Forrester/Meadows) und *Menschheit am Wendepunkt* (Mesarovic/Pestel) ihren Ausdruck.<sup>13</sup> Ziel war es, quantifizierbare Größen wie Rohstoffressourcen oder Energieverbrauch für die Zukunft anhand gegebener Gleichungssysteme zu berechnen.<sup>14</sup> Die Simulation wurde und wird in diesem Bereich als Prognose- und Planungsinstrument eingesetzt und rückte Auguste Comtes Idee einer *sozialen Physik* in greifbare Nähe.<sup>15</sup> Doch bei aller Euphorie gegenüber den Möglichkeiten der neuen Methode zeigte sich schnell, daß Computersimulationen die Komplexität globaler Situationen stark vereinfachen<sup>16</sup> und daß aufgrund der gesellschaftspolitischen Konsequenzen simulierter Szenarien und Planungsmodelle die neu entstehende Zukunftsforschung als *Wissenschaft des Überlebens*<sup>17</sup> mit Vorsicht zu bewerten ist. Neben den quantitativ faßbaren Aspekten soziologischer Systeme und deren Simulation ist vor allem das Verhalten von Individuen sowie dessen Auswirkung auf eine Gesamtheit von Interesse. Dazu werden sowohl probabilistische und stochastische Simulationstechniken als auch Methoden aus den Bereichen der Künstlichen Intelligenz (KI) und des Künstlichen Lebens (KL) verwendet, die *qualitative Formalismen* ermöglichen.<sup>18</sup> Angelehnt an die Kognitionswissenschaften nutzt man in der Soziologie mit Hilfe der KI-Sprachen LISP und PROLOG Systeme, die auf intelligenten Bewußtseinsoperationen basieren (Expertensysteme) oder auf Elementen des KL wie Neuronale Netze, Zellularautomaten oder genetische Algorithmen.<sup>19</sup> Bei

<sup>12</sup> Die Anfänge der Computersimulation sind jedoch schon älteren Datums. „Ihre [numerische Simulation] *Geburtsstunde* läßt sich durchaus festlegen auf das Jahr 1946, als John von Neumann - zusammen mit H. H. Goldstine - sein programmatisches Manifest über die Zukunft und Notwendigkeit des digitalen Computing schrieb.“ Hoßfeld, F.: Wissenschaftliches Rechnen - Motor der Rechenentwicklung, 1992, S. 2

<sup>13</sup> Forrester, J.: World Dynamics, 1973. Für die zweite Studie schufen Mihailo Mesarovic und Eduard Pestel mit dem Modellierungsprogramm MODEL BUILDER ein komplexes Mehrebenenmodell. Mesarovic, M./Pestel, E.: Menschheit am Wendepunkt, 1974; Pestel, E.: Das Deutschland-Modell, 1978. Vgl. Harbrodt, S.: Computersimulation in den Sozialwissenschaften, 1974, S. 144ff

<sup>14</sup> Dies ist die klassische, deterministische Simulation wie sie auch in der Physik verwendet wird. Doch für die Soziologie bedeutet es eine unnötige Einschränkung, denn: „In vielen Sozialbereichen ist es nämlich weder möglich noch sinnvoll, soziale Beziehungen durch exakte Gleichungen darzustellen, und der „Sinn“ sozialer Interaktionen, wie immer man diesen bestimmen will, ist kaum als Realisation strenger mathematischer Zusammenhänge wiederzugeben.“ Klüver, J.: Soziologie als Computerexperiment, 1995, S.15

<sup>15</sup> „So besteht der wahre positive Geist vor allem darin zu sehen um vorauszusehen, zu erforschen was ist, um daraus auf Grund des allgemeinen Lehrsatzes von der Unwandelbarkeit der Naturgesetze – das zu schließen, was sein wird.“ Comte, A.: Rede über den Geist des Positivismus, 1956, S. 20

<sup>16</sup> Das Mehrebenenmodell von Mesarovic/Pestel war wesentlich komplexer als das erste von Forrester/Meadows, welches die Welt als ein homogenes System modelliert.

<sup>17</sup> „... um mit Hilfe der neuen Methoden der permanenten Überschau und Vorausschau ... die immer komplexeren und krisenbedrohlicheren Entwicklungen der nächsten Jahrzehnte [zu] meistern.“ Jungk, R.: Menschen im Jahr 2000, 1969, S. 10. Ein konkretes Beispiel ist das PLATO-System (Programmed Logic for Automated Teaching Operations) für das DELPHI Spielprogramm, das Mitte der 60er Jahre entwickelt wurde.

<sup>18</sup> Klüver, 1995, S. 8

<sup>19</sup> Neuronale Netze lassen sich beispielsweise zur Modellierung von Übergangsgesellschaften verwenden, Zellularautomaten zur Simulation theoretischer Annahmen über das Interaktionsverhalten verschiedener Gesellschaftsklassen und genetische Algorithmen zur selektiven Konkurrenz von Theorien nach der These von Thomas Kuhn. Vgl. Klüver, 1995, S. 10ff; Kuhn, T.: Die Struktur wissenschaftlicher Revolutionen, 1993

diesen Techniken stehen weniger die Prognose- und Planungszwecke im Vordergrund als vielmehr der Verstehensprozeß dynamischen Systemverhaltens.

Andere Schwerpunkte des Simulierens setzt die Chemie, die über die numerischen Daten der Berechnung chemischer Eigenschaften hinaus qualitative Informationen aus der graphischen Symbolik der chemischen Strukturformeln gewinnt. Die Visualisierung erhält daher neben der Berechnung eine entscheidende Bedeutung.<sup>20</sup> Die Darstellung von Molekülen – früher mit geometrisch-mechanischen Modellen wie Strichformel, Kugelstab- oder Kalottenmodell – wird nun mit Hilfe des molecular modelling zu einer berechneten Graphik, die es erlaubt, anhand der simulierten Moleküle neue Eigenschaften visuell zu identifizieren und die Synthese von Molekülen am Bildschirm planbar zu machen.<sup>21</sup> Aufwendige Bildtechniken erlauben die interaktive Stereo-3D Darstellung der Moleküle, die dem Forscher plastisch vor Augen stehen und die er ähnlich realen Objekten in jede beliebige Richtung drehen kann. Damit erhält er Einblicke in die an sich unsichtbare Welt molekularer Szenarien.<sup>22</sup>

## 2. Deterministische Simulation als Gegenstand der Arbeit

Die für die vorliegende Arbeit relevante Form der Simulation ist die numerische Simulation des Verhaltens komplexer Systeme in Raum und Zeit auf Basis partieller Differentialgleichungen (deterministische Simulation).<sup>23</sup> Die numerische Simulation ist ein Verfahren, welches das Untersuchungsspektrum von mathematisch symbolisierten Systemen erheblich erweitert, indem es komplexere Systeme, für die keine analytischen Lösungen bekannt sind, einer numerischen Handhabung zugänglich macht, gleichwohl ausschließlich auf computergestützter Basis.<sup>24</sup> Die numerische Simulation bietet neben

---

<sup>20</sup> Die Geometrie eines Moleküls ergibt sich aus der Berechnung der Schrödinger-Gleichung für die Elektronenkonfiguration (ab-initio-Methode). Die Steigerung der Rechenkapazitäten ermöglicht die Berechnung komplexerer Moleküle, doch große Moleküle aus einigen hundert Atomen würden auch heutige Großrechner überfordern. Deshalb werden die Bewegungen der Atome mit einer Mischung aus klassischen und quantenmechanischen Verfahren berechnet, die komplexe Molekülsysteme als eine Menge von Massepunkten (Atome) beschreiben. Die Wechselwirkungen der Atome erzeugen ein Kräftefeld, in dem sich die Massepunkte bewegen, wobei relevante Parameter an Meßergebnisse angepaßt oder quantenmechanisch berechnet werden.

<sup>21</sup> Während die geometrisch-mechanischen Modelle nur zu rein didaktischen Zwecken verwendbar sind, „... kann die computergestützte Modellierung die Sichtweise des Chemikers und die Forschungsentwicklung der Chemie verändern. ... Das computergestützte Design ermöglicht die Voraussage von Experimenten und verbessert damit die Effizienz des Entdeckungsprozesses in der chemischen Forschung und des Produktionsprozesses in der chemischen Industrie.“ Mainzer, K.: Chemie, Computer und moderne Welt, 1992, S. 119. Vgl. auch Kaufmann, W./Smarr, L.: Simulierte Welten. Moleküle und Gewitter aus dem Computer, 1994; Horwood, N. (Hg.): Mathematical and Computational Concepts in Chemistry, 1986; Brickmann, J.: Fraktale Dimension in der Chemie, 1988; Brickmann, J./Knapp, W.: Der Computer ersetzt das Labor, 1984

<sup>22</sup> Vgl. Brickmann, J.: Molecular graphics: how to see a molecular scenario with the eye of a molecule, 1992

<sup>23</sup> Hartmut Bossel ordnet die deterministischen Simulationen den strukturtreuen Modellen im Unterschied zu den statistischen Modellen zu. Er unterscheidet zeitabhängige sowie zeit- und raumabhängige deterministische Simulationen. Vgl. Bossel, H.: Simulation dynamischer Systeme, 1989, S. 18f. Alle sogenannten *dynamischen Simulationen* sind zeitabhängig.

<sup>24</sup> „Die großen Fortschritte in der Naturwissenschaft des 19. und 20. Jahrhunderts wie in der klassischen Mechanik, Elektrodynamik und Quantenmechanik waren allesamt im linearen Bereich. Nichtlineare Systeme wurden als exotische Ausnahmen betrachtet. Man tat sogar, als ob alle wesentlichen Phänomene der Welt mit linearen Approximationen hinreichend beschreibbar waren. Kein Wunder, denn die nichtlinearen Differentialgleichungen ... waren zum überwiegenden Teil nicht analytisch lösbar.“

dem rein formalen Weg eine Alternative an, die vor allem für den Bereich der nichtlinearen Differentialgleichungen von Interesse ist.<sup>25</sup> Im Unterschied zum Formalismus der exakten analytischen Lösungen arbeitet die Simulation mit Approximationen und im nichtlinearen Bereich verstärkt mit Heuristiken. Vor allem in der Physik findet dieser Typ der Simulation Anwendung, beispielsweise in der Strömungsdynamik auf Basis der Erhaltungsgleichungen (Euler-Gleichungen oder Navier-Stokes-Gleichungen). Die numerische Simulation spezifischer Lösungen läßt sich - unter Vorbehalt aufgrund der verwendeten Heuristiken und Approximationen - als theoriegestützte Deduktion betrachten, und die Visualisierung der Simulationsresultate erzeugt Bilder dieser Theorien. Dieser Zusammenhang ist für die vorliegende Untersuchung von besonderem Interesse, da die Transformation einer theoretischen Beschreibung in eine formale Struktur und schließlich in ein Bild einen bemerkenswerten Vorgang darstellt. Für die Naturwissenschaften bieten sich auf diese Weise neue Einblicke in theoretische Zusammenhänge und neue Ausblicke auf die Welt. Die Frage ist: Was sind das für Bilder und was zeigen sie?

Angesichts der Tatsache, daß sich die numerische Simulation mittlerweile neben der Theorie und dem Experiment als gängige Methode durchsetzt, ist es erstaunlich, daß in der Wissenschaftstheorie und -philosophie der computergestützten Forschung insbesondere der numerischen Simulation bislang wenig Aufmerksamkeit beschert wurde.<sup>26</sup> Aufgrund der Fortschritte in der Entwicklung der Hochleistungsrechner darf zudem von einer steigenden Tendenz des Einsatzes der Simulation an Stelle des Experiments ausgegangen werden. Aus wissenschaftsphilosophischer Perspektive ist die Frage von Interesse, woher die Simulation ihre welterschließende Funktion über die Theorie hinaus erhält, wenn sie als theoriegestützte Deduktion nicht mehr Aussagekraft besitzen kann als diese selbst? Der Grund dafür dürfte zum einen in den Heuristiken liegen, die für die Simulation nichtlinearer Probleme eine Rolle spielen, und zum anderen in der unterschiedlichen Realisierung von Theorie und Simulation,

---

*Es gab für sie zwar numerische Lösungsverfahren, aber keine Computer, um sie in einer vernünftigen Zeit auszuführen!* Carty, M. J.: Chaos und Systeme, 1995, S. 35. Seit den letzten 40 Jahren hat sich die Rechengeschwindigkeit alle zehn Jahre um den Faktor 100 erhöht und heute werden rund 100 Milliarden Operationen in der Sekunde durchgeführt. Dies erlaubt seit Ende der 70er Jahre die Simulation von Klimaszenarien, die weniger Berechnungszeit erfordern als die simulierte Wetterentwicklung. Für eine Prognose müssen rund 250 Millionen unbekannte Zustandsgrößen wie Luftdruck, Windgeschwindigkeit, Temperatur u.a. auf Basis der Euler-Gleichungen, ein System nichtlinearer partieller Differentialgleichungen, von den Anfangswerten für den Zeitpunkt  $t_0$  ausgehend berechnet werden. Dabei steht ein Berechnungsgitter zur Verfügung, dessen Abstände zwischen den einzelnen Gitterpunkten am Äquator 120 km beträgt. Seit Ende der 90er Jahre konnte das Gitter auf einen Abstand von 60 km verfeinert werden. Dies wurde durch die Weiterentwicklung der Hardware möglich und durch die Parallelisierung der Rechenoperationen. Mit der Verfeinerung des Gitters erhöht sich auch die Genauigkeit der Vorhersage. Vrgl. Trottenberg, U.: Quantensprünge in der Numerischen Simulation, 1998, S. 7ff

<sup>25</sup> Populär wurden manche Effekte der nichtlinearen Dynamik komplexer Systeme in den 80er Jahren unter dem Begriff der Chaosforschung.

<sup>26</sup> Loeck, G.: Der cartesische Materialismus, Maschine, Gesetz und Simulation, 1983; Bossel, 1989; Randow, G. von: Computer-Simulation, Bild statt Welt?, 1991; Mainzer, 1995; Gramelsberger, G.: Theorie – Simulation - Experiment, 1996; Hartmann, S.: The World as a Process. Simulations in the Natural Science, 1996; Mader, A. (Hg.): Computersimulationen: Möglichkeiten zur Theoriebildung und Ergebnisinterpretation, 1996; Lux-Endrich, A./Wachsmann, A. (Hg.): Konstruierte Wirklichkeiten, 1997; Stäudner, F.: Virtuelle Erfahrung: eine Untersuchung über den Erkenntniswert von Gedankenexperimenten und Computersimulationen in den Naturwissenschaften, 1998; Casti, J.: Would-be-worlds, 1997

welche für die Simulation durch den Wechsel ins Medium des Computers zwei maßgebliche Darstellungsvorteile besitzt: den der Dynamik und den der ikonischen Präsentation, die zugleich Abgrenzungskriterien zwischen Beschreibung, formaler Struktur und Simulation sind. Mathematische Gleichungen strukturieren die Relationen konstitutiver Entitäten eines Systems. Im Rahmen physikalischer Zusammenhänge dienen sie als Interpretationsstrukturen (symbolische Modelle) und sind als solche im Medium der Schrift fixiert. Simulationen nun sind Instrumente zur dynamischen Darstellung der schriftbasierten Strukturen. Dies kann als computerbasierte numerische Simulation oder als experimentelle Simulation geschehen, wobei sich Simulation und Experiment in ihrer Realisierung unterscheiden. Ist erstere semiotisch, so ist letzteres material umgesetzt. Trotzdem wird im Falle der Computersimulationen oft von Computerexperimenten gesprochen, die mitunter Experimente ersetzen. Diese Rede verweist auf eine strukturelle Ähnlichkeit zwischen beiden Methoden, die zum einen teoriengeleitet sind, zum anderen eine Anwendung eben dieser Theorien außerhalb ihrer schriftbasierten Funktion darstellen. Für die Simulation ist dies der Berechnungsprozeß, für das Experiment der materiell implementierte Experimentablauf. Beide lassen sich zur Bestätigung von Hypothesen und Prognosen verwenden, wenngleich sie bezüglich des Geltungsanspruches differenziert zu betrachten sind. Kriterien der Abgrenzbarkeit und Wiederholbarkeit gelten für beide Methoden.

### 3. Philosophischer Begriff der Simulation

Obwohl der Begriff der Simulation in der Philosophie explizit keine bedeutende Rolle spielt, zählen die ontologischen, epistemologischen und ästhetischen Aspekte der Simulation zu den grundlegenden Themen der Philosophie.<sup>27</sup> Eine philosophische Auseinandersetzung mit dem Begriff der Simulation müßte den unterschiedlichen Bedeutungen des Begriffs Rechnung tragen, denn die bislang skizzierte, methodenorientierte Interpretation der Naturwissenschaften und der Mathematik ist nur eine Version. Ein anderes Verständnis der Simulation ist in Bereichen wie der Literatur- oder Medienwissenschaften zu finden. Simulation (lat. *simulare*) läßt sich wörtlich als *nachbilden* verstehen und bezeichnet allgemein die stellvertretende Nachbildung eines Prozesses oder von Teilen davon. Im Sinne von *nachahmen* verweist die Simulation auf das Ende einer langen Tradition, die bei Aristoteles mit dem Begriff

---

<sup>27</sup> Der 16. Deutsche Kongreß der Philosophie beschäftigte sich 1993 mit diesem Thema. Das Kolloquium *Code, Medium, Computer - Künstliche Welten* versuchte eine Positionsfindung zum Verhältnis von Philosophie und Neuen Medien. Dabei herrscht jedoch die von Sybille Krämer skizzierte Haltung in der Philosophie vor: „*Die Philosophie ist geprägt durch eine Abstinenz. Sie betrifft die Reflexion der medialen Grundlagen des Denkens und Erkennens. Mit bemerkenswerter Hartnäckigkeit wird, was medial konstitutiv ist, kategorial verleugnet oder marginalisiert.*“ Krämer, S.: Philosophie und Neue Medien, 1995, S. 185. Vgl. Lenk, H. (Hg.): Neue Realitäten - Herausforderung der Philosophie, 1995



der Mimesis ihren Anfang hat.<sup>28</sup> Dabei handelt es sich jeweils um semiotische Kategorien verschiedener Formen der Bezugnahme.<sup>29</sup> Die Auflösung der Abbildungsfunktion durch konstruktive Elemente entbindet die Simulation von einer Verweisstruktur auf einen vorgeordneten Natur- oder Realitätsbereich bis hin zu einem fiktionalen Darstellungsgehalt, der - dank der Neuen Medien - in seiner ästhetischen Verfaßtheit Realismus vorspiegeln kann. Möglich wird dies durch die Emanzipation der Simulation von der abbildenden Darstellungsfunktion zu einem eigenständigen Ereignis und dem damit einhergehenden Wandel von der Repräsentanz zur Präsenz.

Mit dem Einzug der Medien eröffnet sich jedoch eine weitere, postmoderne Deutungsweise, welche in ihrer Bezugnahme auf vorgeordnete, medienvermittelte Wirklichkeiten, die selbst als Simulationen charakterisiert werden, eine rekursive Funktion beinhaltet und so von der *endlosen Simulation* handelt.<sup>30</sup> Die inhaltliche Ausrichtung der endlosen Simulation ist durch die Bezugnahme auf vorgeordnete Zeichen oder Bilder gekennzeichnet. Vor allem die Bilder spielen mit dem Aufkommen der visuellen Medien Fotografie, Film und TV eine zunehmende Rolle und ihre ubiquitäre Präsenz „... schafft nicht nur die traditionellen Deutungen und Bedeutungen ab, sondern die Realität – die sogenannte objektive Außenwelt – gleich mit dazu.“<sup>31</sup> Das Simulationsverständnis in den Medien- und Literaturwissenschaften basiert auf dem Gegensatzpaar von Schein und Realität und postuliert die gelungene Ablösung der Realität durch die medienvermittelten Bilder. Dies scheint durch das Medienspektakel der rumänischen Revolution oder des Golfkrieges hinreichend bestätigt.<sup>32</sup> Schließlich erfüllen sich die Erwartungen beinahe vollkommen mit dem Cyberspace, der als Inbegriff der simulierten Umgebung das vollständige Eintauchen in dieselbe gewährleistet und nach und nach alle Sinne involviert.<sup>33</sup> Im Mittelpunkt dieser neueren Entwicklung steht nach den audiovisuellen Medien nun die Computertechnologie, deren schier grenzenloses Manipulationspotential die realitätsimitierende Erscheinung der

---

<sup>28</sup> Mimesis umfaßt als Ausdruck bei Aristoteles die nachahmende Darstellung der Natur in der Kunst – Epos, Tragödie, Komödie und Musik. „Das Darstellen nämlich liegt den Menschen im Blute von Kindheit an, und dadurch unterscheiden sie sich von den anderen Geschöpfen, daß sie aufs Nachahmen versessen sind. Auch das Lernen beruht anfänglich auf Nachahmen...“ Aristoteles: Poetik, 1959, S. 59. Zur Simulation in den Literatur- und Medienwissenschaften u.a.: Schonberg, A. (Hg.): Simulation und Wirklichkeit, 1988; Rötzer, F. (Hg.): Digitaler Schein. Ästhetik der elektronischen Medien, 1991; Großklaus, G.: Natur-Raum: von der Utopie zur Simulation, 1993; Iglhaut, S. (Hg.): Illusion und Simulation: Begegnungen mit der Realität, 1994; Jung, W.: Von der Mimesis zur Simulation: eine Einführung in die Geschichte der Ästhetik, 1995; Venus, J.: Referenzlose Simulation, 1997; Gendolla, P.: Über Simulationsmodelle, 1997; Kablitz, A/ Neumann, G. (Hg.): Mimesis und Simulation, 1998; Bolik, S. (Hg.): Medienfiktion: Illusion – Inszenierung – Simulation, 1999; Bolz, N.: Die Welt als Chaos und als Simulation, 1992.

<sup>29</sup> „So, wie im Begriff „Mimesis“ sich das semiotische Leitbild der klassischen Antike niederschlägt und so, wie im Begriff „Repräsentation“ sich die Bedingungen des neuzeitlichen Zeichengebrauchs kondensieren, scheint „Simulation“ zum epochalen Markenzeichen semiotischer Konzepte in der Moderne/Nachmoderne zu avancieren.“ Krämer, 1995, S. 187/188

<sup>30</sup> Baudrillard, J.: Der symbolische Tausch und der Tod, 1982; Baudrillard, J.: Agonie des Realen, 1978.

<sup>31</sup> Jung, 1995, S. 230. Ohne den Bezug auf die Realität sind wir in den Endlosschleifen der Simulation gefangen.

<sup>32</sup> Sei, K. (Hg.): Von der Bürokratie zur Telekratie. Rumänien im Fernsehen, 1990; Virilio, P.: Krieg und Fernsehen, 1993; Bredekamp, H.: Das Bild als Leitbild. Zur Überwindung des Anikonismus, 1997

<sup>33</sup> Nach dem Seh- und Hörereignis läßt sich mittlerweile auch das Tastereignis simulieren.

Simulationen als ästhetische Verfaßtheit erlaubt,<sup>34</sup> auch eben für fiktionale Inhalte.<sup>35</sup> Doch bereits das Konzept der Dualität, das Simulation mit Schein und oft auch mit Virtualität identifiziert, stößt im philosophischen Diskurs auf erhebliche Probleme, denn einerseits ist die Simulation wie die Realität durch Wahrnehmung, Sprache und Schrift vermittelt, andererseits läßt sich ein eindeutiges Abgrenzungskriterium zwischen beiden nicht angeben. Die Simulation steht Aspekten entgegen, die auf den Begriff der Realität projiziert werden, wie etwa Existenz, Notwendigkeit, Wahrheit, Objektivität, Originalität oder Natürlichkeit.<sup>36</sup> Oftmals reduziert sich der Gegensatz auf einen naiven Materialismus, der als Unterscheidungskriterium auf den pragmatischen Aufweis der Undurchdringlichkeit der materiell verfaßten Realität verweist. Doch selbst die Undurchdringlichkeit kann mittlerweile simuliert werden, und die Umschreibung der Simulation als Schein wird schwierig.<sup>37</sup> Andererseits leiten sich aus den Simulationsergebnissen in den Naturwissenschaften Konsequenzen ab, die sich in einer Überprüfung an realen Systemen bestätigten lassen und in Form von Technik eine realitätskonstituierende Funktion besitzen. Unter diesen Aspekten läßt sich die Simulation als Verfahren begreifen, dessen Resultate den Status des Virtuellen aufweisen, insofern virtuell als elektronisch realisiert verstanden wird, wobei die sichtbaren Inhalte in unterschiedlicher Weise interpretiert werden und somit in unterschiedlicher Weise Bezug nehmen auf Objektbereiche. In Abgrenzung zu den beiden skizzierten Auffassungen stellt die vorliegende Arbeit einen dritten Ansatz vor und zwar einen semiotisch orientierten.<sup>38</sup> Dabei wird jedoch nicht nur der semiotische Status der Simulationsbilder untersucht, sondern in erster Linie die Erzeugungsmechanismen, die wir Simulation nennen. Der Begriff der Simulation führt dementsprechend zu einem erweiterten Begriff der Schrift.

---

<sup>34</sup> Als Maßstab einer gelungenen Simulation in diesem Sinne kann dann der Verwechselbarkeitsansatz von Bild und Realität der Illusionstheorie gelten und die Simulation erhält den Charakter eines Trompe-l'œil Szenarios. Vgl. Gombrich, E.: Kunst und Illusion, 1978; Gramelsberger, G.: Zur Intersubjektivität ikonischer Wissensvermittlung und deren Wahrheitsfähigkeit, 1999

<sup>35</sup> Dabei wird ein Umkehrprozeß zwischen dem vorgeordneten Referenzbereich der Signifikate und der Simulation deutlich, der sich paradigmatisch im Bereich der Informationsvisualisierung zeigt. Umfangreiche Datenstrukturen, deren Organisation sich mit mathematischen Gleichungen beschreiben lassen, werden naturgesetzliche Strukturen zugrundegelegt. Aus der Simulation anhand der Naturgesetze werden Datenobjekte als Signifikate der Simulation erzeugt und für die Prognose realweltlicher Zusammenhänge genutzt. Das Projekt IVORY der ETH Zürich beispielsweise arbeitet für die Informationsvisualisierung der Korrelation von Finanz- und Zinsdaten mit Hilfe von Newtons Kraftgesetz. [Quelle 4: Sprenger, T.C./et al.: A Framework for Physically-Based Information Visualization, 1998]

<sup>36</sup> „Das Natürliche erscheint unter diesem Blickwinkel als das Noch-nicht-Simulierbare und Noch-nicht-Herstellbare, als ein Rest also, der sich aufzehrt, je mehr die künstlichen Modelle ihre anfängliche Einfachheit und Kargheit überwinden und sich durch Differenzierung und Komplizierung ihrem Vorbild annähern.“ Waldenfels, B.: Ein menschlicher Traum für Wachende, 1995, S. 194/195

<sup>37</sup> In Simulationen wird mit Undurchdringlichkeit (collision detection) gearbeitet und seit neuestem mit der haptischen Erfahrbarkeit der Objekte.

<sup>38</sup> Nicht von ungefähr tendieren die Disziplinen der *zwei Kulturen* zu ersterem respektive letzterem Verständnis, wobei der jeweils andere Aspekt leicht aus den Augen verloren wird. Snow prägte die Unterscheidung zwischen literarischen Intellektuellen und Naturwissenschaftlern in den USA. Vgl. Snow, C.P.: The Two Cultures, 1993. Dies entspricht in etwa der hiesigen Differenzierung zwischen Geistes- und Naturwissenschaften. Nun soll es nach John Brockman eine dritte Kultur geben, deren Protagonisten sich durch ein mediengewandtes und öffentlichkeitswirksames Auftreten auszeichnen und somit die Ideen und Resultate ihrer Forschungen und Theorien in populärwissenschaftlicher Art breiten Schichten zugänglich machen, obwohl sie allesamt dem Lager der *trockenen* Naturwissenschaftler entstammen. Dabei ist anzumerken, daß die bunten Simulationsbilder ihr übriges zur medienwirksamen Darstellung leisten, wie der populärwissenschaftliche Boom der Chaosforschung in den 80er Jahren bewiesen hat oder wie die populärwissenschaftlichen Infotainment-Sendungen der TV-Stationen demonstrieren. Brockman, J.: Die dritte Kultur. Das Weltbild der modernen Naturwissenschaft, 1996

## II. SEMIOTISCHE ANALYSE – BESCHREIBBARKEIT UND BERECHENBARKEIT

### 1. Emanzipation der Schrift von der Sprache

#### 1.1 *Abecedarium Novum Naturae, Charactersitica Universalis, Begriffsschriften*

Es ist viel über die Sprache und ihre Verwendung philosophiert worden, doch seltener wird der Tatsache volle Aufmerksamkeit geschenkt, daß es die geschriebene Sprache ist, die wir dabei vor Augen haben. Vor allem jene Überlegungen basieren auf einer verschrifteten Sprache, die sich mit der Verwendung der Sprache in den Wissenschaften befassen und gegebenenfalls formalsprachliche Ansätze zu etablieren versuchen.<sup>1</sup> So schlägt bereits Francis Bacon eine *Sprachtherapie* auf der Basis von Schriftzeichen vor, welche die Mehrdeutigkeit und Fiktionalität der Wörter kurieren und damit den Gebrauch falscher Ideen unterbinden solle.<sup>2</sup> Dabei denkt er an die Einführung von Charakteren ähnlich den Zahlen, die unabhängig von den gesprochenen Sprachen als geschriebene Zeichen nahezu universell verstehbar sein sollen. Auf Basis solcher Zeichen sollte sein *Abecedarium Novum Naturae* als Begriffsschrift der exakten Indexierung des Wissens dienen.<sup>3</sup> Einen großangelegten Entwurf zu einer *characteristica universalis* und einer *scientia generalis* versuchte Gottfried W. Leibniz. Dazu diente ihm die Organisation der Alphabetschrift als Metapher, denn die Begriffe sollten sich in einem Alphabet des Denkens ordnen lassen. Die *characteristica universalis* ist als ein Werkzeug zu verstehen, welches die Denkprozesse durch die Zeichenverwendung versinnbildlichen, also visuell verding-

---

<sup>1</sup> Beispielsweise: Wittgenstein, L.: *Tractatus logico-philosophicus*, 1997; Carnap, R.: *Der logische Aufbau der Welt*, 1961; Popper, K.: *Logik der Forschung*, 1989; Waismann, F.: *Logik, Sprache, Philosophie*, 1976; Quine, W.v.: *Wort und Gegenstand*, 1980; Langer, S.: *Philosophie auf neuem Wege*, 1979

<sup>2</sup> „Daher knebelt die schlechte und törichte Zuordnung der Worte den Geist auf merkwürdige Art und Weise. Auch die Definitionen oder Bezeichnungen, mit denen sich die Gelehrten in einigen Punkten zu schützen und zu verteidigen pflegen, bessern die Sachlage keineswegs.“ Bacon, F.: *Novum Organon I*, 1990, S. 103

<sup>3</sup> Francis Bacon hatte dabei weniger Zahlzeichen vor Augen, als vielmehr chinesische Schriftzeichen, die sich für ihn dadurch auszeichnen, daß sie sich direkt auf Objekte beziehen und als Schriftzeichen – unabhängig von der unterschiedlichen Aussprache – sowohl von den Chinesen als auch von den Japanern gelesen werden können. Vgl. Eco, U.: *Die Suche nach der vollkommenen Sprache*, 1997, S. 218ff. „Bacon dachte nicht an ein Schriftzeichen, das ein Abbild der bezeichneten Sache liefert oder gar ihr Wesen enthüllt; sein Charakter ist ein konventionelles Zeichen, das sich jedoch auf einen präzisen Begriff bezieht. Sein Problem bestand darin, ein Alphabet der Grundbegriffe zu konstituieren, und in diesem Sinne war sein 1622 zusammengestelltes *Abecedarium Novum Naturae*, das im Anhang seiner *Historia naturalis et experimentalis* figurieren sollte, ein Versuch der Indexierung des Wissens ...“ Eco, 1997, S. 221. Auf eine Schriftsprache mit Charakteren ähnlich der algebraischen oder arithmetischen weist auch 1654 John Webster in seinem *Academiarum examen* hin. Vgl. Eco, 1997, S. 226; Meier-Oeser, S.: *Die Entlastung von der Mühsamkeit des Denkens*, 1993. Die Idee einer Begriffsschrift wie sie bereits zu jener Zeit diskutiert wurde, birgt weniger das Problem in sich geeignete Schriftzeichen zu entwerfen, als vielmehr diese auszusprechen. Denn wie Rene Descartes hinweist „...w enn einer sich für die Elementar begriffe der Synonyme in seiner eigenen Sprache bediente, würde er von den anderen Völkern nicht verstanden, es sei denn, er drückte sich schriftlich aus.“ Descartes Gedankengang wird zitiert nach: Eco, 1997, S. 225

lichen sollte, denn das Typische der Charaktere sei ihre sinnlich wahrnehmbare Gestalt.<sup>4</sup> „Das Ziel unserer Charakteristik ist, so beschaffene Sinnzeichen anzuwenden, daß alle Folgerungen, die aufgestellt werden können, sogleich aus den Wörtern oder Charakteren selbst hervorgehen; ... in der allgemeinen Sprache muß sie [die Folgerung] aus einer Zerlegung der Wörter in ihre Buchstaben bewiesen werden können ...“<sup>5</sup> Im Mittelpunkt dieser Bemühungen steht die symbolische Erkenntnis, die sich der Schriftzeichen bedient und in der Mathematik als verwirklicht gilt, denn „...menschliches Denken wird durch Zeichen vollbracht.“<sup>6</sup> Dabei bedarf die rationale Durchdringung der Welt, wie sie Leibniz und anderen als Vision vorschwebt, der Schrift, um ein symbolisches Abbild zu schreiben und die Relationen der Dinge zu spiegeln. Denn es seien die Gesetze des Denkens, die sich in den Zeichen und Zeichenrelationen symbolisieren ließen, wie George Boole darlegte,<sup>7</sup> und er weist ausdrücklich darauf hin: „In the present treatises, however, it is with written signs that we have to do, and it is with reference to these exclusively that the term „sign“ will be employed.“<sup>8</sup> Auch Gottlob Frege ist sich der „...Vortheile einer angemessenen Bezeichnungsweise“<sup>9</sup> bewußt und würdigt das Programm einer allgemeinen Charakteristik von Leibniz, auch wenn es ihn *riesenhaft* anmutet. Doch: „Man kann in den arithmetischen, geometrischen, chemischen Zeichen Verwirklichungen des Leibnizschen Gedankens für einzelne Gebiete sehen. Die hier vorgeschlagene Begriffsschrift fügt diesen ein neues hinzu ...“<sup>10</sup>

## 1.2 Sprachspiele

Weitere Beispiele ließen sich anfügen, doch diese Hinweise sollen genügen, um auf die Relevanz der Schrift für die Versuche der Konstruktion einer eindeutigen Sprache im Dienste der Wissenschaft aufmerksam zu machen, unabhängig davon, ob es sich um eine zu konstruierende Begriffsschrift handelt oder um eine rein formale Verwendung der Zeichen wie in der Algebra oder der formalen Logik. Sie sollten auch genügen, um die philosophisch motivierte Frage nach dem zu stellen, was die

<sup>4</sup> „Neben Buchstaben und mathematischen Zeichen können auch geometrische Figuren, Bilder oder Modelle Charaktere sein“ Peckhaus, V.: Logik, Mathesis universalis und die allgemeine Wissenschaft: Leibniz und die Wiederentdeckung der formalen Logik im 19. Jahrhundert, 1997, S. 32

<sup>5</sup> Leibniz, G.W.: Fragmente zur Logik, 1960, S. 93

<sup>6</sup> Leibniz, G.W.: Die philosophischen Schriften, Bd. 7, 1973, S. 204. „Zu diesem „Leibnizprogramm“ gehören als Hilfsmittel eine *characteristica universalis*, welche alle Relationen zwischen Dingen in Relationen zwischen Zeichen zu spiegeln erlaubt; eine *logica inventiva*, welche ausgehend von den einfachsten Relationsaussagen der Reihe nach alle Wahrheiten liefert, ferner als *calculus ratiocinator* ein Folgerungskalkül, in dem alle Schritte als bloß syntaktische Umformungen von Zeichenreihen geschehen, und eine *ars iudicandi*, die sachliche Meinungsverschiedenheiten durch Bereitstellung eines rein formalen und voll kontrollierbaren Entscheidungsverfahrens beilegen kann.“ Thiel, Ch.: Kurt Gödel: Die Grenzen der Kalküle, 1992, S. 174

<sup>7</sup> „1st. *Literal symbols*, as *x*, *y*, &c., representing things as subjects of our conceptions. 2nd. *Signs of operation*, as +, -, x, standing for those operations of the mind by which the conceptions of things are combined or resolved so as to form new conceptions involving the same elements. 3rd. *The sign of identity*, =“ Boole, G.: The Laws of Thought, o.Dat, S. 27

<sup>8</sup> Boole, o.Dat, S. 25

<sup>9</sup> Frege, G.: Begriffsschrift und andere Aufsätze, 1964, S. XI

<sup>10</sup> Frege, 1964, S. XII

Schrift ist und wie sie verwendet wird. Denn, wie Susanne Langer anführt, „... steht das Gebäude menschlichen Wissens nicht mehr als eine ungeheure Sammlung von Sinnesmitteilungen vor uns, sondern als ein Gebäude aus Tatsachen, die Symbole, und Gesetzen, die deren Bedeutung sind. Ein neues philosophisches Thema ist für die Zukunft angeschlagen, ein erkenntnistheoretisches Thema, das Verständnis der Wissenschaft. Sein Stichwort ist die Macht des Symbolismus, so wie die Endgültigkeit der Sinnesdaten das einer früheren Epoche war.“<sup>11</sup> Die Symbole sind die neuen Daten, aus welchen sich die *Tatsachen* der Wissenschaften berechnen lassen.<sup>12</sup> Aus der mathematischen Grundlegung der Naturwissenschaften, insbesondere der Physik, resultiert nicht nur eine spezifische Weltanschauung, sondern auch die semiotische Fundierung der Wissenschaften auf der Basis der Schrift. Mittlerweile hat sich die Schrift in diesem Prozeß jedoch so weit von der Sprache emanzipiert, daß das *Spiel* – die Herkunft der Schrift, wie Jaques Derrida es sieht – heute „... zu sich selbst [kommt], indem es die Grenze auslöscht, von der aus man die Zirkulation der Zeichen meinte regeln zu können, indem es alle noch Sicherheit gewährenden Signifikate mit sich reißt, alle vom Spiel noch nicht erfaßten Schlupfwinkel aufstößt und alle Festen schleift, die bis dahin den Bereich der Sprache kontrollierten.“<sup>13</sup> Es gäbe also verschiedene Gründe, die Schrift in den Mittelpunkt einer philosophischen Untersuchung zu stellen. Denn einerseits wirkt sie normierend auf die Sprache ein, wie die skriptographische und die typographische Revolution zeigen,<sup>14</sup> andererseits ist sie das Instrument symbolischer Erkenntnis. Doch es zeichnet sich noch ein weiterer Grund ab, der aus der aktuellen Entwicklung der Computertechnologie resultiert und Derridas Überlegung eine interessante Wendung gibt. Computer - selbst semiotische Maschinen, die im Verständnis von Alan Turing auf der Idee einer schriftbasierten Zeichenverwendung gründen<sup>15</sup> - eröffnen durch ihre enorme Rechenkapazität eine neue Verwendungs- und Darstellungsweise der Schrift. Damit ist nicht die Imitation des Schreibens mit Hilfe von Textverarbeitungsprogrammen oder eine neue Form von Textualität durch das Prinzip des Hypertexts gemeint, sondern die semiotische Modellierung von Objekten und Prozessen auf Basis der numerischen Simulation. Mit der Simulation findet die Schrift insofern zu sich selbst, als sie sich des sprachlich orientierten Symbolcharakters entledigt und vom Medium zum Objekt semiotischer Operationen avanciert.

<sup>11</sup> Langer, S.: Philosophie auf neuem Wege, 1979, S. 29

<sup>12</sup> „Was sich direkt beobachten läßt, ist nur ein Zeichen der »physikalischen Tatsache«; es erfordert Deutung, um wissenschaftliche Aussagen herzugeben.“ Langer, 1979, S. 29

<sup>13</sup> Derrida, J.: Grammatologie, 1974, S. 17/18

<sup>14</sup> Derrida, 1974; Coulmas, F.: Über Schrift, 1981; Feldbusch, E.: Geschriebene Sprache, 1985; Ong, W.: Oralität und Literalität, 1987; Stetter, Ch.: Schrift und Sprache, 1997; Giesecke, M.: Sinnenwandel, Sprachwandel, Kulturwandel, 1992

<sup>15</sup> Der Mechanismus der Turingmaschine basiert auf der Idee der sukzessiven Verarbeitung von Schriftzeichen. „Turing greift dazu auf seine Schulzeit zurück und beschreibt den Vorgang des Rechnens als Notieren von Zahlen nach festen Regeln in den Rechenkästchen karierteter Schulhefte.“ Coy, W.: Gutenberg und Turing: Fünf Thesen zur Geburt der Hypermedien, 1994, S. 71. „The machine is supplied with a „tape“ (the analogue of paper) running through it, and divided into sections (called „squares“) each capable of bearing a „symbol.“ Turing, A.: On Computable Numbers, with an Application to the Entscheidungsproblem, 1964, S. 116

### 1.3 Digitale Zeichen und semiotische Partikel

Vorbereitet wird diese Entwicklung durch die Formalisierung und Mechanisierung der Zeichenverwendung.<sup>16</sup> Während die Formalisierung in der interpretationsfreien und operativen Verwendung der Schrift besteht,<sup>17</sup> delegiert die Mechanisierung die Ausführung der Zeichenoperationen an das maschinelle Medium des Computers. Dabei werden die Zeichen selbst als *digitale Zeichen* in Form unanschaulicher Zustände operationalisiert. Schließlich erlaubt die numerische Simulation die semiotische Modellierung als direktes Operieren auf den Zuständen, denn die digitalen Zeichen werden zu formbaren Objekten der Symbolmanipulation. Visualisiert auf Basis von Farbwertzuordnungen bilden sie die *semiotischen Partikel* der virtuellen Welten. Die aktuellen Rechengeschwindigkeiten von über eine Milliarde Operationen in der Sekunde ermöglichen die Erzeugung und Umformung enormer Mengen digitaler Zeichen und sorgen so für die semiotische Fülle, die notwendig ist, um einen ikonischen Eindruck dieser Welten zu generieren.<sup>18</sup> Die Einsichten, die sich mit diesen Bildern eröffnen, verweisen auf den formal-operativen Erzeugungsmechanismus der entfalteten Datenfluten, wir jedoch glauben Moleküle, Wetterfronten oder Strömungsturbulenzen darin zu erkennen. Doch was haben diese Bilder mit der Schrift zu tun? Dieser Frage nachzugehen ist Thema der Analyse der Zeichensysteme und ihres Wandels von der Beschreibbarkeit zur Simulierbarkeit.

## 2. Zeichensysteme und Zeichen

### 2.1 Typographische Grundeinheiten der Alphabetschrift

Unbestreitbar hat die Schrift die Externalisierung des Wissens durch die Fixierung, Speicherung und jederzeit verfügbaren Präsentation auf einem Trägermedium zur Folge. Aber sie ist auch die Voraussetzung der Formalisierung und Kalkülisierung des Symbolgebrauchs und damit der Externalisierung ihrer eigenen Verwendungsweise, die sich in der intrasymbolischen Relevanz der Zeichen zeigt. Die Sichtbarmachung semantischer Einheiten mit Folgen von Zeichen einer Alphabetschrift führt zur Linearisierung der Informationsdarstellung und diese legt die Idee nahe, das Verfahren der Erzeugung von

---

<sup>16</sup> Vrgl. Krämer, S.: Symbolische Maschinen, 1988; Heintz, B.: Die Herrschaft der Regel, 1993; Mainzer, K.: Computer – Neue Flügel des Geistes?, 1995; Fischer, M.: Schrift als Notation, 1997, S. 81 – 98

<sup>17</sup> Operationszeichen wie +, -,  $\supseteq$ ,  $\subseteq$ ,  $\in$ ,  $\wedge$  oder  $\vee$  symbolisieren Operationsvorschriften und nicht Objekte. Die Variablen werden formal verwendet und können auf beliebige Objekte oder Zustände bezogen werden.

<sup>18</sup> Die semiotische Fülle diskreter Werte simuliert dabei eine syntaktische Dichte, die laut Nelson Goodman die Voraussetzung ikonischer Darstellungsformen ist. Vrgl. Goodman, N.: Sprachen der Kunst, 1995, S. 133ff

Zeichenfolgen zu schematisieren. Der visuelle Dingcharakter lenkt die Aufmerksamkeit auf die Zeichen selbst und gibt damit den Weg zur Abkopplung der Signifikanten von den Signifikaten frei. Dieser Übergang - von der referentiellen zur formalen Verwendung der Ausdrücke als bloße Zeichenfolgen - ist ein wichtiger Schritt in der Symbolverwendung und hat tiefgreifende Folgen für den Zeichengebrauch.<sup>19</sup> Denn er geht mit der Emanzipation der Schrift von der Sprache einher,<sup>20</sup> insofern die Entkopplung von den extrasymbolischen Bezügen die Loslösung von der Lesbarkeit der Zeichenfolgen zur Folge hat. Denn selbst wenn Buchstaben verwendet werden, wären diese zwar lesbar, doch ohne Semantik verlöre die Lesbarkeit ihre Bedeutung, d.h. die Verwendung ist eine rein schriftbezogene. In diesem Sinne unlesbare Schrift läßt sich jedoch nicht mehr als Supplement der Rede zur Reproduktion von Lauten und entsprechenden Sinneinheiten verstehen. Vielmehr gewinnt sie als Grundlage von Kalkülen oder formalen Sprachen an Eigenständigkeit und übernimmt produktive Aufgaben, indem sie operativ zur Zeichenproduktion verwendet wird.<sup>21</sup>

Diese Entwicklung fußt wesentlich auf dem hohen Abstraktionsgrad der Alphabetschrift. Die Buchstaben-schrift ist zwar nur eine Möglichkeit der skriptographischen Umsetzung oral vermittelter Zeichen. Piktogramme, Ideogramme, Silbenschriften dienen dem selben Zweck und zumeist sind Schriften hybride Systeme. Doch das Prinzip des Alphabets erzeugt Bedingungen und Normierungen, welche die Idee der Formalisierung und Mechanisierung des Zeichenumgangs fördern. Die Normierungsleistung des Alphabets zeigt sich in verschiedenen Aspekten. Zum einen bezüglich der Übersetzbarkeit zahlreicher Sprachen auf der Basis des Alphabets, zum anderen aufgrund der einfachen Lehrbarkeit, die das Schreiben des elitären Anspruchs enthebt. Vor allem jedoch in ihrem Prinzip der Zeichenverwendung, denn mit dem griechischen Alphabet, das erstmals die Vokale verschriftet, gelingt die „ ... *fast totale Transformation des Wortes aus dem Klang ins Sichtbare ...*“<sup>22</sup> und damit die Reduktion von Schriftsprache auf kleinste Einheiten. Dazu wird die lautliche Einheit des Wortes in Teile zerlegt und

<sup>19</sup> In ihren Studien hat Sybille Krämer auf diesen Wandel aufmerksam gemacht: Die Entdeckung der symbolischen Differenz zwischen Ausdruck und Gegenstand in der Antike, die ontologische Legitimierung der Zeichenfolgen als Ausdrücke und die Verdrängung des ontologischen durch einen operativen Symbolismus läßt sich von Platon und Aristoteles, über die mittelalterliche orientalische und abendländische Mathematik und Philosophen wie Raimundus Lullus oder Gottfried W. Leibniz, bis zur neuzeitlichen Logik und Mathematik von George Boole, Gottlob Frege oder David Hilbert nachvollziehen. Krämer, S.: *Symbolische Maschinen*, 1988 und Krämer, S.: *Berechenbare Vernunft*, 1991

<sup>20</sup> Allerdings handelt es sich nicht um ein historisches Ereignis, da Schrift von Beginn an auch zu anderen Zwecken als zur Darstellung der Rede verwendet wurde, wie die Nutzung von Ziffern dokumentiert. Die Prononcierung der Emanzipationsidee ist eher als oppositionelle Abgrenzung zur Supplementstheorie sprachwissenschaftlicher Untersuchungen zu verstehen. Vgl. Saussure, de F.: *Grundlagen der Allgemeinen Sprachwissenschaft*, 1967, S. 28ff. „*Die Definition der gesprochenen Sprache als Ausdruck des Denkens und der geschriebenen Sprache als Abbild des Gesprochenen (Abbilddogma) bildet den Kristallisationspunkt der Bestimmung geschriebener Sprache.*“ Feldbusch, E.: *Geschriebene Sprache*, 1985, S. 1

<sup>21</sup> Sybille Krämer unterscheidet zwischen der typographischen Schrift und der phonetischen Schrift. Die Differenz beider „... kann bestimmt werden durch die Polarität »produktiv-reproduktiv«.“ Krämer, S.: *Geistes-Technologie*, 1989, S. 44

<sup>22</sup> Ong, W.: *Oralität und Literalität*, 1987, S. 92. „*Der Grund dafür, warum das Alphabet so spät und nur ein einziges mal erfunden wurde, liegt in der Natur des Klanges selbst. Denn das Alphabet operiert mehr mit dem Klang als die anderen Schriften, indem es ihn direkt auf räumliche Äquivalente reduziert, ihn in kleinere, analytisch genauere, handhabbarere Einheiten zerlegt als eine Silbenschrift: Anstatt des einen Symbols für den Klang ba benutzt man zwei, b und a.*“ Ong, 1987, S. 93

auf Schriftebene als zusammengesetzte Folgen von Buchstaben realisiert (phonographisches Prinzip). Während die Alphabetschrift den Klang der Worte visuell verdinglicht und Sprache in Laut- und Zeichenatome zerlegt, bilden ideographische und piktographische Schriften ganze Sinnzusammenhänge ab.<sup>23</sup> Der Vorteil dieser Art von Zeichen besteht darin, daß sie unabhängig von ihrer Aussprache und damit Lesbarkeit - insofern ihre Bedeutung bekannt ist - als geschriebene Zeichen verstehbar sind.<sup>24</sup> Die Errungenschaften, die sich mit der Verwendung der Alphabetschrift ergeben, verstärken sich durch den Wandel von skriptographischen zu typographischen Zeichensystemen und führen zu einer weiteren Normierung des Zeichengebrauchs zur Repräsentation der gesprochenen Sprache.<sup>25</sup> Denn während ein umfangreiches Typenrepertoire mit Buchstaben, Ligaturen und Abkürzungszeichen die handschriftliche Kodierung von Texten erleichtert, bedarf die typographische Textverarbeitung aus Zeit- und Kostengründen eines möglichst kleinen Zeichenumfangs.<sup>26</sup> Abkürzungen, wie sie zahlreich von den Schreibern im Mittelalter verwendet wurden, verletzen das Prinzip der phonographischen Kodierung der Alphabetschrift. Mit abnehmendem Zeichenrepertoire erleichtert sich aber auch die Informationsvermittlung, da sich die Anzahl der Kodierungsprinzipien und Schriftelemente verringert. Die Folge der zunehmenden Normierung der Zeichenverwendung ist die Reduktion subjektiver Einflüsse auf das Zeichensystem und macht dessen Produkte allgemeinverständlich lesbar.<sup>27</sup>

## 2.2 Semantische Grundeinheiten geschriebener Sprache

In diesem Sinne ist auch die Herausbildung typographischer Grundeinheiten zu verstehen. Während die gesprochene Sprache zwar eine Akzentuierung, aber kaum eine Sequenzierung des Sprechflusses vornimmt, basiert die geschriebene Sprache auf der Klammerung von Informationseinheiten wie Silben, Worten, Sätzen oder Absätzen.<sup>28</sup> Epistemologisch interessant ist, daß die grammatische Form

<sup>23</sup> Begriffsschriften, welche Buchstaben und Buchstabenkombinationen zur Indexierung von Wissensinhalten nutzen, verwenden die Zeichen des Alphabets wie ideographische oder piktographische Schriften, um der Schrift eine polygraphische Funktion zu verleihen. Vgl. Eco, U.: Die Suche nach der vollkommenen Sprache, 1997, S. 206ff

<sup>24</sup> Die chinesische Schrift ist ein Beispiel für diesen Nutzen, denn unabhängig von ihrem Dialekt können sich Chinesen über ihre Schriftzeichen verständigen. Auch die Ziffern als ideographische Zeichen sind nahezu universell verstehbar.

<sup>25</sup> Vgl. Giesecke, M.: Sinnenwandel, Sprachwandel, Kulturwandel, 1992, S. 302ff. Die Diskretisierung der Buchstaben als Lettern geht dabei auf Johannes Gutenberg zurück.

<sup>26</sup> „Gutenberg und manche Frühdrucker nach ihm übersetzten diese Zeichen [Ligaturen und Abkürzungen] in den Maschinencode, weil sie sich von ihren handschriftlichen Vorbildern nicht weit genug absetzen konnten oder wollten. Jedenfalls entsprachen beide Zeichenklassen nicht der Logik der neuen typographischen Textverarbeitung und sie wurden deshalb in der Folge schrittweise fallengelassen.“ Giesecke, 1992, S. 306

<sup>27</sup> Die Frage stellt sich, „... warum bei der handschriftlichen Erfahrungstradierung ... so problemlos gekürzt werden konnte. Ein Grund dürfte sein, daß die Handschriften in aller Regel Medien innerhalb von abgegrenzten Institutionen gewesen sind, und nur auf festgelegten »Dienstwegen« zirkulierten. Die Personen, die mit ihnen zu tun hatten, lasen sie wie Formulare.“ Giesecke, 1992, S. 312. Abkürzungen und Privatschriften finden sich bis heute in persönlichen, handschriftlichen Notizen.

<sup>28</sup> Die Einführung von Wortabständen setzt sich ab dem 9. Jahrhundert durch, die Satztrennung mittels Punkten erst später. Vgl. Koch, P.: Graphé. Ihre Entwicklung zur Schrift, zum Kalkül und zur Liste, 1997, S. 62 sowie Giesecke, 1992, S. 312ff. Allerdings muß geschriebene Sprache die Melodie und Prosodie gesprochener Sprache ersetzen. Die Schwierigkeit zeigt sich heute in den Text-to-speech Programmen.



durch den typographischen Zeichengebrauch beeinflusst ist: „Als Grundeinheit der typographischen Datenverarbeitung hat sich letztendlich der »Aussagesatz« durchgesetzt. In der Normalform besteht er aus Subjekt, Prädikat und Objekt. Durch Variationen dieser Normalform lassen sich verschiedene weitere Satztypen generieren.“<sup>29</sup> Der Wandel des Zeichengebrauchs setzt sich schließlich im 16. Jahrhundert auf breiter Front durch, da einerseits der Lese- und Schreibunterricht der Schulen sich zu dieser Zeit an den neuen typographischen Medien orientiert, andererseits die Handschriften ab der Mitte des 16. Jahrhunderts die Gestaltungsprinzipien der Drucke imitieren.<sup>30</sup> Das Primat der lautsprachlichen Realisierung gegenüber der schriftlichen gilt jedoch bis ins Hochmittelalter: Texte werden laut geschrieben (diktiert), und Lesen ist stets lautes Lesen. Erst mit graphischen Textgliederungsverfahren wird auch die stumme Produktion und Rezeption von Schrifttexten möglich. Damit geht die kommunikative Nähe und die Einbindung in den Entstehungskontext verloren und eine zerdehnte Sprechersituation entsteht.<sup>31</sup> In der Erschließung des Bereichs der kommunikativen Distanz liegt eine entscheidende Leistung der Technologie des Schreibens. Dazu muß eine syntaktische wie semantische Schreibstrategie entwickelt werden, die im Blick auf den potentiellen Leser die kommunikative Situation simuliert und mögliche Fragen durch die Allgemeingültigkeit der Inhalte weitgehend antizipiert.

### 2.3 Beschreiben, Registrieren, Zählen

Doch es ist nicht nur das Schreiben, das die Entwicklung der Schrift prägt. In der Verwendung von Schriftzeichen lassen sich verschiedene Entwicklungsstränge rekonstruieren: Die Nutzung der Schrift zum Beschreiben, Zählen und Registrieren, wobei alle drei Zwecke zu Beginn noch nicht ausdifferenziert sind.<sup>32</sup> Erst die Entflechtung der Vorgänge des Zählens und Beschreibens führt zu einer Spezialisierung der Zeichen und zur Abstraktion der Symbole im Bereich des Zählens. Die Emanzipation des Verfahrens der Beschreibung erlaubt die graphische Symbolisierung von Referenten, die nicht gezählt werden. Im Unterschied dazu gerät mit der Spezialisierung auf das Zählen und Rechnen sowie mit der Abkoppelung der Zahlen von den gezählten Objekten die graphische Realisierung der Zählzeichen selbst in den Mittelpunkt des mathematischen Zeichengebrauchs. Die Bündelung iterierter Zählzei-

---

<sup>29</sup> Giesecke, 1992, S. 317

<sup>30</sup> „Im 18. und 19. Jahrhundert beginnt dann auch der Umbau der Rede, der gesprochenen Sprache, nach den typographischen Normen.“ Giesecke, 1992, S. 327

<sup>31</sup> „Das Schreiben ermöglicht das, was man „kontext-freie“ Sprache ... oder „autonomen“ Diskurs ... nannte, einen Diskurs also, der nicht wie die orale Rede befragt oder angefochten werden kann, weil er sich nämlich von seinem Autor unabhängig gemacht hat.“ Ong, 1987, S. 81

<sup>32</sup> Dies geschieht durch die pragmatisch motivierte Spezialisierung auf das Referieren, Registrieren sowie Zählen und Rechnen und zeigt sich in der Trifurkation der Graphé in Schrift, Kalkül und Liste. Vgl. Koch, 1997, S. 55ff

chen zu Einheiten führt zur Ausbildung von Ziffersystemen und schließlich zum Rechnen mit den Symbolen selbst. Derart verwendete Zeichen unterscheiden sich grundlegend in ihrem Gebrauch von Zeichen in Texten. Ein Mittleres zwischen Beschreiben und Zählen stellt die Technologie des Registrierens zur Speicherung, Präsentation und Verarbeitung von Informationen in Form von Listen dar. Informationssparten, Listeneinträge und Metatexte für das Lesen der Liste bilden eine Struktur, die eine Teilrezeption ermöglicht, welche die Linearität, die für die Produktion erforderlich ist, in der Rezeption umgeht: Einträge, die durch eine Similaritätsrelation mit den Informationssparten verknüpft sind, können sowohl im ganzen, als auch punktuell rezipiert werden. Listen dienen der Vernetzung, Klassifikation, Selektion und Neuordnung von Informationen und sind über die Registrierung hinaus schriftbasierte Werkzeuge zur Verarbeitung von Daten. Dieser Nutzen erhöht sich mit der Realisierung im dreidimensionalen Medium der Kartei.<sup>33</sup> Schließlich entwickeln sich Metasysteme zur Verwaltung der Adressen von Karteikarten oder anderen Informations-trägern. Computer überwinden die Dreidimensionalität und ermöglichen die Handhabung von Listen im n-dimensionalen mathematischen Raum. Beschreiben, Zählen und Registrieren sind Verwendungsweisen der Schrift, welche die Zeichen als sinnhafte Zeichenfolgen (Wörter) oder ideographische Sinnzeichen (Zahlen) verwenden.

#### *2.4 Definition semiotischer Begriffe und Klassen von Zeichensystemen*

Mit der Formalisierung erschließt sich ein weiterer Symbolgebrauch, indem die Zeichen von ihrer Sinnhaftigkeit, also ihrer extrasymbolischen Bedeutung abgekoppelt werden. Die Alphabetschrift, deren Abstraktionsgrad und lineare Darstellungsweise die Grundlage der hier besprochenen Formalisierung und Mechanisierung der Schrift stellt, dient dabei als prototypischer Ausgangspunkt semiotischer Überlegungen zu formalisierten Zeichensystemen. In einer allgemeinen Redeweise läßt sich nämlich ein schriftbasiertes *Zeichensystem* als eine endliche Menge diskreter Zeichen und konventioneller oder expliziter Regeln über den Gebrauch dieser Zeichen zur Erzeugung und Umformung von Ausdrücken oder Zeichenfolgen (Formations- und Transformationsregeln) beschreiben.<sup>34</sup> Der Begriff *Zeichen* bezieht sich dabei auf Buchstaben, Ziffern und andere graphische Konfigurationen, also jene Grundeinheiten der Schrift, die in der Sprachwissenschaft Grapheme genannt werden und welche als Objekt-, Operations- und Hilfszeichen im Zeichensystem spezifiziert sind. *Zeichenfolgen* titulieren Zeicheneinheiten, die keine semantische Interpretation aufweisen, wohingegen der Begriff *Ausdruck*

<sup>33</sup> „Dadurch daß hier das Trägermedium zerschnitten ist, stellt es keine einheitliche Fläche mehr dar. ... Ein einzelner „Eintrag“ kann potentiell wesentlich länger sein als bei der Liste und gegebenenfalls selbst wieder eine Liste oder einen ganzen Text darstellen.“ Koch, 1997, S. 73. Die Verbindung zu elektronisch realisierten Datenbanken und Hypertexten liegt auf der Hand.

<sup>34</sup> Regeln sind Anweisungen für die zulässige Bildung und Umformung von Zeichenfolgen.

im traditionellen Verständnis des Begriffs Zeichen zu verstehen ist, also für sinnhafte Zeicheneinheiten wie Worte, Sätze oder Piktogramme.<sup>35</sup> Ausdrücke verweisen auf einen referentiellen Zeichengebrauch, der auf einen vorgeordneten Objektbereich referiert. In einem solchen Zeichensystem besitzen die Ausdrücke einen extrasymbolischen Symbolgehalt und damit eine Stellvertreterfunktion.

Die Entkopplung von Zeichen und Bezeichnetem, jene Entwicklung, die wir Formalisierung nennen, vollzieht sich in zwei Schritten: vom referentiellen zum formalen und vom formalen zum formalistischen Zeichengebrauch, der hier als formal-operativer bezeichnet wird.<sup>36</sup> Indem von der Stellvertreterfunktion der Ausdrücke abstrahiert wird, fungieren einzelne Zeichen als *Variablen*. Als Variablen in einem referentiellen Zeichensystem sind sie immer bestimmt, also spezifischen Ausdrücken, Sätzen, Kategorien oder Gegenständen zugeordnet. Ein solches *formales System*, das einen gewissen referentiellen Charakter beibehält, dient der Artikulation von Eigenschaften oder relationalen Strukturen zwischen den vorgeordneten Objekten, oder es intendiert als Modell die Exemplifikation guter Rede, wahrer Urteile oder folgerichtiger Schlüsse, insofern die Objekte sprachlicher Natur sind oder Tatsachen entsprechen. Basismodell ist dabei das Sprach- und Schriftsystem der natürlichen Sprache, von welchem spezifische Variablen und Ausdrücke ausgewählt werden, die im Rahmen des Zeichensystems dann gemäß der Intention verwendet werden. Den ausgewiesenen Variablen und Ausdrücken werden Gesetze hinzugefügt, deren Befolgung den Rahmen korrekter Operationen innerhalb des Zeichensystems vorgibt. Beispielsweise werden in der aristotelischen Logik bestimmte Variablen und Ausdrücke als Prädikate, andere als Subjekte oder logische Formworte klassifiziert und anhand von Definitionen in ihren konkreten Bedeutungen - Begriffswort und Bedeutung des umgrenzten Begriffes - festgelegt. Die logische Form der so *gezähmten* Sprache ist analysierbar und unter Einhaltung bestimmter Gesetze wie des Satzes vom Widerspruch reglementierbar.<sup>37</sup> Auf diesem Weg läßt sich aus

---

<sup>35</sup> Wird eine Zeichenfolge semantisch (extrasymbolisch) interpretiert, so wird sie in einen Ausdruck transformiert. Ist ein Ausdruck von seiner semantischen Interpretation abgekoppelt, wird er als Zeichenfolge tituliert. An die Zeichen, Zeichenfolgen bzw. Ausdrücke und Regeln werden spezifische Anforderungen gestellt, die entscheidend von der Intention abhängen, für welchen Verwendungszweck das Zeichensystem konstruiert wurde. Gilt die Aufmerksamkeit des Autors der Normierung umgangssprachlicher Praxen, der Abbildung semantischer Begriffseigenschaften, der Konstruktion neuer Ausdrücke oder der Kalkülisierung gegebener Zeichensysteme? Die Intention entscheidet über die referentielle oder formal-operative Verwendung der Ausdrücke bzw. Zeichenfolgen, die intrasymbolische und gegebenenfalls extrasymbolische Interpretation, die syntaktische Ausbildung der Form sowie den Leistungsumfang des konzipierten Zeichensystems. Je nach Konzeption und Umsetzung werden Kriterien wie Eindeutigkeit, Endlichkeit, Konsistenz, Entscheidbarkeit sowie die Gelingenskriterien wie Wahrheit oder Richtigkeit dominant.

<sup>36</sup> Die Verwendung der Unterscheidung zwischen einem formalen und einem formalistischen System ist in der Literatur uneinheitlich: Für Helmut Schnelle ist ein formales System eines, das „1. Von jeder ontologischen Bestimmung der Entitäten und Objekte, deren Ordnung und Form das System repräsentiert (insbesondere ist die Frage nach der Realisation des Systems irrelevant); 2. Von den speziellen Zeichen- und Sprachmitteln, die zur Darstellung des formalen Systems benutzt werden“ abstrahiert. Schnelle, H.: Zeichensysteme zur wissenschaftlichen Darstellung, 1962, S. 31. Sybille Krämer gibt an: „Die Aristotelische Syllogistik ist zwar formal, jedoch kein formalistisches System. Dabei sei unter einem „formalistischen System“ ein System verstanden, in welchem die Richtigkeit von Ableitungen innerhalb des Systems nachgeprüft werden kann, ohne daß man die Bedeutungen der in den Ableitungen benutzten Ausdrücke und Symbole in Rechnung stellen muß.“ Krämer, 1988, S. 75

<sup>37</sup> Auf dieser Basis lassen sich dann durch Umformungen Regeln gewinnen, z.B. *A kommt jedem B zu und B kommt jedem C zu: A kommt jedem C zu* (Schlußregel Barbara).

einem normalsprachlichen Satz ein formalsprachlicher Satz gewinnen, der innerhalb des Zeichensystems spezifiziert ist, der aber aufgrund der referentiellen Ausrichtung an den vorgeordneten Objektbereich gekoppelt und dem Basismodell natürlicher Sprache verhaftet bleibt (extrasymbolische Interpretation).

Der Schritt nun zu einem *formal-operativen Zeichensystem* besteht in der Abkoppelung der bestimmten Variablen und Ausdrücke von einem vorgeordneten Objektbereich. Dies bedeutet, die Zeichen weder als umgangssprachliche Ausdrücke zu werten noch ihnen eine Stellvertreterfunktion zuzubilligen. Sie markieren lediglich Gruppierungen beliebiger, diskreter Entitäten, deren Ordnung sich ausschließlich aus der regelbasierten Anwendung ergibt. Für das Zeichensystem hat die Unbestimmtheit weitreichende Folgen, denn es müssen die zuvor durch den Objektbereich implizierten Voraussetzungen expliziert werden. Impliziert der Objektbereich beispielsweise eine bestimmte Reihenfolge der Ausdrücke, so muß in einem formalistischen Zeichensystem explizit angegeben werden, ob die Reihenfolge der Zeichen beliebig ist oder nicht.<sup>38</sup> Diese Art der Zeichenverwendung läßt sich als *operativer Symbolismus* bezeichnen,<sup>39</sup> d.h. die Verwendung der Zeichen generiert sich aus den Regeln des Systems und sucht keine inhaltliche Orientierung im vorgeordneten Objektbereich. Die Regeln nehmen lediglich auf die syntaktische Gestalt der Zeichen Bezug. Dazu bedarf die formal-operative Zeichenverwendung spezifischer syntaktischer Anforderungen wie der Schriftlichkeit und damit der Linearisierung der Zeichenverwendung. Beides sind notwendige Bedingungen für das formale Operieren mit Zeichen.<sup>40</sup> Die Dominanz der Syntax reduziert die Semantik der Zeichen auf deren intrasymbolische Bedeutung, die sich in den Operationsvorschriften bzw. in der Interpretation bezüglich ihrer Zulässigkeit erschöpft und operational handhabbar wird. Formal-operative Systeme können aufgrund ihrer in sich geschlossenen und auf sich selbst angewandten Operationalität auch als Kalkülsysteme bezeichnet werden.<sup>41</sup>

---

<sup>38</sup> Beispielsweise muß geklärt werden, ob im Zeichensystem Kommutativität erlaubt ist oder nicht.

<sup>39</sup> Vgl. Anm. 1, Seite 9. „Formale Axiomensysteme sind bloße Kalküle und können als solche keinen inhaltlichen Wahrheitsbegriff für Formeln oder Sätze definieren, sondern nur den Begriff der Ableitbarkeit einer Figur eines bestimmten Typus ...“ Stekeler-Weithofer, P.: Grundprobleme der Logik, 1986, S. 155. Die verwendeten Zeichen-(folgen) besitzen in einem formal-operativen System keine extrasymbolische Bedeutung mehr, denn „... die Grundidee der Formalisierung besteht darin, das Manipulieren von Symbolreihen von ihrer Interpretation abzutrennen.“ Krämer, 1988, S. 176

<sup>40</sup> Als herausragende Beispiele für die Verwendung graphischer Zeichen und die damit einhergehende Linearisierung nennt Sybille Krämer die indischen Ziffern mit ihrem Stellenwertprinzip und Gottlob Freges Linearisierung der logischen Semantik in seiner Begriffsschrift. Krämer, 1988, S. 175f

<sup>41</sup> „Ein Kalkül ist eine Herstellungsvorschrift, nach welcher aus einer begrenzten Menge von Zeichen unbegrenzt viele Zeichenkonfigurationen hergestellt werden können.“ Krämer, 1988, S. 59

## 2.5 Konsequenzen der Formalisierung für die Zeichenverwendung

Was bedeutet die Formalisierung für das einzelne Zeichen? Der Übergang vom referentiellen zum formal-operativen Symbolgebrauch trennt den Gebrauch der Zeichen von ihrer semantischen Interpretation. In einem referentiellen Zeichensystem stehen die Ausdrücke in formaler Supposition. Dies gilt für fast alle Worte der Umgangssprache.<sup>42</sup> Es liegt auf der Hand, daß in formal-operativen Zeichensystemen keine formale Supposition vorliegt, da die Zeichen keinen extrasymbolischen Bezug aufweisen. Allerdings kommt auch ein formalisiertes System nicht ohne Bedeutungen der verwendeten Zeichen aus. Diese beziehen sich jedoch lediglich auf die intrasymbolische Funktion der Zeichen, die wohlunterscheidbaren und definierten Zeichenklassen angehören, wie Variablen, Konstanten, Operations- und Hilfszeichen und mehr.<sup>43</sup> Für die Frage nach dem Charakter der Zeichen eines formal-operativen Zeichensystems ist zu beachten, daß die Zeichentheorien in der Regel unter dem Begriff *Zeichen* einen sinnhaften Ausdruck verstehen, der basierend auf der Konzeption von Charles S. Peirce mit dem Mittel-, Objekt- und Interpretantenbezug eine triadische Relation aufweist. „Wenn irgend Etwas diese drei Bezüge nicht aufweist, so handelt es sich auch nicht um ein vollständiges Zeichen.“<sup>44</sup> Nach Max Bense läßt sich die Zeichenrelation folgendermaßen darstellen:  $Z = R(M, O, I)$ . In formal-operativen Zeichensystemen kommt es jedoch in erster Linie auf die Grapheme als Zeichen an, also auf deren materiale Beschaffenheit, nicht darauf, wofür die Zeichenfolgen stehen. Da Zeichen traditionell gerade über ihre Eigenschaft, etwas zu repräsentieren, definiert werden,<sup>45</sup>

<sup>42</sup> Formale Supposition: Der Ausdruck *Peter* bezeichnet den Menschen Peter. Materiale Supposition: In „*Hund*“ steht der Ausdruck *Hund* als Substantiv in materialer Supposition.“ Bochenski, I./Menne, A.: Grundriß der formalen Logik, 1983, S. 23. Schreibregeln erlauben die Unterscheidung zwischen formaler und materialer Supposition: *Der Hund ist ein Substantiv* ist falsch, da hier nicht der Ausdruck *Hund* gemeint ist. Inwieweit materiale Supposition in formal-operativen Zeichensystemen existiert, hängt von der intrasymbolischen Interpretation ab bzw. von der selbstreferentiellen Bedeutung der Zeichen aufgrund der in den Regeln oder der Metatheorie festgelegten Eigenschaften.

<sup>43</sup> Beispielsweise unterscheidet David Hilbert in seinem Aufbau der Gesamtmathematik: „... I. Individualzeichen (meist griechische Buchstaben) ... II. Variable (lateinische Buchstaben) ... III. Zeichen zur Mitteilung (deutsche Buchstaben) ...“ Hilbert, D.: Neubegründung der Mathematik, 1965b, S. 165/166. Bochenski und Menne erklären die wichtigsten Verwendungen der Zeichen. Vgl. Bochenski/Menne, 1983, S. 19 - 22

<sup>44</sup> Walther, E.: Allgemeine Zeichenlehre, 1974, S. 48. Durch die von Peirce unterschiedenen Bezüge läßt sich die Einteilung in Quali-, Sin- und Legizeichen (nach Charles Morris: Tone, Token, Type) sowie in Spezifikationen des M-Bezugs (MM, MO, MI), O-Bezugs (OM, OO, OI) und I-Bezugs (IM, IO, II) und damit in zehn ausgezeichneten Zeichenklassen geben. Interessant im Zusammenhang formaler Zeichensysteme wäre gegebenenfalls das argumentisch-symbolische Legizeichen: „Nach Peirce ist das argumentisch-symbolische Legizeichen – oder kurz das Argument – die zehnte und höchste Zeichenklasse. Das Argument ist das Zeichen eines vollständigen, geregelten (gesetzmäßigen) Zusammenhangs, in dem es nicht auf die Objekte, die nur symbolisch bezeichnet werden, ankommt, sondern auf die geregelten Zusammenhänge, wie sie in Schlußfiguren, Kalkülen usw. vorkommen.“ Walther, 1974, S. 82. Allerdings ist zu beachten, daß für Peirce der Zerfall der Worte in Silben und dieser in Laute die degenerative Semiose vom Legizeichen zum Qualizeichen darstellt. Der Laut ist ein Qualizeichen mit dem Mittelbezug MM. Hier wird zudem deutlich, daß das Primat der gesprochenen Sprache, wie es in den Sprachwissenschaften und der Semiotik anzutreffen ist und von Jacques Derrida kritisiert wurde, den Blick auf die graphischen Zeichen verstellt. So schreibt Ferdinand de Saussure in seinen *Grundlagen der Sprachwissenschaft* in Abschnitt §3 Kritik der Schrift: „... tatsächlich arbeitet jede Sprache mit einer bestimmten Anzahl deutlich unterschiedener Lauteinheiten. Dieses System ist das einzig Wirkliche, auf das es dem Sprachforscher ankommt. Die Schriftzeichen sind nur ein Abbild davon, dessen Genauigkeit festzustellen.“ Saussure, 1967, S. 40. Zurecht wird dies in Frage gestellt, vgl. Krämer, 1997 oder Koch, 1997

<sup>45</sup> So schreibt Charles S. Peirce: „Jedes hinlänglich vollständige Zeichen bezieht sich auf verschiedene wirkliche Objekte.“ Peirce, Ch.: Neue Elemente, 1998, S. 37. Der Zeichenbegriff ist hier wesentlich umfangreicher angelegt. Für Peirce sind deshalb *Ikon* und *Index* entartete Zeichen. Das *Ikon*, da es als ein Zeichen definiert ist, „... dessen Eigenart, welche es in die Lage setzt, ein Zeichen derjenigen Sorte zu werden, zu der es gehört, einfach als eine seiner Qualitäten in ihm liegt. Eine geometrische Figur z.B. die auf Papier gezeichnet ist, kann das *Ikon* eines Dreiecks oder einer anderen geometrischen Gestalt sein.“

rekurrieren formal-operative Zeichensysteme auf unvollständige Zeichen bzw. auf einen stark reduzierten Zeichenbegriff, der sich auf den Zeichenträger konzentriert und ein spezifisches Verständnis von Designat und Interpretant aufweist.<sup>46</sup> Die Reduktion besteht darin, daß einzelne Buchstaben und andere Zeichen verwendet werden, die ihre intrasymbolische Bedeutung im Rahmen des Zeichensystems aufgrund von Regeln oder durch metatextuelle Festlegungen erhalten. Da die Zeichen einer semantischen Interpretation entbehren, können sie aus beliebigen graphischen Konfigurationen gebildet sein, vorausgesetzt, diese sind unterscheidbar und reproduzierbar. Die primäre Funktion der Zeichen und Zeichenfolgen in formal-operativen Zeichensystemen besteht in ihrer definitiven Identifikation, unabhängig von subjektiver Interpretation.

Dies bedeutet, daß Zeichen in formal-operativen Zeichensystemen sowohl eine ähnliche Funktion als auch Eigenschaften aufweisen, wie sie Nelson Goodman in seiner Symboltheorie den Zeichen von Notationssystemen zugeschrieben hat, allerdings ausschließlich auf den syntaktischen Teil bezogen.<sup>47</sup>

„Kurz, die von einem Notationssystem geforderten Eigenschaften sind Eindeutigkeit, syntaktische und semantische Disjunktivität und Differenzierung. ... Ein System ist also dann und nur dann notational, wenn wir theoretisch festlegen können, daß jede Marke zu höchstens einem besonderen Charakter gehört und jeder Gegenstand Inskriptionen von höchstens einem besonderen Charakter erfüllt.“<sup>48</sup> Der Unterschied besteht darin, daß Zeichen von Notationssystemen etwas notieren und daher vorgeordnete Gegenstände denotieren. Dies ist für die Zeichen der formal-operativen Zeichensysteme nicht der Fall, da die entsprechenden Inskriptionen vakant sind und keinen extrasymbolischen Erfüllungsgegenstand aufweisen.<sup>49</sup> Trotz dieses Unterschieds sind die syntaktischen Eigenschaften, wie sie Goodman für die Zeichen von Notationssystemen beschreibt, für Zeichen in formal-operativen Zeichensystemen von Bedeutung. Er gliedert Zeichen in einen syntaktischen und semantischen Teil. Für den syntaktischen Teil sind die entscheidenden Kriterien die Disjunktivität und Differenziertheit. Disjunkt meint: Ein Zeichenträger (Marke) kann nur zu einem Charakter gehören. Eine Marke kann nicht

---

Pierce, 1998, S. 41 „Die andere Form entarteter Zeichen ist als Index zu bezeichnen. Er ist als Zeichen definiert, das sich zu einem solchen eignet, weil es sich in einer wirklichen Relation mit seinem Objekt befindet. Ein Wetterhahn z.B. ist ein solches Zeichen.“ Peirce, 1998, S. 41. Für Charles W. Morris resultiert die Semiose aus „...dem, was als Zeichen wirkt, aus dem, worauf sich das Zeichen bezieht, und aus dem Effekt, der in irgendeinem Rezipienten ausgelöst wird und durch den die betreffende Sache ihm als Zeichen erscheint. Diese drei Komponenten der Semiose sollen jeweils Zeichenträger, Designat und Interpretant heißen; ...“ Morris, Ch.: Grundlagen der Zeichentheorie, 1998, S. 57

<sup>46</sup> Das Designat beschränkt sich auf die intrasymbolische Interpretation (vakante Inskriptionen auf semantischer Ebene), der Interpretant wird automatisiert, d.h. seine Interpretationskompetenz läßt sich mechanisieren.

<sup>47</sup> Goodman, N.: Sprachen der Kunst, 1995, S. 125ff; Vrgl. Scholz, O.: Bild, Darstellung, Zeichen, 1991, S. 82ff

<sup>48</sup> Goodman, 1995, S. 150/151

<sup>49</sup> „... im Objekt-Englisch hat weder ein »ktn« noch ein »k« irgendeinen Erfüllungsgegenstand. ... Inskriptionen ohne Erfüllungsgegenstände können vakant genannt werden. Vakanz kann entweder durch einen Charakter entstehen, dem kein Erfüllungsgegenstand zugewiesen wurde, oder dadurch, daß es solche Erfüllungsgegenstände, wie sie verlangt werden, nicht gibt, oder durch die explizite Klausel, daß der Charakter keinen Erfüllungsgegenstand haben soll.“ Goodman, 1995, S. 141. Für formal-operative Systeme kann man diese Klausel als gegeben für einen vorgeordneten Objektbereich annehmen. Oder mit Willard O.V. Quine gesprochen, es handelt sich nicht um Gegenstands-Variablen, die auf irgendwelche Gegenstände als ihre Werte referieren. Vrgl. Quine, W.O.: Die Wurzeln der Referenz, 1972, S. 138ff

ein a und gleichzeitig ein b sein. Differenziert meint: Es läßt sich bestimmen, zu welchem Charakter jede Marke gehört. Das Symbolschema ist so konstruiert, daß die Inskriptionen nicht ineinander übergehen, sondern (endlich) unterschieden sind. Inskriptionen sind realisierte Zeichenträger, die zu einer bestimmten Klasse von Marken gehören, beispielsweise als Linienzug einen bestimmten Buchstaben darstellen. Ein Beispiel für ein disjunktes und differenziertes Symbolschema ist das Alphabet als eine endliche Liste von Marken (Buchstaben), aus der sich ein Zeichensystem konstruieren läßt. Alle Marken sind wohlgeformt bzw. lassen sich von nicht wohlgeformten unterscheiden. Reproduzierbarkeit im Sinne einer Transkription oder Kopierung ist möglich, ohne die Entstehungsgeschichte des Textes berücksichtigen zu müssen. Ist ein Zeichensystem syntaktisch nicht disjunkt und differenziert, dann handelt es sich um ein syntaktisch (diskontinuierlich oder durchgängig) dichtes System, wie beispielsweise der Bereich der reellen Zahlen. Syntaktische Dichte ist laut Goodman eine notwendige Bedingung für bildhafte Zeichensysteme. Ihre Reproduzierbarkeit kann allenfalls approximativ sein, auch mit heutigen Verfahren. Die Identität ist dementsprechend von der Entstehungsgeschichte abhängig. Oder mit anderen Worten: Es läßt sich kein eindeutiges Notationsverfahren für Bilder angeben. Analog dem syntaktischen Teil kann man für den semantischen von Disjunktivität und Differenziertheit sprechen. Der Bezug ist jedoch nicht die Klasse von Inskriptionen, sondern die Klasse von Gegenständen, auf welche die Inskriptionen angewendet werden. Ist etwas semantisch disjunkt, so dürfen keine zwei Charaktere einen Anwendungsgegenstand gemeinsam haben. Für die semantische Differenziertheit gilt, daß die Klassen entscheidbar sind. Beide Eigenschaften führen zu einem Höchstmaß an semantischer Eindeutigkeit. Die natürliche Sprache kann aufgrund ihrer alphabetischen Kodierung als syntaktisch disjunkt und differenziert sowie semantisch mehrdeutig bezeichnet werden. Allenfalls formale Sprachen mit Bezug auf einen Objektbereich sind syntaktisch wie semantisch disjunkt und differenziert.<sup>50</sup> Doch wie bereits erwähnt, sind die Inskriptionen der Zeichenträger formal-operativ verwendeter Zeichensysteme vakant und besitzen keine extrasymbolischen Erfüllungsgegenstände. Es ist eine Frage der Perspektive, ob intrasymbolische Interpretationen wie die Verwendung eines Zeichenträgers als Variable, Konstante, Argument oder Funktor als abstrakte Erfüllungsgegenstände in Form von Definitionen - oder besser: Erfüllungsvorschriften - angesehen werden, die jeweils unterschiedliche Eigenschaften aufweisen. Wenn ja, gilt die Forderung der semantischen Differenziertheit, da die Zuordnung eines Zeichenträgers zu einer Erfüllungsvorschrift wie Funktor oder Argument eindeutig entscheidbar sein muß. Hingegen muß keine semantische Disjunktheit vorliegen, da voneinander verschiedene Zeichenträger eine Erfüllungsvorschrift gemeinsam haben können.<sup>51</sup> Zudem lassen sich

---

<sup>50</sup> Für Notationssysteme sind folgende Eigenschaften gefordert: „*Eindeutigkeit, syntaktische und semantische Disjunktivität und Differenziertheit. ... es sind Merkmale, die notationale Systeme ... von nichtnotationalen Systemen unterscheiden.*“ Goodman, 1995, S. 150/151

<sup>51</sup> Die semantische Disjunktheit gilt für Zeichenklassen, die eindeutig einer Erfüllungsvorschrift zugeordnet sein müssen.

Operationszeichen als Notationen von Operationsvorschriften verstehen, auf die alle Bedingungen von Notationssystemen zutreffen. Die Betrachtung des operativen Symbolismus macht deutlich, daß der Objektcharakter der Zeichen in den Mittelpunkt rückt.<sup>52</sup> Die Zeichen selbst werden in Form von Variablen zum Material der Symboloperationen, und die Erfüllungsvorschriften und Regeln geben an, wie das Material zu verwenden ist.<sup>53</sup> Die Gestaltqualität der Zeichen bzw. die Eigenschaften, welche die syntaktische Disjunktheit und Differenziertheit gewährleisten, erlangen für die primäre Funktion der formal-operativen Zeichensysteme - die definitive, syntaktische Identifikation von Zeichen und Zeichenfolgen unabhängig von subjektiver Interpretation - einen großen Stellenwert.<sup>54</sup> Eine hohe Gestaltqualität ist die Voraussetzung für die Normierung der Zeichen, wie sie sich beim Übergang vom skriptographischen zum typographischen Umgang mit Texten entwickelt hat.<sup>55</sup> Und sie ist eine Voraussetzung für die Identifizierung im Sinne einer eindeutigen und von subjektiven Interpretationen unabhängigen Perzeption.<sup>56</sup> Darüber hinaus stellen manche Zeichensysteme „...nicht nur dar, sondern man erkennt an ihnen ihr Konstruktionsprinzip und ihren Zusammenhang mit den anderen Zeichen des Systems“.<sup>57</sup>

## 2.6 Interpretationsmöglichkeit formaler Zeichensysteme

Die Zeichenverwendung in formal-operativen Zeichensystemen ist unbestimmt, d.h. die Zeichen können für jedes beliebige Objekt stehen.<sup>58</sup> Der Nutzen liegt in der interpretationsfreien Verwendung der Zeichen als Material syntaktischer Operationen. Im Gegensatz dazu lassen sich formale Zeichensysteme als symbolische Modelle verstehen, die auf einen Objektbereich bezogen und damit konkreti-

<sup>52</sup> Helmut Schnelle artikuliert die Anforderungen an Kalkülzeichen wie folgt: „a) Die Sinnesdaten, die als Zeichen zu verwenden sind, seien für das optische Sinnesorgan des Menschen wahrnehmbar. b) Sie seien mit Hilfe der üblichen Druck- oder Schreibverfahren erzeugbar oder erzeugt. c) Sie seien Schwärzungen oder Färbungen auf einheitlich gefärbtem flächigem Untergrund. d) Sie seien für die menschliche Perzeption deutlich in selbst nicht weiter zerlegbare Grundkonfigurationen zerlegbar und aus diesen konstruierbar, und zwar eindeutig, d.h. auf eine und nur eine Weise.“ Schnelle, 1962, S. 49

<sup>53</sup> Moderne Kalkültheorien definieren deshalb Sprache in diesem Sinne wie folgt: „By a language, in the general sense used in semiotics, is meant any system of objects, called symbols, which can be produced in unlimited quantity, like the letters of ordinary print or the phonemes of speech, and combined into linear series called expressions.“ Curry, H.B./Feys, R.: *Combinatory Logic I.*, 1958, S. 23

<sup>54</sup> „Bei möglichst hoher Gestaltqualität muß eine möglichst hohe charakteristische Vielfalt erzielt werden, um die Identifizierung durch möglichst viele typische Stellen zu erleichtern und gegen physiologische Mängel bei der Perzeption und Störungen der Zeichenstruktur selbst immun zu machen.“ Schnelle, 1962, S. 53. Vgl. Krämer, S.: *Symbolische Erkenntnis bei Leibniz*, 1992

<sup>55</sup> So waren die von Gutenberg verwendeten Zeichenklassen der Ligaturen und Abkürzungen den Kodierungen der mittelalterlichen Skriptorien entlehnt und finden sich in heutigen Druckschriften nicht mehr. „Mit den Ligaturen werden Schriftzeichen, die oft nacheinander beim Schreiben benutzt werden, zu einem komplexen Zeichen zusammengeschlossen; die Einzelbuchstaben werden verstümmelt oder neutraler gesprochen: abgekürzt“ Giesecke, 1992, S. 307. Die Lesbarkeit als perzeptives Moment wird durch die Vielfalt und unterschiedliche Handhabung der Abkürzungen beeinträchtigt.

<sup>56</sup> Aktuell ist diese Thematik heute für die maschinelle Texterkennung, wie die Normierung der Schrift der neuen Europa-Kennzeichen für Autos veranschaulicht.

<sup>57</sup> Schnelle, 1962, S. 53. Helmut Schnelle gibt diesbezüglich als Beispiele Notationen binärlogischer Verknüpfungen von Frege, Peirce, Lesniewski u.a. an.

<sup>58</sup> Die Unbestimmtheit der Zeichen in Computern geht prinzipiell weiter, da jede binäre Notierung programmgesteuert verschieden kodiert werden kann. So läßt sich die ursprünglich als Zahl kodierte Notierung als Farbe oder Klang darstellen.



sierbar sind. Die logische und arithmetische Interpretation von Kalkülen oder die Verwendung formaler Theorien in den Wissenschaften sind Beispiele dafür. Die Anwendung formaler Zeichensysteme auf einen Objektbereich strukturiert diesen, da die Ontologien den eingesetzten Objektklassen und den Regeln des Zeichensystems entsprechen müssen und nicht kontradiktorisch interferieren dürfen.<sup>59</sup> Im Rahmen einer modelltheoretischen Einordnung lassen sich referentielle Zeichensysteme als *Modelle von etwas* verstehen, also als Abbildungen vorgeordneter und in diesem Sinne originärer Objektbereiche. Da Modelle in der Regel nicht alle Attribute des zu repräsentierenden Originals umfassen, sondern nur die als jeweils relevant eingestuft, basieren sie auf einer Abstraktionsleistung. Bereits die Unterteilung des Objektbereichs in Individuen und Attribute stellt eine abstrahierende Interpretation dar.

Die Angleichung eines Modells an das Original kann primär strukturell (formal) oder material (inhaltlich) erfolgen.<sup>60</sup> Eine formale Angleichung sieht von der Verknüpfung der Attribute mit einer semantisch verstandenen Bedeutung ab, so daß formale Gegebenheiten übrigbleiben (formale Zeichensysteme).<sup>61</sup> Die materiale Angleichung kann in einem Spektrum analoger bis isohyler Modelle erfolgen. Erstere werden durch Um- und Neukodierung aller materialer Beschaffenheiten charakterisiert, während letztere als kodierungsinvariante Abbildung die größtmögliche materiale Angleichung repräsentieren. Eine isomorphe und isohyle Modellabbildung stellt eine Kopierung seines Originals, also ein adäquates Modell dar. Ein Modell kann als Original eines neuen Modells oder auch als Modell seiner selbst aufgefaßt werden. Viele Attribut- bzw. Prädikatklassen sind Systeme. Ein System definiert sich durch wenigstens eine Zusammenhangsrelation jedes Elements innerhalb derselben Klasse, so daß die Gesamtheit der Klassenelemente bezüglich dieser Relation ein einheitlich geordnetes Ganzes bildet. Wissenschaftliche Modelle sind in der Regel Systeme und werden zu unterschiedlichen Zwecken eingesetzt: Als Demonstrationsmodelle zur Veranschaulichung von Zusammenhängen, als Experimentalmodelle zur Ermittlung oder Überprüfung von Hypothesen, als abstrakte Modelle um Sach-

---

<sup>59</sup> „Während sie in der gewöhnlichen Sprache unvermeidlich erscheinen, können die logischen Paradoxa in keiner der gegenwärtig verwendeten formalisierten Sprachen abgeleitet werden ...“ Henle, P.: Sprache, Denken, Kultur, 1975, S. 150

<sup>60</sup> „Unter Attributen sind Merkmale und Eigenschaften von Individuen, Relationen zwischen Individuen, Eigenschaften von Eigenschaften, Eigenschaften von Relationen usw. zu verstehen.“ Stachowiak, H.: Allgemeine Modelltheorie, 1973, S. 134. Individuen kann man als Attribute nullter Stufe bezeichnen, während die eigentlichen Attribute eine erste (Eigenschaften der Individuen, Relationen zwischen Individuen), zweite (Eigenschaften von Eigenschaften oder Relationen, Relationen zwischen Relationen) und weitere Stufen einnehmen können, entsprechend der stufen- bzw. typentheoretischen Einteilungsweise. Die symbolische Repräsentation der Attribute geschieht durch Prädikate, wobei angenommen wird, daß es zu jeder Attributklasse wenigstens eine sie repräsentierende Prädikatklasse gibt. Mathematische oder physikalische Kontinua lassen sich durch endliche Attribut-, bzw. Prädikatklassen diskretisieren. Präterierte Attribute werden in der Modellabbildung nicht berücksichtigt, während abundante Attribute im Modell keine originalseitige Entsprechung aufweisen. Präterition (Verkürzung) und Abundanz sind quantitativ explizierbar, wohingegen Kontrastierung (Überbetonung von Attributen) nicht allgemein erfaßbar ist.

<sup>61</sup> Die Abbildungs-Isomorphie als maximale strukturelle Angleichung führt Original-Individuen in Modell-Individuen und Original-Attribute in Modell-Attribute über, wobei die Stellenzahl der Attribute beibehalten wird. Ein dreistelliges Original-Attribut beispielsweise wird als dreistelliges Modell-Attribut präsentiert. Demgegenüber steht der Fall der minimalen strukturellen Angleichung, die die Gesamtklasse aller Attribute auf ein einziges modellseitiges Individuum verkürzt (monadisches Modell).

verhalte in logisch gebündelter Form zu vermitteln oder als operative Modelle möglicher Zielaußenwelten zur Entscheidungs- und Planungshilfe. Die axiomatisch-deduktive Methode als spezielle Form der Zeichenverwendung beispielsweise kann als Modell wissenschaftlichen Vorgehens verstanden werden, so wie auch von Aristoteles impliziert und in Euklids Elemente umgesetzt. Die Betonung des Modellcharakters ist jedoch von Bedeutung, da es ansonsten zu Mißverständnissen bezüglich des Geltungsbereiches kommen kann.<sup>62</sup> Formal-operative Zeichensysteme leiten sich nicht aus einem vorgeordneten Objektbereich ab, d.h. sie sind weder Abbildungen noch Abstraktionen wie referentielle oder formale Zeichensysteme.<sup>63</sup> Dennoch können sie als Modelle fungieren, die im nachhinein auf einen Objektbereich angewandt werden. Sie sind also weniger Modelle von etwas, sondern eher *für etwas*. Natürlich können auch Modelle, die von ihrem vorgeordneten, ursprünglichen Objektbereich abgekoppelt und für einen anderen Bereich verwendet werden, Modelle für etwas sein. Modelle in diesem Sinne sind konstruktiv, da sie Interpretationsstrukturen konstituieren, die auf einen Objektbereich angewendet werden. Allerdings zielt die Referenz auf einen nachgeordneten, nicht auf einen vorgeordneten Objektbereich. Für formal-operative Zeichensysteme ist die Interpretation nicht wesentlich, solange sich das Interesse auf die syntaktischen Eigenschaften des Zeichensystems konzentriert. Wenn es jedoch als Textur einer Anwendung dient, wie dies in den Wissenschaften üblich ist, kann die Interpretation für unterschiedliche Objektbereiche vorgenommen werden.<sup>64</sup> Dies bedeutet aber auch, daß für den selben Objektbereich verschiedene Texturen verwendet werden können, d.h. es gibt kein ausgezeichnetes (wahres) formales Zeichensystem.

Doch was ist dann das Ziel der Formalisierung? Es ist wohl die im Laufe der Jahrhunderte entwickelte Einsicht, daß *„die symbolische Erkenntnis, eine Erkenntnis also, die sich nicht Begriffen (Ideen), sondern wie in der Mathematik Symbolen (Zeichen) bedient, ... zentrale Bedeutung für das menschliche Denken“* hat.<sup>65</sup> Normierte und formalisierte Sprachen bzw. deren Zeichensysteme als Darstellungs- wie Operationsinstrumente der symbolischen Erkenntnis erlauben die Generierung einer Ordnung der Entitäten, die entweder aus einem vorgeordneten Objektbereich abstrahiert oder ohne extrasymbolischen Bezug konstruiert wurde. Solche Systeme sind übersichtlicher und einfacher als das normal-

<sup>62</sup> „Daß Beweise immer syllogistisch-deduktiv seien, ist schon bei Aristoteles ein bloßer wissenschaftstheoretischer Glaubenssatz, der an der wissenschaftlichen Praxis vorbeiredet und sich nur an dem Logik-Bild, nicht an der Frage seiner Angemessenheit orientiert. ... Man sollte daher das ‚dogmatische‘ (Miß-) Verständnis eines Logik-Bildes oder eines Modells einer Wissenschaftslehre von dem Gebrauch solcher Bilder und Modelle zu Vergleichs-, Unterscheidungs- und Artikulationszwecken, zur Erstellung geordneter Terminologien und Notationen (usw.) unterscheiden.“ Stekeler-Weithofer, 1986, S. 124

<sup>63</sup> Tatsächlich bilden die formalen Zeichensysteme einen Mittelbegriff zwischen referentiellen und formal-operativen. Ein referentielles Zeichensystem kann durch die Abkopplung von der extrasymbolischen Bedeutung der Zeichen in ein formales System überführt werden.

<sup>64</sup> Ein formalisiertes Zeichensystem ist bezüglich der Interpretationsmöglichkeiten multifunktional verwendbar, „da die undefinierten Termini eines formalen deduktiven Systems willkürliche Symbole ohne Interpretationen und wörtliche Bedeutungen sind, sind die Postulate überhaupt keine Aussagen oder Feststellungen, sondern bloße Formeln.“ Henle, 1975, S. 94  
<sup>65</sup> Peckhaus, V.: Logik, Mathesis universalis und allgemeine Wissenschaft, 1986, S. 31/32

sprachliche Basismodell und entsprechen den methodischen Anforderungen und Kriterien eher als die natürliche Sprache.<sup>66</sup> Zudem garantiert die deduktive Methode eine lückenlose Umformung und Ableitung neuer Zeichenfolgen. Die *Leistung* eines Zeichensystems liegt in seiner Abbildungs-, Abstraktions- oder Konstruktionsfunktion, je nach Verwendungszweck. Doch erst der Übergang vom referentiellen zum formal-operativen Zeichengebrauch führt zur Entdeckung, daß Sprache – besser: Schrift<sup>67</sup> - syntaktisch konstruktiv und operativ verwendet werden kann.<sup>68</sup>

### 3. Schriftbasierte Zahlensysteme und Zahlen

#### 3.1 Zähl- und Ziffernsysteme

Die Entwicklung von Zeichen und Zeichensystemen nimmt mit dem Symbolisieren, Registrieren und Zählen von Anzahlen ihren Anfang.<sup>69</sup> Dabei zeigt sich die Tendenz zur Formalisierung im Bereich des Zählens und Operierens mit Größen und die Algebra avanciert zum prototypischen Verwendungsbereich formal-operativer Zeichensysteme. Das Referieren auf Gegenstände und das Zählen dieser Gegenstände sind zu Beginn noch in einem einzigen Verfahren gebündelt, wobei hier unter Zählen das Iterieren der Symbolisierungen der Anzahlen zu verstehen ist. Erst nach und nach differenziert sich einerseits die Spezialisierung auf das Referieren respektive auf das Zählen und Rechnen, andererseits werden die Zeichen im Bereich des Zählens verselbständigt. Dies bedeutet einen Übergang von der gegenständlichen zur symbolischen Repräsentation von Zahlen. Schließlich wird die Iteration von Zählzeichen (Zählreihen) und damit die rekursive Erzeugung von Zahlen aus einem Einheits-

---

<sup>66</sup> Weitverbreitet ist die Auffassung, die semantische Mehrdeutigkeit der natürlichen Sprache sei ein Mangel, der durch die Formalisierung von Sprache behoben werden müsse: „Die Umgangssprache ist weithin durch historische Zufälligkeiten so, wie sie heute ist. Sie enthält eine Fülle von Mehrdeutigkeiten und Inkonsequenzen. In mancher Hinsicht mag das vorteilhaft sein – für die Logik jedoch sind es Mängel. Darum benutzt die moderne Logik mit großem Vorteil die formalistische Sprache der Kalküle.“ Bochenski/Menne, 1983, S. 17

<sup>67</sup> „Es geht also um die Erfindung und Nutzung eines Typus von Schrift, der vom phonetischen Alphabet mit seiner engen Verbindung zur gesprochenen Sprache wohlzuunterscheiden ist. Ein solches Schriftsystem sei „operative Schrift“ genannt. Wir verstehen darunter ein genuin graphisches System, das aus einem diskreten Vorrat elementarer Zeichen besteht, sowie aus Regeln zur Bildung und Umbildung der Zeichen und Zeichenreihen. Dabei nehmen die Regeln ausschließlich bezug auf die syntaktische Gestalt, nicht aber auf die Bedeutung der Ausdrücke. Ein solches System kann auch als „symbolische Maschine“ gekennzeichnet werden.“ Krämer, S.: Schrift und Episteme am Beispiel Descartes', 1997, S. 115/116

<sup>68</sup> Dazu bedarf es der Explizierung konstituierender Regeln im syntaktischen Umgang mit den Zeichen sowie der Absicherung spezifischer Eigenschaften, welchen das formal-operative Zeichensystem (Kalkülsystem) unterliegt. Um festzustellen, daß das Kalkülsystem konsistent ist, muß es als Regelwerk in sich geschlossen und überschaubar sein. Dies ist der Fall, wenn es über einen endlichen Vorrat an Grundzeichen und Operationen verfügt, so daß entscheidbar ist, ob eine gebildete Zeichenfolge zulässig ist oder nicht.

<sup>69</sup> „Im Rahmen erster komplexerer Formen der Wirtschaftsorganisation wird es notwendig, Abgaben, Verpflegung, Vorratshaltung usw. in einem körperexternen Medium zu registrieren, weil die Informationsmenge nicht mehr memorisierbar ist. Seit dem 8./7. Jahrtausend v. Chr. werden zunächst Steine, dann kleine Formen aus gebranntem Ton als Zählhilfen aufbewahrt ...“ Koch, 1997, S. 51

Zahlzeichen durch Individualzeichen zur Zusammenfassung mehrere Einheits-Zahlzeichen in ein additives Ziffernsystem überführt.<sup>70</sup> Dabei bedienen sich Ziffernsysteme eines Kunstgriffes, der darin besteht „... die unbegrenzte Menge der Zahlen auf eine Weise überschaubar und beherrschbar zu machen, für die das menschliche Gedächtnis nicht zur Grenze wird. Das aber ist der Fall, sofern wir Zahlen dadurch bilden, daß wir von einer begrenzten Menge von Individualzeichen ausgehen und einer Regel, die genau vorgibt, wie aus diesen wenigen Individualzeichen alle möglichen Zahlen gebildet werden können.“<sup>71</sup> Jeder, der die Individualzeichen und Regeln kennt, kann Zahlen bilden und entsprechend der zugeordneten Beschreibung (Wortname) lesen.

Die Ersetzung der additiven Zählsysteme im Mittelalter durch das Stellenwertprinzip des indischen Ziffernsystems führt nicht nur ein neues Zeichensystem für Zahlen ein, es ermöglicht darüber hinaus das Darstellen der Zahlen wie das Operieren mit diesen in ein und demselben Medium, dem der schriftlichen Zeichensysteme auf Papier.<sup>72</sup> Aufgrund der Endlichkeit der Grundzeichen sowie der Regelmäßigkeit der Operationen mit diesen Zeichen zur Erzeugung neuer Zeichen stellen Ziffernsysteme formale Zeichensysteme dar. Um jedoch in einem Positionssystem wie dem indischen Ziffernsystem eindeutig operieren zu können, bedarf es eines Zeichens für eine leere Stelle. Die Null als das Leere (sunya) wird von den Indern als ein solches Zeichen eingeführt.<sup>73</sup> Ein Punkt oder ein Kreis sind numerische Inskriptionen für das Leere in den indischen Inschriften, und ab dem 9. Jahrhundert n. Chr. wird der symbolische Umgang mit dem Leeren operationalisiert, indem die bis heute gültigen Rechenregeln eingeführt werden. Das Besondere des indischen Ziffernsystems ist sein dezimales Stellenwertprinzip, das es erlaubt, die Grundrechenarten zu algorithmisieren. Dazu ist nicht nur das Symbol der Null eine Voraussetzung, sondern auch die Einführung negativer Zahlen, die durch besondere Zeichen gekennzeichnet werden. Aus neun Ziffern (123456789), dem Zeichen für Null (0) sowie der Kennzeichnung negativer Zahlen (̄) lassen sich alle ganzen Zahlen generieren sowie mit ihnen gemäß den Vorschriften der Grundrechenarten operieren. Das Ziffernsystem ist zur Darstellung ganzer Zahlen für die Rechenoperationen Addition, Subtraktion und Multiplikation vollständig.

<sup>70</sup> „Seit dem 3. Jahrtausend v.Chr. sind uns Dokumente überliefert, aus denen zu schließen ist, daß verschiedene antike Hochkulturen unabhängig voneinander Zählreihen durch Zählsysteme bildeten, in denen nicht nur ein und dasselbe Zeichen fortlaufend aneinandergesetzt, sondern Zeichengruppen gebildet und diese durch Individualzeichen ersetzt wurden: die Zählreihe ist mit Hilfe von Ziffern gebildet.“ Krämer, 1988, S. 9

<sup>71</sup> Krämer, 1988, S. 10

<sup>72</sup> Vgl. Krämer, 1988, S. 48ff. Rechenbrett oder Rechensteine waren nicht mehr von Nöten. Die Algoristen setzten sich in Europa Ende des Mittelalters gegen die Abakisten durch und mit ihnen die indischen Ziffern und das Rechnen auf Papier.

<sup>73</sup> Sowohl die Ägypter als auch die Griechen besaßen bereits ein Lückenzeichen. „... PTOLEMAIOS verwendet in seinen Tabellen als Lückenzeichen o, was vielleicht den Anfangsbuchstaben von **ouden** (=nichts) bedeutet ...“ Gericke, H.: Geschichte des Zahlbegriffs, 1970, S. 47. „Dieses Wort [sunya] haben die Araber mit al-sifr übersetzt; daraus entstand cifra, das noch bis GAUSS die Bedeutung Null hatte.“ Gericke, 1970, S. 47. „... die Null wird in Indien erstmals im 9. Jahrhundert n.Chr. verwendet und findet in Europa erst im 13. Jahrhundert durch das „Algorismus“ betitelte arithmetische Lehrbuch des SACROBOSCO Verbreitung!“ Thiel: Philosophie und Mathematik, 1995, S. 112

Für das Bruchrechnen ist jedoch die Einführung neuer Zeichen und Regeln erforderlich. Das Rechnen mit Verhältnissen führt zu Zahlen, die gemäß der lateinischen Übersetzung für Verhältnis (ratio) als rationale oder gebrochene Zahlen bezeichnet werden. Verhältniszahlen lassen sich als Brüche darstellen, wobei zwei Zahlen übereinander angeordnet und durch einen Strich getrennt werden ( $\frac{a}{b}$ ). Brüche entsprechen Teilen von ganzen Zahlen, die mit Hilfe eines Trennungszeichens (,) numerisch endlich oder periodisch unendlich notiert werden. Die Idee, numerische Zeichensysteme auf geometrische Systeme anzuwenden, führt jedoch zu Problemen und macht auf die Möglichkeit neuer Zahlen aufmerksam, die sich nicht mit den bekannten Zeichen darstellen lassen. Das Verhältnis der Seite eines Quadrats zu seiner Diagonalen weist beispielsweise eine Größe auf, die sich mit den bislang erwähnten Zahlzeichen nicht notieren läßt. Wird der Seite des Quadrats die Länge 1 zugeordnet, so entspricht die Größe der Diagonale einer Zahl, die nicht als Bruch zweier teilerfremder Zahlen darstellbar ist: Wurzel 2, deren numerische Formulierung eine Zahl aus einer nicht abbrechenden Folge rationaler Zahlen ist, die den Wert der Diagonale approximiert. Zur Erzeugung dieser Formulierung muß ein Näherungsverfahren definiert und ausgeführt werden, das eine konzentrierte Folge sich einander-nähernder rationaler Zahlen erzeugt. Dabei entsteht „... die durch die konzentrierte rationale Zahlenfolge  $a_n$  dargestellte reelle Zahl  $a$  ( $a_n$ )“. In der Analysis schreibt man statt „ $a$  ( $a_n$ )“ häufig „ $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n$ “, gelesen „Limes (d.i.: Grenzwert) der Folge  $a_n$  für  $n$  gegen Unendlich“. <sup>74</sup> Die rationale Zahl  $p$  läßt sich eindeutig einer reellen Zahl  $a$  ( $p$ ) zuordnen, so daß sich der Eindruck ergibt, man könne reelle Zahlen mit rationalen Zahlen in der Veranschaulichung auf der Zahlengerade identifizieren. Reelle Zahlen ohne Entsprechung einer rationalen Zahl sind analog dieser Terminologie irrationale Zahlen wie eben Wurzel 2. <sup>75</sup> In der heutigen Bezeichnung lassen sich **N** die Menge der natürlichen Zahlen, **Z** die Menge der ganzen Zahlen, **Q** die Menge der rationalen Zahlen und **R** die Menge der reellen Zahlen unterscheiden. Der Zugang zu diesen Zahlen ergibt sich für die natürlichen und ganzen Zahlen durch Ordnungs- oder Kardinalzahlen, also durch das Erzeugen von Zählseinheiten durch Nachfolgebeziehungen oder durch die Anzahl der Elemente einer Menge, für die rationalen Zahlen durch algebraische Operationen und für die reellen Zahlen durch die Vervollständigung der Zahlengerade zur Meßbarkeit jeder beliebigen Strecke. <sup>76</sup>

<sup>74</sup> Thiel, 1995, S. 147

<sup>75</sup> „Im 16. und z.T. 17. Jh. haben sich nicht nur die Brüche und irrationalen Zahlen, sondern auch die Null, die negativen und die komplexen Zahlen in der Algebra durchgesetzt, und sie werden auch alle als Zahlen behandelt, d.h. man führt mit ihnen die üblichen Rechenoperationen durch.“ Gericke, 1970, S. 68

<sup>76</sup> Zählen, Rechnen und Messen kennzeichnen die Schritte zur Entwicklung reeller Zahlen oder analog der Bourbakischen Einteilung: Mengenlehre, Algebra und Topologie. Vgl. Bourbaki, N.: Die Architektur der Mathematik, 1974. **C** die Menge der komplexen Zahlen sowie hyperkomplexe Zahlen werden hier nicht behandelt. Komplexe Zahlen besitzen keine Ordnungsstruktur der Art kleiner, gleich, größer.

### 3.2 Zahlbegriffe und -definitionen

Die Unterschiedlichkeit der Zahlen, insbesondere die Anwendung von Zahlen auf geometrische Verhältnisse, führt in der Reflexion zu unterschiedlichen Zahlbegriffen. Diese Zahlbegriffe haben sich im Laufe der Jahrhunderte erheblich gewandelt, und zwar in dem Maße, wie sich die Zähltechniken und Zählsysteme und mit ihnen die Zeichensysteme zur Erzeugung und Notierung von Zahlen verändert haben. Die Frage nach dem Zahlbegriff wurde erstmals im antiken Griechenland gestellt. Zahlen sind in der griechischen Mathematik Gegenstände mit Eigenschaften, über die sich Aussagen treffen lassen, und dies ist eine notwendige Bedingung, um Definitionen von Zahlen aufzustellen.<sup>77</sup> Aristoteles bezeichnet die Zahl als begrenzte Vielheit, die in diskrete Teile zerlegbar ist, während für Euklid die Zahl eine aus Einheiten zusammengesetzte Menge ist.<sup>78</sup> Weder die Null noch die Eins - die laut Definition keine aus Einheiten bestehende Menge, also Vielheit ist - noch irrationale Zahlen lassen sich mit diesem Zahlbegriff fassen, lediglich die natürlichen Zahlen. Der Unterschied der beiden Arten von Zahlen zeigt sich bei Euklid, der Bruchrechnungen als Lehre von Zahlenverhältnissen und irrationale Zahlen als Lehre von Größenverhältnissen substituiert.<sup>79</sup> Die theoretische Herangehensweise der griechischen Mathematik im Umgang mit dem Zahlbegriff und die Idee des Beweises führt den deduktiv-axiomatischen Denkstil als Form des Verstehens im Bereich des Zählens ein. Die Addierbarkeit, Vergleichbarkeit und Anordenbarkeit werden als basale Operationen im Umgang mit mathematischen Größen in Form von Aussagen über die Addition, Gleichheitsrelation und Ordnungsrelation verstanden. Dies steht im engen Zusammenhang mit der Entwicklung der Logik.<sup>80</sup> Und Euklid verwendet gemäß dem aristotelischen Modell der Wissenschaftslehre Beweise, die auf Theoremen basieren. Die Ausrichtung der griechischen Mathematik auf das beweisende Wissen wird durch die Geometrisierung der Algebra unterstützt als Ersetzung der Zahlen durch Strecken und der Addition durch Aneinandersetzen von Strecken. Obwohl die Beweiskunst nicht unbedingt auf die anschauliche Demonstration referieren muß, ist für die griechische und mittelalterliche Mathematik die demonstrative Beweisführung, und darunter die geometrische, die am höchsten evidente Methode.<sup>81</sup> Die Entdeckung der h-

---

<sup>77</sup> „Die Pythagoreer sprechen von geraden und ungeraden Zahlen. Das klingt unscheinbar, aber es bedeutet, daß die Zahl ein Gegenstand ist, dem Eigenschaften zugeschrieben werden.“ Gericke, 1970, S. 20.

<sup>78</sup> „Quantum heißt das, was in Teile, die ihm innewohnen zerlegbar ist, von denen jeder der Natur nach ein Eines und ein Das ist. Die Menge ist nun ein Quantum, wenn es zählbar ist, aber eine Größe, wenn es meßbar ist.“ Aristoteles: Metaphysik, 1970, 1020a. „Zahl ist die aus Einheiten zusammengesetzte Menge“ Euklid VII, 2 zitiert nach Gericke, 1970, S. 27. Euklid trennt strikt zwischen Zahlen und Verhältnissen (Zahlenverhältnisse und Größenverhältnisse). Die Unterscheidung hält sich zwar bis ins 17. Jahrhundert in den Lehrbüchern, wird aber praktisch bereits von Archimedes unterlaufen, der mit Brüchen rechnet inklusive irrationalen Größenverhältnissen.

<sup>79</sup> Die Eins gilt erst als Zahl, als Descartes im Anschluß an seine Streckenrechnung angibt, was man unter einer Zahl zu verstehen habe, nämlich „... das, was sich zur Einheit verhält wie eine Strecke zu einer fest gewählten Einheitsstrecke.“ Gericke, 1970, S. 10

<sup>80</sup> Noch die pythagoreische Rechensteinarithmetik nutzt die Gestalt der Formationen zur Demonstration arithmetischer Eigenschaften und veranschaulicht damit Eigenschaften von Zahlen in heuristischer Weise.

<sup>81</sup> Vgl. Schüling, H.: Die Geschichte der axiomatischen Methode im 16. und beginnenden 17. Jahrhundert, 1969

kommensurabilität zweier Strecken als Verhältnis einer Seite zur Diagonale eines Quadrats und die Folgerung, daß sich beide Strecken nicht wie Zahlen zueinander (rational) verhalten, stärkt die Vorrangstellung der Geometrie gegenüber der Arithmetik. Aus dieser Erkenntnis leitet sich die Einsicht ab, daß nichts Geometrisches durch die Arithmetik bewiesen werden dürfe. Dies schränkt den Bereich der Algebra erheblich ein, da für geometrische Deutungen das Homogenitätsprinzip gilt, d.h. Ausdrücke wie  $x^4$  entsprechen keinen geometrischen Objekten und sind von daher nicht zulässig. Oder anders gesprochen: Läßt sich ein numerisches Zeichensystem nicht in ein geometrisch interpretiertes, anschauliches System überführen, so ist es nicht zulässig, wobei die geometrische Konstruierbarkeit als Referenz gilt.<sup>82</sup>

Der geometrischen Anschaulichkeit entgegengesetzt ist der rein symbolorientierte Umgang mit Größen in der Algebra, allen voran in der indischen Algebra auf Basis des uns vertrauten Ziffersystems. Während die Algebra das Rechnen mit Unbekannten (Größen) ist, bezieht sich die Arithmetik auf bekannte Größen, eben die Zahlen. Im Unterschied zur griechischen Methode des beweisenden Wissens, das sich am Modell der Geometrie orientiert, sind Beweise in der orientalischen Rechenkunst auf die Algebra bezogen und geben das verwendete Lösungsschema wieder. Die Denkweise, die hier zum Tragen kommt, ist ein verfahrensorientierter Stil, wenn auch noch kein streng formalisierter und kalkülisierter. Erst François Viète begründet im 16. Jahrhundert ein rein schematisches, zeichenorientiertes Rechenverfahren mit Buchstaben für unbestimmte numerische Werte und entwirft so die moderne Algebra und die mathematische Formel. Diese wird von René Descartes erweitert, indem er den Wertebereich der Algebra auf die Geometrie ausdehnt und die algebraischen Operationen auf Linien, die er Einheiten nennt, „... um sie mit Zahlen in nähere Beziehung zu bringen ...“,<sup>83</sup> abbildet. Damit ist es vermöge der symbolischen Algebra möglich geworden, allgemeine Größen überhaupt zu artikulieren und arithmetische wie geometrische Probleme zu lösen.<sup>84</sup> Dadurch verändert sich auch der Zahlbegriff, denn die Zahl ist kein Objekt mit Eigenschaften mehr, die geometrisch veranschaulicht werden, sondern das, was durch ein (Kalkül-) Zeichen repräsentiert ist. Maßgeblich wird einzig die zulässige Operation mit diesen Zeichen, die keinen Gegenstand Zahl mehr denotieren, sondern ma-

---

<sup>82</sup> Unabhängig von dieser strengen Forderung gibt es Mathematiker wie Diophant von Alexandrien, die mit diesem Denkstil brechen und im Bereich der Algebra erstaunliches leisten. Indem er Zeichen für (noch) unbekannte Zahlen und reziproke Potenzen einführt, gelingt es ihm, alle Typen quadratischer, kubischer und biquadratischer Gleichungen zu lösen. Vgl. Krämer, S., 1988, S. 36ff. Interessant in diesem Zusammenhang ist, daß die nicht-euklidische Geometrie erst ihren Siegszug antreten konnte, als sie in dem Modell von Felix Klein in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts einen neuen Begriff von Parallelität veranschaulichte, welcher der aus der Alltagsgewohnheit vertrauten Anschauung widerspricht. Vgl. Meschkowski, H.: Wandlungen des mathematischen Denkens, 1985, S. 12ff

<sup>83</sup> Descartes, R.: Geometrie, 1981, S. 1. „Und ich werde mich nicht scheuen, diese der Arithmetik entnommenen Ausdrücke in die Geometrie einzuführen, um mich dadurch verständlicher zu machen.“ Descartes, 1981, S. 2

<sup>84</sup> Obwohl Descartes auf traditionelle geometrische Probleme konzentriert bleibt, ist das Neue daran, „... daß Konstruktionsprobleme durch Berechnung gelöst werden und somit die Möglichkeit der Konstruierbarkeit einer geforderten Figur zurückgeführt wird auf die Möglichkeit der Berechenbarkeit der einer der Figur entsprechenden Gleichung.“ Krämer, 1988, S. 65 Descartes gibt auch folgerichtig das Homogenitätsprinzip auf, das noch für Francois Viète verpflichtend war.

thematische Gegenstände symbolisch konstituieren, die dann als Zahlen, Strecken-Zeichen oder beliebige diskrete Entitäten interpretiert werden können, d.h. der Begriff der Zahl selbst wird kalkülisiert und ordnet sich einem allgemeinen Zeichenbegriff unter. Rechnen bezieht sich nicht mehr nur auf (An-)Zahlen, sondern auf syntaktisch differenzierte und disjunkte Charaktere. Ein Beleg dieses Zeichenbegriffs ist der Differentialquotient von Leibniz  $dx/dy$ , der eine operative Vorschrift symbolisiert, die das Unendliche einer rekursiven Handlung darstellt, indem die Vorschrift unbegrenzt oft auf das vorausgehende Resultat der Vorschrift angewandt wird.<sup>85</sup> Damit wird die Algebra zum prototypischen Beispiel formal-operativer Zeichensysteme.

Der unterschiedliche Umgang mit dem Zahlbegriff führt zu verschiedenen Zahlendefinitionen, deren Unterschiedlichkeit sich vor allem in der Idee eines kontinuierlichen Zahlbegriffs zeigt: Sind Zahlen kontinuierliche Größen ähnlich dem Verhältnis zweier Strecken, von welchen eine als Einheit anzusehen ist? Oder sind sie Zeichenfolgen, die bis ins Unendliche fortgesetzt werden können, aber prinzipiell als diskret voneinander unterschieden gedacht werden können? So schreibt Isaac Newton beispielsweise in seiner *Arithmetica universalis*: „Unter ‚Zahlen‘ verstehen wir nicht sowohl eine Menge von Einheiten, sondern vielmehr das abstrakte Verhältnis irgendeiner Größe zu einer anderen Größe derselben Gattung, die als Einheit angenommen wird. Sie ist von dreifacher Art: ganz, gebrochen und irrational; ganz, wenn die Einheit sie mißt, gebrochen, wenn ein Teil der Einheit, dessen Vielfaches die Einheit ist, sie mißt, irrational, wenn die Einheit mit ihr inkommensurabel ist.“<sup>86</sup> Die geometrische Begründung des Zahlbegriffs und damit seine Anschaulichkeit ist jedoch mit zunehmender Methodenorientiertheit der Mathematik nicht mehr aufrechtzuerhalten, und so entwickelten sich in der Neuzeit mit den neuen Methoden (analytische Geometrie, Differential- und Integralrechnung, algebraische Umformungen von Gleichungen) neue Zahlenbegriffe, aber auch neue Versuche der Veranschaulichung wie die Konzeption von William R. Hamilton, der Aussagen der Zeitanschauung zur Erzeugung eines Axiomensystems für die Algebra verwendet.<sup>87</sup> Vor allem die komplexen Zahlen führen zu vielfältigen Erklärungsansätzen, doch um komplexe Zahlen fassen zu können, bedarf es erst eines klaren Begriffes der reellen Zahlen.<sup>88</sup> Die Frage stellt sich, ob reelle Zahlen etwas entsprechen, also ob die Nähe-

---

<sup>85</sup> Vgl. Krämer, 1988, S. 71

<sup>86</sup> Newton, I.: *Arithmetica universalis*, Leiden 1732, zitiert nach Gericke, 1970, S. 71/72.

<sup>87</sup> Paare von Zeitmomenten lassen sich entsprechend unserer Anschauung mit den Relationen zuvor, gleichzeitig und später ordnen. Mit diesen Ordnungsrelationen und Umformungsregeln lassen sich ganze, gebrochene und irrationale Zahlen konstruieren. Hamilton deutet komplexe Zahlen als Paare reeller Zahlen mit spezifischen Additions- und Multiplikationsregeln. Vgl. Gericke, 1970, S. 81ff

<sup>88</sup> Komplexe Zahlen sind Zahlenpaare mit einem reellen und einem imaginären Teil. Veranschaulichen lassen sie sich in der Zahlenebene. Komplexe Zahlen treten bei einigen quadratischen Problemen auf (Cardano 1545), kubischen (Scipione de Ferro 1515, Tartaglia 1539) und höheren Gleichungen auf. Der Fundamentalsatz der Algebra rechtfertigt die komplexen Zahlen. Er besagt, daß jede Gleichung vom Grad  $n$  genau  $n$  Lösungen ergibt, und daraus abgeleitet, daß es für jeden Grad Gleichungen mit sovielen Wurzeln gibt, wie der Grad angibt. Die Lösung dieser Gleichungen führt mitunter zu Lösungen, die von Descartes *imaginär* und von Leibniz *Amphibien* zwischen Sein und Nichtsein genannt werden. Vgl. Gericke, 1970, S. 57ff.



rung von etwas Größerem und etwas Kleinerem zu etwas führt, das einer Zahl entspricht. Oder mit anderen Worten: *„Das Prinzip, daß eine Größe, die von Werten  $>c$  zu Werten  $<c$  „durch alle Zwischenwerte“ übergeht, einmal  $=c$  wird, ist ... ohne genauere Angabe über die Art des Überganges bzw. die zugelassenen Zwischenwerte nicht richtig.“*<sup>89</sup> (Zwischenwertsatz). Dieser Ansatz geht von der objektorientierten Vorstellung aus, daß  $c$  einer Entität entspräche. Hier zeigt sich die Produktivität symbolischer Erkenntnis, da für etwas Nichtgreifbares oder Unendliches ein Symbol als ideelle Setzung verwendet werden kann. Die Approximierung an die ideelle Setzung geschieht dann mittels Operationsvorschriften wie im Falle des Differentialquotienten. Der formal-operative Zeichenumgang entfaltet hier seine Wirkung, da die Zeichen nicht mehr auf vorgeordnete abstrakte oder reale Entitäten referieren, sondern als operativ erzeugte, semiotische Objekte verstanden werden. Die Frage, ob  $c$  etwas entspricht oder nicht, stellt sich genau genommen nicht mehr. Aber auch das Konzept der Folge zur Generierung reeller Zahlen läßt sich als ein operatives interpretieren, denn eine *„... Folge läßt sich also verstehen als eine Vorschrift, deren Befolgung zu jeder gegebenen Grundzahl  $n$  einen Ausdruck liefert, den wir als das  $n$ te Glied der Folge bezeichnen.“*<sup>90</sup> Eine Folge läßt sich darüber hinaus als einstellige Funktion darstellen, deren Argumente die Grundzahlen sind und die durch den Term  $T(x)$  dargestellt wird als  $a(T(x))$ . Die abstrahierende und konstruktive Denkweise moderner mathematischer Zeichenverwendung gelangt von Aussagen über konkrete Gegenstände durch Abstraktion zu Aussagen über fiktive Gegenstände, die mittels Termen bezeichnet werden. *„Jeder Abstraktionsschritt geht aus von konkreten Zeichen, und diese Zeichen sind in der Mathematik stets Ergebnisse von Konstruktionen nach Herstellungsregeln, deren Gesamtheit wir jeweils einen „Kalkül“ zur Herstellung der Zeichen nannten.“*<sup>91</sup> Der Aufbau der Zahlensysteme geschieht durch Abstraktionsschritte, die jeweils auf die vorausgehende Konstruktion konkreter Figuren aufbauen (Äquivalenzklassenbildung).<sup>92</sup> In diesem Sinne ist eine Zahl einem Zahlensystem dann zuordenbar, wenn sie mit den entsprechenden Herstellungsregeln erzeugbar und entsprechend den konventionell festgesetzten Zeichen notiert ist.

<sup>89</sup> Gericke, 1970, S. 87. Wieder kann die Geometrie zur Anschauung genutzt werden und zwar die Stetigkeit der Kurve bzw. Funktion. Euler nutzt dies 1749 um die Gültigkeit des Zwischenwertsatzes zu zeigen, da jede Gleichung ungeraden Grades mindestens eine reelle Lösung hat, da die mit der Gleichung beschriebene Kurve die x-Achse schneidet.

<sup>90</sup> Thiel, 1995, S. 148. *„Es handelt sich also um eine Zuordnung der Glieder der Folge zu Grundzahlen,*

$$\begin{array}{cccc} 1 & 2 & 3 & 4 \dots \\ - & - & - & - \end{array}$$

$a_1 \quad a_2 \quad a_3 \quad a_4 \dots$

*die wir uns induktiv (auch: rekursiv) vorgenommen denken können, d.h. durch die Angabe, wie jedes Glied der Folge aus (einen oder allen) ihm vorhergehenden Gliedern berechnet werden kann, oder aber durch ein einheitliches Bildungsgesetz in Gestalt eines Ausdruckes mit einer Leerstelle, deren Ausfüllung durch ein Zeichen für die Grundzahl  $n$  den gegebenen Ausdruck in einen anderen überführt, der (evtl. nach Ausführung in ihm noch geforderter Rechenschritte oder Umformungen) das gesuchte Glied  $a_n$  liefert.“* Thiel, 1995, S. 148

<sup>91</sup> Thiel, 1995, S. 153

<sup>92</sup> *„Die Abstraktion ist vielmehr ein rein logischer Prozeß, ein Operieren mit Aussagen, dessen logischer Charakter durch den Wechsel von der Struktur der komplizierten Ausgangsaussage zur Struktur der neuen Aussage, die wir durch Abstraktionsschritte erhalten, zum Vorschein kommt.“* Thiel, 1995, S. 131

### 3.3 Worte und Werte

Zusammenfassend läßt sich sagen, daß die Verschriftung des Zählens, dessen markanteste Eigenschaft das induktive Erzeugungsprinzip ist, die Zusammenfassung großer Mengen an Zählzeichen mit Individualzeichen (Ziffern) erlaubt. Damit werden auch große Zahlen erfaßbar. Die Verschriftung erleichtert durch die symbolische Repräsentation sowohl den Umgang mit Zahlen als auch die Formalisierung von Ziffersystemen. Die Bedingungen der Formalisierung – Schriftlichkeit, Schematisierbarkeit und Interpretationsfreiheit<sup>93</sup> – sind bei Ziffersystemen gegeben: Ziffersysteme weisen endlich viele Grundzeichen auf, mit welchen unendlich viele diskrete Zeichenausdrücke erzeugt werden können, und die Generierung von Zeichenausdrücken in Zahlensystemen ist kalkülisierbar. Im Unterschied zu den Zeichensystemen lassen sich jedoch nicht beliebig viele Ziffersysteme konstruieren, denn sie sind durch die Geordnetheit der Zahlen limitiert. Während die Ordnungsstruktur einer Zählreihe aneinandergfügter Striche ersichtlich ist, wird diese in einem Ziffersystem mit Stellenwertprinzip verschlüsselt, indem die Ziffern eine doppelte Funktion erfüllen: *„Sie zählen die Einer und geben die Rangstufen an, auf der die Einer „gelten“. ... die Rangstufen werden ... aus der Stelle abgeleitet, an der die Ziffer steht.“*<sup>94</sup> Der Unterschied zwischen einer Sprachschrift, einer formal-operativen Zeichenverwendung und Ziffersystemen wird sowohl auf der Ebene der Grundzeichen als auch der Zeichenausdrücke deutlich. Das Charakteristikum der Sprachschrift ist das phonographische Prinzip und die daraus resultierende Lesbarkeit. Die Emanzipation der Schrift ermöglicht die Einführung nicht-lesbarer Zeichen. Während die Buchstaben und Ziffern zwar prinzipiell arbiträr sind, sich jedoch im Laufe der Zeit kulturell etabliert haben, da sie eindeutig Laute bzw. Zahlen notieren, sind die Grundzeichen formal-operativer Zeichensysteme beliebig. Hier zählt einzig die syntaktische Disjunktheit und Differenziertheit der Zeichen. Dies ist deshalb möglich, da die Zeichen nichts notieren, also semantisch nicht kodiert sind. Wörter und Zahlen hingegen referieren auf etwas. Allerdings ist die Form der Bezugnahme unterschiedlich: Wörter, die beliebig gebildet werden können - sieht man von lautbasierten Ausschlußregeln und der kulturellen Etablierung der Worte ab - nehmen auf extrasymbolische Bedeutungen zum Teil in mehrdeutiger Weise Bezug. Die Bildung von Wörtern läßt sich nicht formalisieren, auch deshalb nicht, da der Bereich der Laute keine Ordnung aufweist. Ziffern hingegen referieren auf einen Objektbereich beliebiger Entitäten, der durch eine kalkülisierbare Ordnungsstruktur geprägt ist (vollständige Induktion für **N** zur Erzeugung von Entitäten, die zueinander kleiner, größer oder

---

<sup>93</sup> „Ein Vorgang ist formal beschreibbar, sofern es möglich ist, diesen mit Hilfe künstlicher Symbole so darzustellen, daß die Bedingungen des typographischen, schematischen und interpretationsfreien Symbolgebrauchs erfüllt sind.“ Krämer, 1988, S. 2

<sup>94</sup> Krämer, 1988, S. 11

gleich sind).<sup>95</sup> Insofern sind die Erzeugungsregeln für Zahlenausdrücke formalisierbar. Formal-operative Zeichensysteme lassen sich auf Ziffernsysteme anwenden, indem sie in einer allgemeinen Weise auf geordnete Entitäten Bezug nehmen, wie dies für die formale Algebra der Fall ist. Der Vorteil der Ziffernsysteme gegenüber formal-operativen Zeichensystemen ist, daß nicht nur den Regeln gemäß Ausdrücke gebildet, sondern diese berechnet werden können. *Berechnen* meint, die regelbasierten Ausdrücke für konkrete numerische Werte anzuwenden und sie entsprechend der Ordnungsstruktur zu prüfen.

Sprachschrift	Formal-operative Zeichensysteme	Zahlensysteme
Laute sind kulturell geformt		Beliebige Entitäten, die geordnet sind (kleiner, größer, gleich) <sup>96</sup>
Grundzeichen (Buchstaben: a, b, c ...) sind kulturell geformt, syntaktisch disjunkt und differenziert und notieren Laute (phonographisches Prinzip)	Grundzeichen sind arbiträr, syntaktisch disjunkt und differenziert (beliebige graphische Konfigurationen)	Grundzeichen (Ziffern: 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9; I, V, ...) sind kulturell geformt, syntaktisch disjunkt und differenziert und notieren geordnete Entitäten (induktives Prinzip)
Zeichenausdrücke (Wörter) sind arbiträr und semantisch mehrdeutig (semantisch kodiert, ggf. lautbasierte Ausschlußregeln)	Zeichenfolgen sind durch Regeln determiniert und ohne extrasymbolischen Bezug	Zahlenausdrücke (Zahlen) sind durch Regeln determiniert eindeutig

Abb. 1.: Verschiedene Symbolsysteme

<sup>95</sup> Da es sich um einen Objektbereich beliebiger Entitäten handelt, der lediglich eine bestimmte Ordnung aufweisen muß, ist der Begriff der semantischen Eindeutigkeit hier ein sehr reduzierter, der lediglich auf die Ordnungsstruktur der Zahlen referiert, die es erlaubt, jede Entität eindeutig zu positionieren (kleiner, größer, gleich). Er erlaubt es jedoch, die Korrektheit einer Berechnung festzustellen.

<sup>96</sup> Die Definitionen von *größer*, *kleiner* und *gleich* hängen davon ab, ob man es mit endlichen oder unendlichen Mengen zu tun hat. Für komplexe Zahlen lassen sich diese Ordnungsstrukturen nicht verwenden.

## 4. Strukturen und Operationen

### 4.1 Rezept, Algorithmus, Kalkül

Die Formalisierung selbst stellt eine spezifische Strukturierung des Umgangs mit Zeichen dar, denn um mit Zeichen formal zu hantieren, bedarf es einer charakteristischen Verfahrensweise: Zum einen werden die Zeichen als referenzlose Entitäten aufgefaßt, zum anderen müssen die zulässigen Operationen in Form von Regeln expliziert werden. Als Folge der Abkopplung von einem extrasymbolischen Bezug und der schematischen Zeichenverwendung gewinnt die intrasymbolische Interpretation der Zeichen an Bedeutung. Diese sind in Form von metatextuellen Zuordnungen, aber vor allem durch Operationsvorschriften expliziert. Von daher lassen sich formal-operative Zeichensysteme als prozeßorientierte Strukturen verstehen. Der Begriff der *Struktur* bezieht sich dabei auf ein Gefüge von Zeichen, die in Relation zueinander stehen, wobei diese Relationen mit Operationszeichen notiert sind.<sup>97</sup> Strukturen unterscheiden sich also insofern von einfachen Zeichenfolgen, als sie Operationszeichen einbinden und damit einen Zusammenhang zwischen den Zeichen und Zeichenfolgen artikulieren. Diese Unterscheidung läßt sich am Beispiel der natürlichen Sprache veranschaulichen: Ausdrücke sind aus den Zeichenfolgen des Alphabets gebildete Worte, und Strukturen sind Sätze und Texte, die gemäß den grammatikalischen Regeln sowie Operationsworten wie *und*, *oder*, *nicht* (logische Konstanten) gebildet werden, wobei die Generierung der Worte nicht reglementierbar ist.<sup>98</sup> Dabei wird eine hierarchische Anordnung erkennbar, die vom Alphabet über die Worte zu den Strukturen aufsteigt. In formal-operativen Zeichensystemen wird diese hierarchische Anordnung nivelliert. Kalkülsysteme bieten gerade den Vorteil, nicht nur die Erzeugung der Strukturen, sondern auch der Zeichenfolgen durch Regeln zu formalisieren. Damit sind Zeichenfolgen und Strukturen auf der selben Ebene angesiedelt. Die Nivellierung der Hierarchisierung in formalisierten Zeichensystemen macht die Einführung einer theoretischen Unterscheidung zwischen Zeichenfolgen und Strukturen notwendig, da Strukturen als komplexe Folgen durch die von ihnen artikulierten Relationen spezifischen Kriterien unterliegen. Die mit der Formalisierung erwirkte Strukturierung ermöglicht einen reproduzierbaren und mechanisierbaren Umgang mit den Zeichen.<sup>99</sup>

---

<sup>97</sup> Existiert nur ein Zeichen oder eine Folge von Zeichen, so könnte man von einer Struktur sprechen, welche die Relation *Teil einer Folge sein* ausdrückt. Diese Relation betrifft nicht die Anordnung der Teile in der Folge. In formalisierten Zeichensystemen ist diese Anordnung nicht beliebig oder konventionell festgesetzt, sondern durch Regeln näher bestimmt. Dadurch entstehen geordnete Zeichenfolgen wie die der natürlichen Zahlen. Ein Zeichen ist Teil einer Folge, wenn diese Folge aus mindestens einem Zeichen besteht. Folgen mit der Länge 1 werden Zeichen genannt. Ein Zeichen, das eine Leerstelle andeutet, soll ebenfalls Teil einer Folge sein.

<sup>98</sup> Es lassen sich allenfalls lautbasierte Ausschlußregeln finden, die gewisse Buchstabenfolgen ausschließen oder wenig wahrscheinlich machen.

<sup>99</sup> Das Konzept der Erzeugbarkeit von Zeichenfolgen trifft diese Eigenschaft von formalisierten Zeichensystemen wohl am besten. „Eine Menge *M* von Worten über einem Alphabet *A* heißt erzeugbar, wenn es ein Regelsystem gibt, derart, daß ein Wort *W*

Auch hier lässt sich eine historische Entwicklung aufzeigen, die von der Algorithmisierung zur Kalkülierung den Charakter der zunehmenden Schematisierung von Symboloperationen widerspiegelt. Den Beginn dieser Entwicklung markieren rezeptartige Anweisungen. Während *Rezepte* normalsprachliche Anweisungen für den Umgang mit konkreten Problemstellungen sind, geben *Algorithmen* allgemeine Lösungsverfahren für eine Klasse von Problemen an. *Kalküle* umgehen umgangssprachliche Formulierungen, indem sie in einer künstlichen Zeichensprache Handlungsanweisungen für den Umgang mit den Zeichen geben. Allen drei Verfahren ist der Anweisungscharakter zur schematischen Abfolge expliziter Regeln gemein, der zur Problemlösung führt. Rezepte, Algorithmen und Kalküle erlauben in ihrer je eigenen Weise das Operieren mit Zeichen und sind Ausdruck eines operativen Symbolismus. Typisch für diesen Zeichenumgang ist, daß nicht nur regelbasiert vorgegangen wird, sondern daß dieses Vorgehen schrittweise erfolgt, so daß sich jeder neue Schritt aus dem vorhergehenden ableitet.<sup>100</sup> Rezepte, Algorithmen und Kalküle sind prozeßorientierte Strukturen mit Aufforderungscharakter zur schrittweisen Ausführung der explizierten Operationen.<sup>101</sup> Die Ausführung der Anweisungen kann von Menschen vorgenommen werden oder im Falle der Algorithmen von Maschinen. In beiden Fällen müssen die Anweisungen jedoch eindeutig in einem endlichen Text formuliert sein. Doch auch wenn die Anweisungen endlich sind, kann sich die tatsächliche Ausführung beliebig lange hinziehen, d.h. nicht jede Anweisung ist abbrechend und es bedarf operationsexterner Abbruchkriterien, um die Ausführungen zu stoppen. Die Gründe liegen auf der Hand, denn jede tatsächliche Ausführung ist an die Endlichkeit der Ressourcen wie Zeit, Material oder Kapazität gebunden. Die Effektivität einer Anweisung ist deshalb von Bedeutung.<sup>102</sup>

Die prozeßorientierte Strukturierung des Umgangs mit Zeichen führt von der Formalisierung der Zeichensysteme zu deren Mechanisierung und bringt damit Konzepte wie Berechenbarkeit, Aufzählbarkeit oder Entscheidbarkeit ins Spiel, da die Effektivität zu einem entscheidenden Kriterium der mechanischen Ausführung wird. Eine Funktion ist *berechenbar*, wenn es eine in einem endlichen Text beschriebene allgemeine Anweisung gibt, mit der für jedes vorgelegte Argument der Funktionswert effektiv erzeugt werden kann. Eine Menge oder eine Relation ist *aufzählbar*, wenn jedes Element der

---

*mit Hilfe der Regeln des Systems ableitbar ist genau dann, wenn es zu M gehört. Ebenso .... kann man von erzeugbaren Relationen sprechen.* Hermes, H.: Aufzählbarkeit, Entscheidbarkeit, Berechenbarkeit, 1978, S. 15

<sup>100</sup> Dieses Vorgehen hat pragmatische Gründe, da die in den Rezepten, Algorithmen oder Kalkülen angeschriebenen Anweisungen und Operationen unabhängig vom Autor von jeder anderen Person ausführbar sein sollen, ohne zusätzliche Informationen.

<sup>101</sup> „Wenn hier von einem allgemeinen Verfahren [Algorithmus] die Rede ist, so soll darunter stets ein Prozeß verstanden werden, dessen Ausführung bis in die letzten Einzelheiten hinein eindeutig vorgeschrieben ist. Dazu gehört insbesondere, daß die Vorschrift in einem endlichen Text niedergelegt werden kann.“ Hermes, 1978, S. 1

<sup>102</sup> „Kriterien der Effizienz wären z.B. geringe Rechenzeiten, möglichst geringer Speicherplatz oder möglichst wenig redundante Resolventenbildung. Unter solchen und anderen Kriterien wurde nach 1965 eine Reihe von effizienteren Resolutionsmethoden vorgeschlagen ...“ Mainzer, K.: Computer - Neue Flügel des Geistes?, 1995, S. 132

Menge durch eine berechenbare Funktion aufgezählt wird oder alle durch eine Relation geordneten Paare mit Hilfe zweier einstelliger berechenbarer Funktionen in geordneter Weise durchlaufen werden. Jede endliche Menge ist *entscheidbar*, indem alle Elemente der Menge gelistet werden, so daß der Vergleich, ob eine Zeichenfolge in dieser Liste vorkommt oder nicht, durchführbar ist.<sup>103</sup>

#### 4.2 Turingmaschine als allgemeines Konzept der Zeichenverwendung

Im Falle der maschinellen Ausführbarkeit zeigt sich jedoch schnell, daß die Kriterien bezüglich der Mechanisierbarkeit prozeßorientierter Strukturen relativ vage sind. Sie beschränken sich auf die detaillierte Beschreibung einer Anweisung, die schrittweise abarbeitbar sein und dabei eine Ausgangskonfiguration von Zeichen in eine Endkonfiguration überführen soll. Um die Zeichenverwendung tatsächlich an eine Maschine zu delegieren, bedarf es einer geeigneten Charakterisierung, was ein Algorithmus bzw. ein allgemeines Verfahren denn sein sollte. Verschiedene Präzisierungen wurden vorgeschlagen, doch die Idee Alan Turings war es, die Allgemeinheit eines Verfahrens direkt mit seiner maschinellen Ausführbarkeit zu demonstrieren.<sup>104</sup> Dazu stellte er sich eine Maschine als einen Mechanismus vor, der in einfacher Manier nach Anweisungen mit Zeichen arbeitet. *„Turing greift dazu auf seine Schulzeit zurück und beschreibt den Vorgang des Rechnens als Notieren von Zahlen nach festen Regeln in den Rechenkästen kariertter Schulhefte. Dies ist ein völlig mechanischer Prozeß, und Turing beschreibt ihn deshalb angemessen im Modell einer programmierten Maschine, der Turing-Maschine.“*<sup>105</sup>

Statt eines karierten Blattes hat man sich ein Band mit Feldern vorzustellen, das jeweils in 1-Feld-Schritten nach links (Anfang) oder rechts (Ende) bewegt werden kann. Auf dieses Band lassen sich Zeichen eines vorgegebenen Alphabets schreiben ( $A = \{a_1, \dots, a_n\}$ ,  $n \geq 1$ ;  $a_0$  für ein leeres Feld). Jede Anweisung zur Umsetzung von Operationen auf diesem Band muß derart formuliert sein, daß sie schrittweise ausgeführt werden kann. Dabei ist es das Ziel, eine Ausgangskonfiguration von Zeichen in endlich vielen Feldern in eine neue Konfiguration zu überführen. Um dies zu bewerkstelligen, gibt es die Operationen: ( $a_k$ ) Beschriften eines Feldes (inklusive Löschung einer gegebenenfalls vorhan-

---

<sup>103</sup> Dies gilt auch für endliche Relationen, wenn man  $n$ -stellige Relationen als eine Menge von  $n$ -Tupeln auffaßt. Dies sind keine strengen Definitionen, sondern dienen zur Veranschaulichung. Aufzählbar darf nicht mit abzählbar verwechselt werden. Vgl. Hermes, 1978, S. 9ff

<sup>104</sup> Church, A.: Unsolvable problem of elementary number theory, 1936; Church, A.: A note on the Entscheidungsproblem, 1936a; Post, E.L.: Finite combinatory processes-formulations I, 1936; Turing, A. M.: On computable numbers, with an application to the Entscheidungsproblem, 1937.

<sup>105</sup> Coy, W.: Gutenberg und Turing: Fünf Thesen zur Geburt der Hypermedien, 1994, S. 71. Zur Turingmaschine vgl. Hermes, 1978, S. 33ff; Ebbinghaus, H.-D.: Turing-Maschinen und berechenbare Funktionen I, 1964, S. 13ff.

denen Beschriftung), (r) Nach-rechts-Gehen, (l) Nach-links-Gehen und (s) Stoppen. Eine Operationsvorschrift muß nun in normierter Form in einzelne Teilvorschriften zerlegt werden und in einer Matrix endlicher Länge angeschrieben werden (Turingtafel): Die erste Spalte gibt die Operationsvorschrift (k) an, die zweite den Zustand des Feldes ( $a_0, a_1, \dots, a_n$ ), die dritte Spalte die Operation ( $v = r, l, s$ ) und die vierte die nächste Teilvorschrift ( $k_N$ ). Eine Turingmaschine kann diese Operationen dann schrittweise ausführen. Im Grunde ist eine Turingmaschine eine Turingtafel, die den maschinellen Mechanismus anhand elementarer Instruktionen schrittweise steuert. „If at each stage the motion of a machine ... is completely determined by the configuration, we shall call the machine an „automatic machine“ (a-machine).“<sup>106</sup>

#### 4.3 Funktionen als zeichenproduzierende Maschinen

Die Idee der Turingmaschine hängt eng mit einer Strukturierung von Zeichen zusammen, die es erlaubt, die Veränderung von Zeichen in Abhängigkeit von anderen Zeichen zu formulieren und zu berechnen: Funktionen.<sup>107</sup> „Eine Funktion  $f$  mit Definitionsbereich  $D$  (oder  $\mathbf{D}$ ) und Wertebereich  $W$  (oder  $\mathbf{W}$ ) ist eine Vorschrift, die jedem Element des Definitionsbereichs ein Element des Wertebereichs zuordnet.“<sup>108</sup>  $f: D \rightarrow W$ . Die Schreibweise für Funktionen arbeitet mit verschiedenen Zeichenklassen, und eine Funktion  $f(x)$  wird gelesen als Funktion  $f$  von  $x$ , die der Zahl  $x$  die Zahl  $f(x)$  zuordnet. Für  $f(x) = x^2$  ordnet die Funktion  $f$  der Zahl 2 den Wert 4 zu, der Zahl 3 den Wert 9 usw. Der Term einer Funktion kann aus einem Objektzeichen, einer Folge von Objektzeichen oder einer Struktur bestehen. Der Wert des Terms ergibt sich aus einer eindeutigen Zuordnung innerhalb eines Intervalls des Definitionsbereichs, indem ein Element des Definitionsbereichs als Wert oder der Wert einer auf dem Definitionsbereich definierten  $n$ -stelligen Operation zugeordnet wird. Der Wert eines Terms ist undefiniert, wenn die ihm zugeordnete Operation oder die als Werte der Funktionszeichen fungierenden Operationen nicht überall auf der Grundmenge definiert sind. So hat der Term  $x - y$  für die Werte 3 und 2 der Objektsymbole  $x$  und  $y$  den Wert 1. Für die Werte 2 und 3 der Objektsymbole  $x$  und  $y$  ist er für die Grundmenge der natürlichen Zahlen nicht definiert.<sup>109</sup> An dem gegebenen Beispiel wird deutlich, daß die

<sup>106</sup> Turing, A.M.: On computable numbers, with an application to the Entscheidungsproblem, 1964, S. 118

<sup>107</sup> „Der Begriff ‚Algorithmus‘ scheint dem Begriff ‚Funktion‘ dann äquivalent zu sein, wenn für eine Funktion Berechnungsregeln existieren, die es erlauben, für jedes Argument in endlich vielen Schritten den entsprechenden Funktionswert zu ermitteln. Ein Algorithmus, der die Werte einer Funktion berechnet, stellt eine Definition der Funktion dar.“ Krämer, 1988, S. 163. Vgl. Matcev, A.I.: Algorithmen und rekursive Funktionen, 1974

<sup>108</sup> Furlan, P.: Das gelbe Rechenbuch 1: Lineare Algebra, Differentialrechnung, o.Dat., S. 121

<sup>109</sup> Während die Operationen der Addition und Multiplikation überall definiert sind, ist die Subtraktion  $x - y$  nur partiell, da sie nur für  $x > y$  definiert ist. Deshalb wird in der Theorie der rekursiven Funktionen eine modifizierte Form der Subtraktion eingeführt und mit einem eigenen Operationszeichen symbolisiert.

Operationen nur dann eindeutig definiert sind, wenn die Zeichen in wohl bestimmter Weise geordnet sind. Der Term  $x - y$  stellt eine Funktion dar, die dem Paar  $\langle 3, 2 \rangle$  den Wert 1 zuordnet. Würde man  $x$  und  $y$  vertauschen so würde diese Funktion für das Paar  $\langle 3, 2 \rangle$  undefiniert sein. Die Objekt- und Funktionszeichen können festgelegte Werte (konstante Zeichen) haben oder nicht (variable Zeichen).<sup>110</sup>

Partiell rekursive Funktionen  $f$  strukturieren Zeichenfolgen in der Weise, daß in einem mechanisierbaren Prozeß jede beliebige natürliche Zahl  $x$  in einen Funktionswert  $f(x)$  der Funktion  $f$  transformiert werden kann. Dieser Prozeß ist jedoch nicht abbrechend, wenn der Funktionswert von  $f$  im Punkt  $x$  nicht definiert ist. Für jede überall definierte partiell rekursive Funktion existiert ein nach endlich vielen Operationsschritten abbrechender Algorithmus. Laut der These von Alonzo Church ist die Klasse der partiell rekursiven Funktionen identisch mit der Klasse der berechenbaren Funktionen.<sup>111</sup> Dies bedeutet, daß jede Zeichenfolge oder Struktur, die sich in einer partiell rekursiven Funktion darstellen läßt, berechenbar ist. Oder anders gewendet: Die Strukturierung von Zeichen in Form berechenbarer Funktionen mit abbrechenden Algorithmen ist die Voraussetzung für deren computerbasierte Realisierung. Funktionen lassen sich als semiotische Maschinen zur Erzeugung definierter Werte verstehen. Ein Wert stellt ein Zeichen dar, das eindeutig auf Entitäten einer geordneten Menge referiert.

<sup>110</sup> Besondere Erwähnung verdienen die Anfangsfunktionen  $s$ ,  $o$  und  $I$ . Es sind zahlentheoretische Funktionen, die per Definition folgende Werte haben:  $s^1(x) = x + 1$ ;  $o^n(x_1, \dots, x_n) = 0$ ;  $I_m^n(x_1, \dots, x_n) = x_m$  ( $1 \leq m \leq n$ ;  $n = 1, 2, \dots$ ). Funktionen, die man mittels berechenbarer Operationen aus den Anfangsfunktionen erhält, heißen partiell rekursiv. Berechenbare Operationen sind die Substitution, die Minimalisierung und die primitive Rekursion. Die Operation der primitiven Rekursion  $f = R(g, h)$  besteht darin, daß man eine Funktion  $f$  aus den partiellen zahlentheoretischen Funktionen  $g$  und  $h$  erzeugen kann, wobei  $g$  eine  $n$ -stellige Funktion,  $h$  eine  $n+2$ -stellige und  $f$  eine  $n+1$ -stellige ist, und zwar wenn für alle natürlichen Werte  $x_1, \dots, x_n, y$  gegeben ist:  $f(x_1, \dots, x_n, 0) = g(x_1, \dots, x_n, y)$  und  $f(x_1, \dots, x_n, y+1) = h(x_1, \dots, x_n, y, f(x_1, \dots, x_n, y))$ . „Sind wir auf irgendeine Weise imstande, die Werte der Funktionen  $g, h$  zu finden, so kann man die Werte der Funktion  $f$  mit Hilfe einer Prozedur vollkommen „mechanischen“ Charakters ausrechnen. In der Tat genügt es für das Auffinden des Wertes  $f(a_1, \dots, a_n, m+1)$  nacheinander die Zahlen  $b_0 = g(a_1, \dots, a_n)$ ,  $b_1 = h(a_1, \dots, a_n, 0, b_0)$ ,  $b_2 = h(a_1, \dots, a_n, 1, b_1)$ , ...,  $b_{m+1} = h(a_1, \dots, a_n, m, b_m)$  zu finden. Die Zahl  $b_{m+1}$ , die wir nach dem  $m+1$ -ten Schritt erhalten, ist der gesuchte Wert der Funktion im Punkte  $\langle a_1, \dots, a_n, m+1 \rangle$ .“ Malcev, 1974, S. 15/16. Der Berechnungsprozeß kann unendlich lange dauern, wenn einer der Ausdrücke einen undefinierten Wert hat. Die Definition primitiv rekursiver Funktionen lautet: „Gegeben sei ein System  $g$  irgendwelcher partieller Funktionen. Eine partielle Funktion  $f$  heißt primitiv rekursiv bezüglich  $g$ , wenn man sie aus den Funktionen des Systems  $g$  und den Anfangsfunktionen  $s, o, I_m^n$  durch eine endliche Anzahl von Operationen der Substitution und der primitiven Rekursion erhalten kann.“ Malcev, 1974, S. 16. „Eine partielle Funktion  $f$  heißt partiell rekursiv bezüglich eines Systems partieller Funktionen, wenn  $f$  aus den Funktionen des Systems  $s$  und den Anfangsfunktionen  $s, o, I_m^n$  durch eine endliche Anzahl von Operationen der Substitution, der primitiven Rekursion und der Minimalisierung erhalten kann.“ Malcev, 1974, S. 22. Die Klasse der partiell rekursiven Funktionen ist weiter als die der primitiv rekursiven Funktionen, da sie auch Funktionen umfaßt, die nicht überall definiert sind. Der Zusammenhang ergibt sich in folgendem Theorem: „ $f(x)$  sei irgendeine primitiv rekursive Funktion und  $A$  eine beliebige primitiv rekursive Menge natürlicher Zahlen. Dann ist die durch das Schema  $f_p(x) = f(x)$ , falls  $x \in A$  und  $f_p(x) = \text{undef.}$ , falls  $x \notin A$  definierte Funktion  $f_p(x)$  partiell rekursiv.“ Malcev, 1974, S. 24

<sup>111</sup> Vgl. Church, 1936



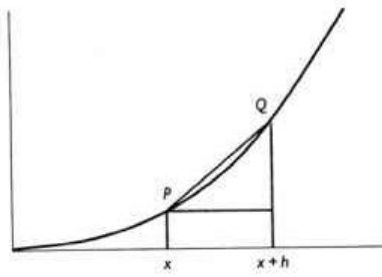


Abb. 2: Kurve zu  $y = x^2$

Darüber hinaus besitzen Funktionen ein geometrisches Bild, mit welchem die Veränderung der Werte in Abhängigkeit von anderen Werten darstellbar ist, und zwar dann, wenn der Kurvenverlauf einer Funktion  $f(x)$  in einem Intervall  $a, b$  von jeder Vertikale dieses Intervalls nur einmal getroffen wird.<sup>112</sup> „Der Graph der Funktion  $f: D \rightarrow W$  ist eine Teilmenge von  $D \times W$  und besteht aus allen Paaren  $(x, y)$  mit  $x \in D$  und  $y = f(x)$ .“<sup>113</sup> Jede Funktion  $f(x)$  hat zwar ein geometrisches Bild, doch nicht jedes geometrische Bild entspricht

einer Funktion. Beschäftigt man sich mit dem Verlauf der Kurvendarstellung einer Funktion, so interessiert vor allem das Verhalten der Änderungsrate der miteinander in Abhängigkeit gesetzten Werte oder mit anderen Worten: die Steigung der Kurve.<sup>114</sup> Die Steigungsrate leitet sich aus der Funktion ab und ist selbst eine Funktion. Ist eine Funktion  $f: I \rightarrow \mathbf{R}$  an jedem Punkt des Intervalls  $I$  differenzierbar, so erhält man die Ableitungsfunktion oder (erste) Ableitung  $f'$ , die jeder Stelle  $x$  die Zahl  $f'(x)$  zuordnet. Für die Funktion  $f(x) = x^2$  sind die Funktionswerte vom Wert von  $x$  abhängig. Das Verhalten der Kurve geht von einer mäßigen Steigung zu Beginn aus, die zunehmend steiler wird, d.h. die Steigung der Kurve ist nicht konstant und hängt vom Wert von  $x$  ab. Um eine Struktur zu finden, die beschreibt wie die Steigung von  $x$  abhängig ist, betrachtet man zwei Punkte  $P$  und  $Q$  auf der Kurve und stellt sie sich durch eine Gerade  $PQ$  verbunden vor. Der Unterschied zwischen Kurve und Gerade nimmt in dem Maße ab, wie  $h$  abnimmt, und die Steigung der Kurve in  $P$  nähert sich der Steigung der Strecke  $PQ$  an. Die Steigung der Geraden  $PQ$  läßt sich berechnen, indem man die Höhenzunahme  $(x + h)^2 - x^2$  durch die Zunahme in waagerechter Richtung  $h$  teilt. Die Steigung der Geraden ist  $2xh + h^2 / h$  bzw. durch Kürzung  $2x + h$ . Da mit  $h \rightarrow 0$  der Unterschied der Steigung der Geraden  $PQ$  und der Kurve im Punkt  $P$  immer geringer wird, nähert sich die Steigung der Geraden dem Grenzwert  $2x$  an, welcher der Steigung der Kurve in  $P$  entspricht. Verwendet man statt  $h$  die Notation  $dx$  und für die Höhendifferenz zwischen  $P$  und  $Q$   $dy$ , so erhält man die von Leibniz eingeführte Notation  $dy/dx$ , die man *dy nach dx* ausspricht.<sup>115</sup> Das Besondere dieser Struktur ist, daß ein infinitesimaler Prozeß formuliert wird, der

<sup>112</sup> Man kann sich nach der Definition von C. Jordan unter einer Kurve das vorstellen, was ein Punkt bei stetiger Bewegung durchläuft. Der Ort des Punktes  $x, y$  wird als Funktion der Zeit  $t$  aufgefaßt. Dieser anschauliche Begriff wird jedoch durch die Entdeckung C. Peanos erschüttert, der eine Kurve entdeckte, die ein ganzes Quadrat durchläuft. Vgl. Waismann, F.: Einführung in das mathematische Denken, 1970, S. 128ff

<sup>113</sup> Furlan, o.Dat., S. 121

<sup>114</sup> Die Aufmerksamkeit der antiken Mathematik galt Kreis, Ellipse, Parabel und Hyperbel. Erst mit der Koordinatengeometrie von René Descartes geraten unabsehbare Mengen an Kurven in den Blick der Mathematiker, und eine universelle Methode zur Bestimmung des Verlaufs jeder beliebigen Kurve ist gefordert. Isaac Newton und Gottfried W. Leibniz lösen dies mit der Differentialrechnung. Dabei faßt Leibniz die Tangente als Grenzfall der Sekante auf. „Bis Leibniz bestand in der Mathematik eine tiefe Kluft zwischen Sekante und Tangente; für die Kreissekante gelten zum Beispiel ganz andere Sätze als für die Kreistangente, und keinem Geometer wäre es in den Sinn gekommen, für diese beiden Arten von Linien gemeinsame Sätze aufzustellen.“ Waismann, 1970, S. 135

<sup>115</sup>  $dx/dy$  läßt sich auch als  $x'$  schreiben. Allgemein ist  $nx^{n-1}$  die Ableitung der Funktion  $x^n$  für jede natürliche Zahl  $n$ . „Der durchschlagende Erfolg der Methode Leibnizens und Newtons beruhte darauf, daß die Anzahl der Funktionen, die man differenzieren

einen Näherungswert ermittelt.<sup>116</sup> Die Differentiation ist eine Methode, um die Steigung einer Kurve approximativ zu berechnen bzw. um aus einer Ausgangsfunktion deren Steigungsfunktion (Ableitung) abzuleiten. Der dynamische Prozeß der Approximation der Steigung läßt sich als eine von  $h$  abhängige Funktion  $f(h)$  erfassen. Eine Zahl  $\epsilon$  ist der Grenzwert, ...*„wenn  $h$  „gegen 0 geht“, genaugenommen: Zu jedem  $\epsilon > 0$  gibt es ein  $\delta > 0$ , so daß für alle  $h$  mit  $0 < |h| < \delta$  gilt:  $|f(h) - f(0)| < \epsilon$ .“*<sup>117</sup> Dieser Grenzwertsatz von Karl Weierstraß fixiert den dynamischen Prozeß der Approximation in einer formalen Definition und symbolisiert spezifische Zahlen  $\delta$ , die bestimmte Eigenschaften aufweisen. Damit läßt sich der Approximationsprozeß selbst als mathematisches Objekt untersuchen.

#### 4.4 Differentialgleichungen als Strukturen zur Beschreibung veränderlicher Größen

Will man die Veränderung veränderlicher Größen mit einer Struktur beschreiben, so läßt sich dies in einer Differentialgleichung formulieren, welche eine Beziehung zwischen einer Funktion und deren Ableitungen herstellt.<sup>118</sup> Im Laufe der Entwicklung entdeckte man, daß es zwischen der Differentialrechnung und der Integralrechnung einen Zusammenhang gibt. Die Differentiation der Steigung einer Kurve der Funktion  $f(x)$  ist invers zur Methode der Integration von Flächen- und Rauminhalten, indem dazu eine Flächen- oder Volumenfunktion  $A(x)$  ermittelt wird.<sup>119</sup> Es zeigt sich, daß die Ableitung von  $A(x)$ :  $A'(x) = f(x)$  ist, also die Funktion, die den Verlauf der die Fläche abschließenden Kurve bzw. das Volumen abschließenden Fläche beschreibt (Hauptsatz der Differential- und Integralrechnung). Die Struktur für  $A(x)$  läßt sich finden, indem man die Struktur sucht, für die  $f(x)$  die Ableitung darstellt. Allgemein wurden Strukturen beschrieben als ein Gefüge von Zeichen, die wechselseitig miteinander in Relation stehen, wobei diese Relationen regelbasiert und durch Operationszeichen symbolisch ge-

---

*konnte, durch die Entwicklung eines Kalküls, also einer Sammlung von Regeln zum Differenzieren komplizierter Funktionen, enorm vergrößert werden konnte.“* Devlin, K.: *Muster der Mathematik*, 1997, S. 101

<sup>116</sup> *„Der Differentialquotient ist kein Zeichen, das einen gegebenen Zustand beschreibt, sondern eine funktionale Abhängigkeit vorschreibt. „Unendlich zu sein“ (im Sinne von unendlich klein bzw. groß) ist keine Eigenschaft einer bestimmten Größe, sondern die Eigenschaft einer Handlung, mit der wir eine bestimmte Vorschrift unbegrenzt oft auf das, kraft dieser Vorschrift gewonnene, Resultat einer Handlung wieder anwenden können. Das aber ist nichts anderes als die Grundidee aller Kalkülisierung: auf der Basis eines begrenzten Zeichenvorrates und eindeutiger Herstellungsvorschriften unbegrenzt viele Zeichenkonfigurationen erzeugen zu können.“* Krämer, 1988, S.70. Differenzierbare Funktionen sind stetig. *„Eine Funktion  $f$  ist an der Stelle  $a$  stetig, falls  $\lim_{x \rightarrow a} f(x) = f(a)$ .“* Furlan, o.Dat., S. 180. In ihrem Definitionsbereich stetige Funktionen sind polynome, rationale und trigonometrische Funktionen, Hyperbelfunktionen und ihre Umkehrfunktionen, Exponential-, Logarithmus-, Betrags- und Wurzelfunktionen sowie alle daraus durch Grundrechenarten und Kompositionen zusammengesetzte Funktionen.

<sup>117</sup> Devlin, 1997, S. 100

<sup>118</sup> *„Eine Differentialgleichung stellt eine Beziehung zwischen einer Funktion und ihrer Ableitung dar. ... Unter der Lösung einer Differentialgleichung versteht man eine stetige Funktion  $y(t)$ , die zusammen mit ihrer Ableitung der vorgegebenen Beziehung genügt.“* Braun, M.: *Differentialgleichungen und ihre Anwendungen*, 1979, S.1

<sup>119</sup> Zur Berechnung der Flächen- und Volumeninhalte für geometrische Objekte mit gebogenen Kanten oder gekrümmten Seitenflächen entwickelte Eudoxos die sog. Exhaustionsmethode, welche die Fläche beispielsweise eines Parabelbogens durch die einfacher zu berechnenden Flächen eingepaßter Dreiecks- oder Trapezflächen annäherten. Vgl. Toeplitz, O.: *Die Entwicklung der Infinitesimalrechnung*, 1972, S. 11ff. Die im 17. Jahrhundert entwickelte Methode der Invisibilen arbeitet mit unendlich vielen, einfach zu berechnenden, eingepaßten Flächen, die ebenfalls einen Näherungswert ergeben wie dies 1635 Cavalieri zeigt. Vgl. Toeplitz, 1972, S. 50ff

kennzeichnet sind.<sup>120</sup> Anders gesprochen: Die Operationszeichen determinieren qua Reglement den Umgang mit den Zeichen. Der Prototyp einer Struktur ist die Formel, in welcher die Zeichen formal-operativ verwendet werden. Die Umformung einer Formel gemäß den Regeln sowie die Anwendung auf eine Grundmenge geordneter Entitäten macht diese berechenbar. Dabei wird die Formel in den Term einer Funktion überführt, die den Zeichen eines Intervalls der Grundmenge Zeichen zuordnet, sofern alle Zeichen und Operationen definiert sind. Die Differentiation und die Integration bilden Strukturierungen des Umgangs mit Zeichen, welche die Operationen auf Funktionen anwenden, um Informationen über den funktionalen Zusammenhang des Verhaltens von Ausgangsfunktionen in Abhängigkeit von diesen zu gewinnen. Indem die Formeln auf Objektbereiche angewendet werden, lassen sie sich als Interpretationsstrukturen nutzen.

Diese Art der Verwendung zeigt sich eindrucksvoll in der Mathematisierung der Physik, wenn „... *in der Physik ›Theorie‹ mit ›mathematischer Theorie‹ tendenziell bedeutungsgleich [wird] ... und zugleich von essentieller methodischer Bedeutung ist.*“<sup>121</sup> Die Identifikation gemessener physikalischer Größen mit dem Spektrum der reellen Zahlen erzeugt eine einheitliche Referenzbasis der Zeichen, welche dieselben Strukturen sowohl berechenbar wie meßbar macht. Die Quantifizierung physikalischer Größen führt diese in einen Bereich geordneter Entitäten über, die mit Zeichen notiert werden können. Da diese mit den reellen Zahlen identifiziert werden, welche ebenfalls als geordnete Entitäten erzeugbar sind, ist der Zusammenhang zwischen Messung und Berechnung hergestellt. Dazu müssen die Entitäten syntaktisch disjunkt und differenziert sowie aufgrund einer explizierbaren Ordnung schematisch hantierbar sein.<sup>122</sup> Die Interpretation dieser Entitäten als Zahlen oder gemessene physikalische Größen hängt vom theoretischen Interpretationsrahmen ab. Die Mathematisierung der Physik, angeregt durch Newtons *Mathematische Prinzipien der Naturphilosophie*, führt zu einer Identifizierung der mathematischen Theorie mit der wahren.<sup>123</sup> Berechenbarkeit wird zu einem pragmatisch motivierten Wahrheitskriterium, das die Prognose des Verhaltens physikalischer Größen erlaubt, welches analog den formalisierten Zeichensystemen als durch Gesetze determiniert angenommen wird. Die Methode der Formalisierung mit unterschiedlichen Strukturierungen des Zeichenumgangs konstituiert den wis-

---

<sup>120</sup> Der Unterschied zwischen Strukturen und Strukturierungen soll an folgendem Beispiel veranschaulicht werden. Für eine algebraische Strukturierung des Zeichenumgangs ist die Operation der Subtraktion und damit aller, mit dieser Operation gebildeten Strukturen entsprechend definiert. Für eine zahlentheoretisch funktionale Strukturierung des Zeichenumgangs muß die Operation der Subtraktion, wie sie in algebraischen Systemen üblich ist, modifiziert werden. D.h. diese Strukturierung erzeugt andere Strukturen.

<sup>121</sup> Stichweh, R.: Zur Entstehung des modernen Systems wissenschaftlicher Disziplinen: Physik in Deutschland 1740 – 1890, 1984, S. 173

<sup>122</sup> Zwar ist das Symbolschema der reellen Zahlen laut Nelson Goodman ein syntaktisch dichtes System, doch aufgrund des Meßvorgangs werden den an sich kontinuierlichen physikalischen Größen eindeutig Zahlen zugeordnet, deren Ungenauigkeit im Bereich von Fehlertoleranzen festgelegt ist. Meßinstrumente sind Instrumente zur Erzeugung differenzierter Entitäten aus einem Kontinuum. Vgl. Goodman, 1995, S. 125ff

<sup>123</sup> Vgl. Böhme, G./van den Daele, W./Krohn, W.: Die neue Wissenschaft der Renaissance, 1977, S. 9f

senschaftlichen Erkenntnisgegenstand.<sup>124</sup> Deutlich zeigt sich dies bei den geometrischen Bildern der Funktionen, die sich als mechanische Bilder interpretieren lassen, indem beispielsweise die Funktion selbst mit dem Weg, die erste Ableitung mit der Geschwindigkeit und die zweite Ableitung mit der Beschleunigung identifiziert wird.<sup>125</sup> Differentialgleichungen beschreiben dann die Gesetzmäßigkeiten in der Entwicklung - Wachstum und Zerfall - dynamischer Systeme, wenn sich der Entwicklungsverlauf als eine Lösungsfunktion bezogen auf die voranschreitende Zeit notieren läßt. So läßt sich beispielsweise begrenztes Wachstum mit der Gleichung  $dM/dt = r(k/r - M)$  darstellen, und die Lösung ist die Funktion  $M(t) = k/r (1 - e^{-rt})$ . Der Graph der Funktion wächst anfangs sehr schnell und nähert sich dann dem Grenzwert  $k/r$  an, der jedoch nie erreicht wird (Abb. 3). Unbegrenzttes Wachstum läßt sich mit der Gleichung  $dP/dt = rP$  formulieren und als Funktion  $P(t) = Me^{rt}$  lösen (Abb. 4). Das logistische Wachstum wird mit  $dP/dt = rP(L - P)$  formuliert, wobei  $L$  irgendeine Grenzgröße ist. Die Lösung  $P = ML/(M + (L - M)e^{-Lrt})$  ist in Abbildung 5 dargestellt.<sup>126</sup>

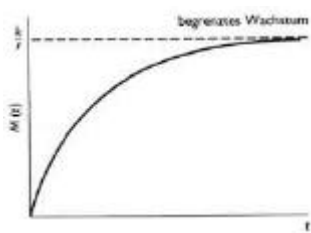


Abb. 3: Begrenzttes Wachstum

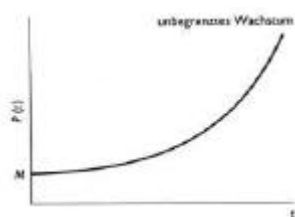


Abb. 4: Unbegrenzttes Wachstum

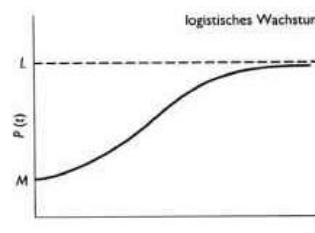


Abb. 5: Logistisches Wachstum

Bereits das geometrische Bild einer Funktion stellt durch die Berechnung eines formalen Terms eine Interpretation dar. Die formale Struktur des Terms generiert durch sukzessive Anwendung auf gegebene Werte, die nach einer festgelegten Ordnung schrittweise voranschreiten, Funktionswerte, deren Dynamik sich graphisch fixiert widerspiegelt, indem die konkreten Wertepaare der Funktion als Punkte in eine Zahlenebene eingetragen werden. Dabei wird ein Wertepaar, das zwei Elemente umfaßt in ein einzelnes, graphisches Zeichen (Punkt) transformiert, das innerhalb eines Koordinatensystems eine zweistellige Relation kodiert und eindeutig durch das Wertepaar notiert ist. Die graphische Interpretation führt visuelle Zeichen (Schriftzeichen) in visuelle Zeichen (graphische Zeichen) über, wobei die strukturellen Eigenschaften erhalten bleiben. Allerdings kodieren graphische Zeichen diese Eigen-

<sup>124</sup> „Der Gegenstand, der solchen operativen Verfahren unterworfen werden kann, muß dann der Bedingung genügen, als Referenzobjekt der entsprechenden Symbole interpretiert werden zu können.“ Krämer, 1988, S. 92

<sup>125</sup> „Ist die Ableitung einer Funktion für  $a \leq x \leq b$  überall 0, so ist die Funktion eine Konstante. Der Satz ist geometrisch sehr einleuchtend: wenn die Kurve in jedem Punkt genau horizontal gerichtet ist, kann sie nur exakt horizontal fortschreiten, stellt also eine Konstante dar ... noch anschaulicher ist er am mechanischen Bild der Funktion: Ableitung 0 heißt hier die Geschwindigkeit 0, Ruhe. Wenn ein bewegter Punkt in jedem Zeitmoment ruht, dann steht er überhaupt still, sein Ort  $s$  ist konstant.“ Toeplitz, 1972, S. 94

<sup>126</sup> Die Beispiele wurden entnommen aus: Devlin, 1998, S. 104ff

schaften in einer anderen Art als Schriftzeichen. Die Funktion  $f(x) = 2x$  ordnet die Zahlenpaare in w-ranschreitender Ordnung der natürlichen Zahlen wie folgt an:  $\langle 1,2 \rangle$ ;  $\langle 2,4 \rangle$ ;  $\langle 3,6 \rangle$ ,  $\langle 4,8 \rangle$  usf. In graphische Zeichen transformiert, stellen diese Zahlenpaare vier Punkte in einer Ebene dar. Die Verbindung der Punkte ist nur erlaubt, wenn die Funktion in dem vorgegebenen Intervall monoton stetig ist, also ohne Sprünge entweder aufsteigt oder absteigt. Da die Steigung nicht immer wie in diesem Beispiel konstant ist ( $f'(x) = 2$ ), müßten theoretisch alle Paare berechnet werden. Dies ist für die reellen Zahlen jedoch in endlicher Zeit nicht durchführbar. Die Differentiation stellt deshalb eine Approximation dar, in welcher sich der Abstand  $h$  zwischen zwei Zahlen  $h \rightarrow 0$  nähert. Die graphische Umsetzung als eine in einem Intervall durchgängige Kurve abstrahiert diesen Tatbestand. Ein weiterer Unterschied zwischen einer schriftzeichenbasierten und graphischen Interpretation besteht in der Limitierung der Diskretisierung. In endlicher Folge notierte Schriftzeichen sind aus diskreten Zeichen gebildet und bilden wiederum voneinander unterscheidbare, diskrete Zeichen, auch wenn das Symbolschema im Falle der reellen Zeichen syntaktisch dicht ist. Der Erhalt diskreter graphischer Zeichen wie Punkte hängt von der Auflösung der Darstellung ab sowie von dem Faktor, ab wann aufgrund der Dichte und Lage die diskreten Zeichen zu einer Gestalt (graphische Struktur) verschmelzen. Die Übertragung des dynamischen Verhaltens berechenbarer, schriftbasierter Texturen auf graphische Strukturen führt neue Eigenschaften mit sich.

## 5. Von der Beschreibbarkeit zur Berechenbarkeit

Die Entwicklung von der Formalisierung zur Mechanisierung vollzieht sich in einem grundlegenden Funktionswandel der Schrift, der von der Beschreibbarkeit zur Berechenbarkeit führt. Dabei geht es nicht darum, zwei voneinander unabhängige Funktionen darzustellen, sondern den Zusammenhang zwischen beiden, der sich aus einem Wandel der Verwendungsweise der Schrift ergibt, zu skizzieren. Entscheidend für diesen Wandel ist die Eliminierung des extrasymbolischen Bereichs der Zeichen und die Einführung einer intrasymbolischen Ebene, die den Umgang mit den Zeichen regelt. Dazu ist es nötig, die Verwendung der Zeichen selbst zu symbolisieren (Operationszeichen) und anhand von Regeln zu explizieren. Schrift dient dann nicht mehr der Reproduktion vorgegebener Ordnungen, sondern erlaubt die produktive Erzeugung und Umsetzung beliebiger Ordnungsstrukturen, insofern sich dafür Regeln angeben lassen. Dabei wandeln sich die Zeichensysteme zu prozeßorientierten Strukturen, die sowohl ihre Verwendung als auch die Objekte der Zeichenverwendung (Variablen) anzeigen. Die tatsächliche Ausführung kann zwar im Rahmen der Schriftlichkeit erfolgen, bedarf aber einer han-

delnden Person. Die Ausführung der Operationen läßt sich jedoch unter bestimmten Bedingungen mechanisieren. Die formal-operative Zeichenverwendung führt nicht nur eine intrasymbolische Ebene im Zeichenumgang ein, sondern kennzeichnet sich dadurch, daß die Zeichen auf sich selbst anwendbar werden. Denn es sind keine extrasymbolischen Objekte oder Sachverhalte auf welche sich die Zeichenverwendung konzentriert, es sind die Symbole selbst, die als Variablen oder Ziffern Gegenstand der Operationen werden. Die Schrift wird hierbei als Produktionssystem, als operative Schrift, verwendet und zeichnet sich durch ihren verfahrensmäßigen bzw. instrumentellen Charakter aus.

Welche Voraussetzungen bringt die Schrift ein, daß diese Entwicklung möglich wird? Die Verschriftung auf Basis der Alphabetisierung schafft eine Technologie, die endlich viele, diskrete graphische Gestalten (Buchstaben) zu linearen Folgen (Worte) zusammenfügt. Dabei notieren in der gesprochenen Sprache die Buchstaben Laute (phonographisches Prinzip) und ihre Ordnung ergibt sich aus der semantisch kodierten Bedeutung. Die Folge der Zeichen  $\{a, b, m, u\}$  in der Ordnung  $W = \{baum\}$  entspricht einem Wort, dessen semantische Bedeutung aus der konventionellen Zuordnung eines extrasymbolischen Bezugs resultiert. Eine Sprache zum Zwecke der Beschreibung lernen heißt, die gültigen Zeichenfolgen mit den tradierten Bedeutungen zu verknüpfen, wobei sich für die Gültigkeit keine formalen Kriterien angeben lassen. Gültige Zeichenfolgen sind bedeutungsvolle Zeichenfolgen (Ausdrücke).<sup>127</sup> Die Buchstaben selbst sind im Rahmen der natürlichen Sprache nicht bedeutungsvoll, sondern stellen ein syntaktisch disjunktes und differenziertes Symbolschema für die Verschriftung gesprochener Sprache zur Verfügung. Schriftbasierte Zeichen und Zeichenfolgen zu formalisieren bedeutet, ihre Zulässigkeit nicht konventionell aus der semantisch kodierten Bedeutung zu gewinnen, sondern durch die schematische Befolgung expliziter Regeln. Die Schematisierung der Symboloperationen basiert auf einer spezifischen Strukturierung von Zeichensystemen, die regelbasierte Anweisungen in endlichen Texten erfordert, welche schrittweise von Instruktion zu Instruktion leiten.<sup>128</sup> Der Aufforderungscharakter der Anweisungen kann dabei so allgemein formuliert sein, daß diese von einer Maschine ausführbar sind.<sup>129</sup> Im Falle der Mechanisierung müssen die Anweisungen schrittweise in endlich vielen, maschinell ausführbaren Operationen abarbeitbar sein, wobei jeder Schritt regelbasiert in den nächsten übergehen muß.

---

<sup>127</sup> Semantisch kodierte Ausdrücke unterscheiden sich aufgrund ihres extrasymbolischen Bezugs von den interpretationsfreien Zeichenfolgen. Diese bedeutungsvollen Zeichenfolgen werden in der Semiotik Zeichen genannt und weisen einen, auf der Einteilung von Charles S. Peirce basierenden triadischen Bezug auf. Deshalb ist dieser Zeichenbegriff hier nicht verwendbar.

<sup>128</sup> Dies können umgangssprachliche Rezepte und Algorithmen oder kunstsprachliche Kalküle sein, wobei sich damit auch semantische Ausdrücke schematisch verwenden lassen. D.h. die Formalisierung von Zeichensystemen bedingt über den regelbasierten Zeichenumgang die schematische Ausführung der Regeln, die Schematisierung bedeutet jedoch noch keineswegs eine Formalisierung. Für schriftbasierte Zeichensysteme ist die Relation zwischen Formalisierung und Schematisierung asymmetrisch. Erst die Mechanisierung bedingt eine symmetrische Relation zwischen beiden Strukturierungen des Zeichenumgangs.

<sup>129</sup> Die Eigenschaft der Allgemeinheit fordert, daß der Übergang von Ausführungsschritt zu Ausführungsschritt expliziert ist und daß die Schritte sich voneinander ableiten. undefinierte Sprünge machen eine Anweisung maschinell unausführbar.

Allgemein gesprochen ist also von schriftbasierten Zeichensystemen die Rede, welche aus einer endlichen Menge diskreter Zeichen bestehen. Schriftbasiert meint, die Entitäten des Systems sind graphisch realisierte Konfigurationen, die syntaktisch disjunkt und differenziert sind und deren Speicherung mit der Präsentation identisch ist. Durch die Kennzeichnung besonderer Zeichen als Operationszeichen lassen sich in den Zeichensystemen Zeichenfolgen bilden, die über die Eigenschaft *Teil einer Folge zu sein* hinaus weitere Eigenschaften anzeigen, welche sich aus den Relationen zwischen den Zeichen – gekennzeichnet als Operationen – ergeben. Solche Zeichenfolgen werden formale Strukturen oder Formeln genannt.<sup>130</sup> Formale Strukturen besitzen die Eigenschaft, im Prinzip berechenbar zu sein, insofern die entsprechenden Operationen definiert, auf einen geordneten Objektbereich anwendbar und die erzeugten Zeichen ebenfalls definiert sind.<sup>131</sup> Die Berechnung stellt eine Form der Interpretation formaler Strukturen dar, indem die Zeichen als berechenbare Zeichen verwendet werden, welche nicht nur syntaktisch disjunkte und differenzierte graphische Konfigurationen sind, sondern semantisch eindeutig geordnete Entitäten symbolisieren, die Werte genannt werden ( $l = w, f; n = 1, 2, \dots$ ). Im Unterschied zu Worten läßt sich die Semantik der Werte formalisieren und mechanisieren. Die Berechnung der Symboloperationen basiert auf einer spezifischen Strukturierung von Zeichensystemen, welche einen funktionalen Zusammenhang zwischen Zeichen oder formalen Strukturen zu Zeichen eines Anwendungsbereiches geordneter Entitäten artikuliert (Funktionen). Die Gestalt des funktionalen Zusammenhangs zeigt sich anhand des Entwicklungsverlaufs der berechneten Werte, dessen Verhalten durch eine abgeleitete Struktur beschreibbar ist. Funktionen sind semiotische Maschinen zur Erzeugung definierter Werte, die unter spezifischen Bedingungen mechanisiert werden können.<sup>132</sup>

Der Weg von der Beschreibbarkeit zur Berechenbarkeit führt von der Formalisierung zur Schematisierung und gegebenenfalls zur Mechanisierung der Zeichenverwendung. Im Laufe dieser Entwicklung erhalten schriftbasierte Zeichen, die in semantisch kodierten Zusammenhängen konventionell festgelegt und damit lesbar sind, den Status beliebiger graphischer Entitäten, die angewandt auf geordnete Objektbereiche, berechenbar werden. Somit lassen sich mit dem Symbolsystem der Schrift sowohl Beschreibungen als auch Berechnungen ausführen. Ein Zusammenhang ist beschreibbar, indem endlich viele Worte zu Sätzen strukturiert zusammengefügt werden, so daß bedeutungsvolle und nachprüfbar Aussagen entstehen. Ein Zusammenhang ist formal darstellbar, wenn die Struktur der Aus-

---

<sup>130</sup>  $a + b$  meint:  $a$  steht mit  $b$  in Relation der Addition bzw. die Addition ist eine zweistellige Relation, die zwei Zeichen miteinander verknüpft. Die Addition ist eine spezifische Operation, die aus der Ausführung festgelegter Additionsregeln resultiert.  $a + b$  ist eine algebraische Struktur oder Formel, da die Addition laut den Regeln Teil einer algebraischen Zeichenverwendung ist.

<sup>131</sup> Nicht jede Formel ist tatsächlich berechenbar. Es sind auch nicht-formale Strukturen denkbar, die berechenbar sind. Allerdings handelt es sich dann um natürlichsprachliche Formulierungen formaler Strukturen.

<sup>132</sup> Partiiell rekursive Funktionen und aussagelogische Funktionen sind mechanisierbar.

sage in ein formalisiertes Zeichensystem widerspruchsfrei übertragen und die Zeichenfolgen gemäß regelbasierten Operationen umgeformt werden können. Ein Zusammenhang ist berechenbar, falls die formale Struktur funktionalisierbar ist und auf eine Grundmenge geordneter Entitäten angewandt werden kann.



### III. SEMIOTISCHE ANALYSE – SIMULIERBARKEIT

#### 1. Digitalisierte Zeichen

##### 1.1 Maschinelle Zeichenverarbeitung

Der Zusammenhang zwischen Formalisierung und Mechanisierung, der bereits von Gottfried W. Leibniz erkannt wurde und ihn zur Konstruktion von Rechenmaschinen veranlaßte, ist die Voraussetzung der Computerentwicklung. Leibniz hat nicht nur ein Modell einer Rechenmaschine zur Ausführung aller vier Grundrechenarten entworfen, die eine *Lebendige Rechenbanck* sein sollte,<sup>1</sup> er hat sich vor allem Gedanken über die zu verarbeitenden Zeichen gemacht. Sein Vorschlag einer dualen Darstellung der Zahlen und dementsprechend formulierten Regeln zur Ausführung der Grundrechenarten sind das Ergebnis seiner Bemühungen.<sup>2</sup> Der Nachteil der Maschine von Leibniz wie auch anderer besteht in der Spezifizierung für einen definierten Bereich von Operationen, indem der Mechanismus zur Ausführung der Operationen die Maschine selbst ist. Oder entsprechend dem Computerjargon gesprochen: Es handelt sich um *festverdrahtete* Operationen, wie sie noch für die unter Mitarbeit von Alan Turing gebauten Rechner *Robinson* und *Colossus* typisch sind.<sup>3</sup> Die Abstraktionsleistung, die vollbracht werden muß, um einen allgemein programmierbaren Computer zu entwerfen, besteht darin, den Vorgang der Zeichenverwendung selbst zu mechanisieren, um dann jedes effektive Rechenverfahren simulieren zu können. Erst dann stellt sich auch die Frage, welche Operationen überhaupt berechenbar sind. Um also eine universelle Maschine zu entwerfen, bedarf es einer Strukturierung der Zeichenverwendung, die elementar, determiniert und endlich ist - so wie Turing es mit seinem Konzept einer automatischen Maschine vorschlägt, für welche die Zeichenverwendung im Beschriften, Löschen oder Überschreiben eines Feldes und in der Bewegung nach links oder rechts gemäß vorge-

---

<sup>1</sup> „... so ich eine *Lebendige Rechenbanck* nenne, dieweil ein Wort dadurch zu wege gebracht wird, daß alle Zahlen sich selbst rechnen, addiren subtrahiren multipliciren dividiren...“ Leibniz, G.W.: Sämtliche Schriften und Briefe, 1923ff, II/1, S. 160. Diese Maschine besteht aus einem Zählwerk aus Staffelwalzen mit achsenparallelen Zähnen. Das Rechnen vollzieht sich dann als mechanischer Vorgang, der durch eine Kurbel angetrieben wird. Vrgl. Mainzer, 1995, S. 32ff. Vor Leibniz haben sich vor allem Wilhelm Schickard und Blaise Pascal mit dem Bau von Rechenmaschinen befaßt. Allerdings gelingt es erst Leibniz alle vier Grundrechenarten zu mechanisieren, indem er die Multiplikation auf die Addition und die Division auf die Subtraktion zurückführt. Seine Rechenmaschine basiert jedoch auf dem Zehnersystem, da das Dualsystem die feinmechanischen Fähigkeiten seiner Zeit überforderte.

<sup>2</sup> „Ebenso sei erwähnt F. Bacon ... der 1623 ein „Zwei-Buchstaben-Alphabet“ für Geheimschriften vorschlägt und T. Hariot (1560 - 1621), in dessen Nachlaß bereits vier Grundoperationen des dualen Zeichensystems behandelt sind.“ Mainzer, 1995, S. 38

<sup>3</sup> Colossus hatte eine klar umgrenzte Aufgabe, er diente der Entschlüsselung des Enigma-Kodes.

gebener Instruktionen besteht, sowie eines Mediums, welches das entsprechende Symbolsystem zur Verfügung stellt. Spricht Turing in seinem logisch-mathematischen Konzept von Zeichen eines Alphabets, so müssen diese Zeichen derart spezifiziert sein, daß eine Maschine diese verwenden und umformen kann. Diese Art von Zeichen können jedoch nur Zustände der Maschine sein, die ein geeignetes syntaktisches wie semantisches Schema aufweisen.<sup>4</sup> Da eine Maschine lediglich interpretationsfrei mit den Symbolen bzw. Zuständen agieren kann, muß das semantische Schema entsprechenden Kriterien genügen, wie sie typisch für Werte sind, d.h. es muß sich um ein Schema handeln, das formal-operativ erzeugbar ist und im Grunde den syntaktischen Anforderungen der Differenziertheit Rechnung trägt, die ansonsten in der visuellen Gestalt der Zeichen kodiert ist. Der Begriff semantisch ist hier also in einem anderen, intrasymbolischen Sinne zu verstehen als in Bezug auf sinnhafte Zeichen mit extrasymbolischer Bezugnahme.

Wie sieht nun die tatsächliche Umsetzung der Mechanisierbarkeit des Vorgangs des Rechnens und Schreibens aus? Die physikalische Implementierung basiert auf der Diskretisierung elektrischer Zustände mit Hilfe von Schaltungen sowie der Realisierung elementarer Operationen mit diesen Schaltungen. Liegt an einem Eingang eines Schalters t elektrische Spannung an, so leitet der Schalter den Strom: am Ausgang liegt Spannung vor ( $t = L$ ). Liegt keine Spannung an, so sperrt der Schalter ( $t = \emptyset$ ).<sup>5</sup> Durch die Kopplung von Schaltungen lassen sich Gatter bilden, welche entsprechend den aussage-logischen Operationen ein Muster an Eingangs- und Ausgangszuständen bilden. Negationselement, UND- sowie ODER-Gatter sind die Grundbausteine der Schaltalgebra, aus welchen sich kompliziertere Schaltungen bauen lassen. Die Gatter verarbeiten die Operationen gemäß den Wahrheitstafeln der Konjunktion, Disjunktion und Negation *„Mathematisch gesehen wird durch die Wahrheitstabelle eine Funktion y definiert, die in Abhängigkeit von ihren beiden Variablen a und b die Werte  $\emptyset$  und L annehmen kann.“*<sup>6</sup> Die Funktionen lassen sich symbolisch schreiben:  $f_K = a \wedge b$  für die Konjunktion,  $f_D = a \vee b$  für die Disjunktion und  $f_N = \neg a$  für die Negation. Die Rechenregeln für die Schaltalgebra bilden eine Boolesche Algebra, welche ein abgeschlossenes System zweier Operationen darstellt, für welches kommutatives, assoziatives, distributives und Verschmelzungsgesetz gilt und in welchem ein Nullelement, ein Einselement und zu jedem Element ein Komplement existiert.<sup>7</sup>

<sup>4</sup> In dem Modell von Leibniz waren die Zustände Zähne der Staffelwalzen, die entsprechend positioniert und von daher syntaktisch disjunkt und differenziert waren.

<sup>5</sup> Zu Beginn der Computerentwicklung nutzte man elektromagnetische Schalter (Relais), später Röhrenschaltungen und Transistoren und schließlich integrierte Schaltkreise auf Siliziumkristallplättchen (Chips). LSI-Chips weisen auf wenigen mm<sup>2</sup> tausende Gatter, VLSI-Chips über 100.000 Gatter auf. Damit sind Schaltungsgeschwindigkeiten im Nanosekundenbereich möglich.

<sup>6</sup> Schauer, H.: Computersysteme – Aufbau und Funktionsweise, 1976, S. 12

<sup>7</sup> Schaltalgebra:

	Rechenregeln der Konjunktion	Rechenregeln der Disjunktion	
$\emptyset \wedge \emptyset = \emptyset$	$a \wedge L = a$	$\emptyset \vee \emptyset = \emptyset$	$a \vee L = L$
$\emptyset \wedge L = \emptyset$	$a \wedge \emptyset = \emptyset$	$\emptyset \vee L = L$	$a \vee \emptyset = a$
$L \wedge \emptyset = \emptyset$	$a \wedge a = a$	$L \vee \emptyset = L$	$a \vee a = a$

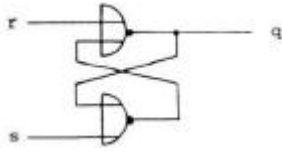


Abb. 6: Speicherelement

Schaltungen lassen sich mit Hilfe von Schaltfunktionen schreiben, und insgesamt gibt es sechzehn mögliche Schaltfunktionen für zwei Eingangsvariablen, wobei die NOR- und die NAND-Schaltung von besonderem Interesse sind. Beide Schaltungen sind zueinander dual und haben die Eigenschaft, jeweils alle anderen Schaltfunktionen darzustellen. Auf Basis dieser Grundelemente lassen sich komplexere Schaltungen bauen.

Schaltet man beispielsweise zwei NOR-Gatter gegenseitig rückgekoppelt, so läßt sich auf diese Weise ein Speicherelement konstruieren. Liegt am set-Eingang des Speicherelements kurzzeitig Spannung an, so wird der Ausgang  $q = L$ . Fällt die Eingangsspannung auf Null zurück, bleibt die Spannung durch die Rückkopplung in der Schaltung erhalten. Liegt am reset-Eingang Spannung an, wird die Spannung am Ausgang Null  $q = \emptyset$  und zwar solange, bis an den set-Eingang Spannung angelegt wird. Ein solches Speicherelement heißt RS-Flip-Flop, und mit ihm läßt sich eine Dualziffer speichern.<sup>8</sup> Um die Zustandsänderungen in Flip-Flops zu koordinieren, wird deren Verhalten mit einem gemeinsamen Taktimpuls gesteuert, so daß taktgesteuerte Flip-Flops ein synchrones Netzwerk erzeugen. Mit Hilfe von Verzögerungselementen läßt sich ein Signal um den Abstand von zwei Taktimpulsen verzögern. Schaltet man eine Folge von Flip-Flops mit Verzögerungselementen aneinander, so erhält man ein Schieberegister, um eine  $n$ -stellige Dualzahl zu speichern.<sup>9</sup> Ein Register speichert Zahlwerte in Form von 0/1-Folgen. Die kleinste Einheit ist eine binäre Stelle (bit), die zwei binäre Werte darstellen kann. Mehrere Werte lassen sich speichern und nach rechts oder links verschieben.

	$L \wedge L = L$	$a \wedge \neg a = \emptyset$	$L \vee L = L$	$a \vee \neg a = L$
Kommutatives Gesetz	$a \wedge b = b \wedge a$		$a \vee b = b \vee a$	
Assoziatives Gesetz	$(a \wedge b) \wedge c = a \wedge (b \wedge c)$		$(a \vee b) \vee c = a \vee (b \vee c)$	
Distributives Gesetz	$(a \vee b) \wedge (a \vee c) = a \vee (b \wedge c)$		$(a \wedge b) \vee (a \wedge c) = a \wedge (b \vee c)$	
Verschmelzung	$a \vee (a \wedge b) = a$		$a \wedge (b \vee c) = a$	
In der Schaltalgebra gilt das Prinzip der Dualität, d.h. „zwei Funktionen sind zueinander dual, wenn nach Komplementbildung der Variablen der einen Funktion das Ergebnis gleich dem Komplement der anderen Funktion ist“ Schauer, 1976, S. 21				
Konjunktion und Disjunktion sind zueinander dual und es gilt:				
	$\neg(a \wedge b) = \neg a \vee \neg b$		$\neg(a \vee b) = \neg a \wedge \neg b$	
De Morgan Theorem	$\neg(a \wedge b \wedge c \dots) = \neg a \vee \neg b \vee \neg c \dots$		$\neg(a \vee b \vee c \dots) = \neg a \wedge \neg b \wedge \neg c \dots$	
Shannon Theorem	Es erlaubt das Komplement von Schaltfunktionen zu bilden, in welchen Konjunktion und Disjunktion gemischt auftreten. Die Klammerung legt die Reihenfolge der Operationen fest.			

<sup>8</sup> „Der Ausgang  $q$  des RS-Flip-Flops ist nicht nur von den beiden Eingangsgrößen  $r$  und  $s$ , sondern auch vom momentanen Zustand  $q = \emptyset$  oder  $q = L$  des Flip-Flops abhängig.“ Schauer, 1976, S. 37. Wird an den Eingängen des RS-Flip-Flops gleichzeitig Spannung angelegt, ist der Folgezustand nicht definiert. Dies kann in einer Schaltung vermieden werden, die zwei UND-Gatter aneinander koppelt (JK-Flip-Flop) oder indem bei einem JK-Flip-Flop beide Eingänge kurzgeschlossen werden (T-Flip-Flop). Das T-Flip-Flop ist ein multistabiler, endlicher und deterministischer Automat, mit einem Eingang, der alle Zustände in sich selbst überführt. Und multistabile Automaten sind grundsätzlich als Speicher geeignet. Unter einem Automaten versteht man einen Apparat oder eine Schaltung, der abhängig von den Eingangsgrößen von seinem aktuellen Zustand in einen anderen Zustand übergeht. „Ein Automat heißt endlich, wenn er endlich viele Zustände annehmen kann, und deterministisch, wenn jeder Zustand durch den vorhergehenden Zustand und die Eingangsgrößen bestimmt ist.“ Schauer, 1976, S. 54

<sup>9</sup> „Schaltet man den Ausgang des Schieberegisters in den Eingang zurück, so kann eine gespeicherte Dualzahl innerhalb des Registers rotieren. Schieberegister werden unter anderem häufig benutzt, um die Operanden und das Resultat arithmetischer Funktionen zu speichern.“ Schauer, 1976, S. 42

Damit kommt ein Register der Vorstellung Turings von einem Band mit Feldern (bit) zur Notierung von je einem Zeichen (L) bzw. als Leerstelle ( $\emptyset$ ) nahe. Mit den Gattern lassen sich weitere Schaltungen wie verschiedene Addierwerke (Akkumulatoren), Subtrahierwerke, Zähler, Vergleichswerke und mehr bauen. Die Operationen der Multiplikation und Division werden auf Addition und Subtraktion zurückgeführt, wie bereits von Leibniz vorgeschlagen.<sup>10</sup> Die aus den Gattern erzeugten Bauteile ergeben ein einfaches Rechnermodell: Mehrere Register werden als Speicher für Operanden genutzt, ein Rechenwerk (+, -, x, ÷) erlaubt die Realisierung der Grundrechenarten und weitere Register speichern die Ergebnisse. Um den Datentransfer zu regulieren, ist jedes Register mit einer Adresse zu versehen, und zu jeder Operation ist diese Adresse mit anzugeben. Die gewünschten Operationen sind in Einzelschritte (Befehle oder Instruktionen) zu zerlegen, die als Operationskodes geschrieben werden. *ADD R a* beispielsweise gibt an, den Inhalt des Registers R um den Inhalt der Speicherzelle a zu erhöhen ( $R := R + a$ ), *STO R a* sorgt dafür, daß der Inhalt des Registers R auf die Speicherzelle a übertragen und damit gespeichert wird ( $a := R$ , store).<sup>11</sup> Um eine Berechnung auszuführen, bedarf es einer Folge von Anweisungen (Programm), welche die Operationen, Adressierungen und Registerinhalte (Daten) schrittweise in einer sinnvollen Reihenfolge koordinieren, sowie eines komplexeren Rechnermodells aus Programmspeicher, Steuerwerk, Rechenwerk und Arbeitsspeicher. Die Programme werden in einem separaten Programmspeicher in Form von Programmspeicherworten abgelegt, welche Informationen über die Art der Operation, die Registernummer sowie die Adresse enthalten. Ein Steuerwerk liest die Befehle aus dem Programmspeicher, schlüsselt diese zur Verarbeitung in den Operationsteil, die Registernummer und den Adressteil auf und leitet die Daten weiter.<sup>12</sup>

Alle aus mnemotechnischen Gründen verwendeten symbolischen Schreibweisen (Assemblerprogramm) müssen in eine binärverschlüsselte Form (Maschinenprogramm) transformiert werden. Dazu werden die symbolischen Operationskodes binärkodiert, Registerbezeichnungen und Dezimalzahlen als Dualzahlen dargestellt und Variablen an bestimmte Speicherzellen binärverschlüsselt adressiert. Da der Rechner permanent zwischen beiden Phasen wechselt, lassen sich Programm und Daten in

---

<sup>10</sup> Statt der Multiplikation einer p-stelligen Dualzahl wird eine p Addition durchgeführt. Die ganzzahlige Division ( $a \div b$ ) mit Rest ( $a \bmod b$ ) wird in Einzelschritte zerlegt. Für die ersten Stellen des Dividenden wird geprüft wie oft der Divisor enthalten ist. Die ermittelte Anzahl liefert die erste Stelle des Ergebnisses. Der Rest des Dividenden wird um die nächste Stelle erweitert und geprüft, wie oft der Divisor enthalten wird, usf. In einem binären System kann der Divisor nur Null-mal oder Ein-mal enthalten sein. Die Division ist also einfacher als im Dezimalsystem und kann durch einen Vergleich der Dualzahlen ermittelt werden. Zur Division benötigt man neben den Registern ein Subtrahierwerk und ein Vergleichswerk.

<sup>11</sup> Das Ergibtzeichen ( $:=$ ) unterscheidet sich wesentlich von dem mathematischen Gleichheitszeichen ( $=$ ). Das Ergibtzeichen drückt eine dynamische Operation aus und ist unsymmetrisch.

<sup>12</sup> „Die automatische Abwicklung eines Befehls erfolgt somit in zwei Phasen. In der ersten Phase – der Instruktionsphase (engl. instruction cycle) – wird der Befehl aus dem Programmspeicher gelesen, und decodiert. ... In der zweiten Phase – der Ausführungsphase (engl. execution cycle) – wird der decodierte Befehl ausgeführt.“ Schauer, 1976, S. 81. Es ist wichtig die Programmbefehle in aufeinanderfolgenden Speicherzellen abzulegen, denn dann können mit einem Befehlszähler die Adressen der Programmbefehle verwaltet werden, indem der Zähler jeweils um 1 erhöht wird. Damit ist das Programm vollautomatisch durchführbar und es bedarf lediglich eines Stop-Befehls, um das Programm abubrechen.

einem Speicher ablegen und dadurch Bauteile einsparen. Damit ist die Hardware für unterschiedliche programmgesteuerte Aufgaben verwendbar. Die Effizienz von Programmen ergibt sich aus einer Strukturierung der Operationsabfolgen, die es ermöglicht, nicht nur Operationen linear nacheinander auszuführen, sondern mit Hilfe von Sprungbefehlen Teile des Programms oder Unterprogramme beliebig oft zu verwenden (Schleifen).<sup>13</sup> Damit erhöht sich jedoch auch die Komplexität der Programme, die dynamische, verschachtelte Operationsfolgen darstellen. Diese Dynamik läßt sich in Programmablaufplänen (flow-chart) darstellen. Während die Grundoperationen der Booleschen Algebra in Form elektronischer Schaltungen als Hardware (Gatter) implementiert sind, beschreiben Unterprogramme beliebige programmierbare Operationen wie mathematische Berechnungen von Quadratwurzeln, Winkelfunktionen etc.<sup>14</sup> Eine Sammlung von Standard-Unterprogrammen bildet eine Programmbibliothek.

## *1.2 Strom als fluides Trägermedium*

Wie gestaltet sich die Realisierung der Zeichen in dem fluiden Medium Strom? Der Übergang von der skriptographischen zur typographischen Zeichenverwendung zeichnet sich durch eine Reduktion der bereits vorhandenen Zeichen aus. Hinzu kommt die Entwicklung neuer Prinzipien des Zeichengebrauchs: Diskretisierung der Zeichen, Sequenzierung der sprachlichen Einheiten, Entwicklung der grammatikalischen Normalform des Aussagesatzes und das Ausschreiben der Worte statt der Verwendung von Abkürzungen. Beide Technologien basieren jedoch auf demselben Erzeugungsprinzip, dem der Visualisierung mittels konventionalisierter Zeichen. Das Erzeugungsprinzip von Zeichen und Zeichensystemen mit Computern hingegen ist davon verschieden. Während im Falle der skriptographischen und typographischen Implementierung die Speicherung und die Präsentation zusammenfallen, sind beide im elektronischen Medium des Computers voneinander getrennt. Oder anders gesprochen: Das Mittel der graphisch realisierten Schriftzeichen wird nur noch für die Präsentation genutzt, nicht mehr zur Speicherung und Generierung der Zeichen auf der Maschinenebene. Das Erzeugungsprinzip von Schriftzeichen im Rechner nimmt auf das Prinzip der Verschriftung mittels diskreter Entitäten Bezug, transformiert dieses Prinzip jedoch in maschinell ausführbare Operationen.

---

<sup>13</sup> Ein Sonderfall ist ein Unterprogramm, das sich selbst aufruft (rekursives Unterprogramm).

<sup>14</sup> Die Hardware umfaßt als Kernstück eine Zentraleinheit (CPU central processing unit) mit Arbeitsspeicher, der bei Spannungsabfall gelöscht wird sowie Steuerwerk und Rechenwerk, die allesamt auf einem Chip integriert sind. Steuerwerk und Rechenwerk werden als Prozessor bezeichnet. Der interne Informationsaustausch erfolgt mit einem Bus-System zur Übertragung von Daten (Datenbus), zur Auswahl von Adressen (Adressbus) und zur Übermittlung von Signalen (Steuerbus). Peripheriegeräte werden über Ports angeschlossen, die an das Bus-System durch Interfaces angekoppelt sind.

Dies ist möglich, da Zeichensysteme wie die Alphabetschrift syntaktisch disjunkt und differenziert und deshalb digitalisierbar, d.h. eindeutig in einen binärkodierten, numerischen Wert überführbar sind (numerisches Prinzip).<sup>15</sup> Jedem gängigen Zeichen (Charakter) - Buchstaben des Alphabets, Zahlzeichen, Interpunktionszeichen und Sonderzeichen - wird mit den ASCII-Textkodes (American Standard Code for Information Interchange) ein numerischer Werte zwischen 0 und 255 zugewiesen.<sup>16</sup> Einem graphischen Zeichen  $z$  wird eindeutig ein numerischer ASCII-Kode  $a$  für  $z$  zugewiesen, der wiederum eindeutig als Binärzeichen  $b$  für  $a$  notiert ist. Die Kodierungsprozesse  $a$  für  $z$  und  $b$  für  $a$  sind programmgesteuerte Operationen. Während  $a$  für  $z$  konventionell festgesetzt ist, läßt sich  $a$  für  $b$  als Operation formalisieren. Mit den ASCII-Textkodes ist die Generierung von insgesamt 256 graphischen Zeichen möglich. Jedes ASCII-Zeichen wird durch eine 8-bit große Zahl identifiziert ( $2^8 = 256$  Zeichen). Eine einstellige duale Zahl heißt ein bit (binary digit) und kann zwei verschiedene Zeichen darstellen: 0 oder 1. Mit 2 bit lassen sich vier Zeichen modulieren: 00, 01, 10, 11. Mit 8 bit, einem byte, lassen sich 256 Zeichen darstellen.<sup>17</sup>

Die computerbasierte Realisierung von Zeichen ist programmgesteuert. Programme werden mittels Programmiersprachen erstellt, die künstliche Sprachen sind. Als Maschinensprachen können sie direkt vom Computer ausgeführt werden und bestehen aus 8bit langen 0-1-Folgen. Da sie jedoch für Menschen nicht verstehbar sind, werden Programme in Hochsprachen (C, C++, Kobol, Pascal, Prolog u.a.) geschrieben und mit Hilfe von Compilern in die Maschinensprache übersetzt. *Programme* sind Folgen von Anweisungen, also präzise artikulierte Vorgehensweisen zur Lösung spezifischer Aufgaben, die Computer verstehen können. Unter *verstehen* ist die Ausführbarkeit der in den Codes enthaltenen Befehle zur Zeichenmanipulation gemeint. *Programme notieren Algorithmen. Eine gutgewählte Notation muß eindeutig sein, da sie vom Rechner eindeutig in maschinelle Operationen umgesetzt werden muß.*<sup>18</sup> Die binärkodierte Notierung der Zeichen erfordert die Unterscheidung und Kennzeichnung von Zeichenklassen, die sich in ihrer operationalen Handhabung unterscheiden. Computer arbeiten mit verschiedenen Zeichenklassen, die in den Programmen über Variablentypen unterschieden sind: ASCII-Zeichen (char) und binary numbers: Byte-Zahlen (0 bis 255 oder -127 bis 127), Integer-Variablen (ganze Zahlen, int), Fließkomma-Variablen (Kommazahlen, float). Der Befehl `int=a;` bei-

<sup>15</sup> „Die Schrift ist von Anfang an ein digitales Medium, da es sich auf einen endlichen Zeichenvorrat (Alphabet) beschränkt. Jedes endliche Alphabet läßt sich eindeutig in das Binäralphabet  $B=\{0, 1\}$  abbilden. Dies ist die Basis der Digitalisierbarkeit aller schriftlichen Medien.“ Coy, 1994, S. 71

<sup>16</sup> Die ASCII-Kodes zwischen 0 bis 127 sind genormt, 0 bis 31 und 127 sind Kontrollcodes, die Codes zwischen 128 bis 255 können sich je nach gewähltem Zeichensatz unterscheiden. Beispielsweise ist der Zahl 70 der Buchstabe F zugewiesen.

<sup>17</sup> Mit  $n$  Bit lassen sich  $2^n$  verschiedene Zeichen darstellen, und zwar die Zahlen von 0 bis  $2^n - 1$ . Ziffern sind ebenfalls mit ASCII-Kodes darstellbar, jedoch nur als konventionell vereinbarte, binärcodierte Charaktere, nicht als variabel handhabbare numerische Werte.

<sup>18</sup> Coy, 1994, S. 70

spielsweise in der Programmiersprache C gibt den Typ und den Namen der Variablen an und  $a=1$ ; weist dann der Variable einen Wert zu.<sup>19</sup> Eine Deklaration für eine Variable kann über den Eingabekanal erfolgen, im Programm vorgegeben sein oder aktuell erzeugt werden. Der Standard-Eingabekanal ist die Tastatur, der Standard-Ausgabekanal der Bildschirm. Beide Kanäle werden automatisch durch das Betriebssystem mit dem Programm verbunden. Darüber hinaus sind eine Vielzahl weiterer Ein- und Ausgabekanäle wie Meßgeräte, Scanner oder Drucker möglich. Unabhängig vom Kanal wird jede Variable an einer definierten Stelle im Speicher abgelegt, um wieder auffindbar zu sein (Adresse). Adressen werden mit Hilfe eines einstelligen Adressoperators ermittelt, dessen Operand der Name der Variable und dessen Ergebnis die Adresse der Variable ist. Adressen lassen sich in speziellen Variablen sog. Zeigern (pointer) speichern: Mit dem Befehl `int i;` wird eine Integer-Variable deklariert, mit `int*z;` ein Zeiger auf eine Integer-Variable deklariert und schließlich mit `z=&i;` der Zeiger auf `i` gerichtet. Der Zeiger muß vom selben Datentyp wie die Variable sein, auf die er zeigt. Dementsprechend lauten für ein ASCII-Zeichen die Befehle: `char c;` `char*z;` `z=&c;`. Neben den Variablentypen `char`, `int` und `float` gibt es logische Werte, die entweder wahr oder falsch sein können und ebenfalls numerisch dargestellt sind. In der Programmiersprache C werden die logischen Werte als Integer-Variablen gespeichert: Für den logischen Wert *falsch* hat die Variable den Inhalt 0, für alle anderen von 0 verschiedenen Inhalte ist ihr logischer Wert *wahr*.<sup>20</sup>

### 1.3 Operieren, Speichern, Präsentieren

Mit der Tastatur lassen sich die Zeichen aktivieren, d.h. auf den Bildschirm schreiben. Die Zeichen, so wie wir sie sehen, werden von Zeichenfolgen (Programmen), die ebenfalls als elektrische Zustände realisiert sind, numerisch kodiert und in einem eindeutigen Binärkode notiert. Die Präsentation basiert auf graphischen Zeichen, die Inskriptionen von Schriftzeichen darstellen und als Gestalt aus Bildpunkten auf dem Monitor erscheinen. Das Erzeugungsprinzip unterscheidet sich von dem der Schriftlichkeit (phonographisches Prinzip). Die Zeichen werden weiter zerlegt und in eine binärkodierte, numerische Notation überführt (numerisches Prinzip). Es wird eine subsymbolische Ebene eingeführt, die aus einem diskreten Symbolschema und einem digitalen Schema besteht, insofern unter digital mit nume-

<sup>19</sup> Variablen können auch symbolische Namen sein wie *Name*, die durch eine individuelle Dateneingabe von ASCII-Zeichen mit `gets(name)`; konkretisiert werden. Die Beispiele der Programmiersprache C sind dem Internet-Vorlesungsskript von Peter Kolb entnommen. [Quelle 1: Kolb, P.: C-Kurs, o. Dat.]

<sup>20</sup> In der Programmiersprache Pascal gibt es den Variablentyp Boolean, der die Werte TRUE oder FALSE annehmen kann. Logische Werte werden für Vergleichsoperationen (`>` ist größer als, `<` ist kleiner als, `>=` ist größer oder gleich, `<=` ist kleiner oder gleich, `==` ist gleich, `!=` ist ungleich) und logische Operationen (`&&` und, `||` oder für zweistellige Operatoren und: `!` nein für den einstelligen Negationsoperator) verwendet. Zudem gibt es arithmetische Operationen für int- und float-Variablen.

rischen Werten darstellbar verstanden wird. Die Folge der Transformation der Zeichen in Maschinenzustände besteht in der Differenzierung eines Erzeugungsteils und eines Präsentationsteils der Zeichen. Lediglich letzterer hat mit den uns vertrauten Schriftzeichen Ähnlichkeit. Der Erzeugungsteil basiert auf der subsymbolischen Ebene unanschaulicher Zeichenzustände. Notieren Buchstaben den Klang der Sprache, so notieren Binärfolgen Schriftzeichen und geben diese programmgesteuert als visuelle Ereignisse auf den Bildschirm aus. Dabei wandelt sich der Vorgang des Notierens. Notationen werden zu programmgesteuerten Operationen, um maschinell ausführbar zu sein. Die Notationen bestehen in der Explizierung des Variablentyps, der Variablendeklaration und der Adressierung, also in den Angaben, um welche Art von Zeichenklasse es sich handelt (Variablentyp), welchen konkreten Wert die Variable besitzt (Deklaration) und wo sie gespeichert ist (Adresse). Zeichen in diesem Sinne verstanden sind nicht mehr materialfixierte Zeichenträger in Form visuell verdinglichter Entitäten als Basis von Symboloperationen, sondern sie sind Resultate von Operationen. Schrift wird zum Produkt digitaler Zeichenoperationen, d.h. der Buchstabe a wird als numerischer Wert 65 kodiert und als 1000001-Folge notiert, ein b wird als 66 kodiert und als 1000010-Folge notiert. *Elektronisch realisierte Zeichensysteme* lassen sich deshalb beschreiben als eine endliche Menge von Operationen diskreter Zustände und expliziter Regeln über den Gebrauch dieser Operationen. Da die Regeln selbst Operationen sind, stellen maschinell realisierte Zeichensysteme Operationen über Operationen dar.

#### 1.4 Bytezahlen und ASCII-Kode

Zur Realisierung von Zahlen im Computer bieten sich zwei Möglichkeiten an: Zahlen lassen sich zum einen als Zeichen auf Basis der ASCII-Kodes wie Buchstaben oder Hilfszeichen auch darstellen, zum anderen als numerische Werte unanschaulicher Byte-Zahlen. Hier zeigt sich die Besonderheit der Entitäten, die wir mit Ziffern symbolisieren, denn Zahlen referieren auf einen geordneten Bereich von Entitäten. Und diese Ordnung läßt sich kalkülisieren und mechanisieren. Indem dieses Verhältnis umgekehrt wird und eine Zahl oder ein numerischer Wert nicht als Stellvertreter einer abstrakten Entität

$$\mathbb{N} \left\{ \begin{array}{l} \Rightarrow | \\ \Rightarrow n | \end{array} \right.$$

Abb. 7: Zählkalkül

gilt, sondern als durch eine bestimmte Ordnungsstruktur erzeugbar, ist der Bereich der Zahlen, soweit er einer Ordnung unterliegt,<sup>21</sup> für die maschinelle Erzeugung und Verarbeitung prädestiniert. Zahlen lassen sich also nicht nur darstellen, sondern auch erzeugen. Grundlage dieser Ordnungsstruktur ist

<sup>21</sup> Dies betrifft beispielsweise nicht die komplexen Zahlen, die keiner Ordnungsstruktur kleiner, gleich, größer unterliegen.



die Generierung von Zahlen mit Hilfe eines Zählkalküls. Dazu eignen sich einfache additive Zeichensysteme wie endliche Folgen von Strichen und Regeln zur Erzeugung von Strichfolgen.<sup>22</sup> Es läßt sich zeigen, daß arithmetische Aussagen sich mit diesen Zählzeichen schreiben lassen: so die Gleichheit von Figuren (Konstruktionsäquivalenz), die Addition von Strichlisten  $n$  und  $m$  sowie deren Kommutativität usf. Voraussetzung ist die eindeutige Bestimmung eines ersten Zählzeichens durch eine einzige Anfangsregel, die Eindeutigkeit des Nachfolgers und damit die Verschiedenheit der unterschiedlich erzeugten Zählzeichen mit Hilfe des induktiven Prinzips.<sup>23</sup> Im Unterschied zu älteren additiven Zählzeichensystemen ist hier Gleichheit keine anschauliche Gestaltgleichheit von Figuren, sondern eine Folge der Herstellbarkeit nach gleicher Abfolge von Regelanwendungen. Auch wenn dies eine pragmatische Voraussetzung ist, so garantiert sie deren Wiederholbarkeit und Reproduzierbarkeit. Unabhängig von der Art der Zählzeichen müssen arithmetische Aussagen allgemeinverbindlich sein, d.h. die gleiche Abfolge von Regeln erzeugt zähläquivalente Strukturen. So ist  $III + II = IIIII$  äquivalent mit  $3 + 2 = 5$  da  $III$  zähläquivalent mit 3 und  $II$  zähläquivalent mit 2 ist. Der Ausdruck *Zahl* gibt die vorgenommene Abstraktion wieder, die in Absehung von dem jeweiligen Zählzeichen bzw. Ziffer bezüglich deren spezifischer Eigenschaften geschieht. Dabei sind die Ziffern weder als Namen von Zahlen, noch die Zahlen als ontologische Gegebenheiten aufzufassen, sondern lediglich als Redeweisen.

Die Realisierung von Zahlen kann in unterschiedlichen Medien implementiert sein und Zählzeichen können beliebige, zähläquivalente Figuren annehmen. So läßt sich die Beschreibung *fünf* mit Hilfe von fünf Steinen oder fünf Äpfeln veranschaulichen, mit den Zahlzeichen 5, IIIII oder V darstellen oder als 00000101 Binärfolge notieren. Im Falle der rechnergestützten Realisierung wird auf zwei verschiedene Möglichkeiten zur Darstellung von Zahlen zurückgegriffen: auf *binary numbers* (byte -, integer -, floating-point numbers) und auf *ASCII text numbers*. Mit den bereits dargestellten ASCII-Kodes lassen sich die Zahlen 0 bis 9 sowie Interpunktionszeichen als Charaktere darstellen, die für uns als Zeichen lesbar sind.<sup>24</sup> Binäre Zahlen hingegen sind nur Computern zugänglich. *Byte-Zahlen* sind in einem byte gespeichert und decken das Zahlenspektrum von 0 bis 255 (unsigned byte) oder von -128 bis 127

<sup>22</sup> „... mit der Anfangsregel „ $\bar{P} \frac{1}{2}$ “ und der Fortsetzungsregel „ $n \bar{P} n\frac{1}{2}$ “, in der „ $n$ “ als schematischer Buchstabe gemäß  $N$  herstellbare Figuren vertritt. Jede nach den Regeln von  $N$  herstellbare Figur wollen wir ein „Zählzeichen“ oder eine „Ziffer“ nennen, also abweichend von dem normalen Sprachgebrauch ...“ Thiel, 1995, S. 114

<sup>23</sup> Prinzip der vollständigen Induktion oder Schluß von  $n$  auf  $n + 1$  zur Erzeugung natürlicher Zahlen. Ähnlich geht David Hilbert vor, allerdings ohne bereits auf das induktive Prinzip zu referieren, indem er lediglich einen axiomenfreien Auf- und Abbau der Zahlzeichen vorschlägt: „Wir beginnen also mit folgenden Erklärungen der Zahlen. Ein Zeichen 1 ist eine Zahl. Ein Zeichen, das mit 1 beginnt und mit 1 endet, so daß dazwischen auf 1 immer + und auf + immer 1 folgt, ist ebenfalls eine Zahl, z.B. die Zeichen  $1 + 1$ ,  $1 + 1 + 1$ . Diese Zahlzeichen, die Zahlen sind und die Zahlen vollständig ausmachen, sind selbst Gegenstand unserer Betrachtung, haben aber sonst keinerlei Bedeutung. Außer diesen Zeichen wenden wir noch andere Zeichen an, die etwas bedeuten und zur Mitteilung dienen, z.B. das Zeichen 2 zur Abkürzung für das Zahlzeichen  $1 + 1$  ... ferner wenden wir die Zeichen =, > an, die zur Mitteilung von Behauptungen dienen.“ Hilbert, 1965b, S. 163

<sup>24</sup> So läßt sich die Zahl 3.145 als 5-byte ASCII-text-string 51 46 49 52 53 darstellen. Der Vorteil von ASCII text numbers ist, daß sie für jede Plattform portabel und als Zeichen für uns lesbar sind. D.h. jede binäre Zahl, die lesbar sein soll, muß in eine ASCII-Zahl konvertiert werden.

(signed byte) ab.<sup>25</sup> Zur Notierung von höherstelligen Zahlen werden *integer numbers* verwendet, die aus zwei bytes (short integer), vier bytes (long integer) oder acht bytes (64-bit-integer) bestehen. Das Zahlenspektrum läßt sich für Integerzahlen erweitern, indem Zahlen als *fixed-point numbers* repräsentiert werden. So kann beispielsweise die Zahl  $\pi = 3,14159\dots$  mit 100.000 multipliziert als Integerzahl 314.159 gespeichert werden, wobei der Multiplikationsfaktor im Programm expliziert sein muß.<sup>26</sup> Für viele Berechnungen genügt dieses Zahlenspektrum jedoch meist nicht. Großrechner sind in der Regel mit floating-point Prozessoren ausgestattet, welche die schnelle Verarbeitung von *floating-point numbers* ermöglichen. Der IEEE-Standard 754 regelt die Arbeitsweise mit diesen Zahlendarstellungen (single-precision floating format). Für dieses 32-bit Format ist das erste bit zur Kennzeichnung einer negativen Zahl (0) bzw. positiven Zahl (1) reserviert, die nächsten acht bits zur Darstellung des Exponenten (1 – 254) und die restlichen 23 bits für die Fraktion (1,0 – 9,999).<sup>27</sup> Das Zahlenspektrum der floating-point numbers reicht von  $1,175 \times 10^{-38}$  bis  $3,403 \times 10^{38}$ . Aufgrund der 23 bit Kapazität zur Speicherung der Fraktion lassen sich Zahlen bis auf sieben Stellen genau in Dezimalnotation darstellen. Das bedeutet, daß jede weitere Stelle gerundet wird, so daß die Zahlen 3,14159265 und 3,14159264 als selbe Zahl gespeichert werden. Der Rundungsfehler kann mitunter sehr unangenehm werden.<sup>28</sup> Mit Hilfe weiterer floating-point Formate, die 64 bzw. 80 bit umfassen (double precision floating-point format bzw. extended format) lassen sich Zahlen auf 15 bzw. 18 Dezimalstellen genau wiedergeben.<sup>29</sup>

Computerrealisierte Zahlen sind im Grunde natürliche Zahlen. Erst mit der Kodierung spezifischer Strukturen lassen sich weitere Zahlensysteme darstellen.<sup>30</sup> Dabei ist zu beachten, daß Computer elektrische Zustände verarbeiten, während für uns das Rechnen nur in symbolischer Notation (Charak-

<sup>25</sup> Für unsigned bytes werden alle acht bit zur Speicherung der Zahl verwendet (00000000 – 11111111), für signed bytes wird das erste bit zur Kennzeichnung einer negativen Zahl (0) bzw. positiven Zahl (1) und die restlichen sieben bits zur Speicherung der Zahl verwendet (10000000 – 01111111). Ob eine Zahl als signed oder unsigned byte gespeichert ist, muß im Programm festgelegt werden, denn anhand der Speicherung läßt sich das nicht erkennen.

<sup>26</sup> „... you must know how the numbers are stored, their multipliers, and the offsets. The data itself does not contain this information. In other words, integer and fixed-point datafiles are not self-describing.“ Fortner, B.: The Data Handbook, 1995, S. 39

<sup>27</sup> Dazu wird beispielsweise die Zahl  $1,1277089 \times 10^{-90}$  in die Fraktion 1,1277089 und den Exponenten –90 zerlegt und wie folgt als floating-point Zahl (float) gespeichert:

s	Exponent	Fraktion
0	-90	11277089
0	-1011010	1001000001011000110001

<sup>28</sup> „This problem can be especially acute for simulations that do calculations thousands or millions of times. For example, after a million calculations, your roundoff error could be larger than 0.1.“ Fortner, 1995, S. 51

<sup>29</sup> Diese Zahlenspektren werden für die Simulation galaktischer oder atomarer Szenarien benötigt. Über die Genauigkeit hinaus ist die Geschwindigkeit entscheidend. MFLOPS geben an, zu wieviel Millionen floating-point Operationen pro Sekunde ein Rechner in der Lage ist. Und obwohl die Portabilität des Floating-point Formates aufgrund der Verschiedenheit der Großrechnerformate gering ist, liegt der Vorteil darin, daß floating-point Daten im Gegensatz zu Integerzahlen selbstbeschreibend sind, d.h. alle Informationen über die Zahl sind in der Zahl gespeichert.

<sup>30</sup> Beispielsweise signed bits zur Darstellung negativer (0) oder positiver (1) Zahlen.

tere) zugänglich ist. Die Reduktion numerischer Werte auf binäre Zustände eröffnet die Möglichkeit, diese nicht nur als Charaktere darzustellen, sondern auch als Farbwerte oder Klänge. Während es die Verschriftung erlaubt, die Darstellung von Zahlen und das Rechnen in einem Medium auszuführen, zerfällt dieser Prozeß mit der Verwendung von Computern in zwei Teile: zum einen in die Erzeugung von Zahlen und die Durchführung von Berechnungen auf Maschinenebene, zum anderen in die visuelle Präsentation der Ergebnisse auf dem Bildschirm oder dem Drucker als ASCII text number oder als Farbwerte. Die Einführung der subsymbolischen Ebene erlaubt die frei wählbare Präsentation der Zeichen als Ziffern, Farbwerte oder sogar Klang, ohne die eindeutige Notation als binary number zu verlieren. Damit wird die Fixierung auf eine spezifische Form des Zeichenträgers überwunden, d.h. die an sich für den Menschen unleserlichen, binärkodierten Zeichen können in unterschiedlichen Inskriptionen präsentiert werden und diese Inskriptionen lassen sich programmgesteuert ineinander überführen. Da sie aufgrund derselben arithmetischen Regeln gebildet sind, sind sie zähläquivalent, ohne daß dies aus ihrer symbolischen Form erschließbar wäre. Lediglich als Ziffern sind die numerischen Werte für uns leserlich, als Farbwerte sind sie ins Ikonische transformiert anschaulich geworden. Dies ist eine maßgebliche Konsequenz der computerbasierten Realisierung von Zahlen. Sowohl computerrealisierte Zeichen als auch Zahlen weisen bezüglich der frei wählbaren Präsentation neue semiotische Eigenschaften auf. Vor allem für die Zahlenausdrücke bedeutet dies, daß formal-operativ erzeugte Ordnungsstrukturen in einer neuen Art sichtbar und analysierbar werden.

### *1.5 Subsymbolische Ebene digitaler Zeichen*

In einem ersten Resümee läßt sich feststellen, daß die Rede von Zeichen, Zeichensystemen, Zeichenoperationen und Zeichenmanipulationen mehrdeutig ist. Unser Verständnis von schriftbasierten Zeichen, also Texturen, ist an das visuell Wahrnehmbare und Lesbare gekoppelt. Es ist nicht ganz zutreffend, wenn wir von einem strengen Begriff der Formalisierung und Kalkülisierung ausgehen, der auf jegliche symbolische Beschreibung verzichtet. Dies wird spätestens mit der Transformation der Zeichen in ein maschinelles Medium wie den Computer deutlich. Um mit Texturen tatsächlich maschinell zu operieren, werden diese zu binären Zuständen, die für uns mangels jeglicher Anschauung nicht mehr zugänglich sind.<sup>31</sup> Es bedarf der programmgesteuerten Übersetzung und Interpretation der Zustände in für uns wahrnehmbare Zeichen, wobei jegliche symbolische Beschreibung oder Darstel-

---

<sup>31</sup> Binary number representations: „*The numbers are coded in a very efficient way that is not 'human readable', meaning that printing the file will produce garbage. Binary data is meant to be read only by computer programs.*“ Fortner, 1995, S. 16

lung expliziert und operationalisiert werden muß.<sup>32</sup> Wenn wir leichthin ein Zeichen *a* als Buchstaben oder gar als den Buchstaben *a* identifizieren, ein Zeichen *5* als Zahl oder gar als Summe von  $3 + 2$ , bedarf es zur maschinellen Realisierung dieser Zeichen unterschiedliche Kodierungs- und Kennzeichnungsvorgänge: *a* (char), *5* (int).

Es zeigt sich, daß die maschinell realisierten Zeichen nicht dem typographisch orientierten Zeichenbegriff und dessen Prinzip der visuellen Verdinglichung entsprechen. Was aber ist ein maschinell (computerbasiertes) realisiertes Zeichen? In der erfolgten Beschreibung elektronisch realisierter Zeichensysteme wurde der Begriff *diskrete Zeichen* durch *Operationen diskreter Zustände* ersetzt. Diskrete Zeichen sind aufgrund ihrer geschlossenen Gestalt wohlunterschiedene, syntaktisch disjunkte und differenzierte, graphische Konfigurationen, die eindeutig als Buchstaben, Zahlzeichen, Operationszeichen oder Hilfszeichen wahrgenommen werden können, wenn sie wohlgeformt sind. Im Falle formal-operativer Zeichensysteme ist es unerheblich, die Zeichen als spezifische Buchstaben wahrzunehmen. Es ist jedoch von entscheidender Bedeutung, die Zeichen (Buchstaben, Zahlzeichen, Operationszeichen, Hilfszeichen) als Zeichen bestimmter Zeichenklassen mit eindeutig durch Regeln und Definitionen zugeordneten Funktionen zu interpretieren. Dies macht deutlich, daß auch in schriftbasierten Kalkülsystemen die Zeichen nicht beliebige Entitäten sind, sondern daß sie als syntaktisch disjunkte und differenzierte Inskriptionen intrasymbolisch wohl definiert und unterschieden sowie Zeichenklassen aufgrund ihrer Gestalt zugeordnet sein müssen.<sup>33</sup>

Bei genauer Betrachtung zeigt sich, daß nicht die uns vertrauten graphischen Zeichen für die computerbasierte Realisierung transformiert werden, sondern ihre syntaktischen Eigenschaften. Die syntaktische Disjunktheit und Differenziertheit der Zeichen wird zur eindeutig kodierten Diskretheit der elektrischen Zustände. Die in den unterschiedlichen graphischen Gestalten der Zeichen konventionell kodierten Informationen werden als numerische Werte notiert (ASCII-Kode). D.h. nicht die Schrift als Technologie zur Sichtbarmachung von Zeichen, sondern das Prinzip der Schrift, das ein syntaktisch disjunktes und differenziertes Symbolschema konstituiert, wird in ein computables Symbolsystem

---

<sup>32</sup> Übersetzungen und Interpretationen können jedoch fehlerhaft sein, d.h. wir können nicht immer sicher sein, ob die auf dem Bildschirm präsentierten graphischen Zeichen tatsächlich den Eingaben entsprechen. Nun mag man einwenden, daß schlecht reproduzierte Druckbuchstaben oder unleserliche Handschriften ebenfalls fehlerhaft sein können. Der Unterschied besteht jedoch darin, daß diese Form der Fehlerhaftigkeit leicht erkannt werden kann, da sie die Wohlgeformtheit der Zeichen verletzt. Eine falsche Interpretation des Codes seitens des Programms mag ein falsches, aber wohlgeformtes Zeichen erzeugen, die Fehlerhaftigkeit besteht in einer falschen Relation zwischen subsymbolischer und intrasymbolischer Ebene. Dies ist vor allem für numerische Simulationen von Bedeutung, da hier das Kriterium der Wohlgeformtheit kein Unterscheidungskriterium mehr zwischen fehlerhafter und fehlerfreier Darstellung ist.

<sup>33</sup> Natürlich können Buchstaben oder Zahlen Operations- oder Hilfszeichen markieren, doch wenn die Interpretation einmal festgelegt ist, sind die Zeichen nicht mehr beliebig austauschbar. Unabhängig welche Zeichen wie interpretiert werden, die Interpretation gilt dann für die gesamte Zeichenklasse, wie die der Buchstaben oder Operationszeichen. D.h. die Fähigkeit zur Unterscheidung von Zeichenklassen aufgrund ihrer Gestalt wird vorausgesetzt.

überführt. Dieses Symbolsystem besteht aus einem diskreten Symbolschema und einem digitalen Schema. Die so konstituierten Zeichen sollen *digitale Zeichen* genannt werden. Digitale Zeichen führen eine zusätzliche Ebene ein, die als subsymbolische Ebene bezeichnet wird. Während die Einführung der intrasymbolischen Ebene durch die Formalisierung der Zeichenverwendung die Handhabung der Zeichen operationalisiert und diese Operationen mit entsprechenden Zeichen symbolisiert, operationalisiert die subsymbolische Ebene die Zeichen als Maschinenzustand selbst. Dies geschieht zum Zwecke der maschinellen Realisierung des Zeichenumgangs. Oder anders gesprochen: Die Zeichen sind nicht mehr nur Entitäten der Symboloperationen, sie werden im elektronischen Medium selbst operationalisiert. Die wahrnehmbare Präsentation ist lediglich eine Referenz an unsere Anschauung.

Der Zusammenhang zwischen Formalisierung und Mechanisierung ergibt sich demnach aus der Strukturierung der Zeichenverwendung. Dabei werden die Zeichen weiter zerlegt und besitzen eine digitale, unanschauliche als auch eine anschauliche Extension. Der Vorteil der weiteren Zerlegung der Zeichen ist ihre Operationalisierbarkeit auf der subsymbolischen Ebene. Erst als digitale Zeichen besitzen sie diejenigen Eigenschaften, um maschinell verarbeitet werden zu können. Zu diesen Eigenschaften gehören ihr diskretes Symbolschema und ihr digitales Schema sowie ihre maschinelle Erzeugbarkeit. Maschinell ausführbare Operationen ergeben sich aus der Konfiguration elektrischer Zustandsänderungen, die mit den Schaltfunktionen beschreibbar sind. Schaltfunktionen sind semiotische Maschinen zur Erzeugung definierter Zustände, die als Werte interpretiert und gegebenenfalls mit schriftbasierten Zeichen präsentiert werden können. Die dafür notwendigen Schaltungen sind in der Hardware implementiert. Die Trennung zwischen Erzeugung und Speicherung von Werten und deren Präsentation erlaubt für letztere die mediale Freiheit. D.h. Werte können als schriftbasierte Zeichen präsentiert werden (ASCII-Zeichen), als Farbwerte oder Töne. Die Mechanisierung atomisiert die Zeichen weiter<sup>34</sup> und führt einen neuen Umgang im Vergleich zum schriftbasierten Zeichengebrauch ein, welcher die Erzeugung<sup>35</sup> und Speicherung der Entitäten, die von deren Präsentation abgekoppelt ist, berücksichtigt.<sup>36</sup> Neben der Entkopplung von Semantik und Syntax durch die Formalisierung und die daraus resultierende Reglementierung und Schematisierung der Zeichenverwendung zum operati-

---

<sup>34</sup> Ist für den klassischen Zeichenbegriff das bedeutungsvolle Wort die kleinste Einheit, so werden diese Zeichen für formalisierte und kalkülisierte Zeichensysteme in ihre Teile (Grapheme) atomisiert. Die Aufmerksamkeit konzentriert sich auf das bloße Zeichen und seine syntaktischen Eigenschaften. Die Mechanisierung führt zu einer weiteren Normierung des Zeichenbegriffs.

<sup>35</sup> In typographisch realisierten Zeichensystemen gilt die Normierung der Zeichenerzeugung - der Schreib- oder Druckvorgang - mit der Abkoppelung von extrasymbolischen Bedeutungen als vernachlässigbar. Jede beliebige graphische Konfiguration kann, wenn sie hinreichend syntaktisch disjunkt und differenziert ist, verwendet werden und der Zeichenvorrat wird als gegeben für das Zeichensystem vorausgesetzt. Der Erzeugungsprozeß hat keinerlei Einfluß auf die Zeichen und das Zeichensystem. Eine Ausnahme bilden Zeichen für Werte, die anzeigen, woraus sie zusammengesetzt, also wie sie erzeugbar sind.

<sup>36</sup> Entgegen dem Argument, das computerrealisierte Zeichen bestünde nur in seiner symbolischen Präsentation und diese Präsentation referiere auf elektrische Zustände, soll angeführt werden, daß die eigentlichen Symbolmanipulationen der Maschinen nicht auf der Präsentationsebene stattfinden. Ein solcher Zeichenbegriff würde die Eigenschaften der Mechanisierung von Zeichensystemen nicht erfassen und nicht klären, was es heißt, den Umgang mit den Zeichen zu mechanisieren.

ven Gebrauch beliebiger graphischer Entitäten erfordert die Mechanisierung die Entkopplung der Zeichen von ihrer graphischen Form - und damit letzte Reste intrasymbolischer Bedeutungen - und die Operationalisierung der in der graphischen Form implementierten Informationen als geordnete Konfigurationen diskreter Zustände, die numerische Werte repräsentieren.

## **2. Form der Simulation**

Mit dem Computer ist ein Instrument gegeben, das Zeichen gemäß Operationsvorschriften umformt und erzeugt. Aufgrund der dargestellten Besonderheit handelt es sich dabei um Zeichen, die dem Symbolsystem des Computers entsprechend als digitale Zeichen numerisch kodiert sind. Die naheliegendste Verwendungsweise des Computers ist daher der Gebrauch als Rechenmaschine und die Entwicklung mathematischer Methoden, die jene arithmetischen Vorteile des Computers nutzen. Die numerische Simulation ist eine solche Methode, welche die Arbeitsweise und Leistungsfähigkeit der Rechner in einer neuen Strategie zur Lösung komplexer Gleichungen umsetzt. Das Besondere der numerischen Simulation im Unterschied zu anderen Anwendungen dabei ist, daß die Simulation die Eigenheiten der digitalisierten Zeichen nutzt. Oder anders gesprochen: Die Möglichkeiten digitalisierter Zeichen zeigen sich nirgends deutlicher als bei der Methode der numerischen Simulation und ihrer Visualisierung.

### *2.1 Organisationsprinzip*

Nachdem untersucht wurde, was Zeichensysteme sind, wie sich deren beschreibende Funktion von der berechnenden unterscheidet und wie sich die Transformation schriftbasierter Zeichen in computerbasierte vollzieht, gilt nun das Interesse der Frage, welche neuen Darstellungsmöglichkeiten sich mit digitalen Zeichen eröffnen. Die numerische Simulation wird dazu als prototypisches Anwendungsbeispiel analysiert. Im Unterschied zur Schrift basiert die Mechanisierung der Zeichen primär nicht auf den Eigenschaften visueller Entitäten, sondern auf den (unanschaulichen) operativen Eigenschaften der Zeichen. Die notwendige Interpretation dieser Zeichenoperationen als Schriftzeichen, Farbwerte oder Klänge entbindet computerbasierte Zeichen von einer fixierten, sinnlich wahrnehmbaren Präsentation. Dies ist möglich, weil die Erzeugung der Zeichen selbst einer Formalisierung unterworfen wird, welche die syntaktischen Eigenschaften der Schriftzeichen erhält (Disjunktheit und Differenziertheit),

ihre gestaltbasierte Unterscheidbarkeit numerisch kodiert und die Präsentation von der Erzeugung, Verarbeitung und Speicherung der Zeichen abkoppelt. Die unanschauliche Verarbeitung elektrischer Zustände erreicht mit den aktuellen Rechnerleistungen eine enorme Geschwindigkeit: Es werden rund 100 Milliarden Operationen in der Sekunde durchgeführt, d.h. es können wesentlich mehr computerbasierte Zeichen in der selben Zeit generiert und verarbeitet werden als es Menschen möglich ist, schriftbasierte Zeichen zu erzeugen und zu erkennen. Vor allem für die numerische Simulation ist dies von Bedeutung.

Welche Art von Symbolsystem konstituiert die numerische Simulation? Dazu wird die Form, die Entfaltung der Form und die Präsentation der Form numerischer Simulationen untersucht. Mit *Form* ist zunächst nicht die äußere Form oder Gestalt gemeint, sondern die spezifische Weise des Umgangs mit digitalen Zeichen. Sie stellt ein bestimmtes Organisationsprinzip dar ähnlich jenen der Schrift, des Kalküls oder der Liste für typographische Zeichen. Ein Text beispielsweise basiert in diesem Sinne auf einer spezifischen Strukturierung (Wortbildung und -reihung) von Materialien (Buchstaben), und die Organisationsprinzipien der Schrift erlauben die Möglichkeit der Texterstellung. Sie bestehen nicht nur in der Anweisung, die Buchstaben von links nach rechts anzuordnen oder die Zeilen von oben nach unten fortzuschreiben, sie beinhalten auch die Implementierung des Materials in dessen Strukturierung auf einem Trägermaterial in der Weise, daß die Lesbarkeit gewährleistet ist (Zeichengestalt-Hintergrund-Differenzierung). Dies und mehr trägt dazu bei, mit der typographischen Form Informationen als Text zu realisieren, wobei hier unter Information lediglich die syntaktische Bereitstellung differenzierter Zeichenfolgen in einer normierten Form gemeint ist, d.h. die Informationen sind in der gestaltbasierten Differenzierung der Zeichen verschlüsselt. Die Bedeutung generiert sich dann durch die Interpretation der Zeichen des geschriebenen Textes.<sup>37</sup> Im Unterschied zur typographischen Form, die bereits fünfhundert Jahre alt ist und auf der noch älteren skriptographischen basiert, wird die Form der numerischen Simulation zur Informationsdarstellung aktuell entwickelt. Simulationen als spezifische Anwendungen mechanisierter, zeichenbasierter Operationen erschließen einen semiotischen Bereich, der eine neue Form der Syntax und der Semantik mit sich bringt, die von der Dynamik der Zeichenoperationen entfaltet und ikonisch dargestellt wird. Damit sind neue Einsichten möglich, wobei zu klären sein wird, was sich da zeigt.

---

<sup>37</sup> Für einen herkömmlichen Text mag dies unzutreffend klingen, da bereits die Erstellung des Textes das Wissen um die Bedeutung voraussetzt. Für die hier betrachteten formal-operativen Zeichensysteme ist die Bedeutung ohne Belang, d.h. Erzeugung und Interpretation sind getrennte Vorgänge.

Die Form der numerischen Simulation ist wesentlich komplexer als die typographische. Die Mechanisierung der Zeichenverarbeitung setzt ein maschinelles Medium voraus, das nicht nur Spuren hinterläßt, sondern den Zeichenumgang mitstrukturiert.<sup>38</sup> Beim Vorgang des Schreibens wird mit passiven Trägermaterialien (Papier, Tinte) die Schrift von einem Autor ausgeführt. Die Trägermaterialien schaffen die Voraussetzung für die Ausführung der Implementierung von Inskriptionen. Die Mechanisierung der Zeichenverarbeitung in einem fluiden Medium (Strom) wandelt die Passivität des Vorhandenseins des Trägermaterials in funktionalisierte Prozesse, die von der Hardware für die Implementierung der Software bereitgestellt werden. Dabei wird der gesamte Vorgang der Zeichenerzeugung umstrukturiert und die eigentliche Handlung der Implementierung wird an das maschinelle Medium delegiert. Dazu bedarf es einerseits der Algorithmisierung der Implementierungsvorgänge im Rahmen von Computerprogrammen, andererseits der Normierung der Inputeingabe in Form taktiler Aktivierungen von Zeichenprozessen.<sup>39</sup> Der Vorgang des *Schreibens* erhält eine zweifache Bedeutung. Zum einen, indem die herkömmliche Form als Implementierung von Inskriptionen mit Hilfe der Tastatur simuliert wird, so als schreibe man direkt auf den Bildschirm, zum anderen als Programmierung maschinell ausführbarer Instruktionen. Durch die Delegation der Implementierung von Inskriptionen an den Computer und die Reduktion des Schreibvorgangs als Input- oder Dateneingabe wird es möglich, die maschinelle Inkorporation von Texten wie von Objekten vorzunehmen, insofern letztere digitalisierbar sind.<sup>40</sup> Die Mechanisierung des Trägermaterials funktionalisiert das fluide Medium des Elektrischen entsprechend der logischen Struktur der Schaltungen (Gatter), welche die Hardware konstituiert, und ermöglicht die binäralgebraische Verarbeitung der elektrischen Zustände. Die Kombination der logischen Struktur der Hardware und der operativen Struktur der Software mit der Datenstruktur der Inputeingabe und -ausgabe bilden die Bedingungen des Organisationsprinzips des Computers als semiotische Maschine. Die Zeichenverwendung in Form numerischer Simulationen ergibt sich darüber hinaus aus der mathematischen Struktur der zu simulierenden Gleichungen.

---

<sup>38</sup> Im Unterschied zur Auffassung - Medien wären nur sinntransportierend und nicht sinnstiftend – kann die vorliegende Untersuchung als Versuch gewertet werden, den Einfluß der Medien darzulegen. „*Das Medium ist nicht einfach die Botschaft, vielmehr bewahrt sich an der Botschaft die Spur des Mediums.*“ Krämer, S.: *Das Medium als Spur und Apparat*, 1998a, S. 81. Es zeigt sich, daß die elektronischen Medien mehr als nur vage Spuren hinterlassen, sondern die Bedingungen der Zeichenoperationen in Form von Normierungen stellen. Allgemein läßt sich zeigen, daß die Medien die Form der Symbolsysteme mitkonstituieren, wie es anhand der digitalen Zeichen deutlich wird.

<sup>39</sup> Das klassische Eingabegerät ist die Tastatur, doch auch die akustische Inputeingabe via Mikrophon ist mittlerweile möglich. Dabei wird die Inputeingabe zur Dateneingabe und läßt sich automatisieren, d.h. die Dateneingabe muß nicht ausschließlich von einem menschlichen Autor vorgenommen werden, sondern kann aus der Tätigkeit von Maschinen wie Scanner, digitale Kameras, Meßgeräte etc. resultieren.

<sup>40</sup> Damit sind nicht nur Bilder von Objekten gemeint, sondern Objekte selbst, insofern sich deren Oberflächen mit Hilfe von 3D-Scannern digitalisiert *einschreiben* lassen, oder die durch Meßdaten charakterisiert werden.



## 2.2 *Überschreiben als neue Technologie*

Die logische Struktur der Hardware resultiert aus der Schaltalgebra, die es erlaubt, die Binärarithmetik mit den logischen Operationen UND, ODER, NICHT auszudrücken. Die physikalische Implementierung der Schaltalgebra (Gatter) entspricht der Modulation des Aussagenkalküls mit diskreten elektrischen Zuständen als Interpretationen von wahr und falsch bzw. 1 und 0 (Stromfluß/kein Stromfluß). Die Regeln der Schaltalgebra bilden eine Boolesche Algebra und es läßt sich mit den logischen Werten gemäß diesen Regeln rechnen. Aus diesen basalen Schaltungen werden in einer Art hierarchischen Baukastenprinzips zahlreiche weitere Schaltungen zur Speicherung, Multiplikation, Division und mehr aufgebaut, und insbesondere die Verschaltung zu Flipflops ermöglicht die Speicherung von Werten. Diese Strukturierung des Trägermediums erfordert die Formalisierung der Zeichen als programmgesteuerte Zeichenoperationen. Ein computerrealisiertes Zeichen generiert sich aus den numerisch gespeicherten Informationen über seinen Typ (char, int, float), seinen Ort (Adressierung) und seinen Wert im Kontext eines Programms.

Die Zeichen zu verarbeiten bedeutet, die Werte entsprechend einer Umformungsvorschrift direkt zu verändern und dabei den alten Zustand zu *überschreiben*. Diese Verarbeitungsweise unterscheidet sich von einem schriftbasierten Formalismus, der aus einem schriftlich notierten Umformungsschritt den nächsten ableitet, niederschreibt und so einen linearen Ablauf der Verarbeitungsschritte erzeugt und gleichzeitig speichert. Die Arbeitsweise der Computer hingegen erfordert einen anderen Umgang. Auf Basis eindeutiger Instruktionen werden die Zustände der Zeichen umgeformt und überschrieben, wobei die Instruktionen Verrechnungen auf binärarithmetischer Basis darstellen. Dies setzt voraus, daß Aufgabenstellungen in Form von Problemlösungen formuliert und daß die einzelnen Schritte zur Problemlösung in ihre elementarsten Teile zerlegt werden, so daß sie als Umformungsvorschrift regelbasiert abarbeitbar sind und schließlich als Lösung die neuen Zustände ausgeben.<sup>41</sup> Die Definition des Algorithmischen ist Ausdruck dieses operativen Vorgehens in einem maschinellen Medium.<sup>42</sup> Zumeist wird der Fokus auf die analytische Verfahrensweise der Algorithmen gerichtet, die im Sinne der Konzeption Alan Turings so elementar ist, daß die Begriffe Algorithmus, allgemeines Problemlösungsverfahren und Berechenbarkeit synonym werden. Von Bedeutung ist jedoch, daß Algorithmen operative Instrumente sind, welche die Lösung einer Aufgabe nicht nur darstellen, sondern im Rah-

---

<sup>41</sup> Dabei muß es sich nicht nur um Umformungen handeln, sondern es können auch Löschungen oder Hinzufügungen stattfinden. Das charakteristische der Arbeitsweise der Computer liegt jedoch in den Umformungen und Überschreibungen von Daten (Zeichenmanipulationen). Entsprechend der Konzeption Alan M. Turings wäre es die Vorschrift des Löschens und Beschriftens eines Feldes und damit das Überschreiben von Zeichen.

<sup>42</sup> "An Algorithm is a precise and unambiguous specification of a sequence of steps that can be carried out mechanically." Aho, A.V./Ullmann, J.D.: *Fundation of Computer Science*, 1995, S. 5

men eines Programms zugleich ausführbar machen. Sie zeichnen sich durch ihre darstellende und exekutive Funktion aus, wobei die exekutive Funktion im Medium des Computers zur Entfaltung kommt und sich in der Notwendigkeit zeigt, daß ein Algorithmus abbrechend sein muß, will man ihn nicht zwangsweise stoppen oder den Rechner bis in alle Ewigkeit arbeiten lassen. D.h. die Endlichkeit des Textes des Algorithmus garantiert nicht seine Ausführbarkeit in endlicher Zeit. Dabei gilt das pragmatische Kriterium der Effizienz als Maß der Ausführbarkeit bezüglich endlicher Ressourcen. So ist eine Funktion dann berechenbar, wenn ein abbrechender Algorithmus existiert, der bei vorgegebenen Argumenten den Funktionswert liefert.<sup>43</sup>

Der Kode eines Computerprogramms besteht aus Kommandozeilen, die in linearer Abfolge einen vielschichtigen und verschachtelten Operationsablauf in einen endlichen Text fassen. Die Ausführung der Instruktionen hingegen folgt in der Regel nicht dem linearen Ablauf des Textes von Kommandozeile zu Kommandozeile, sondern ist durch Subroutinen, Schleifen und Sprünge zwischen Programmteilen strukturiert. Neben dieser logischen und algorithmischen Struktur basieren die numerischen Simulationen auf mathematischen Strukturen, die sich aus partiellen Differentialgleichungen herleiten. Mit diesen läßt sich die Dynamik zeitbasierter Systeme darstellen, indem eine Beziehung zwischen einer Funktion und ihren Ableitungen geschaffen wird. Die zu bearbeitenden Informationen sind in den Gleichungen symbolisiert, und die Aufgabenstellung besteht in der Berechnung der Approximation der Lösungen dieser Gleichungen für ausgewählte Eingabewerte. Um Berechnungen auf einem Computer auszuführen, bedarf es der Anpassung der zu berechnenden Gleichung an das Organisationsprinzip der Rechner. Alle symbolischen Kodierungen müssen in maschinell ausführbare, endliche Operationen übersetzt werden, d.h. die Gleichungen sind zu algorithmisieren und zu diskretisieren. Schließlich wird mit einem Programm der gesamte Ablauf der Simulation festgelegt. Die Triade Modell – Algorithmus – Programm bildet die Grundlage der numerischen Simulation.<sup>44</sup>

---

<sup>43</sup> Vrgl. Hermes, 1978, S. 1ff

<sup>44</sup> Neunzert, 1995, S. 50ff. „Der bekannte russische Mathematiker A.A. Samarskij ... spricht dabei vom „Computereperiment“, da es dieselbe Aufgabe hat wie ein normales Experiment, nämlich die Richtigkeit des Modells zu prüfen. Dieses Computereperiment mit seinen drei Stufen (der „Triade“, wie Samarskij das nennt) Modell – Algorithmus – Programm ist nach Samarskij nicht nur eine neue Wissenschaftsrichtung – „es ist eine neue wissenschaftliche Methode, die sowohl dem Denkstil eines modernen Wissenschaftlers als auch den Kreis der Probleme bestimmt, welche sich der Forscher zu stellen vermag.“ Es ist „eine neue Art die Natur zu befragen“ und es ist darüber hinaus auch eine neue Methode des technischen Designs.“ Neunzert, H.: Von Modellen und wie man sie nutzt, 1990, S. 13

### 2.3 Zeichenmaterial und Umsetzung

Das Material der numerischen Simulation sind Zahlen. Die Dateneingabe wie die Ausgabe besteht in numerischen Werten, die als Folge von 0 und 1 bzw. elektrischen Zuständen auf der Maschinenebene repräsentiert sind. Die Übersetzung der 01-Folgen in Pixel-Darstellungen zur Präsentation auf dem Koordinatensystem des Monitors kann in Gestalt von ASCII-Zeichen (Ziffern) oder Farbwerten erfolgen. Numerische Werte unterscheiden sich von ASCII-Zeichen oder Farbwerten durch ihre regelbasierte Erzeugungsweise, die es erlaubt, Werte gemäß einem Mechanismus operativ zu generieren.<sup>45</sup> Als digitale Zeichen sind sie diskret und differenziert sowie eindeutig. Allerdings begrenzt sich die Eindeutigkeit aufgrund der Endlichkeit der Zahlendarstellung im Computer auf 15 oder mehr Dezimalstellen je nach Rechnertyp. Ein numerischer Wert kann als Input vorgegeben sein oder durch Berechnung erzeugt werden. Im Gegensatz dazu sind ASCII-Zeichen wie auch Farbwerte jeweils im Konkreten zu definierende visuelle Entitäten, für die es nur eine Vorschrift, aber keinen Mechanismus der Erzeugung gibt. Die Vorschrift besteht in der programmgesteuerten Zuordnung zwischen einem numerischen Wert und einem ASCII-Zeichen oder Farbwert. ASCII-Zeichen sind diskret und syntaktisch differenziert. Farbwerte sind zwar als Werte diskret sowie syntaktisch differenziert, in ihrer Präsentation jedoch syntaktisch dicht. Computer als Maschinen zur Verarbeitung von Zeichenoperationen auf binärarithmetischer Basis sind daher bestens geeignet, mit numerischen und binärlogischen Werten dynamisch zu operieren und diese mit Programmen in beliebigen Zeichenzuordnungen zu präsentieren, jedoch nicht umgekehrt. Die Simulationen diskretisierter Gleichungen operieren mit numerischen Werten und präsentieren diese auf Basis ASCII-kodierter oder farbwertbasierter Zuordnungen. Die sichtbaren Ergebnisse sind dann endlos lange Zahlenkolonnen oder ikonische Visualisierungen.

Die Simulation erlaubt die semiotische Realisierung dessen, was in der Neuzeit als grundlegender Wandel in der Mathematik stattgefunden hat und seither symbolisch in den formalen Strukturen kodiert ist: *“Die wichtigste herausragende Bedeutung der neuen Mathematik war dagegen die umfassende Einbeziehung der Bewegung. Das führte zu einer Umbildung der Objekte aller grundlegenden mathematischen Objekte.”*<sup>46</sup> Der Computer stellt das maschinelle Medium, die Simulation, die Form zur Realisierung dynamischer Prozesse und deren Sichtbarmachung dar, insofern sich die Dynamik im Werteverlauf einer simulierten Struktur zeigt. Die formalen Strukturen zur Kodierung zeitbasierter

---

<sup>45</sup> Die Möglichkeit der Darstellung im Dualsystem läßt sich allgemein für jede natürliche Zahl zeigen und als Operation formalisieren. *“Allgemein läßt sich zeigen, daß jede natürliche Zahl a als Summe geeigneter Faktoren von Potenzen einer natürlichen Zahl b (Basiszahl) in der Form  $a = a_n \cdot b^n + a_{n-1} \cdot b^{n-1} + \dots + a_1 \cdot b^1 + a_0 \cdot b^0$  eindeutig darstellbar ist, falls  $b > 1$  und daher die Faktoren  $a_0, \dots, a_n$  nur die Werte 0, 1, ...,  $b-1$  annehmen.”* Mainzer, 1995, S. 39

<sup>46</sup> Kedrovskij, O.: Wechselbeziehungen von Philosophie und Mathematik im geschichtlichen Entwicklungsprozeß, 1984, S. 130

Entwicklungen sind Differentialgleichungen. So lässt sich beispielsweise das begrenzte Wachstumsverhalten einer Population mit der linearen Differentialgleichung  $dM/dt = r(k/r - M)$  darstellen. Die Lösung der Gleichung ist eine Funktion und lautet  $M(t) = k/r (1 - e^{-rt})$ .<sup>47</sup> In diesem Fall ist die Lösung analytisch anzugeben und der Funktionsverlauf lässt sich exakt berechnen. Die Zustandsänderung der Population  $M$  ist die abhängige, die Zeit  $t$  ist die unabhängige Variable. Die Zustandsgröße  $M$  ist als gesuchte Unbekannte abhängig vom Systemparameter  $r$ , der die Wachstumsgeschwindigkeit charakterisiert. Die Begrenzung des Wachstums ergibt sich aus dem Systemparameter  $k$ , der beispielsweise die Sättigungsgrenze der Population in Bezug auf eine begrenzte Nahrungsquelle angibt. Das System lässt sich komplexer gestalten, indem man eine Konkurrenzpopulation bezüglich der Nahrungsquelle einführt. Die Entwicklung des Gesamtsystems zeigt sich dann in der Wechselwirkung zwischen  $M_1(t)$  und  $M_2(t)$  anhand neuer Systemparameter. Die neue Differentialgleichung ist nichtlinear und es ist keine analytische Lösung bekannt, d.h. es gibt keine entsprechende Deduktion von der Gleichung zur Lösungsfunktion im Rahmen des formal-operativen Zeichensystems. Aussagen über die Lösung und damit die Dynamik des Systems, also die zeitabhängige Veränderung der Zustandsvariablen, können nur durch numerische Simulationen anhand ausgewählter Werte der Parameter, Anfangs- und Randbedingungen gewonnen werden.<sup>48</sup>

Für das beschriebene Beispiel ist die räumliche Verteilung uninteressant. Andere Anwendungen hingegen haben die zeitliche Entwicklung eines Systems im Raum zum Thema, wie beispielsweise die Strömungsdynamik. Um eine zeitabhängige räumliche Strömung zu simulieren, bedarf es der Lösung eines Systems partieller Differentialgleichungen (Erhaltungsgleichungen)<sup>49</sup> für Masse-, Impuls- (mit den drei Geschwindigkeitskomponenten) und Energiebilanzen für infinitesimal kleine Volumenelemente. Zur Bestimmung von fünf Unbekannten steht ein System aus fünf partiellen Differentialgleichungen zur Verfügung (Kontinuitätsgleichung, Energiegleichung und drei Impulsgleichungen).<sup>50</sup> Da keine analytische Lösung bekannt ist, müssen die Lösungen für eine raum- und zeitdiskrete Version der Gleichungen approximiert werden. Dazu bedarf es der Erzeugung eines Raunggitters, für dessen Berech-

<sup>47</sup> Vgl. Abbildung 3 auf Seite 36. Die Lösungen linearer Differentialgleichungen sind in der Regel nichtlinear. Für lineare, gewöhnliche Differentialgleichungen lassen sich analytische Lösungsfunktionen angeben, doch bereits für lineare, partielle Differentialgleichungen ist dies oft nicht mehr der Fall. Für nichtlineare, partielle Differentialgleichungen finden sich nur selten analytische Lösungen. Dann bleibt nur die Möglichkeit Lösungen der diskretisierten Gleichungen mit Hilfe der Computer zu berechnen.

<sup>48</sup> Die Terminologie wird in der Literatur unterschiedlich gehandhabt. So besteht für Hartmut Bossel ein System aus vielen Komponenten, deren Beziehungen zueinander vielfältig sind. Er unterscheidet Parameter (konstante Größen), Umwelteinwirkungen (vom System unabhängige Faktoren, die jedoch auf das System wirken), Zustandsgrößen, deren momentanen Werte den Zustand des Systems vollständig beschreiben, Anfangswerte der Zustandsgrößen, Veränderungsrate der Zustandsgrößen und Zwischengrößen (Größen die sich durch Umwelteinwirkungen oder Zustandsgrößen verändern). Vgl. Bossel, 1989, S. 22ff. In der vorliegenden Arbeit wird zwischen *Parametern*, *Anfangs- und Randbedingungen* sowie *Zustandsgrößen* unterschieden, wobei letztere die gesuchten Unbekannten sind.

<sup>49</sup> Die Erhaltungsgleichungen basieren auf den Erhaltungssätzen der Physik. Je nach aufzulösenden Effekten erhält man die Euler- oder die Navier-Stokes-Gleichungen, wobei letztere im Unterschied zu den Euler-Gleichungen Reibungs- und Wärmeleitungseffekte berücksichtigen.

<sup>50</sup> Vgl. Krause, E.: Einige grundsätzliche Aspekte numerischer Strömungssimulationen, 1996, S. 13ff

nungspunkte die Gleichungen gelöst werden,<sup>51</sup> sowie der Diskretisierung der Gleichungen selbst, indem die Differentiale durch endlich viele Differenzenquotienten substituiert werden.<sup>52</sup> Die Simulation strukturiert sich aus den Operationsvorschriften der diskretisierten Erhaltungsgleichungen und den Eingaben ausgewählter Werte der Parameter, der Anfangsbedingungen der Unbekannten (Zustandsgrößen), die sich auf experimentelle Beobachtungen oder theoretische Annahmen stützen sollten, und der Randbedingungen, welche das Verhalten der Zustandsgrößen am Rand des Berechnungsgitters definieren.<sup>53</sup> Die Algorithmisierung zerlegt die Gleichungen in ein System von  $p \times u$  Gleichungen für  $p$  Gitterpunkt und  $u$  Unbekannte.<sup>54</sup> Um also die fünf Unbekannten der Erhaltungsgleichungen für 1000 Punkte zum Zeitpunkt  $t_1$  zu berechnen, müssen 5000 Gleichungen generiert und gelöst werden.<sup>55</sup> Die Arbeit des Computers besteht nun darin, aus den numerischen Werten der Parameter, Anfangs- und Randbedingungen durch Einsetzungen und Umformungen die 5000 Lösungen für  $t_1$  zu erzeugen, die sich der exakten Lösung annähern. Theoretisch wird angenommen, daß eine genügend große Verfeinerung des Raum-Zeit-Gitters zu immer besseren Näherungen an die exakte Lösung führt, daß sich also der Verlauf des Graphen der approximierten Lösungen zunehmend dem Verlauf des Graphen der exakten Lösung annähert. Da jedoch für die meisten nichtlinearen und einige lineare Gleichungen die exakten Lösungen unbekannt sind,<sup>56</sup> ist die numerische Simulation der einzige Weg, um zu Lösungsdarstellungen zu kommen, wenn auch nur zu einer approximierten. Die Lösungsalgorithmen ersetzen die nicht bekannten analytischen Lösungen und stellen insgesamt eine neue Methode zur numerischen Behandlung von Differentialgleichungen dar.<sup>57</sup> Während jedoch im Falle linearer Gleichungen jeder Schritt der algorithmischen Darstellung der numerischen Approximation inklusive der Fehlerabschätzung bezüglich der exakten Lösung begründbar ist, ist man für nichtlineare Gleichungen auf

<sup>51</sup> „So lassen sich zum Beispiel die Anzahl der in der Reihenentwicklung berücksichtigten Terme und der Abstand der Gitterpunkte im Prinzip beliebig variieren. Da aus Genauigkeitsgründen die Abstände zwischen Gitterpunkten möglichst klein gewählt werden müssen, ist die Anzahl der zu lösenden Differenzgleichungen und damit auch die Anzahl der zu bestimmenden Unbekannten stets groß. ... Auch bei der Verwendung der größten und schnellsten heute zur Verfügung stehenden Rechenmaschinen sind zehn, ja sogar mehrere hundert Stunden Rechenzeit zur Berechnung komplexer Strömungsfelder nicht ungewöhnlich.“ Krause, 1996, S. 14/15. Zur Erstellung des Programms einer solchen Simulation bedarf es mehrerer Mannjahre Arbeit.

<sup>52</sup> Als Alternativen zur Differenzenmethode gibt es die finite Elemente- und finite Volumenmethode als auch andere Methoden.

<sup>53</sup> Für einen Simulationslauf sind für  $t_0$  die Parameterwerte, die Werte der Anfangsbedingungen und in der Regel der Randbedingungen im Programm vorgegeben und ändern sich während des Simulationslaufs nicht. Die Randbedingungen ergeben sich aus der Charakterisierung der künstlichen Berandung des zu berechnenden Strömungsgebiets, beispielsweise durch feste Wände und die dadurch bedingten Annahmen zur Flüssigkeitshaftung, Wärmefluß- und Temperaturverteilungen.

<sup>54</sup> „Wenn der Abstand zwischen zwei Gitterpunkten auf dem Äquator [für eine globale Klimasimulation] beispielsweise 120 Kilometer beträgt, kann man sinnvolle einigermaßen realistische Berechnungen anstellen. Für jede Wetterprognose müssen dabei ungefähr 250 Millionen Unbekannte berechnet werden. Erst seit etwa 20 Jahren sind Superrechner so leistungsfähig, daß die Wetterberechnungen weniger Zeit erfordern, als die Wetterentwicklung selbst dauert.“ Trottenberg, 1998, S. 7

<sup>55</sup> Gleichungslöser können aus mehreren hundert bis tausend Kommandozeilen bestehen, die für jeden Zeitschritt durchlaufen werden. Ein guter Gleichungslöser optimiert während der Berechnung aufgrund von Fehlerabschätzungen die räumliche und zeitliche Diskretisierung. Der gesamte Simulationskode kann weit über zehntausend Zeilen umfassen.

<sup>56</sup> Theoretisch wird davon ausgegangen, daß es zu jeder Differentialgleichung eine exakte, analytische Lösung gibt, die für alle Zeitpunkte, Anfangsbedingungen und Parameterwerte gilt. Während für lineare, gewöhnliche Gleichungen die analytischen Lösungsfunktionen bekannt sind, trifft das auf lineare, partielle Gleichungen nur bedingt zu. Es kann auch der Fall sein, daß aufgrund komplexer Randbedingungen die Lösung formal nicht angebar ist.

<sup>57</sup> „Sein [John von Neumanns] Anstoß war die Stagnation der analytischen mathematischen Methoden zur Lösung partieller Differentialgleichungen, vornehmlich in der Strömungsdynamik, und er wollte mit seinem Konzept des sequentiellen Digitalrechners, dessen Flexibilität seitdem den breiten Durchbruch des Computers in Wissenschaft, Wirtschaft und Gesellschaft bestimmt hat, den „digitalen Windkanal“ schaffen, um im Computer die Barriere der Stagnation zu durchbrechen.“ Hoßfeld, 1996, S. 2

Heuristiken angewiesen, die sich aus der Übertragung von Erfahrungen mit der Simulation linearer Differentialgleichungen für nichtlineare ergeben. Es ist also für nichtlineare Probleme wesentlich schwieriger Lösungsverfahren zu finden sowie die Approximationsresultate zu bewerten, denn die begrenzte Genauigkeit der Zahlendarstellung im Computer führt dazu, daß aufgrund der Rundungen etwa bei Differenzenbildungen große Fehler entstehen können und die Lösungen numerisch instabil werden.<sup>58</sup> Da sich zwar für die meisten linearen, aber nur einige nichtlineare Problemstellungen die Richtigkeit der finiten Approximation nachweisen läßt,<sup>59</sup> ist die numerische Stabilität der Differenzapproximation nur daran zu beurteilen, daß die Abbruch-, Rundungs- und Verfahrensfehler bei der Auflösung der Differenzgleichungen nicht beliebig anwachsen.<sup>60</sup> Zudem können die numerischen Instabilitäten durch das Verhalten der Gleichungen gegenüber spezifischen Parameterwerten, Anfangs- oder Randbedingungen bedingt sein, denn nur im Falle eines wohldefinierten Problems, für das die Existenz und die Eindeutigkeit der Lösung wie auch die stetige Abhängigkeit der Lösung von den Parametern, Anfangs- und Randbedingungen nachgewiesen ist, sind die auftretenden Instabilitäten Folgen falsch gewählter Diskretisierungen. Für ein nicht wohldefiniertes Problem können die auftretenden Instabilitäten strukturimmanent sein, und es läßt sich nur anhand von Studien zum Einfluß der Parameter, Anfangs- oder Randbedingungen ein Bild über das Lösungsverhalten gewinnen. Dabei können sogenannte Bifurkationen im Lösungsverhalten auftreten und zu determiniert chaotischen Zuständen führen, so daß sich Prognosen des Lösungsverhaltens sowie Aussagen über die Richtigkeit der Lösung schwierig, wenn nicht gar unmöglich gestalten. Es läßt sich also nicht vorhersagen, ob eine Lösung sich bei gering veränderten Parameterwerten oder Anfangsbedingungen stabil oder chaotisch verhalten wird und ob es sich um eine gute Approximation handelt. Kleine Ursachen können in nichtlinearen Systemen große Wirkungen haben. Da die Parameterwerte und Anfangsbedingungen jedoch bereits in ihrer empirischen Bestimmung aufgrund der Fehlertoleranz der Meßinstrumente ungenau sind, ist der Prognosewert simulierter Szenarien für naturwissenschaftliche Anwendungen nur von bedingter Aussagekraft.<sup>61</sup>

---

<sup>58</sup> „Für gröbere Diskretisierung handelt man sich also einen Diskretisierungsfehler ein, für kleinere Diskretisierungen erhält man sehr plötzlich drastische Fehler wegen der Beschränktheit der numerischen Zahlendarstellung. Natürlich verbessert sich das Ergebnis bei höherer Genauigkeit der internen Zahlendarstellung, das grundsätzliche Problem aber bleibt: Bildet man numerisch eine Differenz etwa gleich großer Zahlen, so kann der Fehler leicht gegen 100% gehen!“ [Quelle 5: Müller-Krumbhaar, H.: Einleitung, S. 1.7]

<sup>59</sup> Der Unterschied zwischen einer linearen und einer nichtlinearen Struktur besteht in der analysierbaren Fehlerabschätzung bezüglich der Approximation für lineare Probleme, da die Struktur der Lösung für lineare Gleichungen bekannt ist.

<sup>60</sup> „Der Laxsche Äquivalenzsatz sagt aus, daß der Nachweis der numerischen Stabilität die notwendige und hinreichende Bedingung für die Konvergenz der Lösung darstellt, wenn die Differenzenapproximation wieder in die zu approximierende Differentialgleichung übergeht, wenn die Abstände der Gitterpunkte gegen Null streben.“ Krause, 1996, S. 15. Allerdings besteht hier dann das Problem, daß dies zu Fehlern führt, wie oben erwähnt, und pragmatisch nur begrenzt durchführbar ist.

<sup>61</sup> Diese Probleme schlagen sich in der Hypothetizität der dadurch erzielten wissenschaftlichen Aussagen nieder. „Ein Gesichtspunkt ist die Komplexität der Zusammenhänge, die sich darin äußert, daß jede Wenn-Dann-Aussage durch die Überlagerung anderer Kausalverhältnisse, durch »intervenierende Variable«, außer Kraft gesetzt werden kann.“ Bechmann, G. et al.: Sozialwissenschaftliche Konzepte einer interdisziplinären Klimawirkungsforschung, 1995, S. 77/78. Diese wissenschaftliche Situation ist typisch für Bereiche wie die Wettervorhersage oder die Klimaforschung, die sich mit komplexen Systemen beschäftigen. Variierende Anfangs- oder Randbedingungen können zu unterschiedlich Ergebnissen führen, wie die Diskussion um die Erder-

## 2.4 Semiotische Interpretation

Wie sieht die semiotische Interpretation dieser Vorgänge aus? Ein formal-operativer Zeichenumgang hantiert mit verschrifteten Zeichen. Operationen werden mit diesen Zeichen ausgeführt und die Erzeugung neuer Zeichen bzw. Zeichenfolgen besteht einerseits in der Umgestaltung der Folgen, andererseits in der Ersetzung definierter Folgen durch Symbole, die als Kürzel von Operationen zur Erzeugung dieser Folgen verstanden werden können. Das Integralzeichen oder der Differentialquotient mögen hier als Beispiele dienen. Gemäß den Regeln erlaubt der formal-operative Zeichenumgang die deduktive Umformung der formalen Strukturen. Diese Umformung kann im Falle algebraischer Gleichungssysteme zu Lösungsfunktionen für die gesuchten Unbekannten führen. Diese beschreiben einen Zusammenhang, der für jede beliebige Einsetzung numerischer Werte durch Befolgung der Funktionsvorschriften den entsprechend Wert der Unbekannten angibt. Der Unterschied zwischen der formal-operativen und der numerischen Methode besteht in der Reduktion der letzteren auf einen Typ von Zeichen: auf Zahlen, und damit auf eine Form: die numerischen Werte als Darstellung der Lösung. Kennt man nur das numerische Resultat, so lassen sich keine Rückschlüsse auf dessen Erzeugung samt Bedingungen gewinnen.<sup>62</sup>

Der Computer operiert mit digitalen, also numerisch kodierten Zeichen gemäß den instruierten Operationen, und die Simulation ist eine numerische Methode im Unterschied zur analytischen Methode der Lösungsfindung durch deduktive Umformungen algebraischer Gleichungen. Dabei werden durch numerische Umformungen der gegebenen Werte eines Gleichungssystems die Lösungen für die Unbekannten des Gleichungssystems berechnet. Dieses Vorgehen kann als *numerische Fallunterscheidung* der formalen Struktur für spezifische Parameterwerte, Anfangs- und Randbedingungen gelten. Dazu muß diese dem Organisationsprinzip der Computer angepaßt werden: Alle Variablen sind zu parameterisieren, und alle durch Operationszeichen artikulierten Beziehungen zwischen den Variablen sind in Rechenoperationen zu transformieren. Die formale Struktur wird in eine operative Struktur

---

wärmung zeigt. Dabei schlagen nicht nur die mathematischen Probleme der numerischen Simulation nicht-linearer Gleichungen zu Buche, sondern die Unkenntnis über Zusammenhänge und sensitive Parameter sowie die mangelnde Datengrundlage (Datenproblem).

<sup>62</sup> Bereits René Descartes weist auf die Vereinheitlichung durch die numerische Methode hin und kritisiert die *Rechner*: „... wir dagegen [können] an dieser Stelle sogar von den Zahlen abstrahieren, ebenso wie kurz zuvor von den geometrischen Figuren und von jedem beliebigen Gegenstand. Wir tun das einerseits, um zum Überdruß langes und überflüssiges Rechnen zu vermeiden, andererseits vor allem, damit die Teile des Gegenstandes, die zur Natur der Schwierigkeiten gehören, immer getrennt bleiben und nicht durch unnütze Zahlen verhüllt werden. Wenn z.B. die Basis des rechtwinkligen Dreiecks gesucht wird, dessen Seiten 9 und 12 gegeben sind, wird der Rechner sagen, sie sei gleich ... [Wurzel aus 225] oder 15; wir aber werden 9 und 12 a und b setzen und die Basis als ... [Wurzel aus  $a^2 + b^2$ ] finden. So bleiben die beiden Teile  $a^2$  und  $b^2$  getrennt, die in der Zahl miteinander verschmolzen sind.“ Descartes, R.: Regeln zur Ausrichtung der Erkenntniskraft, 1972, S. 75. „Dies alles unterscheiden wir, die wir eine evidente und deutliche Erkenntnis suchen, nicht aber die Rechner, die zufrieden sind, wenn ihnen das gesuchte Ergebnis unterläuft, selbst wenn sie nicht sehen, wie es von den Daten abhängt, obgleich allein darin die Wissenschaft eigentlich besteht.“ Descartes, 1972, S. 77

überführt, die zum einen den Berechnungsvorgang darstellt, zum anderen diesen in Form instruierender Operationen auf der binärlogischen Ebene der Rechner ausführt. Der Lösungsalgorithmus kann als Simulationsmaschine bezüglich der zu simulierenden Gleichungen verstanden werden. Indem die Inputdaten der Parameter, Anfangs- und Randbedingungen eingegeben werden, erhält man nach endlich vielen maschineninternen Zustandsänderungen den Output der Lösungen. Zwischen den Anweisungen des Programms und der Präsentation der numerischen Lösungen steht der unanschauliche Prozeß der iterativen Berechnungen. Für die Frage nach den richtigen – also stabilen und sich der exakten Lösung annähernden – Approximationsresultaten lassen sich Plausibilitätsargumente anführen, die durch analytische Verfahren, Heuristiken und die experimentelle Arbeitsweise im Rahmen der Simulation anhand der Beurteilung der numerischen Resultate gestützt werden.

Der Betrachtung der visualisierten Ergebnisse kommt dabei eine große Bedeutung zu. Der Reiz der numerischen Simulation, die Begrenzung der formalen Methode zu erweitern, hat seinen Preis. Formal lösbare Probleme sind meist auch lineare. Nur wenige nichtlineare Gleichungen lassen sich auf diese Weise bearbeiten. Die numerische Simulation wagt sich somit in das Gebiet nichtlinearer Problemstellungen vor, in welchem mit Approximationen und Heuristiken gearbeitet wird. Von daher dürfen keine exakten Resultate erwartet werden. Es kann also nicht die Rede davon sein, daß Simulationen theoriengestützte Deduktionen sind. Zwar basieren die simulierten Gleichungen ausschließlich auf formalisierten Theorien, doch die Sicherheit deduktiver Umformungen bieten sie nicht.<sup>63</sup> Hinzu kommen pragmatisch bedingte Schwierigkeiten, die aus der Unanschaulichkeit der Rechenprozesse, deren Geschwindigkeit und dem Umfang der Kodierung resultieren. Dies zeigt sich zum einen in der Begrenzung der Handhabung komplexer Simulationen, da die Kontrolle der Programmierfehler mit zunehmender Komplexität schwieriger wird, und zum anderen darin, daß die Unterscheidung zwischen Effekten, die durch die formale Struktur kodiert sind, und Effekten, die sich durch Fehler oder unadäquate Diskretisierungen, Berandungen etc. ergeben, nicht einfach ist.<sup>64</sup>

---

<sup>63</sup> Da Simulationen auf Theorien basieren, katalysieren sie keine Theoriendynamik und sind deshalb Bestandteil der normalen Wissenschaft im Sinne von Thomas Kuhns Konzeption wissenschaftlichen Fortschritts. Vgl. Kuhn, 1993. Doch die Neuheit der visualisierten Darstellung sowie die Erweiterung der Lösungsmöglichkeiten, indem auf Heuristiken zurückgegriffen wird, erweitern den Spielraum der Verwendung wissenschaftlicher Theorien. Dies kann zu neuen Erkenntnissen führen - allerdings im Rahmen bekannter Theorien -, die sich experimentell verifizieren oder falsifizieren lassen. Genutzt wird dieser Erkenntnisweg beispielsweise im molecule engineering, indem neue Moleküle im Computer gestaltet und anschließend im Labor synthetisiert werden.

<sup>64</sup> „Eine präzise Simulation stößt an natürliche Grenzen, wo kleine Änderungen in den Daten große instabile Effekte bewirken und eine chaotische Dynamik dominiert. In vielen Fällen, zum Beispiel in der Klimaforschung, ist es jedoch weitgehend ungeklärt, ob die Unsicherheiten durch zu ungenaue Numerik (viel zu große Gitterstrukturen ...), durch Modellierungsfehler oder tatsächlich durch das potentiell chaotische Verhalten der Realität selbst (Klimakatastrophe) bedingt ist“ Trottenberg, 1998, S.10. Determiniert chaotische Zustände treten jedoch nur in nicht wohldefinierten Problemstellungen auf.



### 3. Entfaltung der Form - Zeitlichkeit

#### 3.1 Raum-Zeit-Raster

Simulationen sind maschinell ausführbare Erzeugungsmechanismen numerischer Werte zur semiotischen Modellierung dynamischer Prozesse, insofern sich die Dynamik im errechneten Werteverlauf der gesuchten Unbekannten artikuliert. Die Dynamik wird dabei über die Symbolisierung durch Zeichen hinaus direkt auf semiotischer Basis realisiert. Dazu ist ein fluides Medium von Nöten, das die Implementierung eines dynamisch organisierten Symbolschemas erlaubt. Der Dynamisierung der Simulation liegen verschiedene Zeitformen zugrunde: Im Gesamten zeigt die Simulation einen Prozeß in einem definierten Raum-Zeit-Raster, das sich aus dem Berechnungsraum und den Berechnungsschritten ergibt. Im Detail vollziehen sich die Berechnungen als rekursive Operationen, die an geeigneter Stelle abgebrochen werden und eine approximierte numerische Lösung ausgeben. Der Einblick in die Rekursion, die im Raum-Zeit-Gitter dargestellt wird, veranschaulicht anhand der Visualisierung die Dynamik der Datenstrukturen bzw. des Lösungsverhaltens der berechneten Gleichungen. Differentialgleichungen stellen kontinuierliche Prozesse in Raum und Zeit dar.<sup>65</sup> Der Differentialquotient, der sich mit beliebiger Genauigkeit an jeden Punkt des Verlaufs der exakten Lösungsfunktion annähert, symbolisiert die infinitesimale Operation der Differentiation. Dabei wird von den pragmatischen Bedingungen des Berechnens für endliche numerische Werte abstrahiert.

Für den formal-operativen Umgang mit Strukturen in der Mathematik, die von infinitesimalen Größen handeln, haben sich seit der Neuzeit Rechenregeln entwickelt. Die Zeit selbst wird dabei als Größe interpretiert, die sich mit beliebiger Genauigkeit angeben läßt und in ihrer Dynamik als Zeitstrahl mit dem Zahlenstrahl der reellen Zahlen identifiziert wird.<sup>66</sup> Kleinste Zeiteinheiten einer atomistischen Zeitauffassung werden durch infinitesimale Approximationsprozesse substituiert, wie sie für die reellen Zahlen und Differentiale charakteristisch sind.<sup>67</sup> Indem Zeitpunkte zu reellen Zahlen werden und reelle Zahlen durch infinitesimale Approximationsprozesse definiert sind, wird die Integration der Zeit als reellwertige Variable in mathematische Strukturen möglich. Die Gleichsetzung infinitesimaler Approximationsprozesse mit der Idee des Kontinuums ersetzt einerseits eine atomistische Auffassung und verweist andererseits das Kontinuum in die symbolische Sphäre des schriftbasierten Zeichenumgangs, das Annahmen über die Kontinuität natürlicher Prozesse evoziert. Tatsächlich sind Berech-

<sup>65</sup> Raum und Zeit sind die unabhängigen Variablen der Gleichungen.

<sup>66</sup> Die mathematische Darstellung der Zeit auf einer Zeitkoordinate geht auf Nikolaus Oresme zurück. Vrgl. Mainzer, K.: Zeit, 1995a, S. 32ff

<sup>67</sup> Die reelle Zahl  $a$  läßt sich durch die rationale Zahlenfolge  $a_n$  als  $a(a_n)$  bzw. als  $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n$  darstellen.

nungen, Messungen und Wahrnehmungen jedoch immer diskret.<sup>68</sup> Die Inkommensurabilität zwischen den formal-operativen Darstellungsmöglichkeiten und den maschinell umgesetzten Anwendungsmöglichkeiten zeigt sich nirgends deutlicher als in der numerischen Simulation partieller Differentialgleichungen. Numerische Simulationen vollziehen sich in einem endlichen Berechnungsraum, dessen Dimensionen sich aus der Anzahl der Variablen ergeben, von welchen die zu berechnenden Unbekannten abhängig sind.

Die Darstellung des Berechnungsraums als dreidimensionale Raum-Gitter-Abfolge in der Zeit transformiert den  $n$ -dimensionalen Berechnungsraum als Wirkungen der Unbekannten auf die Raumpunkte in den dreidimensionalen Anschauungsraum, und die Dynamik zeigt sich in der zeitlichen Veränderung der Wirkungen.<sup>69</sup> Der Berechnungsraum der Simulation charakterisiert sich aufgrund der Endlichkeit der Ressourcen an Berechnungszeiten und Speicherkapazitäten durch eine atomare Zeit- und Raumauffassung. Die prinzipiell für jeden Raum- und Zeitpunkt geltenden symbolischen Gleichungen können nur für ein mehr oder weniger feines Raster von Berechnungspunkten gelöst werden.<sup>70</sup> Dabei ersetzt der Vorgang der Diskretisierung die Differentiale durch Differenzenquotienten, die zwischen den Werten der Unbekannten für die Berechnungspunkte  $i, j$  und  $i, j-1$  einen Zusammenhang für den Zeitpunkt  $t_1$  darstellen:  $u_x \approx (u_{i,j} - u_{i,j-1}) / \Delta x$ . Die Erzeugung des Berechnungsgitters besteht in der Berechnung der Werte für  $\Delta x$ , die dann in die Gleichungen der Differenzenquotienten eingesetzt werden.

Die Gestalt des Berechnungsgitters bzw. des Raum-Gitters ist durch die Gitterstrukturierung sowie die Randbedingungen bestimmt. Während erstere die grundlegende Struktur zur Erzeugung des Gitters definiert,<sup>71</sup> enthalten die Randbedingungen Parameter bezüglich der Begrenzung und Charakterisierung des Verhaltens der Zustandsgrößen am Gitterrand als auch bezüglich der Abgrenzung von Binnenformen wie beispielsweise zweier Flüssigkeiten, deren Einfluß aufeinander unter spezifischen Bedingungen getestet wird, oder für Objekte in einem Strömungsmedium. Die für die Simulation interessanten Prozesse spielen sich dabei an jenen Berechnungsumgebungen ab, an welchen die beiden

<sup>68</sup> Auch unsere Wahrnehmung ist aufgrund der Geschwindigkeitsbegrenzung der Nerven diskret.

<sup>69</sup> Das auf Seite 66 besprochene begrenzte Wachstum handelt beispielsweise nicht von räumlichen Prozessen. Der zweidimensionale Darstellungsraum der Graphik repräsentiert weder ein Raum-Gitter, noch den gesamten Berechnungsraum, sondern den Lösungsraum für  $M(t)$  in Abhängigkeit von der Zeit. „Es gibt eine weite Klasse von Systemen, bei denen es gerade auf die räumliche Verteilung der Zustandsgrößen ankommt, bei denen also zwischen benachbarten Punkten Gradienten der Zustandsgrößen bestehen, die durch weitere Differentialquotienten, diesmal für die Raumkoordinaten dargestellt werden müssen. Müssen also in eine solche Systemdarstellung Differentialquotienten in bezug auf mehr als eine Koordinate ... aufgenommen werden, so spricht man von partiellen Differentialgleichungen.“ Bossel, 1989, S. 270

<sup>70</sup> „Dazu werden die Änderungsgeschwindigkeiten (Ableitungen) der einzelnen Variablen durch algebraische Ausdrücke ersetzt, die auf den endlichen Größen  $\Delta x$  und  $\Delta t$  beruhen. Die ursprünglich an jedem Punkt in Raum und Zeit definierten stetigen Gleichungen werden so zu algebraischen Gleichungen, die nur an einer endlichen Zahl von Gitterpunkten exakt sind, die dafür aber leicht gelöst werden können. Benutzt man bei der Lösung ein ausreichend feines Gitter, so nähert sich die numerische Lösung der ursprünglich exakten Gleichung.“ Kaufmann/Smarr, 1994, S. 71

<sup>71</sup> Das Verfahren der Triangulation beispielsweise ist zur Gittergenerierung geeignet.

Medien aufeinander treffen und sich gegenseitig beeinflussen. Da sich an diesen Stellen die eigentlichen Veränderungen ereignen, bietet es sich an, das gleichförmige Berechnungsgitter lokal zu verfeinern. Dies kann bereits bei der Erzeugung des Gitters geschehen oder während der Berechnungsschritte durch adaptive Gitteranpassung. Dort also, wo sich das Lösungsverhalten erwartungsgemäß stärker ändert, empfiehlt sich eine höher auflösende Raumdiskretisierung.

Theoretisch wird davon ausgegangen, daß bei einer immer feiner werdenden Diskretisierung die simulierte Lösung der exakten Lösung beliebig nahe kommt, also konvergent ist. Dies muß im Konkreten nicht der Fall sein, auch wenn die Konvergenz theoretisch bewiesen wurde. Denn aufgrund der endlichen Darstellbarkeit numerischer Werte im Computer durch Rundungen kann die Differenzenbildung annähernd gleich großer Werte zu großen Fehlern führen. D.h. die Approximation nähert sich bis zu einem bestimmten, sich verringernden Wert von  $\epsilon x$  der exakten Lösung an. Wird der Wert unterschritten, können sich Instabilitäten einstellen.<sup>72</sup> Die Umwandlung des Zeit-Kontinuums der Gleichungen in eine diskrete Zeitabfolge definiert den Rahmen, innerhalb dessen sich die Simulation abspielt. Dabei bilden Simulationen „... die reale Zeit auf eine Simulationszeit oder Modellzeit ab. Die Simulationszeit wird durch eine Variable dargestellt, die wie die reale Zeit wachsende Werte annimmt. Diese Variable wird auch Simulationsuhr genannt. ... Während die reale Zeit stetig wächst, kann die auf einem Computer dargestellte Simulationsuhr nur sprunghaft wachsen. Diese Sprünge können von gleicher Länge sein und zu äquidistanten Zeitpunkten führen, oder sie können sich an den Zeitpunkten orientieren, wo sprunghafte Wert- oder Zustandsänderungen stattfinden, die man als Ereignisse (Events) bezeichnet.“<sup>73</sup> Simulationen partieller Differentialgleichungen sind Zeitfolgensimulationen, für welche die Veränderung der Lösung eine stetige Funktion der Simulationszeit ist.<sup>74</sup> Dabei müssen die Zeitpunkte nicht über den gesamten Simulationsverlauf äquidistant sein und können für ausgewählte Zeitfenster verfeinert werden. Dies empfiehlt sich, wenn die approximierten numerischen Werte Insta-

---

<sup>72</sup> Vgl. Anm. 210, Seite 68. Dazu kommt erschwerend hinzu: „Eine eindeutige Auswahl bei der Festlegung der Gittergenerierung, die Diskretisierung wie auch bei der Auswahl des Lösungsverfahrens ist selten möglich, da die Lösungen oft durch die Eigenarten der Anfangs- und Randbedingungen stark beeinflusst werden.“ Krause, 1996, S. 24

<sup>73</sup> [Quelle 6: Lorenz, P.: 1.2 Simulation, 1999, S. 6]. Die Simulationsuhr kann ganzzahlige oder reellwertige Werte anzeigen. „Reellwertige Variablen haben den Vorteil eines größeren Wertebereichs. Wenn reellwertige Variablen große Werte annehmen, können kleine Inkremente verloren gehen. Außerdem kann die Feststellung oder Prüfung der Gleichzeitigkeit von Ereignissen problematisch werden.“ [Quelle 6: Lorenz, 1999, S. 6]. Die Endlichkeit der Zahlendarstellung im Rechner ist auch hier das Problem. Üblicherweise besitzen reellwertige Variablen 15 gültige Dezimalziffern (1E15). Ein Zeitzuwachs von 1 (1E16) kann nicht vollzogen werden und führt zur Programmwarnung: Zahlenbereichsüberschreitung, kein Zeitzuwachs. Bei ganzzahligen Variablen sind die Zeiteinheiten so klein zu wählen, daß keine Abbildungsfehler entstehen. Der größte Wert der ganzzahligen Zeitvariable beträgt in der Regel  $2^{31} - 1$ .

<sup>74</sup> Es handelt sich dann um eine sogenannte Taktsimulation bzw. Zeitfolgesimulation. Vollziehen sich die Sprünge zwischen den Zeitpunkten von Ereignissen so wird die Simulationsuhr für jeden Sprung auf diese Zeitpunkte eingestellt (Ereignissimulation). „Während der Abarbeitung dieses Simulationsprogrammes läuft die Simulationsuhr oder Simulationszeit, und es werden Zustandsänderungen in einer zeitlichen Reihenfolge nachgebildet, die dem Zeit- und Prozeßablauf im Original entspricht. Die Simulationsuhr läuft in der Regel mit wechselhaftem Tempo. Sie kann sich in gleich oder ungleich langen, diskretisierten Zeitschritten bewegen und hat dabei keine festliegende Beziehung zur realen Zeit. Sie verkörpert die Modellzeit und ist Abbild der realen Zeit.“ [Quelle 6: Lorenz, 1999, S. 1]

bilitäten aufweisen.<sup>75</sup> Prinzipiell ist die Zeitdiskretisierung von den Zeitskalen der Gleichungen abhängig.<sup>76</sup> Bezogen auf die Realzeit kann die Simulationszeit eine Zeitraffung oder Zeitlupe darstellen. Sie ist abhängig von der Leistungsfähigkeit des Computers und von der Effektivität des Programms. Das Ziel ist es, Proportionalität zu schaffen und die Simulationszeit mit der Realzeit zu synchronisieren. Anschaulich wird die Simulationszeit durch die Animation der Visualisierungsbilder einzelner Zeitschritte zu einer Folge von Bildern. In der Bilderfolge entfaltet sich die Dynamik der Datenstrukturen.

Für die Zeitdiskretisierung bieten sich zwei Möglichkeiten an, ein explizites und ein implizites Verfahren. Während für das explizite Verfahren der Wert für  $u_{n+1}$  von Zeitschritt zu Zeitschritt – ausgehend vom Anfangswert  $u_1$  - direkt erzeugt wird ( $u_{n+1} = g(u_n)$ ), indem die Funktion  $g$  mit Hilfe eines Algorithmus lediglich einmal ausgewertet, also berechnet werden muß, wird die Lösung für  $u_{n+1}$  in der impliziten Methode durch Rekursionen gewonnen ( $f(u_{n+1}) = g(u_n)$ ).<sup>77</sup> Dazu muß  $f$  invertiert werden, d.h. nach  $u_{n+1}$  aufgelöst und rekursiv berechnet werden. Der Vorteil des impliziten Verfahrens besteht in der Berücksichtigung der Wechselwirkung aller alten Lösungen für das neue Zeitniveau und führt zu stabileren Lösungen. Demhingegen werden mit dem expliziten Verfahren nur die in der partiellen Ableitung auftretenden Lösungen berücksichtigt.<sup>78</sup> Für das explizite Verfahren, das direkt von Zeitschritt zu Zeitschritt rechnet, bedarf es deshalb einer sehr kleinen Zeitschrittweite, denn zu grobe zeitliche Diskretisierungen können zu drastischen Fehlern und Instabilitäten führen.<sup>79</sup>

### 3.2 Rekursion

Der Begriff der Rekursion oder Iteration handelt von der Wiederholung einer definierten Operation, im Falle der Simulation von der wiederholten Berechnung der Zustandsgrößen auf Basis der jeweils zuvor erzeugten Werte.<sup>80</sup> Die Simulation besteht zum einen aus iterativen Schritten zur Berechnung der

<sup>75</sup> Ähnlich der räumlichen Diskretisierung durch die adaptive Gitteranpassung wird die zeitliche Diskretisierung für die Berechnung dann verfeinert, wenn die Approximation der Lösung mit der Fehlerschätzung nicht harmoniert. Gute Algorithmen nehmen diese Verfeinerung aufgrund einer optimierten Fehlerabschätzung selbständig vor.

<sup>76</sup> „Bei Systemen gekoppelter Differentialgleichungen mit stark verschiedenen inneren Zeitskalen führt dies jedoch dazu, daß die Wahl des Diskretisierungsparameters immer durch die kürzeste Zeitskala nach oben beschränkt ist, selbst wenn auf den kurzen Zeitskalen physikalisch nichts interessantes passiert.“ [Quelle 5: Müller-Krumbhaar, S. 1.9]

<sup>77</sup> Die Variable  $u_n$  bzw.  $u_{n+1}$  kann für ein oder mehrere Unbekannte stehen.

<sup>78</sup> In partiellen Ableitungen erster Ordnung tritt nur die Beziehung zwischen zwei benachbarten Berechnungspunkten auf, für partielle Ableitungen höherer Ordnung dementsprechend die Beziehung zwischen mehreren Berechnungspunkten.

<sup>79</sup> Wird beispielsweise die Zeitschrittweite  $\Delta t$  für das durch die Gittergenerierung bestimmte Raumintervall zu groß gewählt, um die Berechnungen zu beschleunigen oder da die Rechenkapazitäten nicht ausreichen, können die Abweichungen der numerischen Lösungen von den genauen Lösungen dramatisch werden und zu schwingen beginnen. Dieses Problem kann vermieden werden, indem  $\Delta t$  ausreichend klein gewählt wird oder Ableitungen höherer Ordnung verwendet werden, die für größere  $\Delta t$  nicht zu Instabilitäten führen.

<sup>80</sup> Der Begriff der Iteration wird zur besseren Unterscheidbarkeit für die Abläufe auf der Ebene des Zeitrahmens der Simulation verwendet, der Begriff der Rekursion für die Abläufe zwischen den Zeitschritten.

Übergänge von Zeitschritt zu Zeitschritt, ausgehend von ausgewählten Anfangsbedingungen (Iteration). Zum anderen arbeitet das implizite Verfahren mit rekursiven Berechnungen zwischen den einzelnen Zeitschritten (Rekursion). Das hat den Vorteil, daß das Ausbreitungsverhalten aller Lösungen für den neuen Zeitschritt berücksichtigt wird. Dabei gestaltet sich der Rekursionsmechanismus als eine Schleife im Programm, die ausgehend von einem Startwert – dem Anfangswert der gesuchten Unbekannten – den approximierten Wert als neuen Startwert wieder einsetzt, solange bis ein Lösungswert der Zustandsgröße erzielt ist, der entsprechend den Fehlerabschätzungen als solcher für ausreichend genau für den darauffolgenden Zeitschritt eingeschätzt wird. Nach mehreren hundert oder tausend Wiederholungsschritten wird die Berechnung an geeigneter Stelle abgebrochen, und der Wert dient als Startwert der Unbekannten für die Berechnung des nächsten Zeitschritts. Auf diese Weise entsteht ein Muster dynamischer Operationen, die ineinandergreifen. Die Methode der Rekursion erlaubt es, im Prinzip unendlich viele Werte gemäß den Operationsvorschriften aus der zugrundeliegenden formalen Struktur zu erzeugen. Pragmatisch ist dies jedoch nicht durchführbar, weshalb es interner Abbruchkriterien bedarf.

### *3.3 Dynamik der Datenstrukturen*

Die Rekursion und die Iteration bilden das syntaktische Muster der Simulation, das, angewandt auf eine formale Struktur, eine Kaskade numerischer Werte entfaltet. Die tatsächliche Berechnungszeit eines Simulationslaufs ergibt sich jedoch auf der Ebene der Berechnungen und ist ohne Bezug zur Simulationszeit. Da die rekursiven Berechnungen zwischen einem Zeitschritt lösungsabhängig sind, können sie in ihrer Zeitdauer erheblich variieren und der Berechnungszeitraum kann die Simulationszeit übersteigen. Folgen hat dies beispielsweise für die Wetterprognose, wenn die Berechnung mehr Zeit erfordert als die Wetterentwicklung des Vorhersagezeitraums.<sup>81</sup> Numerisch simulierte Differentialgleichungen erzeugen durch die Entfaltung der Resultate eine inhärente Dynamik, die sich aus der lösungsabhängigen Strukturierung der Veränderungen der numerischen Werte entlang der Zeitschritte ergibt (Werteverlauf). Die Visualisierung dieser Dynamik gibt Aufschluß über die mit den Gleichungen dargestellten und durch die Berechnungen konkretisierten Beziehungen zwischen den Variablen eines Prozesses. Der Informationsgehalt, der in der Struktur der Gleichungen kodiert ist und nun numerisch entfaltet wird, zeigt sich in der Dynamik der Datenstrukturen und variiert mit deren Änderungsrate respektive mit ihrer Gestalt. Auf diese Weise generieren Simulationen eine eigene Semantik, die als Grundlage heuristischer Annahmen über die Simulation, das Lösungsverhalten der diskretisierten

---

<sup>81</sup> Vgl. Anm. 174, Seite 56.

Gleichungen für spezifische Parameterwerte, Anfangs- und Randbedingungen sowie den simulierten Prozeß dient. Die numerischen Resultate sind zwar durch die Gleichungen determiniert, aber nicht immer vorhersagbar, da aufgrund der Komplexität die einzige Form der Artikulation in ihrer numerischen Simulation besteht. Oder anders gesprochen: Der Zusammenhang zwischen den Gleichungen und den numerischen Lösungen ist mangels nicht bekannter analytischer Lösungen oder Lösungsstrukturen nur bedingt analysierbar und ergibt sich aus der Betrachtung der Dynamik der Datenstrukturen, also aus *quasi-empirischen* Interpretationen der Computereperimente. Sie sind die sichtbaren Darstellungen der *numerischen Fallunterscheidungen* der formalen Gleichungen und erzeugen keine generellen Aussagen über die Gleichungen, sondern lediglich singuläre, bedingte Hinweise.<sup>82</sup>

Aus systemtheoretischer Sicht stellt eine Simulation die strukturellen Beziehungen zwischen den Variablen (Parametern, Zustandsgrößen, Randbedingungen) eines Systems für ausgewählte Anfangsbedingungen dar, wobei die Strukturverknüpfungen des Systems durch Beobachtung, Abstraktion und Theorie gewonnen wurden. Diese Beziehungen zeigen sich in den Wirkungen, welche die Parameter und Zustandsgrößen aufeinander haben. Die Wirkungen lassen sich funktionalisieren, indem bestimmt wird, „ob zwei auf ein Element treffende Wirkungen ... addiert, multipliziert oder anderwertig miteinander verrechnet werden müssen und ob z.B. eine komplizierte funktionale Verknüpfung analytisch oder durch eine Tabellenfunktion vorgeschrieben werden kann.“<sup>83</sup> Die Funktionalisierung mit Hilfe formaler Strukturen (Gleichung) bedarf der Quantifizierung, um auf einem Computer ausführbar zu sein. Das bedeutet, daß alle formal artikulierten Variablen quantifiziert, d.h. für ausgewählte numerische Werte bestimmt werden müssen.<sup>84</sup> Dieses Vorgehen legt die Annahme zugrunde, daß sich im Rahmen der

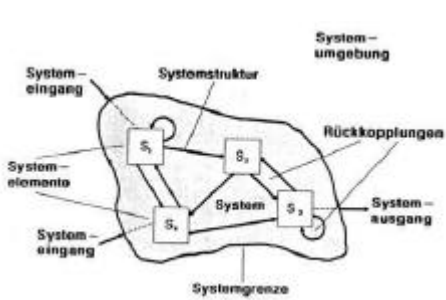


Abb. 8: Systemkonzept

Funktionalisierung und Quantifizierung die konstitutiven strukturellen Merkmale eines Systems inklusive der in den strukturellen Beziehungen enthaltenen Informationen erhalten. Die Simulation der funktionalisierten Strukturen entfaltet nun numerisch die in den formalen Strukturen kodierten Informationen bezüglich der systeminternen Wirkungen der Parameter und Zustandsgrößen aufeinander.<sup>85</sup> Daraus ergibt

<sup>82</sup> „Steht hingegen ein analytisches Lösungsverfahren nicht zur Verfügung, dann lassen sich durch Simulation nur partielle bzw. singuläre Ergebnisse (konkret: Zahlenreihen) erzielen, die – nach geeigneter Auswertung – durch Induktionsschluß zu Funktionalzusammenhängen verallgemeinert werden.“ Mückl, W. : Simulation als methodisches Problem, 1981, S. 192. Diese Ergebnisse werden dann zur Erklärung der Wirklichkeit, zu Prognosezwecken oder für Entscheidungshilfen verwandt.

<sup>83</sup> Bossel, 1989, S. 31

<sup>84</sup> „Das bedeutet, daß alle externen oder Systemparameter, die Anfangswerte der Zustandsgrößen und zusätzlich die Quantifizierung aller funktionalen Verknüpfungen zwischen Systemelementen bestimmt werden müssen.“ Bossel, 1989, S.31

<sup>85</sup> Der Abstraktionsweg vollzieht sich wie folgt: Systembeobachtung, strukturelles Konzept, Formalisierung, Funktionalisierung, Algorithmisierung, Quantifizierung, Simulation, Visualisierung, Interpretation.

sich das Erkenntnisinteresse bezüglich der Simulationsresultate in Form von Sensitivitäts-, Wirkungs- oder Präferenzanalysen. Bei der Sensitivitätsanalyse geht es um die Nutzung der Simulation für Erkenntnisse über die Sensitivität des Systemverhaltens bezüglich des Einflusses bestimmter Parameter auf das Lösungsverhalten. Die Wirkungsanalyse konzentriert sich auf die Sensitivität bezüglich ausgewählter Ziel-Variablen, um einen definierten Zielzustand des Systems optimal zu realisieren. Die Präferenzanalyse geht von alternativen Präferenzen gegenüber der Untersuchung eines Systems aus, das für verschiedene Parameter sensitiv und für unterschiedliche Ziel-Variablen bestimmt ist.<sup>86</sup>

Zeitlich betrachtet entfaltet sich mit der Dynamik der Datenstrukturen das inhärente Verhalten der simulierten Prozesse.<sup>87</sup> Sind die Lösungen für einen Raumpunkt von Zeitschritt zu Zeitschritt gleichbleibend, so geht deren Dynamik gegen Null und die Variablen haben keine Wirkung aufeinander in der Zeit. Verändern sich die Lösungen jedoch von Zeitschritt zu Zeitschritt, weisen also ein dynamisches Verhalten auf, bedeutet dies, daß sich die inhärenten Wirkungen in der Zeit zeigen. Die funktionalisierten Wirkungen beeinflussen die Veränderungsrate der Zustandsgrößen und können von mäßig bis turbulent beschaffen sein.<sup>88</sup> Die numerische Simulation setzt sich aus zahlreichen Berechnungsebenen zusammen, die sich unterschiedlich darstellen lassen, wie beispielsweise als Lösungsentwicklung einer bestimmten Zustandsgröße oder in Form von Parameterstudien.<sup>89</sup> Hier gewinnt die ikonische Visualisierung ihre Bedeutung, denn die Dynamik der Datenstrukturen, als Veränderungen der Lösungswerte im Raum-Gitter über mehrere Zeitschritte hinweg, zeigt sich im Gesamten nur in der Bildabfolge.<sup>90</sup> Die Entfaltung der Form der Simulation bringt also den Aspekt der Dynamik ins Spiel, der bislang dem klassischen Artikulationsinstrument der Schrift für die Organisation seiner Symbole verschlossen war. Die Dynamisierung der formalen Strukturen ist das Resultat der Formalisierung und Mechanisierung der Schrift. Dabei vereint die Entfaltung der Form der Simulation die unterschiedlichen Zeitkonzepte der verschiedenen Ebenen, wie die lineare Entwicklung der Simulationszeit (Zeitpfeil), das lösungsabhängige Zeitmuster der Rekursionen und die systeminterne Dynamik der Daten-

---

<sup>86</sup> Vgl. Mückl, 1981, S. 198ff

<sup>87</sup> Das Konzept eines äußeren Zeitrahmens und der inhärenten Zeit der Prozesse leitet sich aus dem Zeitkonzept Isaac Newtons her, das er für seine Mechanik und das mathematische Instrument der Differentialgleichung entwickelte. Es basiert auf der Idee einer absoluten Zeit und eines absoluten Raums. Zeit wird dadurch zu einer meßbaren und berechenbaren Größe und zur reellen Koordinate in den Bewegungsgleichungen der Mechanik. Die absolute Zeit ist nach Newton ein feststehender äußerer Rahmen zur Beschreibung von Prozessen, dessen metrische Struktur im Unterschied zu den nicht unbedingt gleichförmigen Bewegungen der verschiedenen Prozesse und ihrer Zeitskalen geordnet ist. Bezüglich der Newtonschen Zeitauffassung vgl. Mainzer, 1995a, S. 32ff

<sup>88</sup> Chaotische Zustände liefern trotz Determiniertheit keinerlei Informationen über die Wirkungszusammenhänge. Determiniert chaotische Zustände treten jedoch nur in nicht wohldefinierten Problemstellungen auf, für die keine stetige Abhängigkeit der Lösungen von den Parametern, Anfangs- oder Randbedingungen nachgewiesen werden konnte.

<sup>89</sup> Mit Parameterstudien wird der Einfluß bestimmter Parameter auf das Lösungsverhalten der Zustandsgrößen untersucht. Diese Studien sind die Grundlage der sog. Chaosforschung und haben mit der Darstellung der gesuchten Lösung eines Systems nichts zu tun.

<sup>90</sup> Natürlich läßt sich der Werteverlauf für einzelne Zahlenreihen auch anhand der Zahlendarstellung einsehen. Auf der Ebene der Rekursionen wird die Beurteilung der Lösungsentwicklung von den Algorithmen vorgenommen.

strukturen bzw. des Lösungsverhaltens. All diese Zeitkonzepte passen sich der computerbasierten Organisationsweise an, indem sie auf diskreten Zeiteinheiten basieren und sich von der Kontinuumsidee der schriftbasierten Symbolik unterscheiden. Während die zeitliche Diskretisierung der Simulationszeit und das Zeitmuster der Rekursionen algorithmisch bestimmt sind, ist die Dynamik der Datenstrukturen das eigentliche Resultat des Simulationsvorgangs, das nur in der ikonischen Darstellung intuitiv erfassbar ist. So wie sich die Bedeutung von Texten aus der semantischen Kodierung der Zeichen erschließt, so erschließt sich die Bedeutung der Simulation aus der anschaulichen Darstellung der Dynamik des Lösungsverhaltens und konstituiert die Semantik numerischer Simulationen. Realisiert die typographische Form Informationen als Texte, indem differenzierte und disjunkte Zeichen und Zeichenfolgen in einer normierten Form bereitgestellt werden, deren Bedeutung sich aus der Interpretation der Zeichenfolgen ergibt, so gilt dies auch für die Simulationen, wobei sich die Informationen aus den dynamischen Zeichenoperationen ergeben und die Interpretation auf die visualisierte Dynamik der Datenstrukturen Bezug nimmt. Während Texte jedoch Beschreibungen von Systemabläufen im Medium der Schrift realisieren, stellen Simulationen funktionale Nachbildungen dieser Prozesse bzw. konstitutiver struktureller Aspekte anhand der regelbasierten Entfaltung von Werteverläufen dar, wobei die Werte zugleich als maschineninterne Zustände und visualisierte Präsentationen existieren.

#### **4. Präsentation der Form - Bildlichkeit**

##### *4.1 Strukturierungen der Datenbasis*

Die Visualisierung transformiert die numerischen Werte in farbige Pixeldarstellungen und fügt auf diese Weise zahlreiche individuelle Werte zu intuitiv erfassbaren Strukturen zusammen. Sich verändernde Farbwerte kreieren dabei den Eindruck der Dynamik der Datenstrukturen als Wechsel diskreter Ereignisse, die nur als singuläre Ereignisse, symbolisiert mit Zahlen, lesbar wären. Die Wahrnehmung der Dynamik würde dann jedoch in der Kolonne von Zahlen verschlüsselt sein, und ihre Entwicklung wäre nur schwer oder gar nicht einsichtig. Der Informationsgewinn gegenüber der Darstellung mit Ziffern besteht in der visualisierten Entfaltung der relationalen Strukturen zwischen den numerischen Werten. Wie bereits skizziert, besitzen digitale Zeichen eine eindeutige Kennzeichnung im Rahmen eines Programms (Adresse, Variablentyp, Wert). Die Simulation versieht die errechneten Resultate jedoch mit weiteren Informationen, die sich aus dem Raum-Zeit-Raster ergeben. Es ist also festgelegt, für welchen Berechnungspunkt und Zeitschritt ein spezifischer Wert erzeugt wurde. Auf diesem Wege



werden die numerischen Werte zu raumzeitlich lokalisierten Daten.<sup>91</sup> Zur Aufbereitung der Daten einer Simulation für die Visualisierung bedarf es eindeutiger Angaben über die Art des Zahlenmaterials (binary -, floating-point -, double-precision floating-point numbers, etc.), über die Dimensionalität des Datensatzes und die Form der Speicherung (Matrix oder Liste) sowie über die Verteilungsstruktur der Daten (grid, nodes, cells).

Alle relevanten Angaben bedürfen einer strukturierten Form der Darstellung in Form einer Matrix oder Liste.<sup>92</sup> Dabei referiert die Datenstruktur bereits auf die Bedingungen der visuellen Darstellbarkeit, wie sie vor allem durch die begrenzte Dimensionalität des Anschauungsraums vorgegeben sind. Die Transformation des n-dimensionalen Berechnungsraums in eine matrix- oder listenförmige Darstellungsweise bildet einen Zwischenschritt zwischen den unanschaulichen Berechnungsstrukturen und den Visualisierungsstrukturen. Für diesen Übergang ist es notwendig, fehlende Daten auszugleichen. Dazu gibt es verschiedene Verfahren, die mehr oder weniger anspruchsvoll und zeitaufwendig sind. Dabei kann es jedoch leicht zu Verfälschungen der Werte und der gesamten Visualisierung kommen.<sup>93</sup> Schließlich gilt es, Überlegungen zur geeignetsten Form der Visualisierung der Datensätze anzustellen.<sup>94</sup> Dazu stehen neben den drei Dimensionen des Koordinatenraums auch Farben, Farbschattierungen, graphische Elemente und Formen sowie im Falle der Bildanimation die Bewegung als Gestaltungselemente zur Verfügung.

---

<sup>91</sup> Ein Wert  $t$  ist ein Datum an der Stelle  $x,y,z$  für die Variable Temperatur. Für computerrealisierte Daten kommen noch die Adressierung und der Datentyp als Angaben hinzu.

<sup>92</sup> Die Datenwerte allein sind nicht selbsterklärend und bedürfen entsprechenden Lokalisationen auf Basis unabhängiger Variablen sowie zusätzlicher Beschreibungen, die für alle Daten gelten. Übliche Lokalisationsangaben sind die Zeitkoordinate und die Raumkoordinaten sowie Angaben für welche Variable die Werte stehen. Je höher die Dimensionalität des Datensatzes ist, desto schwieriger wird es, eine strukturierte Form für die Datendarstellung zu erzeugen. Dabei unterscheiden sich Listen von Matrizen dadurch, daß in den Listen numerische Werte als auch ASCII-Text gespeichert sein können und daß die Dimensionalität des Datensatzes nicht eingeschränkt ist. Dagegen bereitet die Darstellung einer 3D-Matrix für eine abhängige Variable Schwierigkeiten und kann nur als eine Abfolge von 2D-Matrix-Layern konzipiert werden. Listen sind deshalb die üblichere Strukturierung, um Daten einer Simulation für die Visualisierung zu speichern. Ein weiterer Aspekt ist die Verteilungsstruktur der Datenwerte in einer Matrix (structured grid) respektive in einer Liste (unstructured grid). Die Dimensionalität von Matrizen legt eine Darstellungsweise in Form eines durch die Koordinatenachsen strukturierten 2D- oder 3D-Gitters nahe, in welchem sich die Datenwerte der abhängigen Variable gleichmäßig oder ungleichmäßig verteilen. Für polygonale Daten, deren Berechnungsgitter komplexer strukturiert ist - wie dies für numerische Simulationen von partiellen Differentialgleichungen der Fall ist - eignen sich Matrizen und die sich daraus ergebenden Verteilungsstrukturen nicht zur Speicherung der Datenwerte. Hier werden unstrukturierte Gitter verwendet, die nur in Form von Listen angeschrieben werden können. Die Verteilungsstruktur der Datenwerte ergibt sich aus der relativen Position zu den benachbarten Werten, wobei der Datenwert in einer Zelle gespeichert ist.<sup>92</sup> Je nachdem aus wievielen Nachbarwerten die Verteilungsstruktur resultiert, ergibt sich die polygonale Form der Zellen. Polygonale Datensätze benötigen zwei Listen: eine Liste für die Polygone und eine für die Kontenpunkte  $P_1 \dots P_N$  und deren Koordinatenangaben.

<sup>93</sup> Fehlende Werte (Leerstellen) werden durch speziell dafür gekennzeichnete Werte repräsentiert (NaN, 99999, -99 etc.). Die Methode der linearen Interpolation beispielsweise interpoliert zwischen den beiden nächsten Werten einer Leerstelle und setzt die so gewonnenen Werte an dieser Stelle ein. Dabei werden jedoch nur die Werte einer Reihe oder einer Spalte berücksichtigt, nicht die gesamte Umgebung der Leerstelle. Verfahren die in kleiner oder größeren Radien die gesamte Umgebung berücksichtigen und eventuell die Nähe oder Weite der beeinflussenden Werte gewichten, liefern differenziertere Ergebnisse. Da bei diesen Verfahren die bekannten Werte angepaßt werden, kann es zu einer verfälschenden Glättung des Wertenniveaus kommen. Die aktuell fortschrittlichste und aufwendigste Technik basiert auf dem Kriging-Algorithmus. Vgl. Fortner, 1995, S. 161ff

<sup>94</sup> Der gesamte Visualisierungsprozeß läßt sich in drei Abschnitte gliedern: Filtering, Mapping, Rendering. Beim Filtering werden die Rohdaten der Simulation durch entsprechende Filterprozesse aufbereitet, das Mapping bildet die Datenwerte auf eine bestimmte Geometrie und ausgewählte Farbwertskalen ab und das Rendering ist die eigentliche Bilderstellung. „*Scientific visualization is an amalgam of tools and techniques that seeks to promote new dimensions of insight into problem-solving using current technology.*“ Earnshaw, R.A./Wieseman, N.: An Introductory Guide of Scientific Visualization, 1992, S. 5

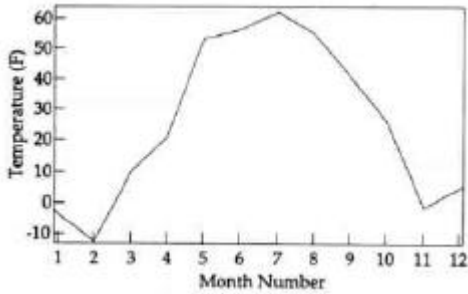


Abb. 9: Liniengraphik einer 1D-Liste

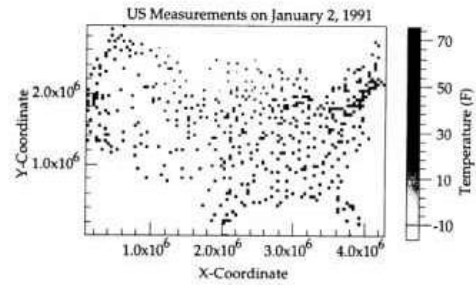


Abb. 10: Streugraphik einer 2D-Liste mit Grauwerteskala

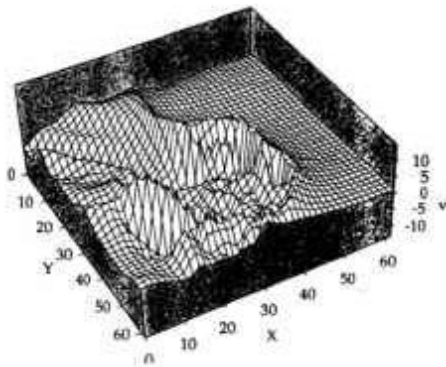


Abb. 11: 3D Oberflächendarstellung eines 2D Datensatzes



Abb. 12: Konturendarstellung einer 2D-Matrix

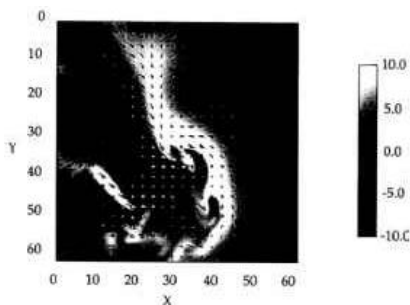


Abb. 13: Vektordarstellung eines 2D-Geschwindigkeitsfeldes

Die durchschnittliche Temperatur eines Monats lässt sich mit diskreten Punkten in funktionaler Abhängigkeit von den Zeiträumen darstellen. Die graphische Verbindung der Punkte simuliert eine Kurve (Abb. 9). Die räumliche Verteilung der Temperaturwerte zu einem einzigen Zeitpunkt bedarf bereits der Farbnuancierung (Grauwerte) als weitere Dimension zur Darstellung der Temperaturwerte (Abb. 10). Das Niveau verschiedener Datenwerte kann aber auch als dritte Dimension in

eine 3D-Darstellung integriert werden (Abb. 11) oder als Verbindungskontur zwischen gleichen Werten (Abb. 12). Um die Windgeschwindigkeit sowohl in ihrer Stärke als auch in ihrer Richtung darzustellen, eignen sich Vektordarstellungen. Dabei hängt der Vektor – graphisch symbolisiert als Pfeil - von den 2D-Datenwerten für  $x$  und  $y$  ab. Die Stärke ergibt sich aus der Berechnung der Wurzel von  $(x^2 + y^2)$  und die Richtung aus  $\tan^{-1}(y/x)$  (Abb. 13). Es sind vielfältige graphische Elemente zur Veranschaulichung von Entwicklungen in den Daten möglich, so etwa Spurbänder, welche die Luftströmung in einer Wolke verdeutlichen. Die bislang gezeigten Beispiele bewegten sich im zweidimensionalen Bereich, mit oder ohne zusätzliche Informationen über Farbskalen oder graphischen Elementen. Die in Abbildung 11 auftretende dritte Dimension ergibt sich aus der Verwendung der Niveaus der Datenwerte als Auftrag in der z-Koordinate.

Tatsächliche dreidimensionale Darstellungen sind in ihrer Visualisierung sehr aufwendig und basieren auf einer Fülle von Datenwerten, die in der Regel in einer 3D-Matrix mit einem uniformen Gitter gespeichert sind.<sup>95</sup> Für die 3D-Visualisierung gibt es verschiedene Verfahren, die entweder einzelne Bilder als Ebenen animiert zusammenfügen (slicing und dicing), die Oberfläche mit Konturlinien in 3D erzeugen (isosurfaces) oder das gesamte 3D-Objekt darstellen (volumetric visualization). Für die volumetrische Darstellung werden die Datenwerte in Intensitätswerte transformiert, die aufeinander angeordnet addiert werden. Ähnlich einer Wolke zeigt sich große Intensität in Opakheit und niedrige Intensität in Transparenz. „*Volumetric visualization mimics nature by creating a 'cloud' of your data.*“<sup>96</sup> Schattierungen und Lichtsetzungen unterstützen die piktorale Wirkung. Dabei wird, ausgehend vom Auge des Betrachters vor dem Bildschirm, der Weg der Lichtstrahlen berechnet, die entsprechende Brechungen und Reflexionen auf der Oberfläche der visualisierten Objekte erfahren. Berechnet man die dreidimensionale Darstellung stereometrisch und betrachtet die Objekte mit entsprechendem Equipment (3D-Brillen), so erhält man einen realistisch anmutenden Eindruck eines Objekts, beispielsweise eines Moleküls, das man beliebig in jede Richtung drehen, von jeder Distanz aus betrachten und eventuell gar darin eintauchen kann. Undurchdringlichkeit ist - falls nicht als collision detection programmiert - keine Eigenschaft elektronisch realisierter Objekte.

<sup>95</sup> „A small volumetric dataset of dimension 100 x 100 x 100 contains one million data values! The disk file size would be two megabytes in size for short integer values, four megabytes for floating-point, and approximately 12 megabytes for ASCII text“ Fortner, 1995, S. 131/132

<sup>96</sup> Fortner, 1995, S. 140. Eine weitere 3D-Technik sind Vektorfelder und Strömungslinien im Dreidimensionalen. „Streamlines are similar to throwing smoke bombs in a windstrom. A windstrom defines a 3D vector field of wind velocity ... The smoke bomb traces the path in that 3D vector field ...“ Fortner, 1995, S. 141

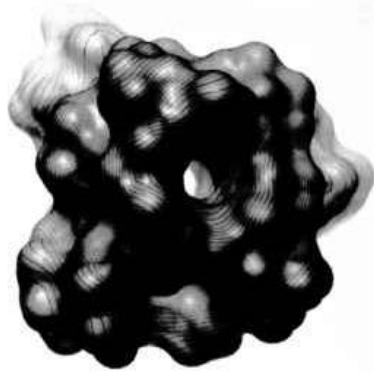


Abb. 14: Isosurface-Darstellung

#### 4.2 Farbdifferenzierung und Gestalt

Die Farbdifferenzierung spielt in der Visualisierung von Datenwerten eine bedeutende Rolle, da sie eine weitere Darstellungsdimension eröffnet. Dabei können Grauwerteskalen oder Farbskalen verwendet werden. Jeder Farbwert wird in drei Komponenten zerlegt und zwar in einen numerischen Wert zwischen 0 und 255 für rot, grün und blau. Dunkelrot ist beispielsweise als (128, 0, 0), schwarz als (0, 0, 0) und weiß als (255, 255, 255) numerisch kodiert. Die Grauwerteskala (Pseudofarbskala) besitzt 255 verschiedene Abstufungen und weist dem Rot-, Grün- und Blau-Index jeweils denselben Wert zu. Indem die quantitative Spanne zwischen den Datenwerten in 255 Stufen eingeteilt wird, erhält man eine Ordnung, die sich auf die Grauwerteskala übertragen läßt. Aufgrund der farblichen Eindimensionalität besitzen die Grauwerte eine deutliche Aussagekraft gegenüber der Quantität der numerischen Werte. So ist entscheidbar, ob ein Grauwert heller oder dunkler ist und ob er entsprechend einen niedrigeren oder höheren numerischen Wert repräsentiert. Für das Farbspektrum ist diese einfache Zuordnungsweise aussagegelos, denn es gibt keine aufsteigende Ordnung zwischen den verschiedenen Farben in der Wahrnehmung, selbst wenn eine numerische Ordnung der Farbwerte von (0, 0, 0) bis (255, 255, 255) denkbar ist. Die Zuordnung geschieht üblicherweise im Rahmen einer expliziten Farbskala (z.B. Regenbogenskala), um quantitative Aussagen mit Farben zu verknüpfen. So lassen sich beispielsweise niedrige Werte blau und hohe Werte rot darstellen. Dazwischen ergibt sich ein Farbverteilungsspektrum unterschiedlicher Farben gemäß der Farbskala, die der Visualisierung als Beschreibungskomponente beigelegt werden muß, soll eine Interpretation zu adäquaten Aussagen über die repräsentierten numerischen Werte gelangen.

Die Visualisierung der Datenwerte kann zeichenbasiert, graphisch oder ikonisch erfolgen. Der Unterschied zwischen einer graphischen und einer ikonischen Darstellung ist einsichtig, aber schwer beschreibbar.<sup>97</sup> Graphiken organisieren Farbe in voneinander abgegrenzten Formen mit einfachen Elementen wie Punkten, Linien oder Flächen. Die Form ist der dominante Faktor, nicht die Farbe, weshalb die meisten Graphiken mit wenigen oder nur einer Farbe auskommen. Zudem sind die Formen in einheitlichen Farben gehalten. Sie basieren nicht auf Farbschattierungen und wirken deshalb abstrakt.

<sup>97</sup> Nelson Goodman billigt Diagrammen ein piktorales Aussehen zu, verweist aber darauf, daß Diagramme meist digital oder gemischt, also digital und analog sind. Für ihn ist die Bezeichnung graphisch mit analog verbunden: „... dann ist das Diagramm rein analog beziehungsweise graphisch.“ Goodman, 1995, S. 163

Dagegen weisen ikonische Visualisierungen sowohl unterschiedliche Farben als auch Farbschattierungen über die gesamte Fläche der Darstellung auf. Formen entstehen durch Abgrenzungen zwischen unterschiedlichen Farben und durch Farbschattierungen. Aufgrund ihrer Farbdichte und der sich dadurch ergebenden Geschlossenheit der Fläche erhält diese Form der Visualisierung ikonische Eigenschaften. Als Unterscheidungskriterium zwischen graphischen und ikonischen Darstellungsformen soll hier die Identität von Farbe und Form gelten, d.h. insofern eine Farbe ohne Farbschattierungen sich klar von anderen Farben abhebt und somit identisch mit der Form ist, die sie anzeigt, soll von einer Graphik die Rede sein. Farbformen dieser Art sind deutlich voneinander abgegrenzt und erscheinen als einfarbige Elemente oder Flächen. Ikonische Darstellungsformen hingegen erhalten aufgrund der Farbschattierungen eine weitere Dimension zur Darstellung von Informationen, und es können Muster zu Tage treten, die in den einfachen Farbformen der Graphiken nicht ersichtlich sind. Durch die Farbschattierungen treten die Formen weniger deutlich voneinander abgegrenzt auf und es kommt ein plastisches Element zur Geltung, das sich auch in Grauwertevertellungen zeigt. Beide sind jedoch pikturale Darstellungsformen.

Dies wirft die Frage auf, woher die Formen ihre Gestalt beziehen: aus den Datenwerten oder durch gestaltgebende Programmierungen? Für den Verlauf einer Kurve ergibt sich die Gestalt der Kurve aus dem Werteverlauf einer Funktion, d.h. die Gestalt wird durch die Datenwerte generiert. Insofern es sich um eine stetige Funktion handelt, ist die Verbindung der berechneten, diskreten Werte mit einer durchgängigen Linie legitim. Dabei erfolgt die Legitimierung aufgrund mathematischer Eigenschaften der zugrundeliegenden Funktion (Nachweis der Stetigkeit). Handelt es sich jedoch um diskrete Durchschnittswerte wie in Abbildung 9, so stellt die Verbindung der Werte mit einer Linie eine gestaltgebende Geste dar und suggeriert einen Kurvenverlauf auf der Basis gemittelter Werte. Unabhängig davon bietet die Farbe der Linie keine zusätzliche Information und ist mit der Form identisch bzw. sie konstituiert die Form. Die in Abbildung 10 erscheinende Form des nordamerikanischen Kontinents ergibt sich aus der räumlichen Verteilung der Meßinstrumente und nicht aus den Datenwerten. Die Grauschattierungen präsentieren die relevanten Informationen der Temperaturunterschiede. Da die jeweiligen Datenwerte in abgeschlossenen Formen (Punkten) dargestellt sind, die jeweils einer Grauschattierung entsprechen, sind diese mit der Form identisch, und es handelt sich um eine graphische Visualisierung. Die Temperaturunterschiede können auch ohne Farbschattierungen als Auftrag auf der z-Achse zum Ausdruck kommen (Abb. 11). Die Form der Konturen in Abbildung 12 ergeben sich aus einer spezifischen Strukturierung der räumlich verteilten Datenwerte gemäß ihren Werten mit Hilfe einer schwarzen Linie. Die komplexe Linienführung und die Häufung von Linien machen es an man-

chen Stellen unmöglich, die Linien voneinander zu unterscheiden. Dadurch entstehen scheinbar dunklere Gebiete. Die Dichte der grauschattierten Stellen in den Abbildungen 10 bis 12 lassen diese Abbildungen im Unterschied zur Kurvendarstellung piktoraler erscheinen und zeigen den Übergang von einer graphischen zu einer ikonischen Darstellung. Ein Grund dafür ist die Plastizität, die sich aus der Grauwerteschattierung, der dreidimensionalen Darstellung und der Verstärkung der Linien zu dunkleren Gebieten ergibt. Deutlich zeigt sich dieser Effekt der Plastizität in Abbildung 14 für die Isosurface-Darstellung eines Moleküls. Die Gestalt von Objekten und ihrer Umgebung resultiert aus der Strukturierung der Datenwerte. Insofern es sich um eine Simulation im Raum handelt, ist das Berechnungsgitter mit der Struktur der Datenlokalisierung identisch (2D: x-, y-Koordinatenachse, 3D: x-, y-, z-Koordinatenachse). Um eine Wechselwirkung zwischen einem Objekt und seiner Umgebung zu erzeugen, werden verschiedene Verfahren verwendet. Für die Crashsimulation beispielsweise müssen die Verformungskräfte, die auf das Objekt wirken, für jeden Zeitschritt berechnet werden (Abb. 16).<sup>98</sup> Anders verhält es sich in Abbildung 17.<sup>99</sup>

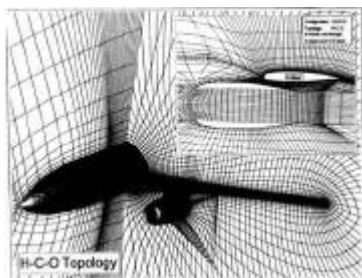


Abb. 15: Strukturiertes Gitter für die Umgebung eines Flugzeuges

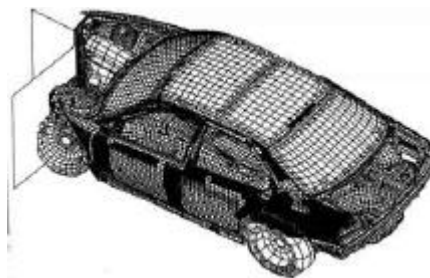


Abb. 16: Finite Elemente-Struktur eines Autos für eine Crashsimulation

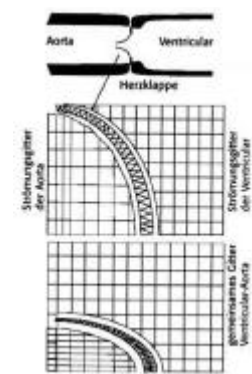


Abb.17: Kopplung zwischen Gitter und Finiten Elementen

<sup>98</sup> „Ein Ziel bei der Crashsimulation ist es, die Verformung des Autos zu bestimmen. Hierzu wird bei der Anwendung der Finite Elemente-Methode das Auto in viele Elemente aufgeteilt ... Die erstmalige Entwicklung der Gitterstruktur von bis zu 200 000 Elementen dauert in der Regel mehrere Wochen. Die verschiedenen Lösungsschritte, wie die Berechnung der Kräfte oder Spannungen, werden dann für jedes einzelne Element durchgeführt. Bei einem Crashvorgang, der etwa 80 Millisekunden dauert, wird zum Beispiel die Verformung des Autos in über 80 000 Zeitschritten aus dem jeweils vorherigen Zeitschritt explizit berechnet.“ Galbas, H.G. et al.: Schnelle parallele Kontaktverfahren zur Crashsimulation, 1997, S. 44

<sup>99</sup> Im Falle der Simulation des dynamischen Verhaltens einer Herzklappe in der Blutströmung wird eine gekoppelte Berechnung der Blutströmung und der sich darin bewegenden Herzklappe vorgenommen. Dabei werden die Herzklappe als auch die Umgebung durch unterschiedliche Gitter dargestellt. Die Wechselwirkung wird durch Nachbarschaftsbeziehungen zwischen den Gitterelementen modelliert (Abb. 17). „In unserem Beispiel der Herzklappe würde die Blutströmung durch ein strukturiertes oder unstrukturiertes (regelmäßiges) Hexaeder-Gitter dargestellt, die Herzklappe jedoch durch Finite-Elemente in Dreiecksform nachempfunden ... Für die Untersuchung der Interaktion zwischen Struktur und Strömung muß die Strukturverformung der Herzklappe direkt aus dem aktuellen Strömungsdruck abgeleitet werden: die Druckinformation in dem Gitter muß in einen Kraftkoeffizienten in der Dreiecksstruktur umgesetzt sein ... Dazu müssen die Nachbarschaftsbeziehungen der Strukturen festgestellt werden: welcher Gitterpunkt ist mit welchem Dreieckspunkt direkt benachbart und muß mit diesem Daten austauschen.“ Brakkee, E. et al.: Herzklappen, Drehmomentwandler, Fährschiffe und andere Probleme, 1997, S. 31

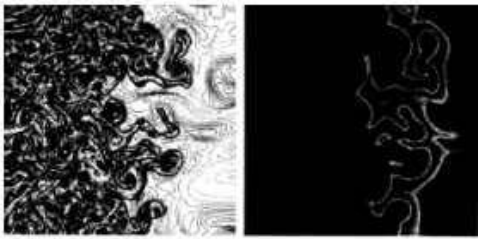


Abb. 18: Strömung in einer Methanflamme

Doch es gibt Gestalten, die sich ausschließlich aus den Datenstrukturen ergeben, wie beispielsweise die Wirbelbildungen in der Strömungsdynamik. Sie basieren auf den farblich visualisierten Datenwerten in einem gleichförmig strukturierten Gitter. So zeigt Abbildung 18 die numerische Simulation der Strömung in einer turbu-

lenten Methanflamme (links: Strömungsfeld, rechts: relativer Massenanteil des Sauerstoff-Wasser-Radikals). Diese Formen sind keine vorgegebenen Effekte, sondern resultieren aus dem dynamischen Verhalten der Datenwerte. Visualisierungen dieser Art sind abstrakte Bilder auf Basis reiner Farben, welche die Formen konstituieren, wie die farbigen Abbildungen auf Seite 86 demonstrieren. Die entfalteten und visuell präsentierten Datenstrukturen verweisen auf Zusammenhänge, wie sie mit den Gleichungen beschrieben und durch die Berechnungen aktualisiert werden. Die Visualisierungen erzeugen je nach Lösungsverhalten mehr oder weniger stark strukturierte Bilder. Aussagen über das Verhalten resultieren aus der Identifizierung gestaltbildender Elemente, die sich durch visuell wahrnehmbare Zusammenhänge, Abgrenzungen und Gliederungen ergeben.

Die Gestalt bietet dabei einen wichtigen Anhaltspunkt zur Interpretation des strukturellen Lösungsverhaltens sowie für den Vergleich mit dem physikalischen System, das als extrasymbolische Interpretation der Simulation zugrunde liegt. Gestalt entsteht, wenn sich eine Gestalt-Hintergrund-Differenzierung ergibt. Dies ist dann der Fall, wenn eine geschlossene Struktur die Teilelemente in ein übergeordnetes Ganzes integriert und sich vom Hintergrund abhebt, obwohl die Gesamtheit der Teilelemente nicht unbedingt mit dieser Gestalt identisch sein muß.<sup>100</sup> Die Gestalterkennung ist von daher ein interpretativer Wahrnehmungsprozeß. *„Wir nennen Gestalt die Form eines Gebildes, wenn diese nicht der Starrheit des Materials zu verdanken ist und auf einer Festlegung jedes einzelnen Punktes für sich, sondern auf einem Gleichgewicht von Kräften (Spannungen usw.) beruht.“*<sup>101</sup> Diese Kräfte ergeben sich aus den Gestaltqualitäten visueller Elemente wie beispielsweise ihrer Gleichartigkeit, ihrer Nähe zueinander, ihrer Geschlossenheit und Symmetrie. Vor allem die symmetrisch angeordneten Elemente führen zu prägnanten Gestalten. Die Gestalten ergeben sich aus berechneten Größen, deren Quantität mit Hilfe der Farbgebung in eine qualitative Ausdrucksweise transformiert wurden. So nehmen die Gestalten – wie in der Strömungsdynamik – die Form von laminaren Strömungen, Wellen

<sup>100</sup> Beispielsweise im sog. Bourdon-Effekt: Drei Punkte in einer spezifischen Anordnung ergeben die Gestalt eines Dreiecks und vier Punkte eines Quadrats. Die Gestalt entsteht durch imaginäre Brückenlinien zwischen den Punkten.

<sup>101</sup> Metzger, W.: Gestalt-Psychologie, 1986, S. 130. *„In jedem Fall aber handelt es sich um ganze, das heißt um überpunktuelle Gebilde oder Sachverhalte, die räumlich, zeitlich oder raumzeitlich ausgedehnt sind, mit Eigenschaften, die sich nicht aus artgleichen Eigenschaften der punktuellen Elemente herleiten lassen. Diese Eigenschaften nannte v. EHRENFELS „Gestaltqualitäten“ ...“* Metzger, 1986, S. 125

und Wirbeln an bzw. werden entsprechend als laminare Strömungen, Wellen und Wirbel interpretiert. Zudem spielt die Wahl der Farbskala eine bedeutende Rolle, denn gewisse Farben sind mit bestimmten Interpretationen verbunden: so werden rote Bereiche eher als kritisch angesehen (z.B. hohe Druckwerte) und hellere als weniger intensiv als dunklere. Auch die Farbfolge im Farbspektrum ist nicht ohne Einfluß. Eine Regenbogenskala erstreckt sich zwischen violett und rot, doch die Wahrnehmung ordnet beide Farben graduell zueinander und gibt die Unterschiede zwischen den Werten unadäquat wieder. Auch die Dynamik der Datenstrukturen ergibt eine Gestalt in der Zeit, insofern die Übergänge von Bild zu Bild nicht zu sprunghaft sind.<sup>102</sup>

#### 4.3 Animierte Bildobjekte

Die Sichtbarmachung von Prozessen ist der eigentliche Vorteil der Visualisierung numerischer Simulationen, da sie diese intuitiv in der Zeit erfaßbar macht, d.h. die Veränderungen werden als Zeitphänomene interpretiert und nicht als ein symbolisch kodierter Wechsel numerischer Werte. Die Zeitschritte der Simulation geben die Taktfrequenz des Bildwechsels vor, und die Veränderung zwischen den einzelnen Bildern generiert sich durch die Dynamik der Datenstrukturen. Mit der ikonischen Visualisierung nutzt die Simulation die mediale Freiheit der Präsentation digitaler Zeichen und verläßt die diskrete Darstellungsweise. Die Transformation der Lösungswerte in Farbwerte macht die Strukturen, die sich in der Veränderung der numerischen Werte entfalten, als Gestalt in der Zeit sichtbar und ermöglicht so Aussagen über das Lösungsverhalten der Gleichung unter spezifischen Bedingungen. Da mit diesen Gleichungen naturwissenschaftlich interessante Systemprozesse mathematisch modelliert werden, erlauben die Visualisierungen darüber hinaus einen anschaulichen Vergleich mit den beobachteten Systemen bzw. visualisierten Prozesse, die nicht beobachtet werden können. Dabei transferieren die Visualisierungen Anschauungskonzepte unserer mesoskopischen Erfahrungsebene auf an sich unsichtbare Bereiche. Beispielsweise, indem funktionalisierte und quantifizierte Wirkungen zwischen Elektronen als Isosurfaces dargestellt werden und so den Eindruck eines Atoms als solides Objekt vermitteln (Abb.14). Mit Hilfe innovativer Visualisierungstechniken, wie Stereo-3D-Darstellungen und taktile Simulationen werden diese Bilder in der Wahrnehmung zu raumfüllenden, beweglichen und tastbaren Objekten. Die Interferenz von Wahrnehmungsraum und Realraum wird dabei aufgehoben. Dieser Bruch kennzeichnet die Virtualität simulierter Objekte.

---

<sup>102</sup> Dieses Phänomen wurde in der Gestalttheorie unter dem Begriff Scheinbewegung untersucht. Vgl. Köhler, W.: Die Aufgabe der Gestaltpsychologie, 1971. Das Gehirn nimmt eine Folge von ca. 24 Bildern pro Sekunde als kontinuierliche Bewegung wahr, insofern die Bilder einen nicht zu sprunghaften Ablauf zeigen. Ein weiteres Gestaltphänomen in der Zeit wäre eine Melodie.



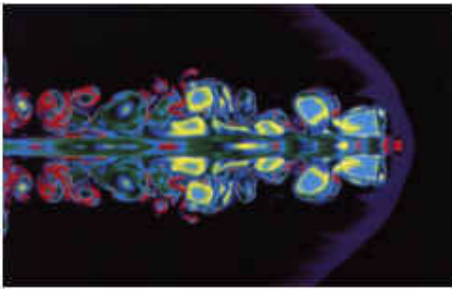
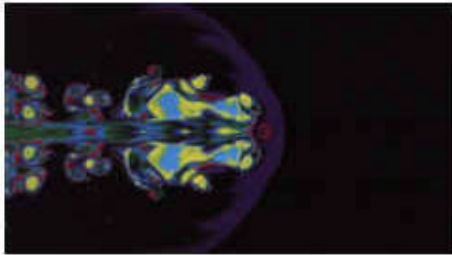
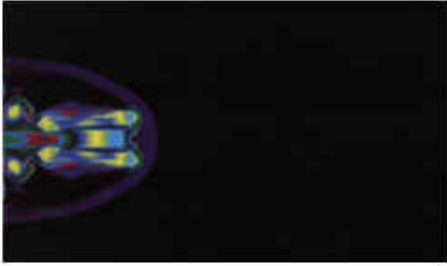


Abb. 19: Simulation von Stoßwellen für Jets, die mit Überschallgeschwindigkeit fliegen, auf Basis der Euler-Gleichungen

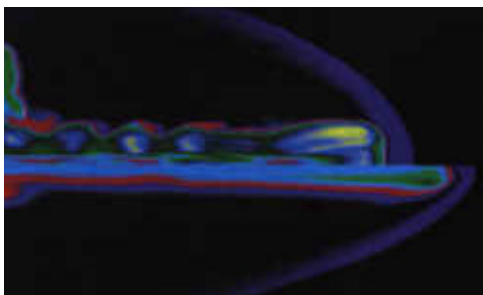


Abb. 20: Vergleich zweier Simulationsgänge mit feinem Berechnungsgitter (obere Bildhälfte) und größerem Gitter (untere Hälfte)

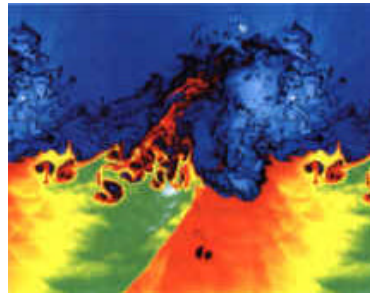
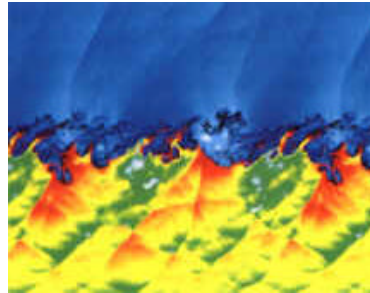
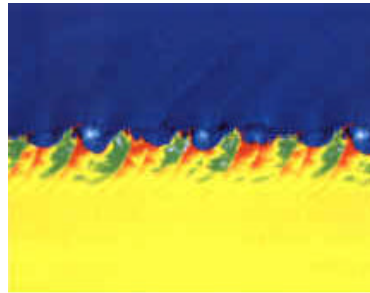
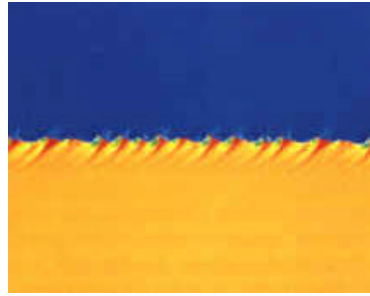


Abb. 21: Simulation der Kelvin-Helmholtz-Instabilitäten für zwei Flüssigkeiten, die sich mit Schallgeschwindigkeit aneinander vorbei bewegen, auf Basis der Euler-Gleichungen (hohe Dichte = grün, niedrige Dichte = blau)

## 5. Von der Berechenbarkeit zur Simulierbarkeit

Um einen Zusammenhang berechenbar zu machen, muß dieser zum einen in einer formalen Struktur artikulierbar, zum anderen quantifizierbar sein, d.h. auf zähläquivalenten Zeichen basieren, welche numerische Werte notieren. Numerische Werte sind durch eine Ordnung charakterisiert, die anhand eines Kalküls rekursiv erzeugbar ist (vollständige Induktion von  $\mathbf{N}$ ) oder auf entsprechend anderen Konstruktionsverfahren aufbaut.<sup>103</sup> Die Berechnung einer Lösung kann einerseits allgemein in der deduktiven Umformulierung von Folgen von Variablen- und Operationszeichen bestehen und als formale Struktur angeschrieben sein, oder sie kann sich konkret in der Anwendung der mit der formalen Struktur symbolisierten Operationen auf numerische Werte vollziehen, welche für die Variablen eingesetzt werden und einem zuvor definierten Ordnungsmuster entstammen. Die numerische Lösung ist dann der aus den Operationen resultierende numerische Wert der formalen Struktur. Dieses Vorgehen läßt sich funktional als eine Zuordnung zwischen den numerischen Werten des Definitionsbereichs und dem Wertebereich gemäß der in der formalen Struktur symbolisierten Operation darstellen:  $f: D \rightarrow W$ . Die Funktionsvorschrift drückt den entsprechenden Zusammenhang zwischen den Zeichenbereichen aus und faßt diesen im Werteverlauf - visualisiert als Graph - zusammen, der sich aus den jeweiligen Zeichenpaaren ergibt. Funktionen sind semiotische Maschinen zur Erzeugung von Werten. Die Entwicklung des Werteverlaufs respektive des Graphen in einem Koordinatensystem, bezogen auf die voranschreitende Erzeugung der numerischen Werte des Definitionsbereichs und entsprechend der Funktionsvorschrift des Wertebereichs, läßt sich mit der Ableitung der Funktion darstellen. Differentialgleichungen artikulieren eine Beziehung zwischen Funktionen und ihren Ableitungen. Sie sind mathematische Instrumente zur Darstellung der Veränderung veränderlicher Größen und finden deshalb in naturwissenschaftlichen Bereichen Anwendung, die quantifizierbare Prozesse zum Gegenstand ihrer Forschung haben. Differentialgleichungen sind die mathematische Basis deterministischer Simulationen ( $dy/dt = \text{Gleichung}$ ), und ihre Lösung ist eine stetige Funktion  $y(t)$ . Diese exakte Lösungsfunktion ergibt sich aus den Umformungen der Differentialgleichung gemäß festgelegter Regeln.<sup>104</sup> Doch diese formal-analytische Handhabung ist nur auf einen kleinen Bereich von Differentialgleichungen beschränkt.<sup>105</sup> Für alle anderen Differentialgleichungen sind bislang keine Lösungsfunktionen bekannt. Die numerische Simulation bietet nun eine neue Methode, diskretisierte Versionen der Differentialgleichungen zu erstellen und approximativ zu lösen, d.h. für endlich viele Berech-

<sup>103</sup> Das können neben Zahlen auch binärlogische Werte sein, die sich mit 0/1 darstellen lassen. Lediglich die komplexen Zahlen besitzen keine Ordnungsstruktur im Sinne von größer, gleich, kleiner.

<sup>104</sup> Die Lösungsfunktion gilt für alle numerischen Werte, welche für die Variablen eingesetzt werden.

<sup>105</sup> Lösungsfunktionen sind für gewöhnliche, viele lineare und einige partielle nichtlineare Differentialgleichungen bekannt.

nungspunkte, so daß die Ergebnisse der exakten Lösung beliebig nahe kommen.<sup>106</sup> Bei dieser Transformation formaler Strukturen in algorithmisierte Zeichenoperationen tritt der prinzipielle Unterschied zwischen dem Symbolisierungsgehalt schriftbasierter Zeichen und computerbasierten Zeichenoperationen zu Tage. Denn während schriftbasierte Zeichen auch infinitesimale Operationen symbolisieren und sich für den Umgang mit diesen Zeichen Regeln aufstellen lassen, es also einen Formalismus zur Handhabung der Symbole infinitesimaler Operationen auf dem Papier gibt,<sup>107</sup> müssen die Symbolisierungen – sollen sie in das maschinelle Medium des Computers übertragen werden – in konkrete Operationen umgesetzt werden. D.h. sie müssen effektiv auf endlichen und eindeutigen, zur Not gerundeten numerischen Werten, die Maschinenzustände notieren, operabel sein. Die Operationen werden direkt auf den numerischen Werten ausgeführt und nicht gemäß einem Formalismus umgeformt. Dies ist ein wichtiger Unterschied zwischen dem formal-operativen und dem maschinellen Zeichenumgang. Kennzeichnend dafür ist, daß im Verlauf formaler Umformungen die Variablenzeichen sich zwar in ihren konfigurierenden Kombinationen ändern, an sich aber als Entitäten erhalten bleiben. D.h. die Variablen werden von einem strukturellen Zusammenhang regelbasiert in einen anderen transformiert.

*Berechnen* in diesem Sinne meint die deduktive Umformung von Gleichungen in allgemeine Lösungen, welche eine formale Struktur für die gesuchte Unbekannte erzeugt. *Berechnen* im numerischen Sinne geht auf dem Papier von der Einsetzung numerischer Werte in die formale Struktur der Lösung aus, um so numerische Werte der gesuchten Unbekannten zu erzeugen. Diese Verarbeitungsweise ist der numerischen Simulation verschlossen, da in der Regel die Umformungsschritte zur algebraischen Lösung einer komplexeren Differentialgleichung nicht bekannt sind. Deshalb wird der Umformungsprozeß an den Computer delegiert und zwar derart, daß ein Algorithmus Verarbeitungsanweisungen zur Manipulation numerischer Werte auf Basis der Gleichungen – nicht der Lösungen, die ja unbekannt sind - vorgibt. Der Computer löst durch Umformungen eingesetzter numerischer Werte für die Parameter, Anfangs- und Randbedingungen ein Gewebe aus Gleichungen, die in Abhängigkeit voneinander jeweils für eine Unbekannte zu einem Berechnungspunkt auf einem Zeitschrittniveau berechnet werden und eine Kaskade numerischer Werte erzeugen. Die Werte stellen die Näherungs-

---

<sup>106</sup> Wie auf Seite 72/73 gezeigt, ist die beliebige Annäherung, wenn auch theoretisch gefordert, praktisch nicht vollziehbar.

<sup>107</sup> Mittlerweile hat sich auch der Bereich der Computeralgebra etabliert, in welchem Algorithmen zur Umformung von Gleichungen entwickelt werden. Für die formale Bearbeitung partieller Differentialgleichungen sind die Ergebnisse bislang jedoch mager und lediglich für gewöhnliche Differentialgleichungen sind solche allgemeinen Lösungsalgorithmen bekannt (Kovacic-Singer-Ulmer-Algorithmus) „*Ein klassisches Problem der angewandten Mathematik von großer Bedeutung liegt in der Berechnung der allgemeinen Lösung einer Differentialgleichung. Mit dem Aufkommen der Computeralgebra erfuhr diese Aufgabe noch eine Verschärfung: Die Konstruktion der Lösung soll algorithmisch erfolgen. Diese Forderung erweist sich jedoch als zu stark, so daß man sich mit geringeren Zielen zufrieden geben muß.*“ Seiler, W.: Formale Theorie partieller Differentialgleichungen, 1991, S. 318. „*Obwohl zur Zeit also nur ein echter Lösungsalgorithmus für Differentialgleichungen existiert, kennt die Computeralgebra zahlreiche Verfahren zu ihrer Behandlung. Die wenigsten davon sind algorithmisch, viele hängen von Heuristiken ab. Die angestrebten Ziele können sehr unterschiedlich sein. Zahlreiche Ansätze streben eine Vereinfachung des Ausgangsproblems an: nichtlineare Gleichungen sollen in lineare, partielle in gewöhnliche überführt werden; gekoppelte Gleichungen sollen entkoppelt werden, die Ordnung der Gleichungen soll reduziert werden.*“ Seiler 1991, S. 321

lösung der als existent angenommenen exakten Lösung innerhalb eines definierten Raum-Zeit-Gitters dar und ihr Verhalten im Raum sowie in der Zeit erlaubt qualitative Aussagen über die erzielten Ergebnisse. Die Anweisungen für die numerischen Umformungen basieren zum Teil jedoch auf heuristischen Annahmen, d.h. der Umformungsprozeß ist nicht komplett analytisch herleitbar. Er gründet auf Plausibilitäten, die sich aus den Erfahrungen mit analytisch lösbaren Problemen ergeben. Der Übergang von der Berechenbarkeit zur Simulierbarkeit vollzieht sich also mit der Transformation einer deduktiven in eine heuristische Vorgehensweise auf Basis von Plausibilitäten bezüglich der Umformungsschritte und quasi-empirischen Auswertung der Resultate. Zur Beurteilung der Resultate dient die Präsentation des Lösungsverhaltens in Form von Zahlzeichen oder Farbwerten. Das bedeutet, es muß so lange von Fall zu Fall getestet werden, ob der Lösungsalgorithmus gut oder schlecht ist, bis für ausreichend viele Fälle die Lösungen adäquat erscheinen.

Diese quasi-empirische Methode der numerischen Simulation partieller Differentialgleichungen bedarf einer Masse von Datenwerten und wird durch die steigenden Leistungskapazitäten der Computer ermöglicht. Die Geschwindigkeit der Rechenoperationen auf Maschinenebene – aktuell rund 100 Milliarden Operationen pro Sekunde – wird durch die Zerlegung der Zeichen in binärkodierte Zustände möglich und stellt einen quantitativen Vorteil gegenüber dem schriftbasierten Zeichenumgang dar. Dieser quantitative Vorteil wandelt sich jedoch in einen qualitativen, insofern zum einen eine neue Methode zur mathematischen Behandlung komplexer Gleichungssysteme möglich wird, die sich einem deduktiven Zeichenumgang in einem formal-operativen Zeichensystem entziehen, und indem zum anderen die Visualisierung die Möglichkeit eröffnet, erstmals ikonisch basierte Einsichten in semiotisch modellierte Prozesse zu erhalten.<sup>108</sup> Damit wird nicht nur die Beschreibung oder Berechnung von Prozessen möglich, sondern deren semiotische Modellierung auf Basis numerischer Werte, die in Form von Maschinenzuständen direkt manipulierbar werden.<sup>109</sup> Der Weg von der Berechenbarkeit zur Simulierbarkeit setzt die Mechanisierung der Zeichenverwendung voraus. Mit der Mechanisierung ist die Zerlegung schriftbasierter Zeichen in digitale Zeichen - diskrete, binärkodierte Zustände - gemeint, die sich unanschaulich im maschinellen Medium des Computers gemäß programmgesteuerter Instruktionen vollziehen und die in ihrer sinnlich wahrnehmbaren Konstitution frei präsentierbar sind, also nicht mehr nur als Schriftzeichen ausgegeben werden. Die Überwindung der symbolischen Nutzung von Zeichen, einerseits durch die tatsächliche Ausführung der Operationen<sup>110</sup> – also nicht nur ihre

---

<sup>108</sup> Dabei muß es sich nicht nur um numerische Simulationen partieller Differentialgleichungen handeln, sondern es können auch quantenmechanische oder statistische Simulationen sein.

<sup>109</sup> Die zeitliche Dimension ergibt sich aus dem Vergleich mit dem mathematisch modellierten, physikalischen Prozeß. In der Mathematik selbst spielt die Zeit keine intuitive Rolle, sie ist lediglich eine Variable.

<sup>110</sup> Zwar gilt das auch für das Berechnen auf dem Papier, doch nur im eingeschränkten Maße, denn der Umfang der Berechnungen als auch deren Komplexität hat sich durch die Mechanisierung der Zeichen und die Algorithmisierung des Berechnens

formal-symbolische Umformung -, andererseits durch die ikonische Darstellungsweise der Resultate, eröffnet der numerischen Simulation eine neue Umgangsweise mit den Zeichen. Die Zeichen selbst sind das Material zur semiotischen Modellierung von Prozessen auf Basis formaler Operationen, und sie sind das Material für die Konstruktion semiotischer (Daten-)Objekte. Dabei muß die Generierung der Datenwerte so umfangreich sein, daß die in den Daten durch die Operationen definierten Strukturen entfaltet werden und daß für die Visualisierung ein syntaktisch dichtes Symbolschema ausgebildet werden kann, damit der ikonische Effekt wie die Dynamik der Datenstrukturen zu Tage tritt. Die numerische Simulation bietet aus dreierlei Gründen neue Einsichten: durch die semiotische Ausführung dynamischer Prozesse, die bislang nur schriftlich fixiert und von daher statisch symbolisiert werden konnten; durch die Erweiterung des Berechnungsraums, so daß komplexere Strukturen mathematisch behandelbar werden; und durch die ikonische Darstellung der Resultate, welche die Dynamik intuitiv zugänglich präsentiert. Der semiotisch interessante Aspekt besteht dabei in der Überwindung eines symbolischen Zeichenumgangs durch die Transformation zeichenbasierter Informationen auf maschinelle Operationen. Für das Simulationsgeschehen selbst handelt es sich um einen nicht-repräsentationalen Zeichenumgang, der freilich als Referenz an unsere Anschauung und unsere Zwecke strukturiert, visualisiert und interpretiert werden muß. Die Entkopplung von extra- und intrasymbolischen Bedeutungen geht dabei über das Maß der Formalisierung hinaus, da mit der Mechanisierung ein anderer Zeichenumgang gefordert ist, der zugleich in einer darstellenden (instruierenden) und einer exekutiven Funktion der regelbasierten Anweisungen besteht. Dies bedeutet, daß der intrasymbolische Gehalt der Zeichen auf der Ebene der Zeichenmanipulation nicht symbolisch angezeigt wird, sondern direkt als Operation ausgeführt werden muß.

Um die Mechanisierung tatsächlich maschinell umzusetzen, bedarf es einer weiteren Zerlegung der Zeichen durch die Einführung einer subsymbolischen Ebene. Das bedeutet, daß alle intrasymbolisch relevanten Aspekte wie die Funktion der Zeichen im Zeichensystem, ihre Unterscheidbarkeit anhand der visuellen Gestalt oder ihre Zuordnung zu einer definierten Klasse von Zeichen müssen transformiert werden. Zum einen in maschinell ausführbare Instruktionen (programmgesteuerte Interpretationen), zum anderen in das Symbolsystem der digitalen Zeichen (diskretes Symbolschema, digitales Schema), die Werte darstellen und insofern operativ erzeugbar sind. Die Reduktion verschiedener Zeichengestalten auf digitale Zeichen normiert die zu verarbeitenden Entitäten auf der subsymbolischen Ebene und macht diese ineinander überführbar. Die digitalen Zeichen selbst sind deshalb im Unterschied zu den graphischen Entitäten der Schrift formbar. Die Fortführung der Schrift ins Dynami-

---

erheblich erweitert. Das gilt auch für die graphische Darstellungsweise, die erst durch den enormen Umfang der Datenwerte zu einer ikonischen wird. Der quantitative Effekt schlägt mit der numerischen Simulation in qualitative Effekte um.

sche, als Konsequenz der semiotischen Revolution der Mechanisierung des Zeichenumgangs, eröffnet die direkte semiotische Modellierung von Prozessen – die zuvor nur durch formal-operative Zeichensysteme symbolisierbar waren - im (virtuellen) Raum und in der Zeit, indem die numerischen Operationen Objekte und Abläufe simulieren bzw. semiotisch erzeugen.

## IV. DISKUSSION – FORTFÜHRUNG DER SCHRIFT INS DYNAMISCHE

### 1. Erweiterter Schriftbegriff

#### 1.2 Prinzip der Verschriftung

Daß Schrift aufgrund ihrer mnemotechnischen Funktion ein Hilfsmittel der Wissenschaften ist, steht außer Frage. Die Auffassung, daß Schrift jedoch aufgrund ihrer systematisierenden Funktion Voraussetzung der Wissenschaften ist, wird kontrovers diskutiert. Dabei stellt sich die Frage, ob Schrift eine notwendige Voraussetzung der Logik wie der induktiven und deduktiven Beweisführung der Wissenschaften ist.<sup>1</sup> Billigt man der Schrift, wie dies in der Linguistik auf Anraten Ferdinand de Saussures geschah,<sup>2</sup> nur den Status eines abgeleiteten Zeichensystems zu, so muß sich jede Analyse metasprachlicher Funktionen wie logischer oder grammatischer Strukturen auf die Sprache selbst richten. Doch, so die These Florian Coulmas, „*Schrift ist Sprachanalyse*“<sup>3</sup>, auch wenn metasprachliche Funktionen nicht von der Schrift abhängig seien, so begünstige sie diese doch entscheidend. Die Schrift läßt sich also nicht so leicht als Supplement – als Abbild der Rede – abtun, denn bereits an ihrer historischen Entwicklung vom Piktogramm zum Alphabet ist der zunehmende Abstraktionsgrad gegenüber der Erfassung von Sprache ablesbar und verweist auf einen, der Schrift inhärenten Umgang mit den sprachlichen Entitäten. Die Schrift, als Wortschrift, Silbenschrift oder Lautschrift konzipiert, ist bereits ein Produkt sprachlicher Analysen.<sup>4</sup> Erst der selbstverständliche Umgang mit einer spezifischen Schriftform wie dem Alphabet läßt diese als Abbild der Sprache erscheinen. Doch dieser Schein trügt. *„Sprache sichtbar machen, heißt, Einheiten der Sprache als solche zu identifizieren und sie somit aus dem instrumentellen Zusammenhang ihres Gebrauchs herauszulösen und der Reflexion zugänglich zu machen. ... In Schrift ist also, um diese ihre Eigenschaft auf einen Begriff zu bringen, nicht nur die*

---

<sup>1</sup> Marshall McLuhan, Jack Goody und David Ohlson vertreten diese Meinung. McLuhan, M.: *The Gutenberg Galaxy*, 1962; Goody, J.: *The consequences of literacy*, 1968; Ohlson, D.: *From utterance to text: the bias of language in speech and writing*, 1977

<sup>2</sup> „*Sprache und Schrift sind zwei verschiedene Systeme von Zeichen; das letztere besteht nur zu dem Zweck, um das erstere darzustellen. ... Aber das geschriebene Wort ist so eng mit dem gesprochenen, dessen Bild es ist, verbunden, daß es mehr und mehr die Hauptrolle für sich in Anspruch nimmt.*“ Saussure, F. de.: *Grundlagen der Allgemeinen Sprachwissenschaft*, 1967, S. 28. Die Schrift dient lediglich als Abbild der Rede und wird im Rahmen sprachwissenschaftlicher Untersuchungen als unwichtig eingestuft. Dies impliziert jedoch die Voraussetzung, daß Lautstruktur und Schriftstruktur isomorph sind. Vgl. Coulmas, F.: *Über die Schrift*, 1981, S. 23ff

<sup>3</sup> Coulmas, 1981, S. 25

<sup>4</sup> Die Idee Sprache mit Wortschriften, Silbenschriften oder Lautschriften zu repräsentieren basiert auf unterschiedlichen Prinzipien, die der jeweiligen Schrift inhärent sind, nicht unbedingt der Sprache. Allerdings begünstigen manche Sprachen spezifische Schrifttypen, wie beispielsweise das Chinesische – eine isolierende Tonsprache, die keine flektierende Sprache ist – die Wortschrift.

*flüchtige Rede, sondern auch Sprachbewußtsein aufgehoben.*<sup>5</sup> Für den Zusammenhang zwischen Alphabetschrift und Wissenschaft ist zum einen die Verdinglichung der Sprache durch Schriftzeichen von Bedeutung, sowie deren Speicherfunktion wie Vervielfältigbarkeit; zum anderen die Verwendung endlich vieler, diskreter Zeichen, die Linearität der Zeichenabfolge und die Möglichkeit beliebige graphische Konfigurationen als Symbole für Begriffe oder Operationen einzuführen. Ein Schriftsystem kann unabhängig von seiner phonographischen Funktion verwendet werden und die Wissenschaften nutzen diese Möglichkeit auf vielfältige Weise, indem sie Schriftzeichen zur Generierung von Kodes, Notationen, Formeln, Listen oder Kalkülen einsetzen.

Welches Schriftverständnis liegt dieser Verwendungsvielfalt zugrunde? Denkt man Schrift nur von der Sprache her, läßt sich das umfangreiche Spektrum der Schriftverwendung nicht erfassen. Der Begriff der Schrift muß also wesentlich weiter gefaßt und unabhängig von einer einzigen Funktion, nämlich der Transkriptionsfunktion der Rede, gedacht werden. Es ist jedoch auch nicht damit getan, Schrift auf die Erzeugung *gewisser* graphischer Konfigurationen zu beschränken und die Sichtbarmachung als ihr Geschäft zu verstehen. Denn die Antwort auf die Frage, was da sichtbar gemacht wird, kann nur lauten: Schriftzeichen. Schriftzeichen, welche in einer zu bestimmenden Weise Bezug nehmen auf etwas. Diese Erklärung wäre jedoch selbstbezüglich und wenig aufschlußreich, denn sie würde in Abhandlungen über die Art der Bezugnahme, aber nicht über das Typische der Schrift enden. Ginge es nur um die Sichtbarmachung der Rede, so könnte man das Zustandekommen von ideographischen Zeichen wie Zahlzeichen – Symbole, die mit Namen belegt sind, um aussprechbar zu sein<sup>6</sup> – nicht erklären, da Ziffern und viele andere Symbole nur indirekt die Rede von ihnen bezeichnen. Zudem bereitet es Schwierigkeiten, den vagen Ausdruck *gewisse* durch vergleichende Eigenschaftsbestimmungen zu definieren.

Was unterscheidet Schrift von anderen Symbolsystemen wie beispielsweise Bildern? Hier erweist sich Nelson Goodmans Symboltheorie als hilfreich, da verschiedene Symbolsysteme anhand ihrer syntaktischen Eigenschaften bezüglich ihres Symbolschemas unterschieden werden: im Falle von Schrift und Bild die syntaktische Disjunktheit und Differenziertheit der Schrift und die syntaktische Dichte der Bilder.<sup>7</sup> Diese Kennzeichnung ist bereits so universell, daß sie sich mühelos auf diskrete Zustände verallgemeinern läßt, wobei in Goodmans Symboltheorie die Visualität der Schrift oder der Bilder als

---

<sup>5</sup> Coulmas, 1981, S. 30

<sup>6</sup> Das Zahlzeichen 2 ist nur über seine Namen aussprechbar: *zwei, due, two* etc.

<sup>7</sup> Schrift und Bild unterscheiden sich laut Nelson Goodman vor allem bezüglich ihres Symbolschemas, weniger durch ihre Semantik. Bilder sind syntaktisch dichte Zeichensysteme, Schriften syntaktisch disjunkte und differenzierte. Vgl. Goodman, N.: *Sprachen der Kunst*, 1995, S. 125ff



gegeben vorausgesetzt wird. Die Situation ist also kompliziert, und die Frage – Was ist Schrift? – ist neu zu stellen. Neu deshalb, da einerseits der erweiterte Anwendungsbereich der Schrift in den Wissenschaften über unser Sprach- und Alltagsverständnis von Schrift hinausführt, andererseits, da das augenfälligste Kennzeichen, die Visualität im Sinne von Sichtbarmachen immer ein Sichtbarmachen von etwas ist und von daher für bestimmte Schriftverwendungen problematisch ist. Die Frage also müßte lauten: Was ist das Prinzip der Verschriftung?

In einem allgemeinen Verständnis ist Schrift das Setzen von Marken, die typischerweise visuell realisiert sind. Und noch allgemeiner kann das Prinzip der Schrift als das Setzen von Marken bezeichnet werden, die diskret und voneinander wohlunterscheidbar sind. Solche Marken können abgeschlossene graphische Konfigurationen sein oder elektrisch realisierte, voneinander unterschiedene Maschinenzustände. Die Eigenschaft *diskret* bezieht sich dann entweder auf die graphische Abgeschlossenheit der Zeichen oder auf die eindeutige Unterscheidbarkeit elektrischer Zustände. Die Wohlunterscheidbarkeit ist in Bezug auf graphische Konfigurationen eine Erkenntnisleistung des Betrachters, in Bezug auf elektrische Zustände eine an die Maschine delegierte Identifikationsleistung, die sich aus der Ausführbarkeit der Zustände ergibt.<sup>8</sup> Schrift in diesem Sinne verstanden ist so weit gefaßt, daß der Einwand erhoben werden könnte: alles was nicht als kontinuierlicher Zusammenhang erfaßbar wäre, sei Schrift, denn das Typische wäre die Darstellungsweise mit diskreten Entitäten, wie auch immer diese Entitäten beschaffen wären. Dieser Einwand ist insofern zutreffend, als er den immens erweiterten Anwendungsbereich der Schrift widerspiegelt. Denn auch wenn ein System diskreter Entitäten kein Schriftsystem sein muß, kann es dennoch mit einem belegt werden, ohne dabei lesbare Sinnzusammenhänge zu artikulieren. Das Prinzip der Schrift - die Darstellungsweise diskreter Entitäten - entwickelt sich in diesem allgemeineren Verständnis zum Kode, dessen diskrete Symbole Bezug nehmen auf andere Zeichen, Objekte oder Zustände. Als Beispiele ließen sich der genetische Kode und der Morse-Kode anführen: Während die Zeichen des genetischen Kodes Bezug nehmen auf isolierte chemische Substanzen, referieren die Zeichen des Morse-Kodes - Kombinationen aus Strichen und Punkten - auf die Buchstaben des Alphabets. Entscheidend ist jedoch, daß diskrete Entitäten auf diskrete Entitäten abgebildet werden und daß das Prinzip der Verschriftung verwendet wird, um einen Bereich entsprechend zu strukturieren und zu kennzeichnen. Da die Ordnung eines Kodes über eine konventionell festgesetzte Zuordnung Zeichen für Zeichen geschieht, kann ein Kode auch als ein Notationssystem im Sinne Goodmans verstanden werden.<sup>9</sup> Schrift läßt sich also in einem notierenden

---

<sup>8</sup> Ist die Wohlunterscheidbarkeit nicht gewährleistet, kann die Maschine also eine Zustand nicht eindeutig identifizieren, so kommt sie umgehend zum Stillstand.

<sup>9</sup> „Kurz, die von einem Notationssystem geforderten Eigenschaften sind Eindeutigkeit, syntaktische und semantische Disjunktivität und Differenzierung.“ Goodman, 1995, S. 150

Sinne verwenden. Die einzelnen Zeichen werden dabei zu ideographischen Symbolen, deren phonographische Realisierung indirekt über die Benennung der Symbole mit Namen erfolgen kann. Doch das Prinzip der Schrift erlaubt darüber hinaus die Erfassung eines weiteren Phänomens, das sich aus der Emanzipation der Schrift von der Sprache ergibt, nämlich der formalen Verwendung von Schriftzeichen. Buchstaben, also phonographische Zeichen, oder jede beliebigen diskreten, wohlunterscheidbaren Konfigurationen - Zeichen oder Zustände - können in einem formalen System verwendet werden. Das Charakteristische dabei ist, daß das formale System nicht bezeichnet oder notiert. Es kann zwar auf einen Objektbereich interpretativ angewandt werden, doch es besteht auch ohne diese Anwendung als ein eigenständiges Zeichensystem. In einem formalen System verschiebt sich die Verwendungsweise von einer symbolisierenden auf eine operierende, insofern einige Zeichen, nämlich Operationszeichen, an intrasymbolischer Bedeutung gewinnen. Die Rede von der Formalisierung bezieht sich auf die formale Verwendungsweise der Variablenzeichen, die beliebig interpretiert werden können oder eben nicht.<sup>10</sup> Operationszeichen hingegen besitzen im Rahmen eines Zeichensystems eine definierte Bedeutung. Sie sind ideographische Zeichen, die weder Wörter, noch Objekte bezeichnen, sondern eindeutig regelbasierte Operationen symbolisieren.<sup>11</sup>

Formale Zeichensysteme wie in der Algebra oder der formalen Logik verwendet, lassen sich daher als *Operationsschriften* verstehen. Sie sind keine Begriffsschriften, die von der Bedeutung, Klassifikation oder Struktur von Begriffen handeln, sondern sie artikulieren den operativen Umgang mit Zeichen. Als Operationsschriften lassen sie sich algorithmisieren, insofern sich die Operationen in schrittweise auszuführende Instruktionen übersetzen lassen. Zusammenfassend bedeutet die Emanzipation der Schrift von der Sprache die Eröffnung neuer Verwendungsweisen wie die notierende oder die formal-operative. Indem zum einen von der phonographischen Funktion der Schrift und damit von ihrer direkten Lesbarkeit und zum anderen von ihrer ausschließlich visuellen Realisierung abstrahiert wird, erhält man einen Schriftbegriff, der wesentlich weiter gefaßt ist und auf das Prinzip der Schrift als ein endliches System diskreter Entitäten referiert, wie es für Alphabetschriften typisch ist. Dieses System kann phonographische, notierende und formal-operative Funktionen erfüllen. Die Semantik ergibt sich auf unterschiedliche Weise: Für die phonographische Verwendung aus der konventionell festgelegten Sinnhaftigkeit bestimmter Zeichenfolgen, für die notierende Verwendung aus der expliziten Zuordnung der einzelnen Zeichen zu anderen Zeichen, Objekten oder Zuständen und für die formal-operierende

---

<sup>10</sup> Dies ist nicht ganz zutreffend wie bereits hingewiesen wurde, da Klassen von Variablen eines bestimmten Schrifttyps für spezifische abstrakte Klassen wie Namen, Argumente, Aussagen, Klassen von Objekten oder für bestimmte Parameter stehen.

<sup>11</sup> Operationszeichen besitzen keine extrasymbolische Bedeutung, aber eine eindeutig festgelegte intrasymbolische Bedeutung in Form von Regeln für den syntaktische Umgang mit Variablenzeichen.

durch die intrasymbolische Bedeutung mancher Zeichen als Operationszeichen. Lediglich Variablenzeichen besitzen keinerlei bedeutungskonstituierende Semantik.

## 1.2 Erweiterung des Zeichenbegriffs

Auf der Basis dieser Einteilung stellt sich die Frage nach dem Zeichenbegriff. In semiotischen, sprachphilosophischen und linguistischen Untersuchungen wird in der Regel von einem sinnhaften Zeichenbegriff ausgegangen, der sich aus der Sprache und dem Gebrauch der Wörter ableitet. Die Trennung von sinnhaften Schriftzeichen und Signifikanten erweitert jedoch die Transkriptionsfunktion der Schrift in Bezug auf die gesprochene Sprache und deren heterogene Signifikate. Texturen sind nicht mehr nur solche Zeichenkombinationen, die lautmalerisch artikuliert werden können. Texturen sind prinzipiell alle Artefakte, die als diskrete Zeichen oder Zustände gesetzt werden und die sich aufgrund ihrer syntaktischen Gestalt von anderen Symbolsystemen unterscheiden. Dabei verändert sich der Umfang des Zeichenbegriffs, der sich nicht mehr ausschließlich über die Sinnhaftigkeit des Wortes der Sprache und dessen direkte Lesbarkeit definieren lässt. Die Einheit des gesprochenen Wortes löst sich in ihre phonetischen bzw. phonographischen Teile auf, die zu *Atomen* der Schrift avancieren.<sup>12</sup> Die erweiterte Verwendungsweise löst unsere Aufmerksamkeit von den sinnhaften Einheiten als prototypische Zeichen und lenkt sie auf diese *letzten Einheiten*. In dem Maße wie die Sinnhaftigkeit (extrasymbolische Bezüge) schwindet, gewinnt der Objektcharakter der *neuen Zeichen* an Bedeutung, denn die Zeichen werden in einem von der Schrift geprägten Verständnis zum Material verschiedener Zeichenverwendungen, seien diese phonographischer, notierender oder formal-operativer Art. Zeichen können dementsprechend als Buchstaben, Kode-, Operations- oder Variablenzeichen verwendet werden. Lediglich in ihrer Verwendung als Buchstaben ist einerseits die Gestalt der Zeichen vorgegeben, andererseits sind sie direkt lesbar, da sie sprachlichen Lauten entsprechen.<sup>13</sup> Alle anderen Zeichen können beliebige graphische Konfigurationen sein, die mit Namen belegt werden können. Je nach Verwendung der Buchstaben und Schriftzeichen entstehen Notationssysteme, Operationsschriften und andere Zeichensysteme, wie sie vor allem in den Wissenschaften zum Einsatz kommen. Die Fokussierung auf jene letzten Einheiten der Schrift und deren syntaktische Manipulierbarkeit zeigt sich auch in der Idee der Mechanisierbarkeit der Zeichenverwendung.<sup>14</sup> Voraussetzung ist die operative

---

<sup>12</sup> „Die Isolierung von Phonemen als kleinste Einheiten der Sprache setzt also in der Tat eine gewaltige Abstraktionsleistung voraus.“ Coulmas, 1981, S. 33. Grundlage dieser Abstraktionsleistung ist die Entwicklung der alphabetischen Schrift mit ihrer Sichtbarmachung der Phoneme.

<sup>13</sup> In diesem Sinne ergibt das Alphabet ein Notationssystem sprachlicher Laute innerhalb einer spezifischen Sprache.

<sup>14</sup> Die Idee der Mechanisierbarkeit kann unterschiedlich umgesetzt sein. Zum einen in Form der Mechanisierung der Zeichenerzeugung durch den Buchdruck. „Das Revolutionäre an Gutenbergs Innovation im zweiten Drittel des 15. Jh.s ist die Erfindung

Verwendungsweise der Zeichen, die sich algorithmisieren und an eine Maschine delegieren läßt. Dazu werden die Operationen in maschinell ausführbare Instruktionen übersetzt. Die Instruktionen definieren eindeutige Übergänge von einem Maschinenzustand in den nächsten, wobei der Anfangszustand konkret definiert sein muß.<sup>15</sup>

Der Umgang mit den Zeichen, wie die Zeichen selbst, verändert sich dabei radikal. Das, was als *symbolische Maschine* mit Hilfe von Operationsschriften auf dem Papier konzipiert wurde, bedarf nun der Übersetzung in das maschinelle Medium des Computers: Operationszeichen werden zu Instruktionen, Variablenzeichen zu binärkodierten Zuständen. Dabei stellt sich die Frage, ob von Schrift überhaupt noch die Rede sein kann? Die Argumentation bezüglich dieser Frage hängt entscheidend davon ab, ob man Schrift als Medium versteht und was mit dem Begriff *Medium* gemeint ist? Oder anders gefragt: Wo genau vollzieht sich der mediale Wechsel bei der Mechanisierung der Schriftzeichen, wenn nicht mehr von Schrift die Rede sein soll? Das Problem resultiert aus der vagen Rede, daß Schrift ein Medium sei. Wenn, wie bislang, von der Realisierung eines Zeichensystems als medienspezifische Implementierung gesprochen wurde, die skriptographisch, typographisch oder elektronisch realisiert und präsentiert sein kann, dann wird unterstellt, daß Handschrift, Druckschrift und binärkodierte Zustände je eigene Medien seien. Doch hier gilt es zu differenzieren. Üblicherweise verläuft die Unterscheidung zwischen verschiedenen medialen Formen aufgrund der sinnlich wahrnehmbaren Konstitution - visuell, akustisch, taktil, olfaktorisch -, der materiellen Erzeugung - physikalisch, chemisch, elektrisch - oder der datenbezogenen Realisierung - digital, analog. Schrift wäre dementsprechend auf einem physikalischen Trägermedium (Tinte auf Papier) visuell realisiert. Ist die Schrift selbst aber Medium? Tatsache ist, daß Schrift ohne ein entsprechendes Trägermedium nicht existiert und über Schrift als Medium an sich deshalb kaum gesprochen werden kann. Mit dem Trägermedium *Tinte auf Papier* lassen sich jedoch auch andere Erzeugnisse verfertigen, wie etwa Bilder, und es ist intuitiv einsichtig, daß sich Bilder von Schriften unterscheiden. D.h., obwohl es ohne ein adäquates Trägermedium keine Schrift und kein Bild geben kann, liegt der entscheidende Unterschied zwischen beiden visuellen Formen nicht im Trägermedium begründet. Doch so ganz trifft das nicht zu, denn während für Schrift und Bild das selbe Papier verwendet werden könnte, ist die Art der graphischen Verwendung der Tinte eine unterschiedliche.

---

*des Drucks mit beweglichen Lettern bzw. des Handgießgeräts zur Produktion von einzelnen gegossenen, nicht geschnitzten Typen.*“ Hiebel, H.: Kleine Medienchronik, 1997, S. 15. Zum anderen bezüglich der mechanisierten Verarbeitung der Zeichen. „*The machine is supplied with a „tape“ (the analogue of paper) running through it, and divided into sections (called „squares“) each capable of bearing a „symbol“.*“ Turing, A.: On Computable Numbers, with an Application to the Entscheidungsproblem, 1964, S. 116. Beiden Auffassungen ist jedoch die Zerlegung der Schrift in ihre elementaren Bestandteile sowie deren Verwendung als einzelne, abgeschlossene und isolierte Zeichen eigen.

<sup>15</sup> D.h. Variablen müssen interpretiert werden (Typ, Wert und Adresse der Variable) und sind von daher auf Maschinenebene nicht mehr formal verwendet.

Der Erzeugungsprozeß ist entscheidend und besteht in der Verfertigung - wie Goodman sagen würde - syntaktisch differenzierter und disjunkter bzw. syntaktisch dichter Symbolschemata. Der Prozeß würde dann entsprechend als Schreiben oder Zeichnen betitelt werden und bestünde darin, auf Basis des Mediums eine gewisse Ordnung oder ein Gefüge zu realisieren, das wir als Schrift oder Bild identifizieren. Eine Ordnung, nach der etwas aufgebaut ist, oder ein Gefüge als einheitlich geordnetes Ganzes, sind jedoch charakteristische Kennzeichen eines *Systems*. Schrift als Aufschreibesystem und Bilder als Darstellungssystem oder beide als Symbolsysteme titulierte, erfassen den Zusammenhang besser, als der Begriff Medium. Dies würde bedeuten, daß die Funktion eines Trägermediums darin besteht, Basis der Implementierung eines Symbolsystems zu sein, daß also das Trägermedium Tinte auf Papier zur Implementierung schriftbasierter oder ikonischer Symbolsysteme genutzt wird und daß die Schrift oder das Bild an sich keine Medien darstellen, auch wenn wir im alltäglichen Sprachgebrauch beides gerne als Medium betiteln.<sup>16</sup> Der Begriff Medium impliziert Passivität im Sinne von Vorhandensein, während der Begriff System ein strukturiertes Vorgehen, also eine Tätigkeit anzeigt. Doch darf dies nicht so gedeutet werden, daß Trägermedien keinen Einfluß auf Symbolsysteme haben. Die Konstitution des Trägermediums ist Bedingung der Möglichkeit spezifischer Symbolsysteme.<sup>17</sup> Deutlich wird dies beispielsweise anhand der statischen versus einer dynamischen Realisierung von Symbolsystemen aufgrund unterschiedlicher Trägermedien wie Fotografie und Film oder Papier und Strom. Insofern ist das Medium auch für einen Teil der Botschaft verantwortlich, nämlich für jenen, der in der sinnlich wahrnehmbaren Konstitution und der materiellen Erzeugung begründet liegt und die Semantik unterstützt.<sup>18</sup> Das bedeutet, daß mit einem visuellen Trägermedium wie Papier keine akustischen Symbolsysteme realisiert werden können und umgekehrt. Diese Trennung sinnlich wahrnehmbarer Konstitutionen wird durch die audiovisuellen Medien teilweise aufgehoben. Schließlich integriert das maschinelle Medium des Computers nahezu alle sinnlich wahrnehmbaren Konstitutionen der *Botschaften*.<sup>19</sup>

<sup>16</sup> Als Indiz für diese Darstellungsweise kann folgende Überlegung dienen: Ein unbeschriftetes oder ungebildertes Papier wird eher als Objekt, denn als Trägermedium wahrgenommen. Ein beschriftetes oder gebildertes Papier wird eher als Trägermedium oder in objektorientierter Redeweise als Seite oder Bild gewertet, also aus Perspektive des Symbolsystems.

<sup>17</sup> Dies kann zum einen so verstanden werden, daß bestimmte Symbolsysteme nur auf Basis bestimmter Trägermedien möglich sind (Schrift bedarf einer statischen, beschreibbaren Oberfläche) oder in einem sinnstiftenden Sinne, insofern gilt: „*Das Medium ist nicht einfach die Botschaft; vielmehr bewahrt die Botschaft die Spur des Mediums.*“ Krämer, S.: Das Medium als Spur und Apparat, 1998, S. 81. Sybille Krämer gibt dazu das Beispiel der Stimme als Trägermedium der Sprache, die nicht nur als Werkzeug der Rede dient, sondern anhand ihrer Modalität das Gesprochene untermalt und „... wie eine unbeabsichtigte Spur sich zum absichtsvollen Zeichen verhält.“ Krämer, 1998, S. 79. Dementsprechend ergibt sich der Unterschied zwischen Trägermedium und Symbolsystem als Unterschied zwischen unbeabsichtigter Spur und konventionalisiertem Zeichen.

<sup>18</sup> Beispielsweise erlaubt ein elektrisches Medium die Realisierung einer dynamischen Botschaft. Insofern läßt sich auch Marshall McLuhans vielzitiertes Buchtitel verstehen „*The Medium is the Massage*“, der irrtümlicherweise, nicht zuletzt aufgrund McLuhans gleichnamigen Artikels, als „*The Medium is the Message*“ zitiert wird. Medien *kneten* die Botschaft, sie sind jedoch nicht die Botschaft. McLuhan, M.: *The Medium is the Message. An Inventory of Effects*, 1967

<sup>19</sup> Bis auf olfaktorische Eigenschaften lassen sich alle Sinneseindrücke mittlerweile mit Computern darstellen. War früher das Medium insofern mit der Botschaft identisch, als beide der selben sinnlich wahrnehmbaren Kategorie angehören mußten, so

Dies ist möglich, da die Eingabe, Verarbeitung und Speicherung der Botschaft von ihrer Präsentation und damit sinnlich wahrnehmbaren Konstitution getrennt und die unterschiedlichen datenbezogenen Realisierungen zu einer Form universalisiert wurden. Hans Hiebel spricht in diesem Zusammenhang von einer *sekundären Digitalität*,<sup>20</sup> die für ihn nichts mit der Unterscheidung zwischen digitalen Signifikanten der Sprache und analogen Daten zu tun hat. Sekundäre Digitalisierbarkeit wäre demnach die Übersetzung sprachlicher, akustischer oder optischer Elemente in eine vollkommen anders geartete *Stromstoß-Sprache*. Doch sind einerseits sprachliche Elemente nicht digital, sondern allenfalls diskret und insofern digitalisierbar,<sup>21</sup> andererseits ist die Diskretheit, nicht die Digitalität, das entscheidende Kriterium schriftlicher Zeichen und elektrischer Zustände. Es läßt sich auch nicht von einer Stromstoß-Sprache sprechen, sondern eher von einer Stromstoß-Schrift.

Während sich die Diskretheit schriftlicher Zeichen aus deren abgeschlossener und voneinander abgegrenzter Gestalt ergibt und insofern nur für das Zeichen als Einheit gilt, resultiert die Diskretheit elektrischer Zustände aus der Modulation des Stromflusses.<sup>22</sup> Diskretheit wird dabei im Sinne von Diskontinuität verstanden als unterbrochene Folge oder voneinander getrennte Elemente, während Digitalität *mit Ziffern darstellbar* meint.<sup>23</sup> Bezüglich der diskreten Zustände des Computers betrifft dies die Interpretation des Aus/An des Stromflusses mit 0/1 und dementsprechend die Übersetzung der binärkodierten Folgen in Zahlenwerte (Byte-Zahlen). Diese Folgen sollen *digitale Zeichen* genannt werden. Die Basis der digitalen Interpretation ist jedoch die Diskretheit der Zustände. Die Einführung einer subsymbolischen Ebene unterhalb der Zeichenträgerebene aufgrund der Mechanisierung der Zeichen separiert die Zeichenfunktion vom Zeichenträger und delegiert diese als Interpretationsleistung an ein Programm. Denn es hängt vom Programm ab, ob eine Bytezahl als Farbwert, Charakter oder Klang interpretiert wird. Die Platzierung des diskreten Symbolschemas und des digitalen Schemas unterhalb

---

wird diese Trennung nun im Computer aufgehoben. Allerdings verändert sich die datenbezogene Realisierung, die nunmehr ausschließlich digital ist.

<sup>20</sup> Hans Hiebel unterscheidet zwischen „... *primär-digitalen* (d.h. sprachgebundene bzw. in willkürlichen, diskret-abgesetzten Zeichen gebundene Daten) und *analogen Daten* (d.h. proportional übertragene Datenmengen akustischer und/oder visueller Natur) ... Die computerbedingte Digitalisierbarkeit (sekundäre Digitalität) jeglicher Form von schriftgebundener oder auch analog-akustischer oder analog-optischer Information hat mit der Basisdifferenz von digitalen Signifikanten - d.h. willkürlichen und diskreten Zeichen (geschriebener und gesprochener Sprachen) - und analogen - d.h. auf proportionalen Wiedergabeverhältnissen beruhend - Daten nichts zu tun. Die moderne Digitalisierbarkeit bedeutet die Möglichkeit, jegliches akustische, optische oder sprachliche Element in eine 0/1-„Sprache“ bzw. eine Stromstoß-„Sprache“ zu übersetzen und maschinenverarbeitbar zu machen.“ Hiebel, 1997, S.8

<sup>21</sup> Allerdings sind nur schriftbasierte sprachliche Elemente diskret, gesprochene Sprache ist an sich nicht diskret, sondern stellt einen kontinuierlichen Fluß von Lauten dar.

<sup>22</sup> Stromfluß unterhalb einer bestimmten Spannungsgröße (0,7 Volt) wird als *Aus* interpretiert, Stromfluß überhalb dieser Grenzen als *An*. Aus dieser Unterscheidung generiert sich die Diskretisierung des Stroms als diskontinuierliche Stromstöße.

<sup>23</sup> Nelson Goodman verwendet Digitalität im Sinne von Diskretheit: „*Ein Symbolschema ist analog, wenn es syntaktisch dicht ist; ein System ist analog, wenn es syntaktisch und semantisch dicht ist. ... Ein digitales Schema dagegen ist durchgängig diskontinuierlich.*“ Goodman, 1995, S. 154. D.h. die Schrift ist bezogen auf ihre isolierten Zeichen diskret, die Zeichen selbst sind jedoch syntaktisch dicht und von daher analog.

der Zeichenträgerebene kehrt die von Goodman eingeführte Einteilung für digitale Zeichen um. In seiner Konzeption ist das Symbolschema auf die Zeichenträgerebene bezogen und das Schema auf die Semantik der Zeichen. Dies ist für alle Zeichen außerhalb des Computers auch zutreffend. Der Vorteil der Umkehrung besteht jedoch in der Berücksichtigung der Erzeugungsebene der Zeichengestalt und damit in der Erfassung der semiotischen Besonderheit computerrealisierter Zeichen. Denn mit dem fluiden Trägermedium Strom ist die Generierung eines Symbolsystems möglich, dessen Symbolschema sich aus unanschaulichen, diskreten Zuständen zusammensetzt und dessen Schema in der digitalen Interpretation der diskreten Zustände besteht. Letzteres stellt die Basis für eine

An/Aus Zustand	diskretes Symbol- schema
↓	↓
0/1 Byte-Zahl	digitales Schema
↓	↓
Charakter Klang Farbwert	Gestalt (Zeichen- träger)

Abb. 22: Zeichen-Zustand-Relation

programmgesteuerte Interpretation der Zustände als anschauliche Zeichen dar. Dabei handelt es sich nicht um eine semantische Interpretation konventioneller Bedeutungen, wie sie für Sprachzeichen typisch ist, sondern um eine binärkodierte/numerische Interpretation. Doch sowohl die Diskretheit als auch die numerische Interpretation sind schriftbasierte Verwendungsweisen. Eine 0/1-Folge läßt sich im Computer realisieren und auch auf Papier anschreiben und verwenden.

Daraus läßt sich folgern, daß das Symbolschema der Schrift und das Symbolschema der digitalisierten Zustände prinzipiell ähnlich ist, daß aber die Trägermedien verschiedene sind und von daher die Realisierung und Präsentation der Symbolsysteme unterschiedlich ausfällt. Allgemein gesprochen bedeutet dies, daß das Medium Computer nicht nur Basis zur Implementierung eines Symbolsystems ist, sondern als Maschine den Implementierungs-, Erzeugungs- und Präsentationsvorgang von Zeichen in weiten Teilen programmgesteuert übernimmt. Dabei handelt es sich um ein Symbolsystem, dessen Symbolschema diskret und dessen Schema digital ist: Das Symbolschema, also die Konstitution der Zustände, ist syntaktisch disjunkt und differenziert und somit diskret. Allerdings ist das Symbolschema und das Schema auf Maschinenebene realisiert und von daher unanschaulich. Die Übersetzung der digitalen Zeichen benötigt als Referenz an unsere Anschauung die programmgesteuerte Interpretation und Präsentation der Zustände als anschauliche Zeichen, Farbwerte oder Klänge, welche die Träger semantischer Informationen sind. Es kann also von Schrift nur insofern noch die Rede sein, als dies das Prinzip der Verschriftung betrifft. Der mediale Wechsel im Falle der Mechanisierung der Schriftzeichen vollzieht sich in der Verwendung unterschiedlicher Trägermedien und zeigt sich in deren unterschiedlichem Einfluß auf die Realisierung und Präsentation der Zeichen. Der Begriff Schrift in diesem sehr weiten Sinne ist rein syntaktisch gefaßt und umfaßt die Darstellung von Inhalten in

einem spezifischen Symbolschema, das visuell auf Papier oder elektrisch im Medium Strom realisiert sein kann.<sup>24</sup> Die sekundäre Digitalität wäre demnach die Verschriftung akustischer, optischer und taktiler Inhalte, allerdings nicht in sprachlich-beschreibender, sondern in numerisch-notierender Weise, die im Rahmen eines Programms entsprechend interpretiert wird.<sup>25</sup> Diese Verwendungsweise der Schrift ist neu und erst mit der Mechanisierung der Zeichen gegeben. Sie entspricht dem, was wir gemeinhin unter Digitalisierung verstehen: Akustische, optische und taktile Inhalte werden in ein diskretes Symbolschema überführt und als Daten numerisch interpretiert neu strukturiert.<sup>26</sup> Das bedeutet, alles was sich auf diese Weise in einem diskreten Schema darstellen läßt, läßt sich semiotisch inkorporieren.

Dadurch erweitert sich das Spektrum dessen, was mit Schrift erfaßbar ist, erheblich. Es lassen sich nicht nur diverse Inhalte inkorporieren. Die Mechanisierung der Zeichen mit Hilfe des maschinellen Mediums Computer erlaubt darüber hinaus die Simulation akustischer, optischer und taktiler Inhalte. Zudem integriert die Mechanisierung der Zeichen eine neue Dimension, nämlich die der Bewegung. Der Computer stellt dabei das notwendige Trägermedium dar, indem er das fluide Medium Strom strukturiert. Bereits diese Strukturierung delegiert Teile des Symbolsystems, nämlich dessen Symbolschema, an das Medium und integriert damit in dieses ein gewisses Aktionspotential.<sup>27</sup> Das Verhältnis Trägermedium - Symbolsystem ist aufgrund der Mechanisierung bestimmter Vorgänge ein wesentlich komplizierteres als das Verhältnis Tinte auf Papier - Schrift, und die Frage stellt sich, wie es beschaffen ist. Das offensichtlichste Indiz für die Komplexität des maschinellen Mediums Computer ist die Vielschichtigkeit der Prozesse, die ablaufen, um eine Botschaft darzustellen. Ein Satz beispielsweise wird auf dem Papier während des Schreibprozesses zugleich erzeugt, gespeichert und präsentiert. Dazu müssen ein Blatt Papier und ein funktionierender Stift zur Verfügung stehen. Zudem muß der Schreibende der Schrift mächtig sein und die Zeichen so strukturieren, daß sie im Rahmen einer gegebenen Sprache lesbar sind.<sup>28</sup> Um den selben Satz im Computer erzeugen, speichern und präsentieren zu können, bedarf es wesentlich umfangreicherer Voraussetzungen.<sup>29</sup> Zum einen muß ein Computer mit einem entsprechenden Schreibprogramm zur Verfügung stehen, zum anderen muß der

<sup>24</sup> Angesichts der erweiterten Funktionalität der Schrift über die phonographische Funktion hinaus, bilden die syntaktischen Eigenschaften die einzige Basis, um diese Vielfalt überhaupt noch fassen zu können, weshalb Goodmans Unterteilung in Symbolschema und Schema zur Charakterisierung sich anbietet. Gleichwohl ist die syntaktische Differenziertheit auf dem Papier und im Computer unterschiedlich realisiert. Die Emanzipation der Schrift hat eine Diversifikation möglicher Kategorien von Bezugnahmen bis hin zur Null-Denotation zur Folge, so daß die Bezugnahme als Kennzeichnung nicht dienlich ist.

<sup>25</sup> So werden s/w-Bilder als Matrizen numerischer Werte dargestellt, welche den Intensitätsgrad eines Bildpunktes notieren.

<sup>26</sup> Die Daten beinhalten nicht nur numerisch-notierte Intensitätsgrade, sondern auch Informationen bezüglich der räumlichen Verteilung, der Farbuweisungen und mehr.

<sup>27</sup> Während auf Papier unterschiedliche Symbolschemata erzeugbar sind, läßt der Computer nur ein Symbolschema zu. Dies liegt in der Verschmelzung von Trägermedium und Symbolschema begründet.

<sup>28</sup> So lange der Satz auf dem Papier lesbar ist, fällt seine Präsentation mit seiner Speicherung zusammen. Erst wenn der Satz unleserlich würde, löscht sich damit sowohl seine Speicherung als auch Präsentation.

<sup>29</sup> Auch die Kompetenz des Schreibenden erfordert höhere Anforderungen, denn über den Umgang mit Schrift und Sprache hinaus, muß dieser mit der Arbeitsweise eines Computers und den entsprechenden Programmen vertraut sein.



puter mit einem entsprechenden Schreibprogramm zur Verfügung stehen, zum anderen muß der Rechner eingeschaltet und betriebsbereit sein. Mit Hilfe der Tastatur läßt sich dann der Satz auf Basis eines normierten und begrenzten Zeichenrepertoires (Tastaturbelegung/ASCII-Zeichen) schreiben. Der Schreibvorgang erzeugt einerseits eine Darstellung des Satzes auf Maschinenebene (0/1-Folgen), andererseits eine visuelle Präsentation auf dem Bildschirm. Speichern und Präsentieren werden im Rahmen des verwendeten Programms zu Funktionalitäten im Umgang mit den Zeichen. Da die Speicherung des Satzes auf unanschaulichen, binärkodierte Zustände im Speicher des Computers basiert, bedarf es für jede visuelle Präsentation des Satzes auf dem Bildschirm der Aktualisierung der entsprechenden Zustände. D.h. im Medium Computer fallen Erzeugung, Speicherung und Präsentation auseinander, und alle drei Zeichenfunktionen sind programmgesteuert. Damit eröffnen sich einige neue Umgangsweisen mit den Zeichen, denn zum einen ist die computerbasierte Speicherung nicht fixiert und von daher veränderbar, zum anderen benötigt die Aktualisierung und visuelle Präsentation des Satzes dasjenige Programm, mit dem der Satz erzeugt wurde. Darüber hinaus ist die Darstellungsrelation zwischen unanschaulichen Zeichen und anschaulicher Präsentation frei bestimmbar, d.h. ein Buchstabe kann als Farbwert oder Ton präsentiert werden. Oder anders gewendet: 0/1-Folgen sind manipulierbar, in ihrer sinnlich wahrnehmbaren Konstitution beliebig präsentierbar, aber nicht selbstexplikativ, und bedürfen einer programmgesteuerten Interpretation.<sup>30</sup>

Der Schreibvorgang im Medium Computer wird zerlegt, und Schreiben reduziert sich auf die Inputeingabe normierter Zeichen. Die Zerlegung des Handlungsvorgangs ist nötig, um diesen an eine Maschine delegieren zu können. Im Zuge der Zerlegung des Schreibvorgangs wird die Botschaft, in diesem Falle der Satz, mit zusätzlichen Informationen angereichert, wie etwa bezüglich des verwendeten Zeichentyps oder des Ortes der Speicherung. Die Mechanisierung der Zeichen wie des Zeichenumgangs dynamisiert beide, denn das Medium selbst ist ein dynamisches. Während geschriebene Schrift auf dem Trägermedium Papier materiell fixiert ist und sowohl das Medium wie die Zeichen statische, in der Zeit relativ dauerhaft bestehende Entitäten sind, bedürfen die anschaulich präsentierten Maschinenzustände des Computers der kontinuierlichen Aktualisierung des Spannungsniveaus durch den Stromfluß. Dies ist nur durch die Integration der Zeitlichkeit möglich, sowohl bezüglich des Mediums als auch der Zeichen. Computerrealisierte Zeichen können also keine verdinglichten, dauerhaften Entitäten sein, sondern nur dynamische Zustände in der Zeit. Worin unterscheiden sich Zeichen von Zuständen? Ein Zustand besteht in der dynamischen Strukturierung eines abgegrenzten Systems, im

---

<sup>30</sup> Dies ist ein großes Problem im Zuge der Rekonstruktion alter Datensätze. Obwohl viel von der Universalität der binärkodierte Zustände die Rede ist, sind diese Zustände ohne das dazugehörige Programm und meist auch Hardware nicht entschlüsselbar. D.h. von Universalität kann nur bedingt die Rede sein, da die 0/1-Folgen bezüglich ihrer Zeichenfunktion nicht selbstexplikativ sind.

Falle des Computers in der Strukturierung des Spannungsniveaus im Rahmen der vorgegebenen Hardwareumgebung. Zur Aktualisierung und temporären Aufrechterhaltung der Struktur wird Energie von Außen benötigt. Die in der Struktur enthaltenen Informationen lassen sich interpretieren und veranschaulichen, d.h. in Zeichenzustände auf dem Monitor oder Drucker übersetzen. Zeichen, wobei hier von fixierten Zeichen wie Schrift- und Druckzeichen die Rede ist, materialisieren hingegen Strukturen, die zur Erhaltung keiner weiteren Energie bedürfen. Man könnte fixierte Zeichen als konservative Systeme zur Strukturierung von Informationen bezeichnen, während Zustände dissipative Systeme wären.<sup>31</sup> Dissipative Systeme bedürfen der Energiezufuhr von Außen, um ihre Struktur stabil zu halten. Sie lassen sich jedoch in ihrer Strukturierung, die von der Energiezufuhr abhängig ist, verändern und in unterschiedliche Systemzustände überführen.<sup>32</sup> Das entscheidende Kriterium ist die Dauerhaftigkeit konservativer Systeme in der Zeit, im Unterschied zur Abhängigkeit dissipativer Systeme von der Zeit, denn letztere unterliegen durch ihre energetische Kopplung mit der Umwelt oder in unserem Falle mit dem Trägermedium einer Zeitentwicklung. Ein Zustand, der nicht gespeichert wurde, vergeht bei Unterbrechung der Energiezufuhr unwiederrufbar, während die statische Fixierung materialisierter Zeichen sich nur durch ihre Zerstörung überwinden läßt.<sup>33</sup> Zeichen, als Zustände realisiert, die hier *Zeichenzustände* (digitale Zeichen) genannt werden sollen, sind als Maschinenzustände Teil eines Systems, einer Maschine. Ihr Symbolschema verschmilzt mit dem Trägermedium und kann insofern nur homogen gestaltet sein. Während das Symbolschema des Alphabets oder der Ziffern heterogen ist und sich aus voneinander unterscheidenden Zeichen zusammensetzt, wobei ein maßgebliches Kriterium darin besteht, daß zwei Zeichen eines Alphabets sich nicht gleichen dürfen, basiert das Symbolschema der computerrealisierten Zeichenzustände auf der homogen strukturierten Modulation des Trägermediums Strom: An/Aus, interpretiert als 0/1. Die Differenz zwischen den Zeichenzuständen ergibt sich aus der Sequenzierung der An/Aus-Folgen und deren Verschiedenheit (Byte). Dies hat zur Folge, daß zwar die Zeichenzustände als 0/1-Folgen wie die Zeichen syntaktisch differenziert,<sup>34</sup> also eindeutig voneinander unterschieden sind, daß das Symbolschema der Zeichenzustände aufgrund seiner Homogenität es jedoch ermöglicht, Zeichenzustände ineinander überzuführen. Die syntaktische Differenziertheit gilt zwar prinzipiell für die eindeutige Identifizierung der Zeichenzustände, sie ist jedoch anhand von Zeichenoperationen überwindbar und erlaubt die Möglichkeit, die Zustände

---

<sup>31</sup> Diese systemtheoretische Beschreibung geht von einfachen, energetisch geschlossenen (konservativen) und energetisch offenen (dissipativen) Systemen aus und findet vor allem in der Physik zur Darstellung von Systemzuständen und -dynamiken Anwendung. Vrgl. Thomas, H./Leiber, T.: Determinismus und Chaos in der Physik, 1994

<sup>32</sup> Ein faszinierendes Beispiel eines dissipativen Systems ist die Zhabotinski-Reaktion verschiedener anorganischer Substanzen. „Es kommt zu einem periodischen Bewegungsmuster aus interferierenden Kreisen, das so lange Bestand hat, als von außen energiereiche Substanzen zugeführt werden, um den Verbrauch („Dissipation“) von Energie auszugleichen.“ Mainzer, K.: Computer - Neue Flügel des Geistes, 1995, S. 212

<sup>33</sup> Gespeicherte Zustände lassen sich durch ihr Löschen zerstören.

<sup>34</sup> Es läßt sich bestimmen, zu welchem Charakter/0/1-Folge jede Marke/Zeichenzustand gehört. Das Symbolschema ist so konstruiert, daß die Inskriptionen nicht ineinander übergehen. Vrgl. Godmann, 1995, S. 128ff

direkt umzuformen, also *auf* ihnen zu operieren und zwar in Form von Verrechnungen. Im Unterschied dazu besteht die schriftbasierte Zeichenverwendung immer im Operieren *mit* den Zeichen, die während des Operierens nicht umgeformt, sondern in linearer Weise fortgeschrieben werden. Die Schriftzeichen dokumentieren die Operationen, zum einen in Form von Operationszeichen, zum anderen anhand ihrer Fortschreibung (Aufzeichnung). Die Operationen selbst werden jedoch von einer handelnden Person ausgeführt. Diese Handlung läßt sich mechanisieren, insofern die Operationen als maschinell ausführbare Instruktionen formulierbar sind. Die maschinelle Ausführung der Instruktionen besteht dann in der Umformung - nicht der Fortschreibung - der als Zustände realisierten Zeichen. Da uns die Kenntnis von diesen Zeichenzuständen und Operationen, nur durch anschauliche Zeichen vermittelt, vergönnt ist, erweitert sich die Form der als triadisch angenommenen Zeichenrelation,<sup>35</sup> denn sowohl die Syntax als auch die Semantik und Pragmatik werden zu komplexen Relationen. Die syntaktische Dimension des Zeichenprozesses kann nicht mehr von fixierten, heterogenen Gestalten ausgehen, sondern muß die Bedingungen der Digitalisierung und Dynamisierung der Zeichen als unanschauliche Zustände sowie die Emanzipation von der fixierten Darstellbarkeit der Zeichenzustände im Rahmen einer spezifischen, sinnlich wahrnehmbaren Konstitution berücksichtigen (intermodale Darstellbarkeit).

Mit anderen Worten: Die auf den Zeichenträger referierende syntaktische Dimension muß dessen Mechanisierung und Dynamisierung Rechnung tragen, die in der Zerlegung der Zeichen in homogene, maschinell darstellbare und verwendbare Einheiten besteht. Vor allem die Manipulierbarkeit der 0/1-Folgen, sowie deren automatisierbare Erzeugung sind zu beachten. Wesentlich komplexer gestaltet sich auch die semantische Dimension, da die Zeichenzustände sowohl einer intrasymbolischen Verwendung als auch einer extrasymbolischen Interpretation unterliegen. Zudem erschließt die intermodale Darstellbarkeit der 0/1-Folgen neue semantische Möglichkeiten. Schließlich erweitert sich die pragmatische Dimension aufgrund der Automatisierung von Handlungen im Rahmen des Zeichenprozesses und deren Delegation an den Computer. Aus einer anderen Perspektive dargestellt, ist das Zeichen als Zeichen-Zustand-Relation, die Zeichenbedeutung als semantisch-digitale Relation<sup>36</sup> und der Zeichenbenutzer als Mensch-Maschine-Relation zu denken. Man kann auch sagen, daß der computerrealisierte Zeichenprozeß einer maschineneigneten Syntax, Semantik und Pragmatik bedarf, die eine für den Menschen wahrnehmbare syntaktische, verstehbare semantische und nachvollziehbare pragmatische Extension aufweist.

---

<sup>35</sup> Vgl. Morris, Ch.: Grundlagen der Zeichentheorie, 1998, S. 57ff

<sup>36</sup> Auch die Digitalisierung stellt bereits eine semantische Interpretation dar, allerdings als numerische Interpretation in einem sehr eingeschränkten Verständnis. Unter semantischer Interpretation soll hier die Bedeutungskonstitution aufgrund sinnlich wahrnehmbarer Zeichen verstanden werden.

### 1.3 Syntaktische Simulation

Aufgrund des digitalen Schemas, d.h. da die diskreten Zustände als 0/1-Folgen auf Maschinenebene numerisch interpretiert werden (Byte-Zahlen), besteht die maschinelle Verarbeitungsweise in der Verrechnung der Zeichen durch die Modulation der Zustände gemäß der Schaltalgebra. Die Zeichen werden in Form von Zeichenzuständen miteinander verrechenbar, insofern Verrechenbarkeit die regelbasierte Umformbarkeit der numerisch interpretierten Zeichenzustände meint. Diese Verrechenbarkeit macht zwar nur Sinn für Zeichenzustände, die als numerische oder logische Werte verwendet und präsentiert werden, lässt sich aber prinzipiell auch für Charaktere oder Farbwerte denken. Eine Folge des mechanisierten Zeichenumgangs und der Verrechenbarkeit der Zeichenzustände ist die Möglichkeit der numerischen Simulation, die allgemein als *syntaktische Simulation* betitelt werden kann. Im Unterschied zur semantischen Simulation, die anhand von Beschreibungen beliebige Szenarien und Welten nachbildet oder kreiert, handelt es sich um eine formal-operative Verarbeitung der Zeichen anhand algorithmisierter Instruktionen, gleichwohl am Ende des Simulationsvorgangs anschauliche Bilder stehen. Wie bereits hingewiesen, stellt der syntaktische Umgang mit den Zeichen deren Objektcharakter als semiotische Entitäten oder Atome in den Mittelpunkt, indem die Zeichen als Material der formal-operativen Zeichenverwendung dienen. Dabei lassen sich mit entsprechenden Kalkülen und Algorithmen unendlich viele dieser Atome erzeugen.<sup>37</sup>

Im Unterschied zum Papier bietet der Computer für den formal-operativen Zeichenumgang zwei Vorteile: Einerseits einen rein quantitativen, da die Erzeugung und Verarbeitung neuer Entitäten sehr schnell erfolgen kann, andererseits einen qualitativen, da die Entitäten in ihrem Symbolschema homogen strukturiert und von daher ineinander überführbar sind. Der quantitative Aspekt zeigt sich in der Möglichkeit, enorme Mengen an Zeichenzuständen erzeugen und verarbeiten zu können. Dabei entsteht eine *semiotische Fülle*, die auf diskreten Zuständen basiert.<sup>38</sup> Der qualitative Aspekt erlaubt die direkte Ausführung der instruierten Operationen auf den Zuständen. Die syntaktische Simulation besteht primär in der regelbasierten Zeichenproduktion und nicht in der Darstellung von Inhalten, auch wenn die Resultate anschließend einer Veranschaulichung (Visualisierung) und semantischen Interpretation bedürfen. Die eigentliche Simulation spielt sich auf der Maschinenebene in Form numerischer Umformungen der Zeichenzustände ab und produziert enorme Mengen an Zeichen. Dabei stellt sich die Frage, was das Simulative an dieser Art der Zeichenverwendung ist und wofür man diese Massen an Zeichen benötigt? Simulieren, im Sinne von Nachbilden, kann auf verschiedene Ebenen

---

<sup>37</sup> Dazu bedarf es rekursiver Kalküle und Algorithmen.

<sup>38</sup> Diese Fülle ist nicht mit Goodmans syntaktischer Dichte identisch.

der numerischen Simulation bezogen sein. Inhaltlich, indem anhand der Visualisierung der Daten Objekte oder Prozesse mit semiotischen Mitteln anschaulich nachgebildet werden. Die Nachbildung besteht jedoch nicht in der Abbildung realer Objekte und Prozesse, sondern in der rein symbolischen Erzeugung von Objekten und Prozessen auf Basis formalisierter und mathematisch modellierter Beschreibungen naturgesetzlicher Abläufe (partielle Differentialgleichungen). Syntaktisch, indem die deduktive Verwendungsweise formal-operativer Zeichensysteme simuliert wird (Umformung der Gleichungen zur Lösungsfunktion). Diese Nachbildung unterscheidet sich jedoch in einigen Punkten grundlegend vom formal-operativen Zeichenumgang auf Papier und dokumentiert den Einfluß des Wechsels des Trägermediums: Im Gegensatz zur formal-operativen Zeichenverwendung nutzt die numerische Simulation an Stelle von Variablen konkrete numerische Werte als Operationsgrundlage. Die formale Darstellung ist eine allgemeine Darstellung, wohingegen die Simulation immer nur für ausgewählte Werte der Parameter, Anfangs- und Randbedingungen durchgeführt werden kann und damit lediglich ein eng umgrenztes Lösungsspektrum präsentiert. Probleme treten auf, wenn sich das, was ideographische Zeichen denotieren, nicht in Form von Instruktionen übertragen läßt; Zeichen, die beispielsweise das Unendliche oder unendliche Operationen symbolisieren und entsprechend approximiert werden müssen.<sup>39</sup> Das Hantieren mit Unendlichkeiten bleibt der symbolischen Zeichenverwendung vorbehalten, während Computersimulationen durch konkrete, endliche Bedingungen eingeschränkt sind. Ähnlich verhält es sich mit der typischen Verwendungsweise formal-operativer Zeichen, der Deduktion: Aufgrund der numerischen Operationsbasis der algorithmisierten Instruktionen und der endlichen Begrenzung wird eine Lösungsfindung simuliert, deren Resultate numerische Werte und keine formalen, exakten Lösungsfunktionen sind. Die Nutzung der numerischen Simulation zur approximativen Lösung der Gleichungen basiert dabei auf heuristischen Annahmen, insofern - wie für nicht-lineare Systeme meist der Fall - keine deduktive Handhabung bekannt ist.<sup>40</sup> Obwohl die Simulation auf regelbasierten Instruktionen zur Umformung der in die Gleichungen eingesetzten numerischen Werte beruht, lassen sich aufgrund der verwendeten Heuristiken nicht alle Verarbeitungsschritte - im Unterschied zur deduktiven Vorgehensweise - in ihrer Korrektheit belegen. Mit anderen Worten: Die syntaktische Simulation (numerische Simulation) bildet den Prozeß der Deduktion des formal-operativen Zeichenumgangs mehr oder weniger *gut* nach, wobei das Kriterium *gut* sich methodisch an der Verwendung analytisch nachvollziehbarer im Gegensatz zu heuristischen Operationsschritten orientiert, sich aber dann schwierig gestaltet, wenn keine analytisch nachvollziehbaren formalen Operationsschritte bekannt sind. Da der quantitative Vorteil der maschinellen Verarbeitung immer größer wird,

---

<sup>39</sup> Beispielsweise durch Auswahl- und Abbruchkriterien oder Diskretisierungsverfahren.

<sup>40</sup> Der Nutzen der numerischen Simulation zeigt sich in der Behandlung nichtlinearer Gleichungen, deren Lösungsfunktion nicht bekannt ist, da der formal-operative Weg von der Gleichung zur Lösung auf Papier bislang nicht gefunden wurde.

kann man mit Hilfe der numerischen Simulation eine immer umfangreichere Schar von Lösungen eines Gleichungssystems simulieren als auch Lösungen berechnen, die der exakten Lösung immer näher kommen. Die Masse an Daten dient dazu, qualitative Aussagen über das Lösungsverhalten zu erzielen, wenngleich deren Aussagekraft aufgrund der Heuristiken und Approximationen mit Vorsicht zu bewerten ist. Damit erlaubt die Simulation den Umgang mit formalen Strukturen in einer Weise, wie sie bislang aus den empirischen Wissenschaften in Form von Auswertungen umfangreicher Beobachtungs- und Experimentierdaten bekannt ist. Sie ermöglicht den experimentellen Umgang mit Zeichensystemen, insofern diese zeichenproduzierende Funktionen aufweisen, so daß sich die in der Gleichung enthaltenen Informationen strukturell entfalten. Dabei sind die formalen Gleichungen die Untersuchungsobjekte, die zur Analyse numerisch simuliert und in ihrem Verhalten anschaulich dargestellt werden. Der Begriff *Computereperiment* bringt diese neue Verwendungsweise der Zeichen zum Ausdruck.<sup>41</sup>

Im Grunde ist bereits die algorithmische Verarbeitungsweise der Computer eine Simulation spezifischer Handlungen,<sup>42</sup> und die unanschaulichen Zeichenzustände sind in Kombination mit ihren programmgesteuerten Interpretationen Simulationen sinnlich wahrnehmbarer Zeichen. Meistens wird dieses Simulationspotential jedoch so genutzt, daß es möglichst nahe an unsere gewohnte Umgangsweise mit den Zeichen heranführt. So ersetzt die Seite auf dem Bildschirm in einem Schreibprogramm das Blatt Papier und wir tippen Sätze darauf wie auf einer Schreibmaschine. Oder das Interface eines Rechenprogrammes erlaubt es uns, wie auf dem Papier zu rechnen, mit dem Unterschied, daß nicht wir sondern der Computer die Berechnungen ausführt und die Resultate notiert. Die numerische Simulation hingegen eröffnet einen Zeichenumgang, wie er auf dem Papier kaum möglich wäre. Das entscheidende Kriterium dabei ist die Leistungssteigerung bezüglich der numerischen Anwendung formaler Strukturen, die als symbolische Maschinen in der Lage sind, Zeichen zu produzieren.<sup>43</sup> Metaphorisch gesprochen bedeutet dies, daß die maschinelle Realisierung symbolischer Maschinen diese tatsächlich zum Produzieren bringt.<sup>44</sup> Ihre Tätigkeit besteht in der regelbasierten Verarbeitung von Zeichenzuständen und ihr Output sind diskrete Zeichen. Die enorme Operationsgeschwindigkeit

---

<sup>41</sup> „*Computational Science*“, die Theorie und Experiment qualitativ und methodisch - einer experimentellen Disziplin vergleichbar - ergänzt. *Computational Science ist synonym mit der Untersuchung komplexer Systeme; ihr Instrument ist der (Super)Computer, ihre Methode die Simulation.*“ Hoßfeld, F.: *Wissenschaftliches Rechnen - Motor der Rechenentwicklung*, 1992, S. 1

<sup>42</sup> Eben solcher Handlungen mit Zeichen, die maschinell ausgeführt werden können.

<sup>43</sup> „Was ist unter einer „symbolischen Maschine“ zu verstehen? Einmal: diese Maschine gibt es nicht wirklich, sondern nur symbolisch. ... Zum anderen: diese Maschine macht nichts anderes, als Symbolreihen zu transformieren. ... Jedes Verfahren, das als Operation einer symbolischen Maschine darstellbar ist, kann - im Prinzip - von einer wirklichen Maschine ausgeführt werden. Das geschieht z.B., wenn bei der mechanischen Rechenmaschine die Symbolkonfigurationen durch eine entsprechende Konfiguration von Zahnradstellungen repräsentiert werden. Computer sind Maschinen, die jede beliebige symbolische Maschine imitieren können.“ Krämer, 1988, S. 2/3

<sup>44</sup> Die symbolische Maschine stellt nicht nur ein Verfahren dar, das zur Ausführung einer Person bedarf. Die Ausführung wird automatisiert, indem die symbolische Maschine in Form von Instruktionen in eine geeignete Hardware implementiert wird.

steigert die Produktivität dieser Maschinen in einem Maße, wie sie für eine Ausführung auf Papier durch eine Person nicht möglich wäre. Dadurch wird die nötige semiotische Fülle erzeugt, um Objekte und Prozesse numerisch zu modellieren.

Die Entwicklung der Schriftverwendung führt also von sinnhaften Zeichenfolgen, die auf sprachliche Einheiten referieren, zu formal oder ideographisch verwendeten Einzelzeichen als heterogene Einheiten, die auf nichts bzw. auf andere Zeichen, Objekte, Zustände oder Operationen referieren, schließlich zu homogen strukturierten Zuständen, die numerische Werte denotieren und als Einzelzeichen (Charaktere, Farben, Klänge) interpretiert werden können. War die Folge der Formalisierung die Einführung einer intrasymbolischen Ebene (Interpretationsfreiheit, Schematisierbarkeit, Schriftlichkeit),<sup>45</sup> so ist die Folge der Mechanisierung die Implementierung einer subsymbolischen Ebene der Zeichen (Homogenität, Formbarkeit, freie Präsentierbarkeit, dynamische Realisierung). Die Schrift emanzipiert sich dabei zum einen von der Sprache, zum anderen von ihrer fixierten Gestalt und sowohl aufgrund der frei wählbaren Präsentation der sinnlich wahrnehmbaren Konstitution der Zeichen als auch bezüglich des Übergangs von statischen Zeichen zu dynamischen Zuständen. Bestehen bleibt das Prinzip der Verschriftung, das sich aus der Verwendung diskreter, wohlunterscheidbarer Entitäten - heterogener Zeichen oder homogen strukturierter, numerisch kodierter Zeichenzustände - ergibt und das zur Kennzeichnung eines erweiterten Schriftbegriffs dient. Dessen Multifunktionalität zeigt sich in der Möglichkeit, auf der Basis dieses Prinzips Zeichensysteme zu erzeugen, die beschreibende, notierende, formal-operative und modellierende Funktionen erfüllen. Die anschaulichen Resultate sind Texte, Kodes, Formeln und Kalküle sowie nun auch Bilder und Objekte.<sup>46</sup> Das Besondere dieser Bilder und Objekte ist, daß sie auf einer Fülle diskreter Zeichenzustände basieren, die als numerische Werte kodiert sind und als Farbwerte präsentiert werden. Sie lassen sich ikonisch oder als Kolonne von Zahlen darstellen.

---

<sup>45</sup> Vgl. Krämer, 1988

<sup>46</sup> Mit Objekten sind hier stereo 3D-Darstellungen gemeint, deren Objekthaftigkeit visuell durch Plastizität erzeugt wird.

### 13. Verlust des Symbolischen?

Der Begriff *Symbol*, der hier synonym für den Begriff Zeichen verwendet wird, umfaßt eine Vielzahl sinnlich wahrnehmbarer Entitäten, die sich dadurch auszeichnen, daß sie stellvertretend für etwas stehen, das sie symbolisieren. Ein Zeichen, das nichts symbolisiert, gilt in der Semiotik als unvollständiges Zeichen. Dennoch sprechen wir in Bezug auf graphische Entitäten, die formal verwendet werden, von Zeichen. Mit der Erweiterung der Funktionalität der Schrift und mit den unterschiedlichen Verwendungsmöglichkeiten der Zeichen stellt sich die Frage, ob sich nicht auch die Form der Bezugnahme diversifiziert?

#### 2.1 Formen der Bezugnahme

Die vertrauteste Art der Bezugnahme ist die Verwendung von Sprache, also die Nutzung der konventionell kodierten Bezugnahme. Wir benutzen Wörter, Namen und Sätze, um Dinge, Sachverhalte oder Personen zu bezeichnen und zu beschreiben.<sup>47</sup> Die sinnhaften Zeichenfolgen beziehen sich dabei auf extrasymbolische Gehalte, die sie semantisch kodieren. Diese Kodierung basiert auf konventionellen Übereinkünften einer Sprachgemeinschaft, die wir erlernen und welche die Grundlage sprachlicher Kommunikation bildet. Wie aber verwenden wir nicht-sprachliche Zeichen? Mit nicht-sprachlichen Zeichen sind Variablen und ideographische Zeichen gemeint, die als Zeichenfolgen keine sinnhaften Zeichen oder Namen ergeben. Die Verwendung von Variablen geht davon aus, daß diese als Platzhalter für verschiedene Objekte möglicher Bezugnahmen fungieren. Sie sind Stellvertreter wie sinnhafte Zeichen, jedoch mit dem Unterschied, daß nicht festgelegt ist, wofür sie stehen. Prinzipiell läßt sich ihnen aber ein Designat zuordnen, d.h. die Variablen lassen sich auf Objektbereiche anwenden wie im Falle logischer, numerischer oder objektorientierter Interpretationen. Ihr Symbolgehalt ist leer bzw. sie weisen ein Null-Denotat auf. Allerdings symbolisieren sie etwas für den Benutzer und zwar daß sie als Zeichen zur abstrakten Klasse der Variablen gehören, deren Eigenschaft es ist, ohne extrasymbolische Interpretation im Zeichensystem verwendet zu werden. Die Identifizierung erfolgt durch eine metatextuell festgelegte Kennzeichnung anhand der Zeichengestalt.<sup>48</sup> Der Symbolcharakter von Variablen bezieht sich dabei lediglich auf die intrasymbolische Verwendung in einem Zeichensystem.

---

<sup>47</sup> Zeichen helfen uns beispielsweise „... eine Haltung gegenüber Gegenständen in absentia einzunehmen, welche als >denken an< oder >sich beziehen auf< bezeichnet wird. In dieser Eigenschaft gebraucht sind Zeichen nicht Symptome, sondern Symbole.“ Langer, S.: Philosophie auf neuem Wege, 1979, S. 39

<sup>48</sup> : „... I. Individualzeichen (meist griechische Buchstaben) ... II. Variable (lateinische Buchstaben) ... III. Zeichen zur Mitteilung (deutsche Buchstaben) ...“ Hilbert, D.: Neubegründung der Mathematik, 1965b, S. 165/166



Doch auch wenn keine extrasymbolischen Objekte oder Sachverhalte denotiert werden, muß dies dem Benutzer bekannt sein. Es bedarf des Wissens um die Form der Bezugnahme und im Falle der Variablen um das Fehlen einer Bezugnahme sowie der Möglichkeit der Interpretation. Da Variablen nicht repräsentieren und nicht Teil einer sinnhaften Zeichenfolge sind, läßt sich jede beliebige graphische Konfiguration als Variable verwenden. Die Entkopplung von einem vorgeordneten Objektbereich stellt eine Abstraktionsleistung dar, die das Zeichen in seiner sinnlich wahrnehmbaren Gestalt in den Blick der Aufmerksamkeit rückt. Anders verhält es sich mit den ideographischen Zeichen, die eindeutig Begriffe, Operationen, Objekte oder Zustände notieren und somit symbolisieren. Vor allem im wissenschaftlichen Schriftgebrauch finden sich ideographische Zeichen, die aufgrund ihrer Notationsfunktion im Rahmen von Theorien definierte Begriffe und Operationen symbolisieren und als relativ exakte Begriffs- oder Operationsschriften den Zeichengebrauch normieren. Abhängig von der Durchsetzung der Zeichen können manche von ihnen, wie die Symbole der Grundrechenarten, als nahezu universell verstehbar angenommen werden.

Die freie Gestaltbarkeit ideographischer Zeichen rückt diese in die Nähe von Piktogrammen. „A symbol scheme ... is pictographic, if it (a) adopts its constitutive features from a pictorial scheme but (b) organizes these constitutive features to form basic labels like a linguistic scheme ...“<sup>49</sup> Piktogramme sollten aufgrund ihrer Ikonizität selbsterklärend sein, so sieht zumindest Otto Neurath den Nutzen dieser Zeichenform, während ideographische Schriftzeichen in konventioneller Weise an die Begriffe, die sie notieren, gekoppelt sind.<sup>50</sup> Die Form der Bezugnahme ist die Notation von Begriffen oder Operationsvorschriften, die eine eindeutige Relation zwischen Zeichen und Begriff/Operation herstellt und die Grundlage von Begriffsschriften bzw. Operationsschriften darstellt. Denn obwohl die Bedeutung der ideographischen Zeichen konventionell vereinbart ist, ist diese Vereinbarung durch ihren Definitionscharakter relativ exakt. Als Beispiel ließe sich die Relation Ziffer - Zahlbegriffe anführen. Dabei wird deutlich, daß es sich um eine dreistellige Symbolrelation zwischen *ideographischem Zeichen* - *Name* - *Definition/Vorschrift* handelt, denn zahlreiche dieser Zeichen sind mit lesbaren Namen belegt.<sup>51</sup> Freilich unterscheiden sich die Namen in den unterschiedlichen Spra-

---

<sup>49</sup> McDonell, N.: Are pictures unavoidable specific?, 1983, S. 93

<sup>50</sup> „Gerade durch ihre [Piktogramme] relative Neutralität und durch die Trennung von der Einzelsprache ist die bildhafte Darstellung jener in Worten überlegen. Worte trennen, Bilder verbinden.“ Neurath, O.: Bildhafte Pädagogik im Gesellschafts- und Wirtschaftsmuseum in Wien, 1991, S. 205. Piktographisch verwendete Bilder sollten die Kluft zwischen den Nationen und Sprachen überwinden und als universelle Bausteine dienen, mit welchen sich alles weitere konstruieren ließe. Das ISOTYPE-System von 1934 (International System of Typographic Picture Education) bringt Bild und Sprache in ihrer Funktion eng zusammen. Der philosophische Hintergrund des Positivismus des Wiener Kreises, dem Neurath angehörte, mit der Diskussion um einfache, grundlegende Sätze (Protokollsätze), und der enge Kontakt zum Bauhaus und dessen Streben nach einfachen, grundlegenden Konstruktionselementen, spiegeln sich in seinem Bildsprachenprojekt wieder. Ziel war die Aufklärung breiter Massen, indem wissenschaftliche Erkenntnisse mit Hilfe bildstatistischer Methoden allgemeinverständlich zugänglich würden. Die Zeichen des ISOTYPE-Systems sollten selbsterklärend sein und deshalb Objekte größtmöglicher Ikonizität darstellen.

legt.<sup>51</sup> Freilich unterscheiden sich die Namen in den unterschiedlichen Sprachen, während die Zeichen universell verwendbar sind.<sup>52</sup>

Zwei Zeichenklassen sollten aufgrund ihrer Besonderheit näher betrachtet werden: zum einen Operationszeichen, zum anderen Ziffern. Operationszeichen referieren als ideographische Zeichen eindeutig auf regelbasierte Operationsvorschriften, die angeben, wie mit Zeichen zu verfahren ist.<sup>53</sup> Der Symbolgehalt ist ein intrasymbolischer und bezieht sich ausschließlich auf die Verwendung innerhalb eines definierten Zeichensystems. Gegenstand der Operationen sind Zeichen, die in einem formalen System Variablen sind. Ein Kalkül kann als prototypische Kombination von Operationszeichen und Variablen gewertet werden.<sup>54</sup> Das Besondere dieser Zeichen ist ihr Symbolgehalt, der durch die Anwendung auf Zeichen Handlungsvorschriften zur Produktion neuer Zeichen angibt. Operationszeichen eines Kalkülsystems erlauben so die Konstruktion symbolischer Maschinen, die Zeichen produzieren, deren Symbolgehalt leer ist.<sup>55</sup> Dabei kann sich der Prozeß der Produktion unendlich gestalten, falls die Handlungsvorschriften iterative Elemente aufweisen. Die Iteration als Operation der Wiederholung eröffnet in operativ-selbstbezüglicher Weise die Integration des Unendlichen, insofern der Prozeß nicht von sich aus oder durch entsprechende Abbruchkriterien zum Ende kommt. Allerdings ist dieses Potential der Unendlichkeit ein symbolisches, da jegliche Realisierung bereits die Begrenzung beinhaltet.<sup>56</sup> Kalkülsysteme symbolisieren mit statischen Zeichen einen dynamischen Zeichenumgang und dokumentieren diesen in linearen Aufzeichnungsschritten. Die Deduktion kann als dessen dynamisches Muster aufgefaßt werden, das es erlaubt, sukzessive aus einem Schritt den nächsten abzuleiten.<sup>57</sup> Sukzessive Vorgänge handeln von der schrittweisen Ausführung regelbasierter Operationen und sind in ihrer zeitlichen Form diskret. Genau betrachtet vollzieht sich die Bewegung im Übergang von einem Zustand in den nächsten, wobei die Zustände als Zeichenfolgen fixiert sind. Die Zulässigkeit der Übergänge resultiert aus den gegebenen Vorschriften. Unter bestimmten Bedingungen sind

---

<sup>51</sup> Beispielsweise so, wie Leibniz bei der Einführung des Begriffs des *Differentialquotienten* vorging: „In dieser Perspektive stellt nämlich das Symbol  $dx/dy$  keine bestimmte Größe, sondern eine operative Vorschrift dar ...“ Krämer, 1988, S. 71. Die Symbolrelation besteht aus dem Zeichen ( $dx/dy$ ), dem Namen (Differentialquotient) und der operativen Vorschrift der Verwendung des Zeichens im Rahmen eines formal-operativen Zeichensystems.

<sup>52</sup> Denn wie Rene Descartes hinweist „... bliebe jedoch das Problem der für diese Begriffe zu wählenden Laute, da manche Laute für das eine Volk angenehm und leicht aussprechbar und für ein anderes unangenehm sind. ... Wenn einer sich für die Elementarbegriffe der Synonyme in seiner eigenen Sprache bediente, würde er von den anderen Völkern nicht verstanden, es sei denn, er drückte sich schriftlich aus;“ Eco, U.: Die Suche nach der vollkommenen Sprache, 1997, S. 225

<sup>53</sup> Operationszeichen in diesem Sinne sind Kalkülzeichen. Es sind zwar Operationszeichen denkbar, die auf Handlungen mit extrasymbolischen Objekten referieren wie beispielsweise in einem Rezept, doch sind diese Operationen meist umgangssprachlich artikuliert und selten mit gesondert eingeführten ideographischen Zeichen notiert.

<sup>54</sup> Hinzu kommen Hilfszeichen wie Klammern, Trennstriche etc.

<sup>55</sup> „Da formalisierte Systeme als symbolische Maschinen zu behandeln sind, können wir über die Gegenstände dieser symbolischen Realitäten auch sagen: Die Gattung dieser Gegenstände ist dadurch ausgezeichnet, daß diese durch Operationen symbolischer Maschinen erzeugbar sind.“ Krämer, 1988, S. 183

<sup>56</sup> Die Begrenzung der Ressourcen spielen für die Realisierung unendlicher Prozesse eine entscheidende Rolle.

<sup>57</sup> „Die Deduktion oder Ableitung ist eine Umformung von Figuren nach Regeln, die sich nur auf die Form der Figur bezieht“ Stekeler-Weithofer, P.: Grundprobleme der Logik, 1986, S. 13. „Den Begriff der Deduktion, der aufruht auf einem schematisch verstandenen Regelsystem: Deduktionen sind `sukzessive` Anwendungen von Regeln ...“ Stekeler-Weithofer, 1986, S. 104

die regelbasierten Operationen mechanisierbar, d.h. in maschinell ausführbare Instruktionen transformierbar. Die Zustände sind dann nicht als Zeichenfolgen fixiert, sondern als Maschinenzustände gegeben, deren Umformung durch die Instruktionen artikuliert wird.<sup>58</sup>

Die zweite Klasse ideographischer Zeichen sind Ziffern, die auf den abstrakten Bereich der Zahlen referieren. Allerdings verweisen sie nicht auf - wie auch immer gedachte - abstrakte Entitäten, sondern auf deren strukturelle Verfassung, die prinzipiell geordnet und maschinell erzeugbar ist.<sup>59</sup> Insofern lassen sich Zahlen als symbolische Maschinen formulieren, die maschinell realisierbar sind.<sup>60</sup> Ihr Symbolgehalt ist operativ erzeugbar, d.h. es sind Regeln formulierbar, um Zahlen zu erzeugen und ineinander überzuführen. Dies ist weder für Variablen noch für sinnhafte Zeichen der Fall, da deren Symbolgehalt entweder leer ist oder auf konventionellen Zuordnungen basiert. Es lassen sich also verschiedene Formen der Bezugnahme feststellen, indem der Symbolgehalt von Zeichen leer, operativ erzeugbar oder konventionell kodiert ist. Außerhalb des Computers ist die Art der Bezugnahme an entsprechende Zeichenklassen - Variablen, Ziffern, Wörter - gekoppelt. Doch die Zerlegung der Zeichen in numerisch kodierte Zeichenzustände erlaubt die operative Erzeugbarkeit und Verrechenbarkeit aller computerbasierten Zeichen, die allerdings für jene Zeichen wenig sinnvoll ist, deren Symbolgehalt konventionell kodiert ist.<sup>61</sup> Mit der Verrechenbarkeit der Zeichenzustände sowie der wählbaren Präsentation als Charaktere, Farbwerte oder Klänge verschränken sich die Relationen zwischen Zeichenklassen und Formen der Bezugnahme. Deutlich wird dies bei der Visualisierung numerischer Simulationen, indem numerische Werte - farblich präsentiert - berechnete Bilder erzeugen.

Die erweiterte Funktionalität der Schrift erlaubt nicht nur die Diversifikation ihrer Formen der Bezugnahme, sondern mit der Fortführung ins Dynamische die Verschränkung der verschiedenen Arten der Bezugnahme. Wie ist dies zu verstehen? Bisher verhielt es sich so: Wenn wir einen Sachverhalt numerisch artikulierten, war der Symbolgehalt an die Ziffern gebunden. Wenn wir etwas beschrieben, war der Symbolgehalt an sinnhafte Buchstabenfolgen gekoppelt. Und wenn wir etwas graphisch darstellten, so wurde der Symbolgehalt ikonisch präsentiert.<sup>62</sup> Doch mit Hilfe des Computers ist es nun

---

<sup>58</sup> Dieser Zusammenhang zeigt sich theoretisch in der Äquivalenz zwischen Turingtafel und Turingmaschine.

<sup>59</sup> Die strukturelle Verfassung konstituiert sich durch die Geordnetheit kleiner, gleich, größer. Die Beschreibung *Zahl* suggeriert das Vorhandensein von Entitäten, zumindest abstrakter Entitäten. Die objektorientierte Betrachtungsweise läßt sich jedoch durch eine operative substituieren. Dann ist lediglich die strukturelle Ordnung von Belang, die sich ausschließlich in der regelbasierten Handhabung der Zeichen zeigt. Derart verallgemeinert lassen sich auch die Operationszeichen der Arithmetik, Algebra und Binärlogik unter der numerischen Verwendungsweise auflisten.

<sup>60</sup> Allerdings nur auf Basis des Zählkalküls natürlicher Zahlen. Die Realisierung anderer Zahlen zeigt sich im Computer in der Kennzeichnung und in der Art der Verrechnung. So zeigt das erste Bit einer Floating-point Zahl an, ob es sich um eine negative oder positive Zahl handelt. Diese Kennzeichnung wird im Rahmen der programmgesteuerten Interpretation und Verarbeitung berücksichtigt. Auf Maschinenebene sind alle Zahlen *positiv* als 0/1-Folgen realisiert.

<sup>61</sup> Es ließen sich auch Buchstaben ineinander überführen, doch im Rahmen sinnhafter Zeichenfolgen macht dies wenig Sinn.

<sup>62</sup> Die Form der Bezugnahme oder des Symbolgehalts besteht in der Konstitution der semantischen Dimension der Zeichen und ist außerhalb des Computers entscheidend von der sinnlich wahrnehmbaren Form der Zeichen geprägt. D.h. das Symbolsys-

möglich einen numerischen Sachverhalt nicht nur mit Ziffern darzustellen, sondern mit ikonischen Mitteln.<sup>63</sup> Es ließe sich also mit Bildern rechnen. Diese Verschränkung der Symbole mit bislang symboltypischen Formen der Bezugnahme hat Folgen, denn sie führt dazu, Zeichen in neuer Weise für Erkenntnisse zu nutzen. Berechnete Bilder besitzen eine andere Aussagekraft als gemalte. Für die Visualisierung numerischer Simulationen bedeutet dies, daß „... das, was formal beschreibbar ist, ikonisch repräsentiert werden kann. ... Bilder substituieren Formeln und zwar so, daß dabei die Anschauung Erkenntnisse zu vermitteln vermag, die in der Arbeit mit der Formel gerade nicht zu Tage treten.“<sup>64</sup> Um welche Erkenntnisse es sich dabei handelt, soll später diskutiert werden. Vorrangig ist jedoch die Frage, was es bedeutet, die Symbole selbst als Objekte der Handlungen zu verwenden und sie ihrer extrasymbolischen Vermittlerrolle zu entledigen? Die Doppeldeutigkeit des Begriffs des *Symbolischen* wird hier deutlich. Denn einerseits ist der Begriff im Sinne einer extrasymbolischen Stellvertreterfunktion zu verstehen, andererseits zeigt er die ausschließliche Verwendung von Symbolen an: ein Hantieren mit semiotischen Entitäten oder in rein semiotischen Welten, wie es in der Algebra oder der formalen Logik ist. Beide Deutungsweisen bedingen sich nicht gegenseitig und die numerische Simulation ist ein Beispiel dafür.<sup>65</sup> Basierend auf formalen Gleichungen, werden zum einen die mit den Operationszeichen symbolisierten Operationen ausgeführt, andererseits die Variablen durch konkrete numerische Werte ersetzt, die selbst als Operationen aufgefaßt werden können. Allerdings nur dann, wenn numerische Werte nicht auf abstrakte Entitäten referieren, sondern als operativ erzeugbare Zeichenzustände verstanden werden.<sup>66</sup> Die semiotische Fülle, die dabei generiert wird, besteht aus digitalen Zeichen, die einen operativ erzeugbaren Symbolgehalt aufweisen. Und dieser läßt sich rein formal verstehen ohne extrasymbolische Bezüge. Die Resultate numerischer Simulationen symbolisieren also lediglich die Struktur ihres Erzeugungsmechanismus, der formal in den Gleichungen angezeigt ist und während der Simulation zur Ausführung kommt. Oder anders gewendet: Die in den Formeln symbolisierten Strukturen entfalten sich durch die konkrete Ausführung im Rahmen der numerischen Simulation auf Basis operativ erzeugbarer Zeichen.

---

tem bestimmt maßgeblich die Form der Bezugnahme oder des Symbolgehalts. Oder anders gewendet: Einen Sachverhalt mit sinnhaften Zeichenfolgen zu beschreiben unterscheidet sich kategorial von dessen ikonischer Darstellung.

<sup>63</sup> Dies ist zwar seit Descartes Darstellung geometrischer Sachverhalte mit algebraischen Ausdrücken möglich, doch in einem wesentlich begrenzterem Umfange, so daß allenfalls von graphischen, aber nicht ikonischen Darstellungen die Rede sein kann.

<sup>64</sup> Krämer, S.: Philosophie und Neue Medien, 1995, S. 189

<sup>65</sup> Beide Deutungsweisen hängen nur dann zusammen, wenn für ein Symbol oder ein Zeichen notwendig das Repräsentieren als elementare Funktion verstanden wird. Doch es ist nicht einfach zu sagen, was die Symbolrepräsentation ist, wie die verschiedenen Symboltheorien dokumentieren. Dabei wird zwar meist der Fall fiktiver Symbole berücksichtigt, die keine Referenz aufweisen wie *Einhörner*, doch handelt es sich dabei immer noch um einen konventionell kodierten Symbolgehalt. Zeichen mit leerem oder operativ erzeugbarem (formalen) Symbolgehalt werden meist nicht berücksichtigt bzw. als unvollständige Zeichen abgetan, die allenfalls selbstbezüglich sind.

<sup>66</sup> Der Mechanismus der Erzeugung numerischer Werte läßt sich formalisieren und mechanisieren, bezieht sich also in keiner Weise auf extrasymbolische, abstrakte Entitäten und ist daher interpretationsfrei im Maschinellen verwendbar. Lediglich die Art ihrer Erzeugung und damit ihre Ordnung ist die signifikante Kennzeichnung numerischer Werte, die artikuliert als Erzeugungsvorschrift eine rein intrasymbolische Anwendung darstellt.

## 2.2 Semiotische Partikel

Ergibt sich ein Verlust des Symbolischen? Die Frage scheint berechtigt, denn die Zeichen werden im Falle der numerischen Simulation zu Objekten der Zeichenoperationen und zeigen selbst keine Objekte an. Vielmehr dienen sie als *semiotische Partikel* zur Erzeugung ikonischer Darstellungen, indem sie - farblich präsentiert - gestaltbildende Funktionen aufweisen. Die Rede vom Verlust des Symbolischen bezieht sich auf die fehlende extrasymbolische Referenzfunktion sowie die objektfokussierte Verwendungsweise der Symbole. Die Zeichen werden zu formbaren Partikeln der Zeichenmanipulation, die nichts repräsentieren als sich selbst bzw. ihre Zustandsdaten.<sup>67</sup> Die Folge der Formalisierung und Mechanisierung der Zeichenverwendung ist die Vergegenständlichung der Zeichen als Objekte eines schematischen Verfahrens. Dies ist nicht unbedingt in einem ontologischen Sinne aufzufassen, sondern als maßgebender Effekt eines Zeichenumgangs, der - als Verfahren konzipiert<sup>68</sup> - mechanisierbar ist. Voraussetzung dazu ist die Normierung der Zeichen und die Schematisierung ihrer Verwendung, wie dies auf Papier mit Variablen oder im Computer mit digitalen Zeichen der Fall ist.<sup>69</sup> Semiotische Partikel sollen allerdings nur jene digitalen Zeichen genannt werden, die im Rahmen eines Koordinatensystems (Raum-Zeit-Raster) eine definierte Position einnehmen und dort ihren numerischen Wert als farblich kodierte Information einbringen. Sie sind die charakteristischen Zeichen der Simulation und konstituieren deren Symbolsystem. Der Informationsgehalt entspricht dabei den Zustandsdaten der Partikel und ist direkt in Raum, Zeit und Farbe umgesetzt. Semiotische Partikel sind also Zeichen, die als Farbpunkte präsentiert eindeutig numerisch kodiert sind. Die intrasymbolische Kennzeichnung ist umfangreich, denn die Farbwerte repräsentieren numerische Werte, die wiederum eine spezifische 0/1-Folge repräsentieren, deren Gestalt oder Struktur im Falle der numerischen Simulation aus regelbasierten Umformungen resultiert. Zudem muß die 0/1-Folge im Rahmen einer Lokalisation in einem Raum-Zeit-Raster eingeordnet sein.<sup>70</sup> Erst die computerbasierte Zerlegung der Zeichen - in diesem Falle eines Bildpunktes - macht auf die Komplexität der Zeichen aufmerksam. Wenn wir beispielsweise von Schriftzeichen sprechen, setzen wir ihre adäquate Realisierung in Raum, Zeit und Farbe als selbstverständlich voraus, denn erst dann können wir sie überhaupt wahrnehmen und darüber reden. Die Lage der Zeichen, ihre Farbe und Dauer werden als kontingent für ihre Bedeutung

---

<sup>67</sup> Der Unterschied zwischen physischen und semiotischen Objekten besteht darin, daß letztere ihre Zustandsdaten - Position im Koordinatensystem, numerischer Wert etc. - im Rahmen eines Programms präsentieren.

<sup>68</sup> Bereits Rezepte und mehr noch Algorithmen und Kalküle weisen einen entsprechenden Verfahrenscharakter auf.

<sup>69</sup> Die Partikel sind diskrete, homogene Zustände, deren Differenzierung anhand numerischer Werte sich ins Farbliche transformieren läßt.

<sup>70</sup> Die 0/1-Folge muß in einer Matrize aufgelistet sein, die als Basis eines polygonalen Datensets dient. Der Farbwert enthält die Zuordnung zu einer bestimmten Aktivierung der Bildschirmpunkte (Pixel), die sich aus drei Werten für rot, grün und blau zwischen 0 und 255 zusammensetzt.

abstrahiert.<sup>71</sup> Tatsächlich sind sie jedoch die Voraussetzung, um die Zeichen zu ermöglichen. Im Falle der semiotischen Partikel repräsentiert die Farbe, Lage und Dauer die anhand der numerischen Simulation entfalteten Informationen. Die Zerlegung der Symbole in digitale Zeichen, die als unanschauliche Zustände einer symbolverarbeitenden Maschine Genüge leisten, bedürfen für uns der sinnlich wahrnehmbaren Präsentation. Das, was wir bislang traditionell als Zeichenträger kennen - Charaktere (Zahlen, Buchstaben etc.), Farbpunkte, Töne - spaltet sich durch die Mechanisierung in verschiedene programmgesteuerte Interpretationsschritte auf: In die sinnlich wahrnehmbare Präsentation der numerischen Darstellung, die binärkodiert in diskrete Zustände umgesetzt ist. Da sich mit dem computerrealisierten Symbolsystem - seinem diskreten Symbolschema und seinem digitalen Schema - unterschiedliche Zeichenträger erzeugen lassen, die außerhalb des Computers auf unterschiedlichen Symbolschemata basieren, erhält die Wahl der sinnlich wahrnehmbaren Präsentation der digitalen Zeichen einen bedeutungskonstituierenden Faktor. Deutlich wird dies bei der Visualisierung numerischer Simulationen, denn der Effekt der Visualisierung numerischer Werte besteht genau darin, die Zahlenwerte eben nicht mit Ziffern darzustellen, sondern mit Farbpunkten. Dabei handelt es sich nicht um Farbpunkte, die aus Gestaltungsgründen gesetzt sind wie in der Malerei, sondern um solche, die operativ erzeugt sind und eindeutig numerische Werte repräsentieren. Die Substitution der Ziffern durch Farben führt zur Verschränkung der Form der Bezugnahme, denn die Farbdarstellung besitzt eine gestaltbildende Funktion im Ikonischen und ermöglicht somit neue Einsichten in formal-operative Zeichensysteme.<sup>72</sup> Die Farbdarstellung ist eine qualitative im Unterschied zur Darstellung mit diskreten Ziffern in linearer oder tabellarischer Form. Mit der numerischen Simulation werden die Zeichen nicht konventionell symbolisierend oder notierend genutzt. Die Zeichenverwendung ist durch den operativen Charakter digitaler Zeichen geprägt, deren numerischer Wert gemäß den Instruktionen umgeformt wird. Die Zeichen werden zu semiotischen Partikeln, die als Symbolschema ikonischer Darstellungen dienen. Oder anders gewendet: Die numerische Simulation besteht in der regelbasierten Produktion semiotischer Partikel, die anschaulich umgesetzt eine raum-zeitliche Extension einnehmen.<sup>73</sup> Und damit lassen sich Strukturen erzeugen und modellieren, die als Bilder von Objekten oder Prozessen

---

<sup>71</sup> „Dagegen haben die Gebilde, die wir Zahlzeichen nennen physische und chemische Eigenschaften, die von dem Schreibmittel abhängen. Man könnte sich denken, daß einmal ganz neue Zahlzeichen eingeführt würden, wie die arabischen z.B. die römischen verdrängt haben. Niemand wird im Ernste annehmen, daß man dadurch neue Zahlen bekäme, ganz neue Gegenstände der Arithmetik mit bisher noch unerforschten Eigenschaften. Wenn man also von den Zahlzeichen ihre Bedeutung unterscheiden muß, so wird man auch den Ausdrücken »2«, »1 + 1«, »3 - 1«, »6 : 3« dieselbe Bedeutung zuerkennen müssen ... Die verschiedenen Ausdrücke entsprechen verschiedenen Auffassungen und Seiten, aber doch immer derselben Sache.“ Frege, G.: Funktion, Begriff, Bedeutung, 1994, S. 20

<sup>72</sup> „... der Computer [produziert] primär nur Zahlen- oder Symbolkolonnen, die in reale Bilder rückübersetzt werden müssen, da diese für den Menschen viel leichter faßbar sind. Man nennt diesen Prozeß Visualisierung.“ Neunzert, H.: Mathematik und Computersimulation: Modelle, Algorithmen, Bilder, 1995, S. 44/45

<sup>73</sup> Die Simulation selbst besteht in der rein numerischen Umformung gemäß den Instruktionen, die sich aus der simulierten Gleichung ableiten. Doch ohne die visuelle Umsetzung sind die Resultate für uns nicht zugänglich. Aufgrund der Fülle der erzeugten Zeichen würde aber auch eine auf Ziffern basierende Präsentation keinen Erkenntnisgewinn bringen. D.h. nur ein Zeichenverständnis wie das eben skizzierte erlaubt die anschauliche Darstellung der Resultate.

interpretiert werden.<sup>74</sup> Die semiotische Modellierung transformiert den statischen Objektcharakter des formalen Zeichenverständnisses ins Dynamische und eröffnet neue Möglichkeiten für den Zeichenumgang, indem sich dynamisch verändernde Objekte und Prozeßabläufe semiotisch erzeugen lassen. Beispiele sind die Simulation der Verformungskräfte auf ein Objekt in einer Chrashsimulation (Abbildung 16) oder die Simulation von Turbulenzen in einer Strömung (Abbildung 18). Dabei ist die Dynamik durch das Verfahren determiniert, d.h. die zeitliche Entwicklung ergibt sich aus der zugrundeliegenden Differentialgleichung bzw. deren numerischer Simulation für ein definiertes Raum-Zeit-Raster. Die ikonische Präsentation der numerischen Resultate bietet die Basis für verschiedene Interpretationsmöglichkeiten, denn sie stellt uns die semiotisch modellierten Objekte und Prozesse in Raum und Zeit vor Augen.<sup>75</sup> Erst die Interpretation der Werte als Werte physikalischer Parameter, Größen oder Kräfte gibt den Partikeln einen extrasymbolischen Gehalt.

### 3. Neue Einsichten

#### 3.1 Semiotische Fülle

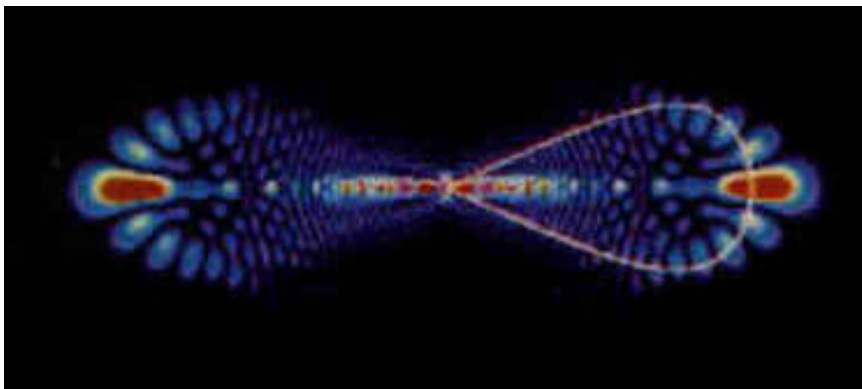


Abb. 23: Simulation der Elektronenverteilung eines Wasserstoffatoms. Jeder Farbpunkt stellt einen numerischen Wert dar, der auf Basis formalisierter Theorien und entsprechender Gleichungen berechnet wurde. Was zeigt diese Visualisierung? Bildet sie ein Wasserstoffatom ab? Oder symbolisiert sie die in den Gleichungen enthaltenen Strukturen, die nun anhand ihrer numerischen Konkretisierung in Raum und Zeit anschaulich werden?

Die numerische Simulation kann als ein Verfahren verstanden werden, das in der regelbasierten Produktion semiotischer Partikel besteht. Dabei wendet sich das Bemühen, mit Zeichen möglichst sparsam umzugehen, ins Gegenteil. Die semiotische Fülle der Simulation - anschaulich umgesetzt anhand

<sup>74</sup> Modellieren ist hier so zu verstehen, daß mit den semiotischen Partikeln raum-zeitliche Objekte oder Prozesse im Elektronischen erzeugt werden.

<sup>75</sup> „Natürlich könnte man die gewählte Farbcodierung rückübersetzen und Koordinaten Zahlenwerte zuordnen. Es wird aber klar, daß solche Form der Repräsentation bestimmter Ereignisse in aller Regel dazu führt, daß die Zusammenhänge, um die es geht, dann nicht mehr unmittelbar sichtbar wären.“ Hegselmann, R.: Die Chaostheorie - Eine Herausforderung für die Philosophie und Wissenschaftstheorie, 1995, S. 158/159. Es steht jedoch zu bezweifeln, ob aus Millionen von Zahlen die Zusammenhänge mittelbar erschließbar wären.

ihrer farbwertbasierten Visualisierung - erzeugt für den Betrachter die nötige Dichte, die typisch für ikonische Darstellungsformen ist.<sup>76</sup> Die Wirkung der semiotischen Fülle auf die anschauliche Modellierung von Objekten und Prozessen zeigt sich in der Verfeinerung des Berechnungsgitters in Abbildung 25 im Unterschied zu Abbildung 24. Ein ähnlicher Effekt war auch in Abbildung 20 zu sehen.

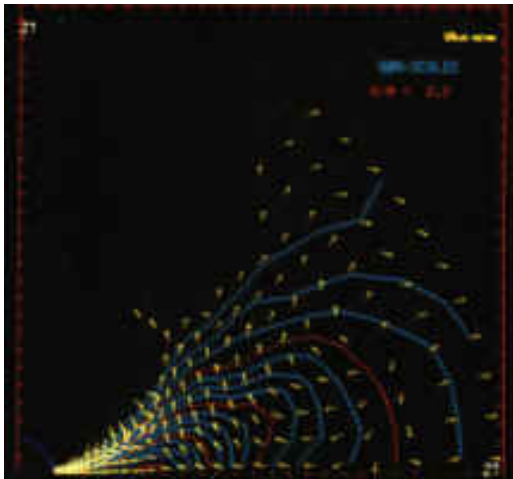


Abb. 24: Simulation eines Gasstroms in ein schwarzes Loch auf einem älteren Computer.

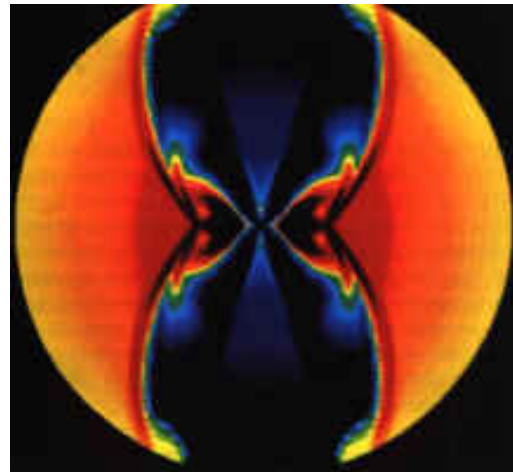


Abb. 25: Dieselbe Simulation mit einem erheblich verfeinerten Berechnungsgitter und für einen größeren Raumausschnitt auf einem 400mal schnelleren Computer.

Eine Struktur semiotisch zu modellieren bedeutet, auf Basis eines regelbasierten Erzeugungsmechanismus (z.B. partielle Differentialgleichung) eine Fülle digitaler Zeichen zu produzieren, die aufgrund ihres numerischen Wertes in Graustufen oder gemäß einer Farbskala in Farbwerte transformiert werden können. Die Gestalt ergibt sich dabei zum einen aus der Form des Berechnungsgitters, zum anderen aus der Datenstruktur. Die Objektivität resultiert aus der Plastizität der ikonischen Darstellungsweise und kann mit interaktiven, stereo 3D-Technologien soweit verstärkt werden, daß der Eindruck raumfüllender, beweglicher und manipulierbarer Objekte entsteht. Dabei wird die Interferenz von Wahrnehmungsraum und Realraum aufgehoben, da die raumfüllende Gestalt der Objekte ein rein simulativer Wahrnehmungseffekt ist. Prinzipiell sind semiotisch modellierte Objekte ausdehnungslose, unanschauliche Zeichenzustände. Je nach Präsentationstechnologie - Bildschirm, Stereo-3D-Equipment, CAVE-Anwendung - und Visualisierungssoftware entsteht aus der semiotischen Fülle eine anschauliche Darstellung. Wenn es zutreffend ist, wie argumentiert wurde, daß die formal erzeugten Partikel, aus welchen sich die Bilder zusammensetzen, keine extrasymbolische Bedeutung aufweisen,

<sup>76</sup> Vrgl. Goodman, 1995, S. 209ff



stellt sich folgende Frage: Was zeigen diese Bilder? Sicherlich sind es keine Abbildungen, die ähnlich wie Fotografien oder Tafelbilder Objekte und Sachverhalte repräsentieren.<sup>77</sup> Betrachtet man nur die Visualisierungen - beispielsweise in der Wetterforschung oder dem Molecular Modelling -, so könnte wohl der Eindruck entstehen, es handle sich um Abbildungen. Wenn „... *die Ergebnisse aufwendiger Berechnungen - scheinbar nichtssagende Zahlenfolgen - erst einmal in Computerbilder umgewandelt sind, kann man leicht sehen, daß sie wesentliche Merkmale vieler Naturerscheinungen richtig wiedergeben.*“<sup>78</sup> Wäre dies zutreffend, so hieße das, die Naturwissenschaften hätten einen Weg gefunden, die Dinge in ihrer Beschaffenheit zu entschlüsseln, und könnten sie nun mit semiotischen Mitteln imitieren, so daß beispielsweise die Wetterentwicklung „... *damit sehr genau unter die Lupe genommen werden [könnte], und die simulierte Wolke wäre wohl kaum noch von der wirklichen zu unterscheiden.*“<sup>79</sup> Doch die euphorische Sichtweise ist vereinfachend, wenn nicht gar falsch. Streng genommen transformieren die Partikel numerische Zusammenhänge, die sich aus der Simulation der Gleichungen ergeben, in farbliche Darstellungen. Die Geordnetheit numerischer Quantitäten wird dabei in eine farbliche Ordnung übersetzt, die entweder als Graustufen von hell bis dunkel - analog zu niedrig bis hoch - oder mit einer explizit vorgegebenen Farbabstufung skaliert ist. Was sich zeigt, ist die Strukturbildung, die sich durch den Erzeugungsprozeß der Zeichen, entsprechend den instruierten Operationen, ergibt. Sind keine Strukturen in den Farbzusammensetzungen identifizierbar, so spricht man von chaotischen Zuständen, denen jeglicher geordneter Zusammenhang fehlt. Das, was wir als Strukturen erkennen, sind farbbasierte Gestalten, die graphische oder ikonische Effekte aufweisen und dementsprechend Diagrammverläufe, Objekte oder Prozesse visuell erzeugen.<sup>80</sup> Zwar kann die Geometrie der Objekte durch die Strukturierung des Raum-Gitters geformt sein, doch trifft dies nur auf einen Teil der Simulationen und Visualisierungen zu.<sup>81</sup> Entscheidend ist, daß auf Basis der Farbgebung keine Strukturen abgebildet, sondern erzeugt werden. Und zwar durch eine rein formale Zeichenverwendung. Den Bildern liegen Formeln zugrunde, und es stellt sich die Frage, ob sie es sind, die jene abbildende Funkti-

<sup>77</sup> „So stehen am Ende der Computersimulation wieder Bilder - natürlich manipulierte, vereinfachte, zweckbestimmte Bilder: Sie sollen der Vorhersage vorher festgelegter Aspekte dienen, nicht eine umfassende Wahrheit widerspiegeln. ... Vergißt man das, nimmt man diese virtuellen Bilder als Wirklichkeit, ist man leicht täusch- und manipulierbar.“ Neunzert, 1995, S. 55

<sup>78</sup> Kaufmann, W./Smarr, L.: Simulierte Welten, 1995, S. 14

<sup>79</sup> Kaufmann/Smarr, 1995, S. 31. Möglich würde dies, da folgendes angenommen wird: „Ein feineres Berechnungsgitter resultiert in einer genaueren Simulation, da es das räumliche und zeitliche Kontinuum der exakten Lösung besser annähert.“ Kaufmann/Smarr, 1995, S. 30. Wie hingewiesen sind der Verfeinerung jedoch Grenzen gesetzt, die sich aus der computerinternen Genauigkeit der Zahlendarstellung und der sich daraus ergebenden Fehlerbildung bei der Quotientenbildung gleich großer Zahlen resultieren. Die naive Vorstellung läßt sich aber auch so kommentieren: „Erhalten wir mehr „Realismus und Authentizität“ durch erhöhte Komplexität? Jeder Mathematikstudent kennt aus der Numerikvorlesung eine Reihe von Beispielen, wo z.B. die Verkleinerung der Schrittlänge nicht notwendig zu größerer Genauigkeit, sondern unter gewissen Umständen zu numerischen Instabilitäten und völlig irreführenden Ergebnissen führt. ... Der Kinderglaube, daß komplexere Modelle realistischer sind, daß das Ausgangsobjekt desto genauer erfaßt wird, je größer die Anzahl der Freiheitsgrade ist, muß also abgelegt werden.“ Booß-Bavenbek, B./Pate, G.: Magischer Realismus und die Produktion von Komplexität, 1992, S. 241/242

<sup>80</sup> Als Unterscheidung zwischen graphischen und ikonischen Darstellungen wurde die Identität von Farbe und Form für erstere genannt.

<sup>81</sup> Die Form des Autos in einer Crashsimulation wäre ein solcher Fall. Doch die Form simulierter Moleküle ergibt sich beispielsweise aus den zugrundeliegenden Gleichungen und nicht aus der Gestalt des Raum-Gitters.

on aufweisen, die sich in den Bildern zeigt. Die Eigenschaft *abbildend* kann dabei sicherlich nicht im Sinne von *ikonisch abbildend* verstanden werden, denn Formeln stellen als formal-operative Zeichensysteme kein piktorales Symbolsystem dar. Sie können allenfalls abstrakte Abbilder schaffen, die in homomorpher Weise Bezug auf die Realität nehmen.<sup>82</sup>

Was wird mit den Gleichungen abgebildet? Eventuell gewisse strukturelle Zusammenhänge dessen, was den Wissenschaftlern als Untersuchungsobjekt entgegensteht. Die Abbildungsrelation würde sich demnach aus folgenden Analogien ergeben: In einem definierten Untersuchungsbereich werden strukturelle Zusammenhänge identifiziert und theoretisch beschrieben. Diese Beschreibungen werden formalisiert - beispielsweise als partielle Differentialgleichungen - und anschließend simuliert. Die in den Visualisierungen zum Vorschein kommenden Strukturen stehen über die Formalisierung in direkter Relation zu den strukturellen Zusammenhängen, die beobachtet und mit Theorien beschrieben wurden. Die Visualisierungen wären demnach Bilder der Theorien, und da die Theorien Darstellungen realer Sachverhalte sind - empirisch und experimentell fundiert sowie technisch anwendbar -, wären die Bilder Abbildungen der Realität.<sup>83</sup> Allerdings Abbildungen, deren Bezugnahme kategorial verschieden wäre von Abbildungen wie Fotografien oder Tafelbilder, da sie nicht ikonische Strukturen ikonisch darstellen, sondern formal erzeugte Strukturen farblich präsentieren. Die Abbildungsrelation bestünde darin, daß Wissenschaftler die Wirkprozesse verschiedener charakteristischer Größen raum-zeitlicher Ereignisse im Untersuchungsbereich identifizieren und mit entsprechenden Meßverfahren aufzeichnen. Dabei findet eine Transformation der Ereignisse in isolierte Zustandsgrößen und diskrete Meßwerte statt, die als empirische Datengrundlage dienen. Die Identifizierung mit den reellen Zahlen schafft eine einheitliche Referenzbasis für Meßwerte und numerische Werte. Auf diese Weise werden die Zustandsgrößen quantifiziert, d.h. auf geordnete Zeichen angewandt. Die beobachteten und mit Theorien beschriebenen Regelmäßigkeiten, in Form von Wirkungen der Zustandsgrößen aufeinander, geben eine Interpretation der Strukturverknüpfungen zwischen diesen und lassen sich als strukturelle Beziehungen zwischen Variablen formalisieren und funktionalisieren. Schließlich werden

---

<sup>82</sup> Dabei wird davon ausgegangen, daß algebraische Strukturen auf andere Strukturen abgebildet werden können.

<sup>83</sup> Computersimulationen setzen keinen empirischen Gehalt voraus. Die Schnittstelle zwischen ihnen und dem klassischen wissenschaftstheoretischen Modell liegt in dem uninterpretierten Kalkül  $K$ , das in Form mathematischer Gleichungssysteme die Grundlage der Simulationsmodelle bildet. Eine solche Simulation kann mit völlig beliebigen Werten der Parameter, Anfangs- und Randbedingungen Situationen erzeugen, die mit der Realität im Sinne einer empirischen Deutung nichts gemein haben. „*Computersimulationen müssen keine Naturgesetze berücksichtigen, sondern können fiktive physikalische Welten mit Alternativen und hypothetischen Gesetzen durchspielen. ... Insofern trägt der Computereinsatz zu einer erheblichen Erweiterung der experimentellen Wissenschaft bei.*“ Mainzer, K., 1995, S. 468. Das Erkenntnisinstrument Computersimulation knüpft im hypothetisch-deduktiven System der Wissenschaft genau an jener Stelle an, die sich durch die Formalisierung der Theorien auszeichnet und erweitert das klassische Modell an diesem Punkt. Während jedoch die empirische Deutung von Erklärungen, Prognosen und Retrodktionen durch Experimente beziehungsweise Messungen an einen vorgegebenen Phänomenbereich  $W_B$  (Untersuchungsbereich) gekoppelt ist, erzeugt die Visualisierung der Daten einen eigenen Phänomenbereich  $W_{Co}$ . Damit erweitert sie die klassischen Systematisierungen wissenschaftlicher Erkenntnis, sowohl für Prognosen als auch Erklärungen. Natürlich liegt es im Interesse der Wissenschaften durch Validierung den simulierten Phänomenbereich  $W_{Co}$  mit seinem korrespondierenden Realitätsausschnitt  $W_B$  zu korrelieren. Vgl. Carnap, R.: Einführung in die Philosophie der Naturwissenschaft, 1986

die Wirkungen der Beziehungen auf die Variablen (Parameter, Zustandsgrößen, Randbedingungen) als funktionale Verknüpfungen - Addition, Multiplikation oder komplexere Verknüpfungen - interpretiert und die so formulierten Gleichungen mit entsprechenden Lösungsverfahren für konkrete Werte der Parameter, Rand- und Anfangsbedingungen simuliert. Das Lösungsverhalten entfaltet die strukturellen Beziehungen zwischen den numerisch konkretisierten Variablen. Die relevanten Strukturverknüpfungen der Zustandsgrößen der beobachteten Ereignisse werden strukturell mit einem formalen Modell artikuliert und als Instruktionen algorithmisiert. Das bedeutet, die beobachteten Erscheinungen werden, als quantifizierbare und formalisierbare Wirkprozesse interpretiert, auf den Umgang mit Zeichen übertragen! Die Simulation beschreibt nicht die Ereignisse, sondern bildet die ereigniskonstituierenden Wirkungen semiotisch nach. Insofern die strukturelle Angleichung zwischen Beobachtung, theoretischer Beschreibung, formalem Modell und algorithmisierten Instruktionen (Erzeugungsmechanismus) zutreffend ist, kann von einer Abbildung struktureller Zusammenhänge gesprochen werden.

Wie läßt sich das prüfen? Anscheinend nur anhand des Lösungsverhaltens, das sich aufgrund der Fülle an Daten farblich visualisiert erschließt: also über einen Bildvergleich zwischen Visualisierung und Beobachtung?<sup>84</sup> Dabei wird davon ausgegangen, daß sich die Wirkung der charakteristischen Zustandsgrößen eines Systems für ein Ereignis - beispielsweise Temperatur, Dichte, Druck und Geschwindigkeit in einem strömungsdynamischen Prozeß<sup>85</sup> - formal-operativ formulieren läßt und in der simulierten Wirkung der Zustandsgrößen aufeinander zum Ausdruck kommt, also in deren Verrechnung auf Basis numerischer Werte. Die Wirkung im beobachteten Prozeß und die computersimulierte Wirkung wären demnach strukturell identisch. Und diese Wirkungen zeigen sich in den beobachtbaren

---

<sup>84</sup> Zur Veranschaulichung soll als Beispiel eine Wettersimulation nach Kaufmann/Smarr, 1995 beschrieben werden: In jahrelangen Beobachtungen wurden die gemeinsamen äußeren Merkmale von Gewitterwolken identifiziert und mit Hilfe verschiedener Meßinstrumente gelang es, Aufschluß über die inneren Prozesse zu erhalten. Die ermittelten Daten wurden in eine Karte der Regenintensität und Windgeschwindigkeit für sechs verschiedene Höhen eingetragen. Verschiedenfarbige Pfeile, befestigt auf einem Drahtgitter, symbolisierten die Intensität der Wasserdichte und ihre Richtung die Windgeschwindigkeit. Durch die simultane Beobachtung beider Größen war es möglich, zusammenhängende Strukturen zu entdecken: In den mittleren Regionen befand sich ein »Haken«, der bereits von früher bekannt war. Die sogenannte Daumenregel prognostiziert in der Nähe eines solchen Hakens mit hoher Wahrscheinlichkeit eine Windhose. Die Gründe hierfür konnten erst anhand der Radar-Daten und der Modelldarstellung ermittelt werden. *„Im hakenförmigen Regengebiet bildet sich nämlich ein riesiger Luftwirbel aus, der anfangs noch viel größer ist als jede mögliche Windhose. In der unteren Ebene ist ein großes niederschlagfreies Gebiet zu sehen (dunkelblau). Dort ändern die starken Winde bei Beginn des Regens abrupt ihre Richtung. Diese »Sturmfront« ist die Grenzlinie zwischen der absinkenden Kaltluft und der warmen Luft unterhalb des Unwetters.*“ Kaufmann/Smarr, 1994, S. 23/24. Der nächste Schritt bestand darin, ein Computerprogramm zu schreiben, das allein auf der Grundlage von Naturgesetzen die Entwicklung einer Wolke simulieren konnte. Die Gleichungen kompressibler Gasströme sowie die Phasengesetze von Wasser (Dampf, Flüssigkeit, Eis) für unterschiedliche Temperaturen und Drücke wurden berücksichtigt. Um die Entstehung eines Unwetters zu simulieren, berechnete der Computer das Verhalten von Wasser und Gas für verschiedene Variablen wie Luftdruck, Windgeschwindigkeit oder Temperatur. Die Bilder der Computersimulation zeigen Regengebiete, aufsteigende und absinkende Luftmassen. Pfeile veranschaulichen die waagrechteten Luftströmungen, die Sturmfront ist ebenfalls eingezeichnet und in der zweiten Höhenlage ist ein weiterer »Haken« erkennbar. Die simulierte Sturmfront und der Haken stimmten mit den Radarmessungen überein, ebenso die zeitliche Entwicklung des simulierten Unwetters. *„Damit war nachgewiesen worden, daß Computersimulationen in der Tat die wichtigsten Verhaltensmerkmale eines komplexen Gewittersystems wiedergeben können.*“ Kaufmann/Smarr, 1995, S. 26

<sup>85</sup> Die Eulergleichungen weisen als Differentialgleichung in Erhaltungsförm für reibungsfreie, nicht-wärmeleitende kompressible Gase vier unbekannt Zustandsgrößen auf: Dichte, Temperatur, x-Geschwindigkeit, y-Geschwindigkeit.

Strukturen wie im Falle der Strömungsdynamik in laminaren oder turbulenten Strömungen. Mit der numerischen Simulation scheint ein Instrument gefunden, das strukturelle Zusammenhänge, insofern diese formal darstellbar und algorithmisch erzeugbar sind, semiotisch nachbildet. Die Bilder wären die Belege dafür, daß die Theorien die Realität zutreffend beschreiben und daß die formal-operative Darstellungsweise das Wesen der Vorgänge strukturell erfassen können. Es scheint also gelungen, eine Brücke zwischen der Wahrnehmung von Ereignissen, ihrer theoretischen und formalen Beschreibung, hin zur semiotischen Modellierung und visuellen Darstellung zu schlagen. Doch das Problem besteht zum einen in der Abbildungsrelation zwischen der Struktur der empirisch identifizierten Wirkprozesse und deren formal-operativen Darstellung sowie numerischen Simulation, und zum anderen in der Validierung der Simulationen anhand des Bildvergleichs,<sup>86</sup> der mit der analytisch-deduktiven Vorgehensweise in den Wissenschaften bricht und allenfalls heuristische Funktion haben kann. Zudem werden oftmals Prozesse simuliert, die selbst unanschaulich sind, da sie sich zu schnell oder zu langsam vollziehen bzw. in mikro- oder makroskopische Bereiche führen.<sup>87</sup> In diesen Fällen kreiert die Simulation vollkommen neue Einsichten, und ein Bildvergleich läßt sich nicht vornehmen. Der Unsicherheitsfaktor ist beträchtlich, denn zum einen basiert die Simulation auf einem formal-operativen Modell, für das sich lediglich prognostisch belegen läßt, daß es die Wirkzusammenhänge adäquat widerspiegelt,<sup>88</sup> zum anderen stellt die Simulation kein rein analytisches Verfahren dar. Dadurch ist die Richtigkeit der Resultate nicht garantiert. Und schließlich sind die Resultate der Simulationsläufe nur singuläre Ergebnisse, die durch Induktionsschluß zu Aussagen verallgemeinert werden, die jedoch logisch nicht zwingend sind und dennoch als Erklärungen und Prognosen auf die Realität übertragen werden. „... die Anwendung der so gewonnenen Hypothesen auf die Wirklichkeit setzt voraus, daß die Homomorphie zwischen Modell und Realität intakt geblieben ist.“<sup>89</sup> Das bedeutet, daß die algorithmisierte Umsetzung der Gleichungen und deren Berechnung eine adäquate Transformation der formal-operativen Zeichenverwendung sowie der deduktiven Lösungsfindung sein muß. Doch auch dies läßt sich nicht mit Sicherheit belegen, da für nichtlineare Gleichungen oftmals keine Lösung bekannt ist, also auch kein deduktiv zulässiger Lösungsweg, und die Simulation auf heuristische Annahmen zurückgreifen muß, deren Zulässigkeit sich nicht beweisen läßt. Der experimentell-heuristische Charakter der Simulation samt des auf Ähnlichkeit basierenden Bildvergleichs mit allerlei Unzulänglichkeiten ist offensichtlich. Als Methode ist die Simulation schwächer als die Theorie, aufgrund ihres hypothetisch-deduktiven Charakters, und das Experiment, aufgrund seiner empirisch fundierten Datenbasis.

---

<sup>86</sup> Die Validierung besteht neben der Beurteilung der sichtbaren Struktureffekte in der Prüfung der Konsistenz des Programms sowie des Simulationsmodells anhand geeigneter Testläufe (Benchmark Tests) als auch in der Abstimmung der Anfangsdaten mit der experimentellen Datenbasis.

<sup>87</sup> Z.B. subatomare und atomare oder astrophysische Simulationen.

<sup>88</sup> Doch für komplexe Modelle ist die Simulation die einzige Möglichkeit Prognosen zu berechnen.

<sup>89</sup> Mückl, W.: Simulation als methodisches Problem, 1981, 203.

Als heuristisch verstandenes Instrument eröffnet sie jedoch neue Einsichten, und zwar deshalb, weil die Phänomene aufgrund der Visualisierung anschaulich werden.<sup>90</sup>

### 3.3 Simulation als neue Zeichenverwendung

Die Resultate numerischer Simulation, so wurde argumentiert, symbolisieren die Struktur ihres Erzeugungsmechanismus, die Form ihres Symbolgehalts ist operativ erzeugt. Die semiotische Fülle der generierten digitalen Zeichen stellt die Grundlage der Dichte der Visualisierung dar, die charakteristisch für ikonische Darstellungen ist. Der Zeichenumgang der Simulation verwendet die Symbole bzw. deren unanschauliche Repräsentanten als formbare Objekte der Zeichenmanipulation und modelliert mit diesen formal-operativ formulierte Wirkprozesse. Die Extension der Symbole als digitale Zeichen und als Farbwerte wandelt die in Zahlenkolonnen verschlüsselten Strukturen in visuell wahrnehmbare Strukturen um. Die Verschränkung der Zeichen mit bislang symboluntypischen Formen der Bezugnahme erlaubt es, die Zeichen - in diesem Falle die Bilder - in neuer Weise für Erkenntnisse zu nutzen. Diese Bilder stellen keine Abbildungen ikonischer Vorbilder dar, sondern geben Einsichten in die berechneten Wirkungen der Symbole aufeinander. Sie geben Einsichten in semiotisch modellierte Welten. Allerdings sind es abstrakte Bilder, die einer extrasymbolischen Interpretation bedürfen. Da formale Zeichensysteme unterschiedlich interpretiert werden können, lassen sich dieselben Formeln und Simulationen für die verschiedensten Gegenstandsbereiche verwenden und bringen eine neue Strukturierung der Wissenschaften mit sich, die sich quer zu den Disziplinen etabliert.<sup>91</sup> Dies ist eine Folge des Mangels eines extrasymbolischen Bezugs der Simulationen und Visualisierungen sowie deren freier Interpretierbarkeit und auch der funktionalen Sichtweise der Wissenschaften, die nicht auf die qualitative Beschreibung der Ereignisse gerichtet ist, sondern auf die Erfassung funktionaler Zusammenhänge, deren Wirkung die Ereignisse erzeugen.<sup>92</sup> Mit der Simulation und deren Visualisierung

---

<sup>90</sup> „Heuristisches Denken ist nicht ein letztes und strenges, sondern vorläufiges und plausibles Denken, dessen Zweck es ist, die Lösung der vorliegenden Aufgabe zu entdecken. ... Heuristisches Denken beruht oft auf Induktion oder Analogie.“ Polya, G.: Schule des Denkens. Vom Lösen mathematischer Probleme, 1949, S. 119

<sup>91</sup> „Die Universalität der Computer-Simulationen ist es, die zu denken gibt. John McLeod übertrug schon 1960 Simulationslösungen aus der Raketenleittechnik auf die Konstruktion einer Herz-Lungen-Maschine, später wandte er sich der Simulation sozialer Systeme zu. Es zeigt sich, daß bestimmte Methoden der Modellbildung und Simulation auf eine Vielzahl von Problemen zu passen scheinen, die dadurch zu „Problemklassen“ werden.“ Randow, G.v.: Computer-Simulation. Bild statt Welt, 1990, S. 122. Dadurch wird eine modulare Art der Theorienbildung möglich, „...derzufolge sich Stücke aus Theorien verschiedener Disziplinen herauslösen lassen, um sie als Bausteine einer neuen Theorie zu verwenden, wobei sich in den neuen Kombinationen deren Bedeutung wandelt“ Lüdtke, K.: Interdisziplinarität und Wissensentwicklung, 1995, S. 112. Allerdings ist diese modulare Art der Theorienbildung nur durch die Mathematisierung der entsprechenden Bereiche möglich und durch die freie Interpretierbarkeit formal-operativer Modelle. Dementsprechend läßt sich auch die Simulation relativ frei interpretieren. Beispielsweise lassen sich mit den Navier-Stokes-Gleichungen der Strömungsdynamik die Stoßwellen von Jets (Abbildung 19), die Strömungen in einer Methanflamme (Abbildung 18) oder die Blutströmung in einer Herzklappe (Abbildung 17) simulieren.

<sup>92</sup> „Statt die Phänomene qualitativ zu beschreiben, werden sie in der Physik gemessen, also metrisch beschrieben.“ Tetens, H.: Modelle in der Physik, 1986, S. 171. Semiotisch gedeutet bedeutet dies, daß die Phänomene sich in Folgen diskreter Zeichen darstellen lassen, die einer formalisierbaren Ordnung unterliegen und somit berechenbar werden.

wird die formal-operative Zeichenverwendung - in ihrer algorithmisierten Umsetzung angewandt auf numerische Werte - anschaulich. Die numerische Simulation, als ein spezifisches Organisationsprinzip digitaler Zeichen, ist das Resultat der Ausführung mathematischer Strukturen auf mechanisierten, formbaren Symbolen, die sich aus der Fortführung der Schrift ins Dynamische ergeben. Die Simulation kann daher als eine Schriftform verstanden werden, die der Formulierung von Objekten und nicht von Begriffen dient. Wie läßt sich aber eine Schrift verwenden, die statt der Begriffe die Objekte anzeigt? Mit dieser Schrift würde es überflüssig werden, notationale Zeichen einzuführen, die das Wissen eindeutig indexieren, wie es Francis Bacon mit seinem *Abecedarium Novum Naturae* vorschwebte, denn die Objekte selbst werden sichtbar.<sup>93</sup> Darunter ist nicht die bildhafte Darstellung des entsprechenden Gegenstands oder Sachverhalts eines Begriffs zu verstehen, wie dies Otto Neurath mit seiner ISOTYPE zum Ziel hatte.<sup>94</sup> Es ist die direkte Erzeugung eines Gegenstands oder Sachverhalts gemeint, der freilich rein symbolischer Natur ist und als formal-operatives Ereignis aufgefaßt werden kann: als Zusammenwirken verschiedener Zustandsgrößen und Parameter unter definierten Randbedingungen, wobei sich die Wirkprozesse mit Operationszeichen und die Zustandsgrößen und Parameter mit Variablen formalisieren lassen. Die qualitative Dimension der Objekte und Sachverhalte, die in der Visualisierung zum Ausdruck kommt, wird mit einer formalen, quantifizierbaren und operationalen Textur erzeugt. Da diese Textur jedoch frei interpretierbar ist, bedarf es der operativen und quantitativen Verschlüsselung der konstitutiven Eigenschaften des Objekts,<sup>95</sup> allerdings nur insoweit, als durch die Simulation raum-zeitliche Eigenschaften sichtbar werden. Ob ein Objekt dann als Stoßwelle oder Strömung, als Wolke oder Molekül aufgefaßt wird, hängt von der extrasymbolischen Interpretation ab. Diese Darstellungsweise ermöglicht es, neben der üblichen Verwendung von Schrift zur Beschreibung oder Notierung von Objekten und Sachverhalten, diese semiotisch zu modellieren. Die Simulation stellt insofern eine *Objektschrift* dar.

---

<sup>93</sup> Aufgrund ihrer digitalen Kodierung sind die semiotischen Objekte eindeutig definiert.

<sup>94</sup> Vrgl. Eco, 1997, S. 218ff sowie Neurath, 1991

<sup>95</sup> Beispielsweise geht die Begrenzung eines Objekts - seine Form im zwei- oder dreidimensionalen - als Input in die Randbedingungen ein.

## 4. Wissenschaftliche Bilder

### 4.1 Verschränkung von Bild und Theorie

Die numerische Simulation, als Objektschrift verstanden, erzeugt mit ihrer Visualisierung abstrakte Bilder objekt- und prozeßartiger Strukturen, die Einsichten in ihren formal-operativen Erzeugungsmechanismus geben. Ohne einen Hinweis auf den extrasymbolischen Kontext der simulierten Gleichungen lassen sich die Bilder nicht deuten, denn es handelt sich nicht um ikonische Abbildungen visuell wahrnehmbarer Vorlagen, die aufgrund von Ähnlichkeit selbsterklärend wären. Doch die Verwendung der Simulationsbilder für Prognosen oder Erklärungen erschüttert das Bild von den Wissenschaften als theorielastiges Unterfangen. Dabei stellt die Nutzung der Simulationsbilder kein Novum dar, denn Bilder werden seit jeher in den Wissenschaften verwendet: Als Erklärungs- und Demonstrationshilfen, zur Illustration theoretischer Abhandlungen oder zur Veranschaulichung abstrakter Zusammenhänge. Untersucht man die wissenschaftlichen Bilder genauer, stellt man fest, daß sie nicht auf unmittelbare Einsichtigkeit ausgerichtet sind, sondern daß es eines umfangreichen wissenschaftlichen Hintergrundwissens bedarf, um sie verstehen zu können. Zudem zeigt sich, daß der zunehmende Einsatz technischer Geräte in unserem Jahrhundert zur Abstraktion der Bildinhalte führt: Während auf Zeichnungen früherer Jahrhunderte oftmals der Experimentator zu sehen ist, ist das für heutige Darstellungen von Experimenten unvorstellbar. Die Neutralität des Beobachters als wichtige Forderung wissenschaftlichen Handelns abstrahiert den einzelnen Forscher als Quelle der Wissensgewinnung. Mit Computern wird es gar möglich, weite Wissensbereiche mit Hilfe von Expertensystemen zu automatisieren. Durch diese Abstraktion entschwindet der situationsbezogene Kontext aus den Bildern. Übrig bleiben reine Farbe, Struktur und Form.<sup>96</sup>

Unabhängig vom Abstraktionsgrad und technischen Aufwand, dienen und dienen wissenschaftliche Bilder dazu, raumzeitliche Ereignisse festzuhalten, sie zu interpretieren und im Rahmen einer Publikation zu vermitteln. Die Verwendung von Bildern kann sich dabei innerhalb einer wissenschaftlichen Untersuchung wandeln: Vom primären Beobachtungsmaterial, zum Analysematerial für Klassifizierung und Begriffsbildung und schließlich zum Illustrations- oder Demonstrationmaterial zur Vermittlung und Publikation des gewonnenen Wissens. Im Laufe dieses Wandels werden die Bilder mit zusätzlichen Informationen *angereichert*, die aus dem wissenschaftlichen Reflexionsprozeß resultieren.

---

<sup>96</sup> Doch auch ohne die Bedeutungsinhalte im wissenschaftlichen Kontext nachvollziehen zu können, macht die Ästhetik wissenschaftlicher Bilder, die in den späten 80er und frühen 90er Jahren mit der Dokumentation nichtlinearer Dynamiken und fraktaler Geometrien ihren Höhepunkt fand, diese für eine breite Öffentlichkeit interessant. Heute sind Computersimulationen und deren Visualisierung oder spektakuläre Meßbilder alltägliche Erscheinungen in Zeitschriften, Fernsehbeiträgen oder im Internet.

Numerierungen, Farbwertkodierungen, Beschreibungen und mehr ermöglichen es, die Bildinhalte mit Hilfe verschiedener Verweisungssysteme mit den Theorien zu verknüpfen. Bildinhalte und theorieorientierte Verweisungssysteme wie Beschriftungen, Symbole, Legenden verschränken sich zunehmend zu einem komplexen wissenschaftlichen Bild.

#### 4.2 Klassifizierung wissenschaftlicher Bilder

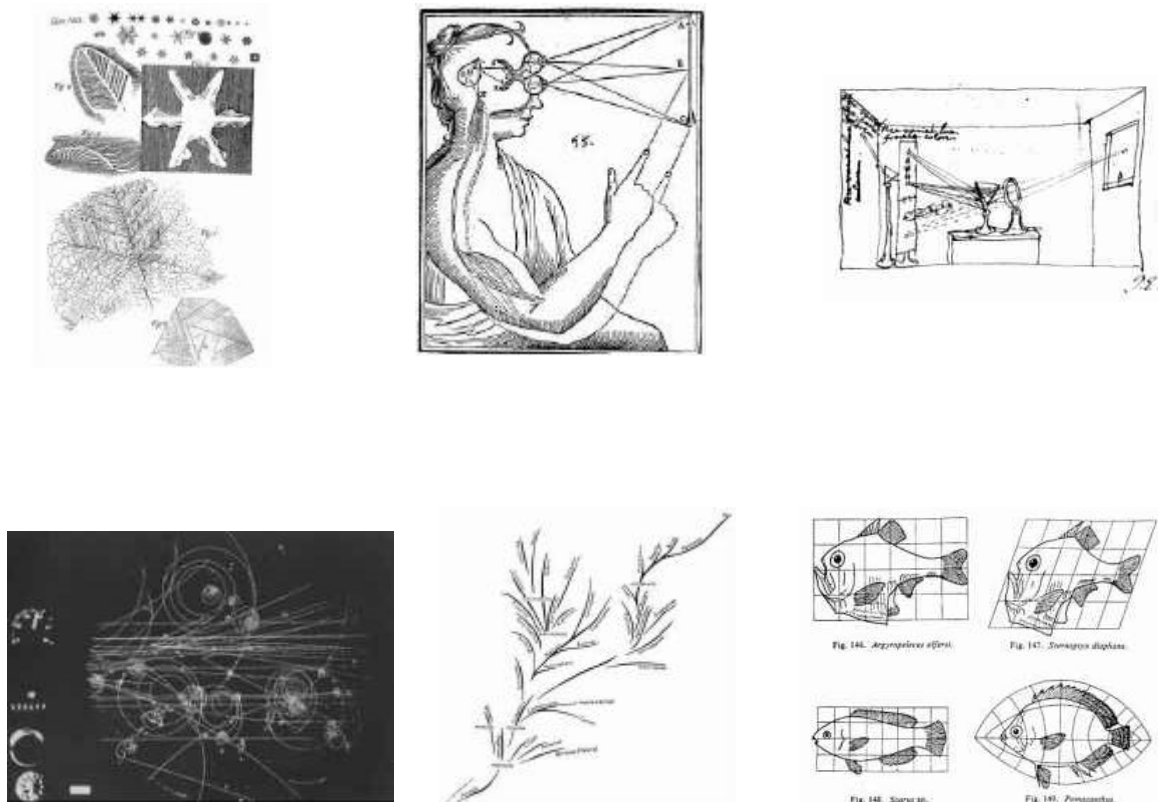


Abb. 26 - 31: Beobachtung: Mikroskopische Untersuchungen von Scheeflocken und Eisblumen von Robert Hooke, 1665. Induktion: Der Sehvorgang von René Descartes, 1664. Methodik: Versuche mit Licht und Farbe von Isaac Newton, 1665-66/1704. Selbstveranschaulichung: Teilchenspuren in einer Blaskammer des CERN, 1970. Klassifizierung: Skizze des Stammbaums von Charles Darwin, 1870. Begriffsbildung: Morphologie von Sir D'Arcy W. Thompson, 1917.<sup>97</sup>

<sup>97</sup> Die Verwendung der Bilder in den Wissenschaften lässt sich systematisieren, und Harry Robin hat eine entsprechende Einteilung für wissenschaftliche Illustrationen vorgeschlagen: Beobachtung, Induktion, Methodik, Selbstveranschaulichung, Klassifizierung, Begriffsbildung: Die *Beobachtung* (Abb. 26) gibt möglichst originalgetreu das wieder, was beobachtet wurde. Zeichnungen von Pflanzen wie der *Vallisneria spiralis* (Erasmus Darwin 1789) und Tieren wie der Muskulatur des Pferdes (Carlo Ruini ca. 1598), von Schichten des Gehirns (Johannes Dryander 1537) oder geologischen Schnitten (William H. Holmes 1879) sind kunstvolle Beispiele. Die *Induktion* (Abb. 27) ergibt sich aus dem Bildmaterial in Form von Deutungen oder Erklärungen. Das Bild dient zur Demonstration von Vorgängen, wie sie vom Verfasser vorgestellt werden, so beispielsweise bezüglich des Wasserkreislaufs (Stephen Switzer 1729), der Entstehung des Regenbogens (René Descartes 1637), der Befruchtung von Blumen (Charles Darwin 1862) oder der Geometrie der Nautiluschale (Henry Moseley 1838). Die *Methodik* (Abb. 28) erlaubt es, kausale Zusammenhänge bildlich zu belegen oder widerlegen und Konstruktionsanweisungen für experimentelle Aufbauten zu leisten wie zur Beobachtung von Sonnenflecken (Christoph Scheiner 1611), zum Luftdruck (Robert Boyle 1680), zur Verarbeitung von Quecksilbererzen (Lazarus Ercker 1575) oder zu elektrostatistischen Versuchen (William Watson 1749). *Selbstveranschaulichung* (Abb. 29) ist gegeben, wenn Naturvorgänge Spuren hinterlassen, die - bildlich eingefangen - von den Wissenschaftlern entschlüsselt werden. Spuren von Vorgängen zeigen sich im Querschnitt durch den Stamm einer Douglasfichte (Andrew Douglas um 1920), in Klangfiguren (Ernst Chladni 1785), Welleninterferenzen (Ernst Heinrich Weber 1825), Röntgenaufnahmen der Blutgefäße der Hand (Wilhelm Röntgen 1895-96), Stroboskopaufnahmen einer fliegenden Gewehrkugel (Harold Edgerton 1973) oder in Tomogrammen der Funktion der linken Gehirnhälfte (Michael Posner 1987). *Klassifizierungen* (Abb. 30)



Die von Harry Robbin vorgeschlagene Systematik (Abbildung 26 bis 31) dokumentiert die unterschiedlichen Bildverwendungen, die sich aus der wissenschaftlichen Arbeitsweise und Intention - Darstellen, Erklären und Demonstrieren, Bestätigen und Widerlegen, Nachvollziehen natürlicher Vorgänge, Klassifizieren, Bilden von Begriffen - ergeben. Die Beispiele, vor allem im Bereich der Selbstveranschaulichung, deuten zudem an, daß sich mit wachsendem Technikeinsatz eine Entwicklung vollzieht, die neben der wissenschaftlichen Illustration bildgebende und bildgenerierende Verfahren hervorbringt. Der Begriff *Bildgebende Verfahren* bezeichnet Meßverfahren mit computergestützter Bildrekonstruktion, der Begriff der *Bildgenerierenden Verfahren* die Visualisierung der numerischen Simulation. Als ein Unterscheidungskriterium kann dabei gelten, daß bildgebende Verfahren als Beobachtungs- und Meßverfahren am Modell der Abbildung und Erfassung natürlicher Vorgänge in Echtzeit orientiert sind. Bei Robin entsprechen sie der Selbstveranschaulichung im Sinne einer wissenschaftlichen Tätigkeit als Entdecken gegebener, visuell oder meßtechnisch erfaßbarer und ikonisch rekonstruierbarer, realer Zusammenhänge. Die zu messenden Objekte wie auch der menschliche Körper werden als Signalerzeuger verstanden bzw. als geeignet, Strahlenfelder zu modulieren. Meßinstrumente detektieren die Signale nach vorgegebenen Bedingungen, indem sie für bestimmte Signalquellen und Maßverhältnisse (Parameter) spezifiziert werden. Die Meßresultate (Parameterwerte) lassen sich mit Hilfe unterschiedlicher Ausgabemedien aufzeichnen. Die Umwandlung der Meßdaten kann je nach Meßvorrichtung als konventionell vereinbarte Abbildfunktion durch eine Skaleneinteilung oder durch die Umwandlung der Meßwerte in Graphen erfolgen. Im Falle der bildgebenden Verfahren wird die Bildrekonstruktion durch mathematische Algorithmen unterstützt, deren Resultate Grauton- oder Farbtonverteilungen sind. Für menschliche Sinnesorgane nicht erfaßbare Wahrnehmungsbereiche rücken so in den Bereich des Sichtbaren.<sup>98</sup>

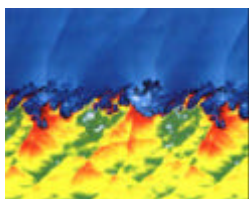
Demgegenüber sind bildgenerierende Verfahren ikonisch präsentierte Exemplifikationen formaloperativer Zeichenverwendungen. Als deren Vorläufer ließen sich eventuell die von Robin als Begriffsbildung spezifizierten Bilder anführen, die Gedankenexperimente veranschaulichen. Charakteris-

---

dienen der Einteilung von Beobachtungen in ein System. So beispielsweise zur Systematik der Ameisen (Pierre-André Latreille 1802), zur Klassifizierung von Pflanzen nach geschlechtlichen Merkmalen (Karl von Linné 1737), zu den Chromosomen eines gesunden Mannes (J. Hin Tijjo und Albert Levan 1956) oder zur Tafel der Elemente (John Dalton 1808). Schließlich erlaubt die *Begriffsbildung* (Abb. 31) Gedankenexperimente zu veranschaulichen, sei es zu den Sphaera Mundi (John von Holywood 1220), dem Sonnensystem (Nicholas Koperinkus 1543), der Weltharmonik (Johannes Kepler 1619), der Substanz des Raumes (René Descartes 1640) oder der Entstehung von Kontinenten und Ozeanen (Alfred Wegener 1915). Vrgl. Robin, H.: Die wissenschaftliche Illustration. Von der Höhlenmalerei zur Computergraphik, 1992

<sup>98</sup> Die Röntgen-Computertomographie CT erlaubt es, überlagerungsfreie Schichtbilder zu erzeugen. Rekonstruktionsalgorithmen errechnen aus den einzelnen Meßwerten das Bild. Das Meßsystem, bestehend aus dem Detektor und der Meßwertfassungselektronik, setzt die durch das Objekt geschwächte Röntgenstrahlung in computergerechte Meßsignale um, aus welchen anschließend das Bild rekonstruiert wird. Dies geschieht, indem die Verteilung der Schwächungskoeffizienten errechnet und auf Basis der Hounsfield-Skala interpretiert wird. Die Übertragung der Hounsfield-Skala (-1000 bis 3000) in 4000 Graustufen ergibt das CT-Bild. Für die CT-Bildrekonstruktion nimmt man an, daß das Objekt aus endlich vielen quadratischen Zellen besteht (Pixeln), die einer gleich großen Zahl von Meßdaten entsprechen. Vrgl. Bley, H.: Compendium Medizin und Technik, 1994, S. 320ff; Morneburg, H. (Hg.): Bildgebende Verfahren für die medizinische Diagnostik, 1995, S. 44ff

tisch ist die Nutzung dieser Bilder zur Veranschaulichung abstrakter Zusammenhänge theoretischer Annahmen, die zumeist einem heuristischen Gebrauch dienen. Während jedoch Gedankenexperimente subjektive Darstellungen präsentieren, die im Nachhinein theoretisch fundiert und experimentell bestätigt oder widerlegt werden müssen, stellen Visualisierungen eine neue Form der Sichtbarmachung von Theorien dar, die erst mit der Mathematisierung der Theorien und der Entwicklung der Computer möglich wurde. Sieht man nur die Bilder, so ist ohne entsprechendes Hintergrundwissen oft nicht entscheidbar, ob es sich um das Resultat eines Bildgebenden oder Bildgenerierenden Verfahrens handelt. Die Ästhetik beider Verfahren ist aufgrund der genutzten Computervisualistik ähnlich. Entscheidend ist jedoch, daß Bildgebende Verfahren indizierte Meßwerte anschaulich darstellen, während Bildgenerierende Verfahren die visualisierten Daten auf Basis formalisierter Theorien produzieren. Die Spezialisierung meßtechnischer Geräte auf spezifische sensorische Aufgaben erlaubt es, die Resultate als Datenmaterial der Anfangswerte, der Parameter und Randbedingungen zu verwenden.



Instabilitäten auf Basis der Euler-Gleichungen

Für wissenschaftliche Illustrationen als auch Bildgebende, aber mehr noch für Bildgenerierende Verfahren ist typisch, daß sie ohne entsprechendes theoretisches oder experimentelles Hintergrundwissen nicht verstehbar und somit nicht unmittelbar einsichtig sind. Zwar mag es durchaus möglich sein, intuitiv die dargestellten Objekte und Vorgänge zu erkennen, doch die wissenschaftliche Intention, einen bestimmten kausalen, strukturellen oder klassifizierenden Zusammenhang zu erfassen, ist auf die Theorien bzw. auf die fachliche Ausbildung und die Erfahrung im Umgang mit den Bildern angewiesen. Ein Laie wird auf einem CT-Bild kaum ein entsprechendes Krankensbild erkennen, noch die ästhetische Linienführungen der Zerfallsspuren von Teilchen auf Blasenkommer-Bildern deuten können. Doch auch für Fachwissenschaftler ist es unmöglich, ohne Angaben zur Meßmethode, zum zugrundeliegenden Gleichungssystem einer Simulation oder zu deren zeitlicher und räumlicher Auflösung eine fundierte Aussage zu einem Bildresultat zu geben. In dem Maße, wie Theorien nicht nur zur Erklärung ikonisch dargestellter Zusammenhänge dienen, sondern Basis der Bilder selbst sind, wird die Mittelbarkeit noch deutlicher.<sup>99</sup> Denn auch wenn der Bildinhalt intuitiv einsichtig wäre und einen scheinbar realistischen Zusammenhang wiedergeben würde, es handelt sich nur um die Visualisierung einer formalisierten und simulierten Theorie. So zeigt Abbildung 32 keinen sturmgepeitschten See, sondern die Visualisierung der Euler-Gleichungen für spezifische Parameterwerte, Anfangs- und Randbedingungen. Zur Deutung dieses Bildes ist die

<sup>99</sup> Das führt zur Forderung nach Offenlegung der Bedingungen der Bilderzeugung für eine intersubjektiv nachvollziehbare Nutzung von Bildern im wissenschaftlichen Diskurs. Dies geschieht in der Regel in der theoretischen Beschreibung zum Bild, aber auch durch Informationen, mit welchen das Bild *angereichert* wird (ideographische Zeichen, Farbkodierungen, Legenden).

Kennzeichnung des Gleichungssystems und der numerischen Bedingungen der Simulation notwendig, aber auch die extrasymbolische Interpretation, daß es sich um das Strömungsverhalten zweier Flüssigkeiten handelt. *Daß der Supercomputer solche vertrauten Formen aus den mathematischen Formulierungen der Naturgesetze errechnen kann, ist für die Wissenschaftler eine wichtige Bestätigung der Richtigkeit ihres Ansatzes.*<sup>100</sup>

#### 4.3 Bildvermittelte Erkenntnis

Welche Erkenntnisse resultieren also aus den berechneten Bildern? Diese Frage ist auf zweierlei Weise zu verstehen. Zum einen als allgemein philosophische Frage nach der typischen Darstellungsweise von Bildern. Zum anderen als spezifische Frage nach der Besonderheit der Darstellungsart computerbasierter Visualisierungen. Das bildtheoretische Feld ist von unterschiedlichen Standpunkten gekennzeichnet, und vor allem zwischen Vertretern einer Ähnlichkeitsrelation versus einer semiotisch motivierten Denotationsrelation ist die Diskussion entbrannt.<sup>101</sup> Einig ist man sich darüber, Bilder als *Bilder von etwas* zu verstehen und in diesem Sinne als Repräsentationen. Gemeinhin wird auf die Frage, wie Bilder abbilden, geantwortet: Sie sind den abgebildeten Objekten ähnlich. Doch: „Die naivste Auffassung von Repräsentation“, vermerkt Nelson Goodman, *könnte man vielleicht folgendermaßen charakterisieren: »A repräsentiert B dann und nur dann, wenn A B deutlich ähnlich ist« beziehungsweise »A repräsentiert B in dem Maße in dem A B ähnelt«.*<sup>102</sup> Da Ähnlichkeit als natürliche, subjektunabhängige sowie symmetrische Relation gilt, harmonisiert sie nicht hinreichend mit dem Repräsentationsbegriff, wie wir ihn intuitiv verstehen. Denn ein Bild repräsentiert eine Person, aber die Person repräsentiert nicht das Bild. Zudem führt die Tatsache, daß es abstrakte oder fiktive Bilder gibt, die ohne auf etwas zu referieren, dem sie ähnlich wären, für uns dennoch als Bilder fungieren, zu Problemen.<sup>103</sup> Folgt man Goodman, so sind darüber hinaus Bilder Bildern ähnlicher, als den dargestellten Objekten oder Ereignissen. Das eigentliche Problem einer Ähnlichkeitsrelation liegt jedoch in der Problematik, Abgrenzungskriterien relevanter Eigenschaften für Ähnlichkeit angeben zu können.

<sup>100</sup> Kaufmann/Smarr, 1994, S. 22

<sup>101</sup> Vgl. Scholz, O.: Bild, Darstellung, Zeichen, 1991 sowie Boehm, G. (Hg.): Was ist ein Bild?, 1995; Gombrich, E./Hochberg, J./Black, M.: Kunst, Wahrnehmung und Wirklichkeit, 1977; Gombrich, E.: Bild und Auge, 1984; McDonell, N.: Are pictures unavoidable specific?; Hoffmann, U. et al. (Hg.): LogIcons, 1997; Jonas: Der Adel des Sehens 1954; Sonesson, G.: Pictural Concepts 1989; Sebeok, Th./Umiker-Sebeok, J. (Hg.): Advances in Visual Semiotics, 1995; Konersmann, R. (Hg.): Kritik des Sehens 1997; Mitchell, W.J.T.: Iconology: Image, Text, Ideology, 1986; Muckenhaupt, M.: Text und Bild, 1986; Schier, F.: Deeper into Pictures., 1986; Recki, B./Wiesing, L. (Hg.): Bild und Reflexion, 1997; Wiesing, L.: Die Sichtbarkeit des Bildes, 1997; Steinbrenner, J./Winko, U.: Die Philosophie der Bilder, 1997; Lopes, D.: Understanding Pictures, 1996

<sup>102</sup> Goodman, 1995, S. 15. Auch Umberto Eco kritisiert den Ähnlichkeitsbegriff. Vgl. Eco, U.: Einführung in die Semiotik, 1968

<sup>103</sup> Der Ähnlichkeitsbegriff ist vielfältig kritisierbar. Oliver Scholz stellt fest: „Sowohl der Fall der (im Sachbezug) leeren Bilder, als auch der Fall der Bilder von Zukünftigem deuten darauf hin, daß das Bestehen einer bestimmten Beziehung zu einem Dargestellten Gegenstand nicht notwendig für die Bildbewandtnis ist. Es kann ein Bild sein, bevor oder ohne daß es eine Ähnlichkeitsbeziehung zu einem Gegenstand gibt.“ Scholz, 1991, S. 33

Eine Bestimmung folgender Art: *A ist B ähnlich, wenn A mit B folgende Eigenschaften gemeinsam hat* führt zu analogen Problemen wie für die zahlreichen Versuche, Umfangs- und Abgrenzungsbestimmungen von Begriffen zu geben.<sup>104</sup> Denn konstitutive und kontingente Eigenschaften zu unterscheiden ist weder allgemeinverbindlich, kontextinvariant noch subjektunabhängig. Die Forderung, alle Eigenschaften anzugeben, ist nicht durchführbar, und die nach mindestens einer Eigenschaft ist trivial. Zudem muß mindestens eine konstitutive Eigenschaft verifizierbar sein, die eine Unterscheidung zwischen Bild und Abgebildetem erlaubt, um überhaupt sinnvoll von Bildern sprechen zu können.<sup>105</sup> Bemühungen, Ähnlichkeit durch Isomorphie zu ersetzen, scheitern an der unverhältnismäßig engen Beschränkung der aus der Logik entlehnten Relation. Denn entweder werden Metakriterien in Relation gesetzt, die zur Bestimmung von Bildlichkeit wenig beitragen, oder es bedarf der Individuierbarkeit von Bildstrukturen. Doch dazu müßten die Bilder oder Teile davon eindeutig differenzierbar und im Rahmen der Isomorphie reproduzierbar sein, analog Alphabeten, Notationen oder geometrischen Figuren. Und dies ist nicht der Fall. Schließlich ist auch Isomorphie eine symmetrische Relation und so für Repräsentations nicht hinreichend. Andere Bildtheorien gehen von einer Ähnlichkeitsbeziehung zwischen sinnlicher Wahrnehmung des Bildes und sinnlicher Wahrnehmung des abgebildeten Objektes in Form einer ähnlichen Perzeption aus.<sup>106</sup> Aber auch hier wäre einzuwenden, daß entweder nicht mehr zwischen Bild und Abgebildetem unterschieden werden kann, und wenn doch, die Perzeption beider signifikant differenziert sein muß. All diese Argumentationen basieren auf der Annahme, Bilder seien *Abbildungen von etwas*. Doch sollte erstens der Abbildungscharakter und zweitens das *Etwas* hinterfragt werden, denn spätestens mit der abstrakten Malerei, Meßbildern und computergenerierten Visualisierungen ist der Repräsentationsbegriff zu spezifizieren.<sup>107</sup> Vor allem die unterschiedlichen Schwerpunkte in der Funktionalität der Bilder scheinen in diesem Zusammenhang entscheidend zu

<sup>104</sup> Wie beispielsweise für Abbildtheorien der Sprache sowie die strukturellen Kennzeichnungen von Begriffen und Objekten. In allen Fällen geht es um eine eindeutig spezifizierte Bezugnahme, die letztendlich aufgrund der Vagheit der natürlichsprachlichen Begriffe und visueller Objekte nicht gelingen kann. Dies läßt auch im Falle der Bilder nicht hoffen. Eine analytische Definition von Bezugnahme - gelänge sie - hätte einen Reduktionismus zur Folge, der letztendlich keinen Erklärungswert für das zu untersuchende Phänomen (hier die Bildlichkeit) aufweisen würde. Vgl. Wittgenstein, W.: *Tractatus logico-philosophicus*, 1963; Carnap, R.: *Logischer Aufbau der Welt*, 1961

<sup>105</sup> Wie leicht wir uns diesbezüglich täuschen lassen, hat uns René Magritte bereits 1948 mit „Human Condition“ und 1928 mit „Ceci n’est pas une pipe“ vor Augen geführt. Die Illusion der *Tromp l’œil* Bilder als gewichtiges Argument für Ähnlichkeit läuft dieser Forderung zuwider.

<sup>106</sup> Vgl. Steinbrenner/Winko, 1997; Blanke, B.: *Modelle des ikonischen Zeichens*, 1998

<sup>107</sup> Eine andere Einteilung von Bildern führt zur basalen Unterscheidung zwischen äußeren und inneren Bildern. Während äußere Bilder eines Mediums bedürfen, sind innere Bilder Vorstellungsbilder: Mental Images, Traumbilder oder vorgestellte Gedankenexperimente wären Beispiele. Aber auch Metaphern, Weltbilder, Leitbilder oder Urbilder sind flüchtige Vorstellungen, die durchaus zu Fixierungen tendieren. Die Philosophiegeschichte selbst kann nicht nur als Archiv verschiedenster Bildtheorien gelten, sondern von Bildern aller Art. Platons Urbild-Abbild Verhältnis, Nietzsches Metaphernwelt oder Wittgensteins logische Bilder sind Belege der Bedeutung *beredeter Bilder*. Vgl. Platon: *Timaios*, 1972; Nietzsche, F.: *Erkenntnistheoretische Schriften*, 1968; Wittgenstein, 1963. In den Bildtheorien werden singuläre und generelle, leere und fiktive, ästhetische und symbolische Bilder und etliche mehr unterschieden. Betrachtet man die verschiedenen Bildkonzeptionen näher, so fällt auf, daß die Autoren jeweils unterschiedliche Bilder und Bildfunktionen vor Augen haben, die sich im theoretischen Ansatz widerspiegeln. Bilder können unterschiedliche Funktionen erfüllen, allererst besitzen sie jedoch eine perzeptuelle oder mentale Funktion. Darüber hinaus können sie affektive, ästhetische, kommunikative und epistemologische Funktionen aufweisen. Tatsächlich sind Bilder multifunktionale Medien, deren einzelne Funktionen nur theoretisch separierbar sind.

sein. Wie bereits angedeutet, muß ein Bild in irgendeiner Weise gegeben sein. Entweder sinnlich als äußeres Bild mit Hilfe eines Mediums oder als inneres Bild durch eine Vorstellung. Auf das Bild angewendet bedeutet dies, daß es eine perzeptuelle und/oder mentale Funktion für uns als Betrachter aufweist. Vor allem wahrnehmungstheoretisch, empiristisch und erkenntnistheoretisch orientierte Ansätze rekurrieren auf die perzeptuelle Funktion. Dabei rücken sowohl der Gegenstandscharakter der Bilder als auch die Möglichkeit der Identifizierung der dargestellten Objekte in den Mittelpunkt, und weniger der Zeichencharakter mit seiner repräsentationalen Funktion oder die Frage, worin sich Bilder von den abgebildeten Objekten unterscheiden. Die Ähnlichkeitsrelation basiert maßgeblich auf der perzeptuellen Funktion von Bildern und der Erkenntnisleistung im Sinne einer Mustererkennung. Diese Form von Ähnlichkeit, deren logische Formulierung Symmetrie und Reflexivität fordert und die von Goodman als naivste Form von Repräsentation attackiert wird, führt zu der Annahme, das Verhältnis von Bild und Abgebildetem sei eine natürliche Relation. Als solche bedürfe sie keines Lernens. Mindestens für wissenschaftlich verwendete Bilder trifft dies nicht zu. Bilder jedoch als natürliche Zeichen zu behandeln, scheint wenig einleuchtend. Sie als konventionelle Zeichen aufzufassen, die im Gegensatz zur Schrift weniger arbiträr und stärker motiviert sind, scheint plausibler. *„Freilich sind wir mit vielen Bildern und Bildsystemen inzwischen so vertraut, daß das Verstehen mancher Bilder fast so schnell und so `automatisch` geht wie das Wahrnehmen von Gegenständen. Diesem Umstand verdankt sich wohl zum Teil der Eindruck, das Bildverstehen erfolge unmittelbar und ohne, daß etwas gelernt werden muß.“*<sup>108</sup> Gelernt werden muß, zwischen Bild und Objekt überhaupt unterscheiden zu können.

Während äußere Bilder auf die Perzeption visueller Eindrücke angewiesen sind,<sup>109</sup> können Vorstellungsbilder durch Gedanken, Erinnerungen, Ideen, Träume, Klänge, Gerüche, Geschmack oder Sprache evoziert werden, aber auch durch visuelle Eindrücke. Vorstellungsbilder weisen keine perzeptuelle Funktion auf. Vor allem in der Philosophie des Geistes und den Kognitionswissenschaften, die mit dem mentalen Bildbegriff als Fortführung des metaphysischen arbeiten, führt die Analogiebildung zwischen mentalen und perzeptuellen Funktionen zu Mißverständnissen beziehungsweise zur Reduktion innerer Bilder auf die perzeptuelle Funktion äußerer. Der zwischen Zenon W. Pylyshyn und Stephen M. Kosslyn geführte Disput zu internen Repräsentationen basiert auf unterschiedlichen Interpretationen zu Modellen äußerer Repräsentationen. Die Analyse und Operationalisierung interner Repräsen-

---

<sup>108</sup> Scholz, 1991, S. 42

<sup>109</sup> Jakob Steinbrenner und Ulrich Winko fassen äußere Bilder mit einem materiellen Bildbegriff: „Während die Relata des materiellen Bildbegriffs in der Regel konkrete Bilder und Gegenstände sind ...“ und innere Bilder: „... können die Relata der metaphysischen Bildbeziehung - als zweistellige Relation verstanden - sowohl materielle als auch sprachliche, mentale oder abstrakte Gegenstände sein. Der metaphysische Bildbegriff unterscheidet sich vom materiellen Bildbegriff insbesondere durch seinen Anwendungsbereich und seine epistemischen und ontologischen Implikationen.“ Steinbrenner/ Winko, 1997, S. 20

tationen veranlaßt Pylyshyn dazu,<sup>110</sup> Vorstellungsbildern keinen eigenen qualitativen Status zuzusprechen. Er macht geltend, daß Gedanken, Vorstellungsbilder oder andere interne Repräsentationen dieselbe modale, da neuronale Basis besitzen und kritisiert die Annahme, daß Vorstellungsbilder in derselben Weise reproduziert werden, wie äußere Bilder uns gegeben sind. Dem setzt Kosslyn entgegen: *„Der Fehler besteht darin, daß Vorstellungsbilder, anders als tatsächliche Bilder, keine fundamentalen Wahrnehmungsverarbeitungen, wie etwa die Konturverschärfung oder die Gestalt-Hintergrund-Kontrastierung, benötigen.“*<sup>111</sup> Dann wird es jedoch schwierig, sich aus dem Perzeptionsmodell äußerer Bilder Analogien für das *geistige Auge* zu borgen. Laut Kosslyn sollten Vorstellungsbilder Bildschirmdarstellungen ähnlich sein, die durch einen Kathodenstrahl erzeugt werden, also eine Art von Projektion. Mit unserem geistigen Auge können wir dieses räumliche Gebilde scannen, und experimentelle Untersuchungen belegen die zeitliche Differenz zwischen dem Abtasten naher beziehungsweise entfernter Elemente eines Vorstellungsbildes. An den experimentellen Belegen läßt sich zweifeln, vielmehr jedoch wird die Theorienbildung durch äußere Bildfunktionen und Metaphern geleitet und kaum einer inneren Bildfunktion gerecht.<sup>112</sup>

Äußere wie innere Bilder können Wohlgefallen, Mißfallen, Stimmungen und Gefühle hervorrufen. Während wissenschaftlich verwendete Bilder eine möglichst geringe affektive und ästhetische Funktion aufweisen sollten, nutzen die Kunst und die Massenmedien diesen Aspekt. Fragen nach dem Wohlgefallen oder dem Eindruck, hervorgerufen durch Bilder, sind mögliche Kriterien für eine ästhetische Funktion derselben. Während unter der affektiven Funktion ein unmittelbarer Eindruck gemeint ist, der durch ein bestimmtes Bild hervorgerufen wird, beispielsweise durch die Gewaltbilder der Nachrichten, scheint die ästhetische Funktion mittelbar durch einen Kontextzusammenhang gegeben zu sein, wie dies für die inszenierten Bilder des Golfkrieges der Fall war.<sup>113</sup> Die Wirkung affektiver Funktionen kann sich durch Gewohnheit vermindern oder verstärken. Eventuell ließe sich sogar der Wille, ein Bild realistisch erscheinen zu lassen, vorrangig unter die affektive Funktion eines Bildes subsumieren. Die perfekte Illusion, die von realen Objekten nicht mehr unterscheidbar ist, erzeugt einen Eindruck, der sich im Nachhinein als trügerisch herausstellt: Der scheinbar unmittelbare Effekt stellt sich

---

<sup>110</sup> Vrgl. Pylyshyn, Z.W.: *What the mind's eye tells the mind's brain*, 1973

<sup>111</sup> Kosslyn, S.M./Pomerantz, J.R.: *Bildliche Vorstellungen, Propositionen und die Form der inneren Repräsentanz*, 1992, S. 255

<sup>112</sup> Der Proband erhält eine Landkarte zur Ansicht. Schließlich wird er aufgefordert die Elemente (Häuser, Pflanzen, etc) aus der Vorstellung zu benennen. Der zeitliche Abstand der Antworten wird als Indiz eines Scannings des Vorstellungsbildes gewertet, das für auseinanderliegende Elemente mehr Zeit beansprucht. Die zeitliche Differenz kann viele Ursachen haben und die Korrelation zwischen Zeit und räumlicher Distanz ist m.E. wenig plausibel. Die Projektionsmetapher leistet hier genau das, was Hans Blumenberg für sie zur Erklärung im Falle des Psychologismus beschreibt, als: *„Einem Denkmuster nahezu unbezweifelbare Plausibilität zu verschaffen, dessen Hauptvorteil darin bestand, die Lokalisierung >außen< und >innen< verwechselbar zu machen.“* Blumenberg, H.: *Höhlenausgänge*, 1989, S. 684

<sup>113</sup> *„Die wenigen autorisierten Bilder waren Videospiele täuschend ähnlich, um die Illusion vom `sauberen` Krieg zu schüren.“* Bredekamp, H: *Das Bild als Leitbild*, 1997, S. 229

nachrangig als mittelbare ästhetische Eigenschaft, als Wohlgefallen am Realistischen, heraus. Insofern könnte Ähnlichkeit nicht nur als logische Relation, sondern auch als Maß der Affektion des Realistischen und als ästhetische Kategorie gewertet werden. Damit wäre sie jedoch subjekt- und kontextabhängig und taugte nur wenig für eine analytische Definition von Bildlichkeit.

Schließlich dienen Bilder der Kommunikation und fungieren als visuelle Zeichen, indem sie etwas darstellen. Die auf Charles S. Peirce und Ferdinand de Saussure zurückreichende Semiotik und Sprachwissenschaft hat den konventionellen Zeichencharakter der Sprache wie auch der Bilder betont. Und dies scheint im Zeitalter technischer Reproduzierbarkeit und massenmedialer Verbreitung die vorrangigste Funktion der meisten Bilder zu sein. Neben der kommunikativen Funktion ist für wissenschaftliche Bilder die epistemologische Funktion von Bedeutung. Welche Art von wissenschaftlicher Erkenntnis ist mit Bildern möglich? Wie läßt sich der Erkenntniswert *bemessen* und belegen? Welche Rolle spielen dabei Konstruktion und Interpretation? Oliver Scholz unterteilt fünf Stufen des Bildverstehens: Wahrnehmung des Objekts; Erkennen als Zeichen; Erkennen als bildhafte Darstellung; Identifikation des Sachbezugs; Identifikation der kommunikativen Rolle.<sup>114</sup> Für wissenschaftliche Bilder käme sicherlich noch eine Identifikation der Rolle des Bildes im Rahmen einer Theorie hinzu. Und es ist von Belang, ob die Bilder einen wahren Sachverhalt im Rahmen der theoretischen Annahmen darstellen.

Auf die Problematik der Wahrheit von Bildern wird unter anderem von Ludwig Wittgenstein und Ernst Gombrich hingewiesen, denn: „*Aus dem Bild allein ist nicht zu erkennen, ob es wahr oder falsch ist.*“<sup>115</sup> Bilder wissenschaftlich zu verwenden bedeutet, sie in einen theoretischen Kontext zu integrieren, der aussagefähig und deshalb wahrheitsfähig ist. Der visuelle Wahrheitsbeweis im Sinne eines Vergleichs zwischen Bild und realweltlichem Ausschnitt ist jedoch ein Analogieschluß, der keine Beweiskraft hat.

Wie bereits angedeutet, wird ein semiotisch orientierter Bildbegriff favorisiert. Dies hat mehrere Gründe. Zum einen zeigt sich, daß für wissenschaftliche Bilder vor allem perzeptuelle, kommunikative und epistemologische Funktionen von Bedeutung sind und daß Bilder im Rahmen von Theorien und Messungen als Zeichen behandelbar sind. Vor allem dort, wo sie Unsichtbares sichtbar machen, fungieren

---

<sup>114</sup> Vrgl. Scholz, 1991, S. 130 ff; Scholz, O.: *When is a Picture?*, in: *Synthese* 95, 1993, S. 9 – 106, Scholz, O: *Wahrheitshintergrund und Interpretation*, 1998, 27-54

<sup>115</sup> Wittgenstein, 1963, 2.224 sowie „*Um zu erkennen, ob das Bild wahr oder falsch ist, müssen wir es mit der Wirklichkeit vergleichen.*“ Wittgenstein, 1991, 2.223. Doch so einfach ist der visuelle Wahrheitsbeweis nicht, denn wie sollte er begründet werden. „*But Gombrich insists that 'a picture can no more be true or false than a statement can be blue or green'*.“ Lopes, 1996, 56

Bilder zudem als Anzeichen mit Verweis auf theoretisch postulierte und simulierte oder indirekt gemessene Entitäten und Strukturen. Außerdem ist Wissenschaft ein durch die Schrift dominiertes Unterfangen, das Bilder in einen zeichenorientierten Kontext und Diskurs setzt. Und schließlich handelt es sich bei den Simulationsbildern um Bilder, die mindestens vom Symbolschema her mit der Schrift identisch sind. Die Gründe für einen semiotisch fundierten Bildbegriff sind also vielfältig, und Goodmans Symboltheorie ist darüber hinaus durch ihre Allgemeinheit von Interesse. In seiner Konzeption unterscheiden sich Schrift und Bilder in erster Linie aufgrund ihres Symbolschemas und weniger durch die Semantik. Bilder sind syntaktisch dichte Zeichensysteme, Sprachen syntaktisch disjunkte und differenzierte.<sup>116</sup> Allerdings trifft diese Unterscheidung für Simulationsbilder nur bedingt zu, und zudem sind die von ihm getroffenen Annahmen gegen eine Ähnlichkeitsrelation zur Kennzeichnung von Bildlichkeit zu hinterfragen. Welche Form der Bezugnahme liegt nun vor, wenn auf Ähnlichkeit als Relation zwischen Bild und Abgebildetem nicht mehr unkritisch verwiesen werden darf? Goodman stellt zwar fest, daß Ähnlichkeit die naivste der Repräsentationsformen sei, doch die Argumente zur Fundierung dieser folgenreichen Aussage sind fraglich. Vor allem deshalb, da er einen intuitiven Repräsentationsbegriff gegen eine logische, zweistellige Ähnlichkeitsrelation stellt. Anhand von zwei Argumenten soll die Problematik skizziert werden. Erstens: *Bilder seien Bildern ähnlicher als den Objekten, die sie darstellten*. Um Bilder von den dargestellten Objekten signifikant unterscheiden zu können, müssen sie eine Eigenschaft aufweisen, welche sie eindeutig von dem Dargestellten unterscheidet - welche Eigenschaft dies auch immer sein mag -, und diese Eigenschaft ist allen Bildern inhärent. Von daher sind sie sich diesbezüglich ähnlich. Zudem zielt diese Version der Ähnlichkeit auf das Bild als Medium und nicht auf den Bildinhalt. Die eigentliche Frage jedoch lautet: Warum erkennen wir die Bildinhalte? Die Bezugnahme auf Objekte hat jedoch eine andere Ähnlichkeitsrelation zum Thema, nämlich die zwischen Bildinhalt und Abgebildetem, nicht jedoch die zwischen Bildmedium und Bildinhalt. Analog der semiotischen Differenz zwischen Zeichen und Bezeichnetem und der typisch sprachlichen Relation zwischen beiden, stellt sich in der Diskussion um das Bild die Frage nach der typisch ikonischen Relation zwischen Bildinhalt und Abgebildetem und nicht zwischen Bildern. Die Metaunterscheidung zwischen Zeichensystemen, beispielsweise zwischen dem griechischen und lateinischen Alphabet,

---

<sup>116</sup> Dennoch sind Bild und schriftbasierte Sprache signifikant unterschieden. Die Unterscheidung in analog (syntaktische und semantische Dichte) und digital (syntaktische und semantische Differenziertheit) ist für die vorliegende Untersuchung von Bedeutung, wobei syntaktische Dichte kein hinreichendes Kriterium für ein Bildsystem ist. Bilder sind gedrängte Zeichensysteme und spannen anhand des Kriteriums der relativen Fülle den Bogen zu Diagrammen, Karten oder auch Piktogrammen. Ein weiterer Unterschied zwischen Bild und Sprache ergibt sich aus der unterschiedlichen Konstruktionsweise für Klassifikatoren. Klassifikatoren sind interpretierte Zeichen, die auf einen Gegenstandsbereich Bezug nehmen. Die Denotation eines Zeichens kann auf einen, mehrere oder keinen Gegenstand verweisen (Null-, einfach-, zusammengesetzte Klassifikatoren). Nun stellt sich folgende Frage: Wieviele konstitutive Züge müssen zusammenkommen, um einen einfachen Klassifikator zu bilden? Laut Neil McDonell sind für eine (natürliche) Sprache mehr konstitutive Züge nötig als für Bilder. „*The attraction of pictorial representations is that it enables us to concentrate on an array of classifications, and thus, an array of informations.*“ McDonell, 1983, S. 92. Sprachliche Klassifikatoren müssen mindestens Worte sein, wenn nicht Sätze. Ein Bild hingegen kann mehr einfache Klassifikatoren pro konstitutivem Merkmal bilden. Bilder sind gedrängte Zeichensysteme, während sprachliche Zeichensysteme weitschweifig sind. Oder, anders gewendet: Bilder können wesentlich mehr Informationen beherbergen als Texte.



aufgrund der inhärenten syntaktischen Disjunktivität und Differenziertheit der Zeichen sowie der Geschlossenheit eines Systems oder Klasse von Zeichen, ist auch für Bilder möglich, und zwar unabhängig von Ähnlichkeit. Allerdings läßt sich im Falle der Bilder die Geschlossenheit nicht unbedingt durch Endlichkeit einer Zeichenklasse bestimmen, sondern basiert möglicherweise auf Kriterien wie Abgrenzung (Rahmen).<sup>117</sup> Zweitens: *Objekte seien sich in höchstem Maße selbst ähnlich, repräsentierten sich jedoch nicht selbst.* Dies trifft zu, wenn man, wie zuvor, von einer aus der Logik entlehnten Ähnlichkeitsrelation, die reflexiv, symmetrisch und zweistellig ist, und von einem intuitiven Repräsentationsbegriff ausgeht. Ob man beide in einer Aussage jedoch miteinander verbinden kann, ist fraglich. Vor allem wenn Ähnlichkeit wie folgt beschrieben wird: *„Repräsentationale Gewohnheiten, die für Realismus bestimmend sind, führen auch dazu, Ähnlichkeiten zu erzeugen.“*<sup>118</sup> Ähnlichkeit in diesem Sinne ist durchaus nicht mehr subjektunabhängig, symmetrisch, reflexiv und zweistellig und vor allem keine logisch fundierte Relation, sondern eine im Laufe der Ontogenese eingenommene Position zur Generierung von Realismen und kontextabhängigen Ähnlichkeiten für Repräsentationen.<sup>119</sup> Dieser Begriff steht im Widerspruch zum logischen Begriff von Ähnlichkeit, auf den sich Goodman maßgeblich in seiner Kritik stützt. Die Kritik an der Ähnlichkeit basiert auf einer formalen Ähnlichkeitsrelation, die anstelle eines mehrdeutigen Repräsentationsbegriffes gesetzt wird. Dies führt natürlich zu Widersprüchen, die es erlauben, Ähnlichkeit kurzer Hand ad acta zu legen. Das eigentliche Problem basiert jedoch auf dem zweideutigen Status der Bilder, der in der verkürzten Rede vom *Bild, das ein Objekt repräsentiert*, verschleiert wird. Denn zum einen sind äußere Bilder selbst physische Objekte der Welt und in derselben Bedeutungsebene wie Gegenstände angesiedelt (Tische, Personen, Bäume, Tafelbilder, Bücher); und zum anderen referieren sie auf diese Objektebene in einer nicht-symmetrischen Weise. Diese zweite Eigenschaft unterscheidet sie von nicht-zeichenhaften Objekten und bedarf einer konventionalisierten Erkenntnisleistung und Kennzeichnung. Repräsentation könnte eine solche Kennzeichnung sein. Die Frage nun stellt sich, in welchen Fällen Ähnlichkeit überhaupt relevant wird. Zum einen wohl zwischen Bildern als Objekten und zum anderen zwischen Bildinhalt und dargestelltem Objekt. Während im ersten Fall Repräsentation keine Rolle spielt,<sup>120</sup> ist der zweite Fall wesentlich komplexer. Ist die Repräsentation die Kennzeichnung, die einem Bild über seinen Ob-

<sup>117</sup> Mangelnde Abgrenzung mentaler Bilder bedingt die Schwierigkeit, Vorstellungen von abstrakten Gedanken eindeutig zu trennen.

<sup>118</sup> Goodman, 1995, S. 47. Wenn Realismus eine Frage der Gewohnheit ist und Ähnlichkeit in diesem Sinne das Problem ist, dann kann die Kritik nicht einem logisch fundierten Ähnlichkeitsbegriff gelten und dessen Eigenschaften wie Symmetrie und Reflexivität.

<sup>119</sup> Interessant sind Fotografien junger Kinder, die scheinbar noch nicht die kulturdominanten Perspektiven und typischen Ansichten internalisiert haben. Personen auf diesen Bildern erkennen wir nur bedingt als ähnlich wieder, da ähnlichkeitskonstitutive Elemente nicht berücksichtigt werden, sondern aus der Sicht sozialisierter Erwachsener kontingente Elemente gewählt wurden.

<sup>120</sup> Bild A ist Bild B ähnlich, und umgekehrt, bezüglich der Eigenschaft x = spezifisches Format; ohne daß A B repräsentiert oder umgekehrt. Aber auch Bild A ist Objekt B ähnlich, und umgekehrt, bezüglich der Eigenschaft x = spezifisches Format (z.B. Bildformat und Buchformat), ohne daß A B repräsentiert oder umgekehrt.

jektcharakter hinaus eine zusätzliche, nämlich zeichenhafte Bedeutung verleiht, dann besteht sie wohl darin, daß ein solchermaßen gekennzeichnetes Bildobjekt eine spezifische Eigenschaft aufweist, und zwar jene, daß es auf eine Relation hinweist und zu dem wird, was wir gemein hin als Bild von etwas bezeichnen (Bild plus sprachliche Verweissystematik). Der Hinweis auf eine Relation, also seine Darstellungsfunktion, muß nicht mit Ähnlichkeit einhergehen. Ähnlichkeit ist eine spezifische Form dieser Relation und wird dann interessant, wenn der Hinweis auf eine Relation implizit als gegeben vorausgesetzt wird, und zwar in Form einer Mustererkennung als automatisierte Erkenntnisleistung.<sup>121</sup> Für das Bild eines Apfels wird vorausgesetzt, daß der Bildinhalt ohne Hinweis erkannt wird - zumindestens von Menschen eines bestimmten Alters - und diese Voraussetzung wird mit Ähnlichkeit erklärt. Und das, ohne daß der dargestellte Apfel unter Umständen dem Objekt Apfel ähnlich sein müßte im Sinne einer symmetrischen Relation. Ein solchermaßen dargestellter Apfel könnte Äpfeln in einer Weise ähnlich sein, ohne daß je ein konkreter Apfel dem dargestellten tatsächlich ähnlich wäre. Dieser intuitive Ähnlichkeitsbegriff scheint mit der Repräsentation als Kennzeichnung besser zu harmonieren als ein logischer Begriff der Ähnlichkeit basierend auf einer symmetrischen Abbildfunktion eindeutig differenzierter Merkmale. Ähnlichkeit in diesem Sinne wäre nicht-symmetrisch, indem für Bilddarstellungen wesentlich vagere Umfangsbestimmungen als für Objekte gelten. Während wir gegenüber Objekten kritischer im Umgang mit der Ähnlichkeit sind, sind wir gegenüber den Bilddarstellungen - im Sinne der künstlerischen Freiheit beispielsweise - großzügiger. Schließlich erlaubt ein expliziter Hinweis auf eine Relation, die ansonsten nicht erkennbar wäre, abstrakte, fiktive, symbolische und andere Formen der Repräsentation. Hinweis und Relation bedingen sich wechselseitig, je nachdem, um welche Form der Relation und um welchen Grad der Ähnlichkeit es sich handelt, wobei unter Ähnlichkeit eine spezifische Erkenntnisleistung verstanden wird. Wie bereits aufzuzeigen versucht wurde, führt diese Erkenntnisleistung unter Umständen auch zu Fehlinterpretationen, indem Bildinhalte nicht unbedingt so unmittelbar einsichtig sein müssen, wie sie auf den ersten Blick scheinen (Abbildung 32).

Statt Ähnlichkeit führt Goodman in seiner Symboltheorie *Denotation* ein.<sup>122</sup> Doch Denotation allein genügt oftmals nicht, um ein Bild näher zu bestimmen, denn die Formen der Denotation können verschiedener Art sein. Sie basieren auf einem unterschiedlichen Sachbezug, der singulär, generell und leer sein kann. Von daher bedarf es der Bestimmung der Klassifikation, also dessen, was das Bild

---

<sup>121</sup> Unter Mustererkennung wird die Erkenntnisleistung verstanden, bestimmte Strukturen als Objekte (Konglomerat konstitutiver und kontingenter Strukturen) zu identifizieren und diese unter Umständen mit Begriffen zu belegen.

<sup>122</sup> „Ein Bild, das einen Gegenstand repräsentiert - ebenso wie eine Passage, die ihn beschreibt -, nimmt auf ihn Bezug und, genauer noch: denotiert ihn. Denotation ist der Kern der Repräsentation und unabhängig von Ähnlichkeit“ Goodman, 1995, S. 17. Der Vorteil dieser Sichtweise liegt darin, daß die scheinbar natürliche Relation von Bild und Abgebildetem aufgrund von Ähnlichkeit zugunsten einer konventionellen Relation aufgegeben wird. Damit wird der Zeichencharakter der Bilder unterstrichen.

repräsentiert.<sup>123</sup> Bilder lassen sich in diesem Sinne als pikurale Etiketten verstehen, die auf einen Gegenstand zutreffen, ihn etikettieren. Neben der Denotation gibt es weitere Weisen der Bezugnahme: Exemplifikation und Ausdruck. Die Exemplifikation verläuft in umgekehrter Richtung zur Denotation und ist Besitz plus Bezugnahme. Beispielsweise exemplifiziert ein Stoffmuster als Etikett im Sinne konkreter Inskriptionen nur jene Eigenschaften des Stoffes, die es besitzt. Eine weitere, besondere Form der Bezugnahme ist der Ausdruck. Bilder drücken etwas aus, ohne es zu denotieren. So kann ein Bild Trauer ausdrücken und fungiert als metaphorische Exemplifikation von Traurigkeit.

Zusammenfassend läßt sich sagen, daß der Zeichencharakter des Bildes in den Mittelpunkt rückt und daß die Relation zwischen Bild und Gegenstand nicht als natürliche Relation auf Basis von Ähnlichkeit gesehen wird, sondern als konventionelle. In diesem Zusammenhang wird die Systembezogenheit von Bildern für deren Interpretation wichtig, das heißt, Bilder erschließen sich nicht von selbst oder in einer kanonisierten Form wie Texte, sondern müssen einzeln *interpretiert* werden. Bildinterpretationen setzen eine entsprechende Kompetenz voraus, die erworben sein will. Bilder sind als syntaktisch dichte Zeichensysteme nicht alphabetisierbar, da sie unendlich viele Zeichen bereitstellen, von welchen keine zwei als syntaktisch äquivalent behandelt werden können. Sowohl Bilder als auch das Verfahren der Bildinterpretation können von daher nicht formalisiert werden, und hier liegt der Nachteil gegenüber der Schrift. Insofern sind auch der Reproduzierbarkeit Grenzen gesetzt. Während jedoch Sprache ihre Weitschweifigkeit mit Menge kompensiert, können Bilder viele Informationen auf einen Blick darstellen und lassen sich zur Datenreduktion nutzen.<sup>124</sup>

Wie verhält es sich nun mit den Simulationsbildern? Diese Bilder besitzen einen besonderen Status, allein aufgrund ihrer formal-operativen Generierung. Zudem bilden sie nicht ab, sondern repräsentieren ihren eigenen Erzeugungsmechanismus. Und als Bilder sind sie relativ abstrakt. Falls überhaupt von Ähnlichkeit die Rede sein kann, handelt es sich allenfalls um eine strukturelle Ähnlichkeit von Formen und Gestalten. Die Erkenntnisleistung bestünde dann weniger darin, zu erkennen, daß es sich um ein bestimmtes Objekt handelt, als darin, eine ähnliche Struktur oder Verhaltensmuster zu identifizieren. Es geht also nicht darum, den Herzog von Wellington oder die Visualisierung als Mann-Bild zu erkennen, sondern um Gestalterkennung. Der Sachbezug ist in jedem Fall generell, denn falls

---

<sup>123</sup> „Ein Bild, das einen Mann repräsentiert, denotiert ihn; ein Bild, das einen fiktionalen Mann repräsentiert, ist ein Mann-Bild; und ein Bild, das einen Mann als Mann repräsentiert, ist ein Mann-Bild, das ihn denotiert. Während es also im ersten Fall darum geht, was das Bild denotiert, und im zweiten Fall nur darum, welche Art von Bild es ist, geht es im dritten sowohl um Denotation als auch um Klassifikation.“ Goodman, 1995, S. 37

<sup>124</sup> Da ein Bild mehr einfache Klassifikatoren pro konstitutivem Merkmal bilden kann, lassen sich mit einem Bild wesentlich mehr Informationen darstellen. Um dieselben Informationen textlich erfassen zu können, bedarf es wesentlich mehr sprachlicher Klassifikatoren (Wörter). Vgl. McDonell, 1983

eine extrasymbolische Deutung vorgenommen wird - im Rahmen einer wissenschaftlichen Theorie - handelt es sich nicht um die Interpretation der Visualisierungen als Darstellung eines spezifischen Moleküles oder Wetterphänomens. In welcher Weise lassen sich Visualisierungen im Rahmen einer semiotischen Bildtheorie beschreiben? Der Vorschlag hierfür lautet: Wissenschaftliche Visualisierungen sind digital (numerisch) generierte, analog präsentierte Symbolsysteme. Sie sind als Bilder syntaktisch disjunkt und differenziert generiert (Simulation) und semantisch dicht präsentiert (Visualisierung).<sup>125</sup> Visualisierungen sind eher weitschweifige Systeme, da sie in der Regel weniger einfache Klassifikatoren pro konstitutivem Merkmal erzeugen als Bilder. Selbst wenn Visualisierungen *realistisch* anmuten, sind sie im Vergleich zu konventionellen Abbildungen weitschweifige Darstellungen, denn der Realismus bezieht sich auf strukturelle Ähnlichkeiten und Gestalten und weniger auf ikonische Details. Sie erzeugen nur wenige Klassifikatoren, nämlich so viele, wie als Zustandsgrößen und Parameter bezüglich des Systemausschnittes formalisiert wurden. Das Mapping der Daten auf Geometrien und Farben erlaubt in der Regel nur einen Klassifikator pro konstitutivem Merkmal zu erzeugen. Visualisierungen sind keine notationalen Systeme. Sie sind jedoch mit Hilfe eines notationalen Verweisungssystems mit der Theorie verknüpft, d.h. Teile der Visualisierung können auf Basis eines notationalen Verweisungssystems eindeutig beschrieben werden. Symbole, Farbkarten und Legenden wären solche Mittel der Beschreibung. Das zugrunde liegende Datenmaterial resultiert aus den Simulationen mathematischer Gleichungen. In der Regel handelt es sich um partielle nichtlineare Differentialgleichungen zur Beschreibung klassisch-deterministischer Problemstellungen, um statistische Vielteilchenmodelle oder um quantenmechanische Berechnungen. Die große Menge der berechneten Daten (semiotische Fülle), die als binärkodierte Zeichen vorliegen, werden programmgesteuert in Farbwerte transformiert. Obwohl jedes Pixel einem Berechnungswert zugeordnet ist, der im Kontext der Theorie individuell interpretiert werden könnte, erhält das Datenmaterial erst in der analogen Präsentation seine ikonische Form und damit seinen epistemologischen Wert. Formal betrachtet werden Visualisierungen als Exemplifikationen mathematischer Modelle verwendet, indem sie Eigenschaften besitzen, die mit dem algorithmisierten Erzeugungsmechanismus dargestellt und durch die numerische Simulation entfaltet werden.<sup>126</sup> Da sich die Lösung einer partielle Differentialgleichung unter beliebig vielen Startbedingungen simulieren läßt, ist jeder Simulationslauf eine Exemplifikation der Gleichung unter spezifischen Bedingungen (numerische Fallunterscheidung). Phänomenologisch betrach-

---

<sup>125</sup> Dies unterscheidet Visualisierungen von herkömmlichen Bildern, die auch syntaktisch dicht sind. Allerdings betrifft die syntaktische Disjunktheit und Differenziertheit die binärkodierte Extension der Farbpunkte. Im Gesamtzusammenhang des Bildes ist deren Wirkung syntaktisch dicht.

<sup>126</sup> Dagegen ließe sich einwenden, daß Visualisierungen keine Exemplifikationen sein können, da eine Transformation der zu exemplifizierenden Eigenschaften vom Numerischen ins Ikonische vorliegt und dies der Forderung der Bezugnahme plus Besitz widerspricht. Doch da es sich um strukturelle Eigenschaften handelt, ist die Gleichheit der Form der Präsentation vernachlässigbar.

tet, repräsentieren Visualisierungen Eigenschaften der formalisierten und mathematisch modellierten Theorien. Da die Theorien Effekte und Ereignisse bestimmter Art als auch Struktur realweltlicher Systeme beschreiben und prognostizieren, kann die Visualisierung für heuristische Zwecke zum visuellen Vergleich mit den beschriebenen Effekten und Ereignissen herangezogen werden. Allerdings setzt dieser Vergleich die Annahme der Homomorphie zwischen mathematischem Modell, Simulation und Strukturen oder Verhaltensmuster realweltlicher Effekte und Ereignisse voraus.

Es muß also von zwei Arten der Repräsentation gesprochen werden. Erstens für den Fall der Verwendung der Bilder als Exemplifikationen mathematischer Modelle. Hier transferieren die Visualisierungen das simulierte Lösungsverhalten der Gleichungen ins Ikonische. Da die Abbildungsrelation durch eine eindeutige Zuordnung erzeugt ist - durch die programmgesteuerte Zuordnung von numerischen Werten und Farbwerten -, ist sie zum einen symmetrisch, zum anderen subjektunabhängig. Allerdings ist die Wahl der Art der Zuordnung - als Grauwert- oder Farbzuzuordnung sowie für letztere als Wahl zwischen unterschiedlichen Farbspektren - willkürlich.<sup>127</sup> Die Visualisierungen repräsentieren die numerischen Strukturen, doch da diese nicht bildlich sind, kann nicht von Ähnlichkeit die Rede sein. Zweitens für den Fall der Verwendung der Visualisierungen als Bilder von Theorien sowie deren beschriebenen oder postulierten Effekten und Ereignissen. Die Theorie dient hier als Klammer zwischen Visualisierung und realweltlichem Systemausschnitt und legitimiert die Nutzung der Bilder zum Vergleich struktureller Ähnlichkeiten. Die Theorien geben - verknüpft mit Messungen und Beobachtungen - den formalen, mathematischen Modellen einen empirischen Gehalt, der es ermöglicht, die Bilder nicht nur als Exemplifikationen, sondern als Abbildungen zu betrachten. Allerdings nicht als Abbildungen im Sinne von Fotografien oder Tafelbildern. Die Visualisierungen wären Abbildungen theoretisch beschriebener Effekte und Ereignisse, insofern sie Resultate semiotischer Nachbildungen der von den Theorien beschriebenen Prozesse sind. Da die Theorien Darstellungen der strukturellen Zusammenhänge sind, welche bestimmte Effekte und Ereignisse erzeugen, die visuell anhand spezifischer Strukturen identifizierbar sind, besteht die semiotische Nachbildung in der Erzeugung eben dieser Strukturen auf der Basis theoretisch bzw. mathematisch formulierter struktureller Zusammenhänge. Die Abbildung ist insofern eine indirekte. Dennoch läßt sich nur über den Bildvergleich feststellen, ob sie zutreffend ist. Gelingt also der Vergleich zwischen den Bildern und den realweltlichen Systemausschnitten - werden ähnliche Strukturen identifiziert -, so kann dies als Bestätigung der theoretischen Beschreibung, ihrer mathematischen Formalisierung und Simulation verstanden werden, allerdings

---

<sup>127</sup> Die Wahl ist nicht beliebig in dem Sinne, daß irgendeine Farbskala verwendet wird. Im Gegenteil, bei einigen Farbskalen werden manche Datenstrukturen nicht sichtbar. Doch es gibt kein formales Entscheidungsverfahren welche Wahl zu treffen ist, d.h. die Wahl ist dem Geschick desjenigen überlassen, der die Daten in Visualisierungen umsetzt

aufgrund der erwähnten Unsicherheiten nur für heuristische Zwecke. Und hier darf von Ähnlichkeit gesprochen werden, da sie strukturelle Aspekte betrifft, für die sich anhand der Theorie und deren Formalisierung konstitutive Merkmale angeben lassen.

Grundsätzlich läßt sich feststellen, daß Visualisierungen Bilder von Theorien sind, die sich je nach Intention unterschiedlich verwenden lassen: als numerische Experimente, zur Sichtbarmachung von Strukturen und Verhaltensmustern oder zur Prognose.<sup>128</sup> Steht die epistemologische Funktion zunächst im Mittelpunkt des Interesses, so wird dasselbe Bildmaterial später zur Dokumentation der Ergebnisse kommunikativ verwendet und in den theoretischen Diskurs eingebunden. Darüber hinaus sind Visualisierungen Resultate dynamischer Prozesse und Verfahren. Die Zeit spielt für Visualisierungen eine dominante Rolle. Zum einen wird das Verhalten eines simulierten Prozesses in der Zeit dargestellt, also seine Dynamik. Zum anderen basiert das Bildgenerierende Verfahren selbst auf einer spezifischen Form der Zeitlichkeit, wie sie mit rekursiven Funktionen und den dynamischen Zeichenzuständen gegeben ist.

## 5. Fazit

Die unterschiedlichen Verwendungsweisen der Schrift sowie ihre Fortführung ins Dynamische führen verschiedene Zeichenebenen ein. Eine lesbare Schrift verweist auf eine extrasymbolische, eine formal-operativ verwendete Schrift auf eine intrasymbolische und eine digitalisierte Schrift auf eine sub-symbolische Ebene. Die Formalisierung und Mechanisierung der Schriftverwendung erzeugen jeweils neue Symbolsysteme die neue Funktionen aufweisen. So ist es mit formal-operativen Zeichensystemen möglich, symbolische Maschinen zur Produktion von Zeichen und Zeichenfolgen zu gestalten. Mit der numerischen Simulation auf Basis der digitalisierten Schrift gelingt es, die symbolischen Maschinen zu mechanisieren, also mit Hilfe des Computers als symbolverarbeitenden und symbolgenerierenden Erzeugungsmechanismus zu automatisieren. Keine andere Computeranwendung nutzt dieses produktive Potential der Formalisierung und Mechanisierung so intensiv wie die numerische Simulation. Diese verfahrensmäßige oder instrumentelle Verwendung der Schrift kennzeichnet das Organisationsprinzip der Simulation. Möglich wird dies durch die Transformation formaler Strukturen in maschinell ausführbare Instruktionen sowie die Digitalisierung der Zeichen. Damit ist die Zerlegung

---

<sup>128</sup> Allerdings können die Experimente und Prognosen aus methodischen Gründen nur heuristischen Zwecken dienen. Vor allem der Prognostizierbarkeit sind Grenzen gesetzt.

der Zeichen auf Basis eines diskreten und digitalen Symbolsystems in einen subsymbolischen Zeichenzustand und die programmgesteuerte Interpretation der Zeichenfunktion gemeint. Für die Simulation bedeutet dies die Erzeugung eines spezifischen Symbolsystems von Zeichen, die semiotische Partikel genannt wurden. Die Partikel sind durch ihre numerisch erzeugte und determinierte Darstellung als Farbwerte in einem geordneten Raum-Zeit-Raster die Basis der sichtbar gewordenen Wirkprozesse der Zeichen aufeinander. Diese Art der Zeichenverwendung wurde semiotische Modellierung genannt. Die Syntax der semiotischen Modellierung besteht in der iterativen und rekursiven Anwendung der algorithmisch umgesetzten Produktionssysteme formaler Strukturen. Die Semantik ergibt sich aus der Dynamik der entfalteten und visualisierten Datenstrukturen (numerische Werte, Raum-Zeit-Lokalisation), die Aufschluß über die Wirkprozesse geben. Als ikonisch umgesetzte Exemplifikationen der Berechnungen dienen die Datenstrukturen als Grundlage qualitativer Aussagen über das Lösungsverfahren als auch das Lösungsverhalten. Darüber hinaus ergibt sich die Interpretation der visualisierten Datenstrukturen bzw. der Bilder, die aus den semiotischen Partikeln resultieren, im Rahmen der entsprechend formalisierten und mathematisch modellierten Theorie.

Der Erkenntniswert der Simulationsergebnisse besteht zum einen in der Beurteilung des Simulationsverfahrens selbst, zum anderen in der Erklärungs- oder Prognosekraft der zugrundeliegenden Theorie. Beide Male zeigt sich die Verschränkung der Art der Bezugnahme, wie sie mit den semiotischen Partikeln zur Anwendung kommt, als erkenntniserweiternde Eigenschaft, indem unanschauliche Prozesse und theoretisch formulierte, mathematisch modellierte Zusammenhänge intuitiv einsichtig werden. Methodisch besteht die Erweiterung in der numerischen Erkundung des Lösungsraums einer formalen Struktur. Besonders eindrucksvoll zeigt sich der Nutzen der Simulationsbilder für theoretisch beschreibbare, jedoch unsichtbare Objekte wie beispielsweise Atome, die nun sichtbar werden. Dabei ist die modellierte Sichtbarkeit eine theoretisch generierte: Nicht nur aufgrund des skizzierten Erzeugungsmechanismus der Simulationsbilder, sondern auch durch die künstlich geschaffene Oberfläche eines Atoms, die sich durch die nicht wahrnehmbare Elektronenverteilung ergibt. Die Simulationsbilder veranschaulichen die mit Theorien beschriebenen Objekte und Prozesse. Da die Art der theoretischen Beschreibung in der Formulierung der Wirkprozesse spezifischer Parameter aufeinander besteht, die als Resultat das Objekt oder den Prozeß konstituieren, ist sie prädestiniert formal-operativ und schließlich simulativ umgesetzt zu werden. D.h. sowohl die Objekte wie auch die Prozesse werden als *Maschinen* aufgefaßt und lassen sich dementsprechend formal mit symbolischen Maschinen darstellen als auch simulieren. Die vielzitierte und aufgrund komplexer Systeme totgesagte Maschinenmetapher zeigt sich deutlich in der Auffassung des instrumentellen Schriftbegriffs, wie er der formal-

operativen Zeichenverwendung und deren Implementierung und Algorithmisierung im maschinellen Medium des Computers zugrundeliegt.<sup>129</sup>

Die Mathematisierung der Wissenschaften kann als Einführung eines instrumentellen Schriftverständnisses gewertet werden und die Umsetzung formaler Strukturen in algorithmisierte Erzeugungsmechanismen numerischer Simulationen macht dieses Verständnis sichtbar. Die numerische Simulation kann deshalb zu recht als Objektschrift zur Erzeugung theoretisch postulierter, semiotisch modellierter Objekte und Prozesse bezeichnet werden. Die Sichtbarmachung dieses Verständnisses ist gleichzeitig die Visualisierung des zugrundeliegenden wissenschaftlichen Weltbildes und der wissenschaftlichen Sichtweise der Dinge und Phänomene. Und die Richtigkeit dieser Sichtweise scheint sich durch den Vergleich zwischen Simulationsbild und Realweltauusschnitt zu bestätigen. Die Evidenz des Anschaulichen verlockt, den Kreis zwischen Beobachtung, Messung, Theorie und Simulation als erfolgreich geschlossen zu betrachten. D.h. die Bestätigung theoretischer Annahmen kann sich nun auch anhand der simulierten Darstellung vollziehen.

Aber kann es sich nicht auch um einen Zirkelschluß zwischen computergestützter Messung, formalisierter Theorie und numerischer Simulation handeln? Auf die methodischen Probleme der verwendeten Heuristiken und Approximationen wurde bereits hingewiesen. Auch auf die Tatsache, daß formale Strukturen beliebig verwendet werden können und sich nicht für die Darstellung spezifischer Inhalte auszeichnen. Doch als weitaus grundlegender stellt sich die Frage, ob es nicht das Zeichenverständnis ist, das diesen Zirkel ermöglicht? Ein Zeichenverständnis, dessen instrumenteller Charakter die Zeichenverwendung operationalisiert und mechanisiert und somit Zeichensysteme als Maschinen oder Apparate auffaßt. Der Unterschied zwischen einer Meßapparatur,<sup>130</sup> einer symbolischen Maschine und einer Simulationsmaschine bestünde lediglich in der medialen Realisierung, nicht jedoch in ihrer Produktionsweise. Dabei wird unter dem Begriff *Maschine* eine Vorrichtung für einen Vorgang verstanden, der regelbasiert von einem Maschinenzustand in den nächsten übergeht. D.h. die Zustände sind nicht beliebig, sondern determiniert. Indem dieser Schriftbegriff untersucht wird, lassen sich Rückschlüsse auf die Bedingung moderner Wissenschaft gewinnen. Eine Bedingung wäre die diskontinuierliche Strukturierung des Untersuchungsbereichs aufgrund der Diskretheit der verwend-

---

<sup>129</sup> Dabei ist die mechanistische Auffassung gemeint, die sich in der Maschinenmetapher artikuliert. Vor allem durch die Simulation komplexer Systeme und deren nichtlineare Dynamik wird immer wieder von der Überwindung des klassischen Determinismus gesprochen. Doch auch wenn die Entwicklung eines komplexen Systems nicht vorhersagbar ist, ist es dennoch in seiner Entwicklung determiniert und von daher formal-operativ darstellbar. Vgl. Booß-Bavenbek, B.: Rationalität und Scheinrationalität durch computergestützte mathematische Modellierung, 1990a; Thomas, H./Leiber, T.: Determinismus und Chaos in der Physik, 1994

<sup>130</sup> Selbst wenn man einem Meßinstrument lediglich die Detektion von Zuständen zubilligt, sind diese Daten ohne entsprechendes, mathematisch modelliertes Datenmodell nicht verwendbar.



ten Symbolsysteme der Schrift, des Computers sowie der Meßinstrumente. Eine andere Bedingung bestünde in der Linearisierung der Abläufe, die lediglich in Form von Visualisierungen in ihrer Gleichzeitigkeit präsentierbar sind. Eine weitere Bedingung wäre die Begrenztheit der Komplexität der Darstellung, da die Diskretheit der Zeichen und die Linearisierung der Abläufe es erlauben, lediglich einige Parameter und Zusammenhänge zu symbolisieren bzw. zu simulieren oder zu messen.<sup>131</sup> Und schließlich wäre die Bedingung der Geordnetheit der Zeichen und Zustände zu nennen, die sich in der Ordnung der Meßwerte wie numerischen Werte zeigt. Zwar verweisen die Variablen der formal-operativen Zeichenverwendung auf keine Ordnungsstruktur, doch die Möglichkeit der Ausführung der symbolisierten Operationen setzt diese voraus.

Das Weltbild der Wissenschaften basiert demnach auf diskreten Entitäten, die nacheinander und jeweils einzeln aufeinander wechselwirken, wobei die Wirkungen einer quantifizierbaren Ordnungsstruktur unterliegen. Diese Sichtweise läßt sich symbolisch im Bild der Formel oder ikonisch im Simulationsbild synthetisieren. Dabei weist der formal-operative Zeichenumgang über den rein instrumentellen Charakter hinaus, insofern die Idee des Kontinuums und des Unendlichen symbolisierbar und operationalisierbar ist. Die Ausführung bedarf jedoch der diskreten und endlichen Umsetzung. War von der systematisierenden Form der Schrift für die Wissenschaften die Rede, so betrifft dies nicht nur logische Aspekte, sondern auch die grundlegende Strukturierung durch die verwendeten Symbolsysteme.<sup>132</sup> Dementsprechend müßten sich durch die Einführung eines neuen Symbolsystems eine neue Strukturierung und damit neue Erkenntnisse ergeben. Dabei geht es nicht nur darum, wie René Descartes die Nutzung der Schrift für die Wissenschaften rühmt: *„Im Vertrauen auf seine [Schriftgebrauch] Hilfe werden wir hier überhaupt gar nichts dem Gedächtnis anvertrauen, ... und alles, was man sich merken muß niederschreiben, und zwar in sehr kurzen Zeichen, damit wir ... alles in einer blitzschnel-*

---

<sup>131</sup> Selbst wenn durch die steigende Leistungsfähigkeit der Rechner immer komplexere Systeme simulierbar sind, ist die Anzahl der Parameter und funktionalisierten Zusammenhänge begrenzt. Gleiches gilt auch für die formal-operative Darstellung sowie für Meßinstrumente.

<sup>132</sup> Rolf Zimmermann gesteht der Schrift auch ontologische Implikationen zu. *„Der formale Gegenstandsbezug gehört somit zur Funktionsbestimmung einer Aussagestruktur als Aussagestruktur.“* Zimmermann, R.: Der „Skandal der Philosophie“ und die Semantik, 1981, S. 77/78. Er verweist auf die Folgerungslücke zwischen Wahrnehmungsdaten und präsenzlokalisierenden Aussagen, die nicht durch eine logische Implikation verknüpft sind, hin und verlegt damit den Bezug auf die Welt in die Struktur der Aussageform. Diese Struktur ist eine schriftgebundene: *„Daß wir die externe Existenz dieser Gegenstände nachweisen können, ist kein Zufall, weil sie systematisch mit der Möglichkeit unseres Sprachgebrauchs zusammenhängen. Und daher gilt andererseits: Wenn unser Sprachgebrauch den Verwendungsbedingungen von Identifikation und Prädikation unterliegt, die sich in Gestalt von Sortalprädikaten und interdependenten singulären Termini manifestieren, dann muß es stabile raum-zeitliche Gegenstände geben.“* Zimmermann, 1981, S. 108. Die sprachanalytische Transformation der Ontologie rekuriert auf die vertikative Form des *ist*. Nicht das Sein im Allgemeinen, sondern das Sein als Existenz ( $\exists$ ) mit seinem Behauptungsmoment ist leitend für die analytische Gegenstandstheorie und die Wissenschaften. Daher stehen assertotische Sätze mit ihrem Wahrheitsanspruch im Mittelpunkt, expliziert durch: *„Es ist der Fall, daß ...“* oder *„Es ist wahr, daß ...“* oder bei wie bei Gottlob Frege *“I—”*. Deutlich zeigt sich dies in der wissenschaftlichen Erklärung. *„Das zu Erklärende, welches Explanandum genannt werden soll, ist stets ein Sachverhalt p, der durch einen empirischen Satz s beschrieben wird, und die eigentlich Erklärung heischende Frage lautet: Warum ist es der Fall, daß p?“* Stegmüller, W.: Wissenschaftliche Erklärung und Begründung, Berlin 1969, S. 74

*len Bewegung des Denkens durchlaufen und intuitiv so viel wie möglich auf einmal fassen können.*<sup>133</sup>

Es geht darum, alles so darzustellen, daß es intuitiv erfaßbar ist, da es anschaulich geworden ist. Es bedarf keiner blitzschnellen Bewegung durch formal artikulierte Zusammenhänge mehr. Die Zusammenhänge zeigen sich in den visualisierten Datenstrukturen und lassen sich quasi-empirisch überprüfen. Die in den Formeln symbolisch angezeigten Relationen werden durch die Simulation numerisch entfaltet und externalisiert. Als sichtbare Datenstrukturen werden sie in einem Ursache-Wirkungs-Verhältnis direkt manipulierbar.<sup>134</sup> Dabei simuliert der Computer die Gleichzeitigkeit der Prozeß- und Objektzustände durch die enorme Rechengeschwindigkeit. Der in den Wissenschaften vorherrschenden theorieorientiert-analytischen Darstellungsform wird mit der numerischen Simulation und der Visualisierung eine anschaulich-synthetische Darstellungsform beigelegt. Dies ist möglich geworden, da die Schrift auf sich selbst angewandt zum Gegenstand semiotischer Operationen avanciert und als Objektschrift zur semiotischen Modellierung von (Daten-)Objekten und (Symbol-) Prozessen im (virtuellen) Raum und in der Zeit dient.

---

<sup>133</sup> Descartes, R.: Regeln zur Ausrichtung der Erkenntniskraft, 1972, S. 75. Eben diese mnemotechnische Funktion der Schrift, die Descartes rühmt und als konstitutiv für eine analytische und klare Wissenschaft sieht, kritisierte Sokrates für die Philosophie: „Denn diese Kunst wird Vergessen schaffen in den Seelen derer, die sie erlernen, aus Achtlosigkeit gegen das Gedächtnis, da die Leute im Vertrauen auf das Schriftstück von außen sich werden erinnern lassen durch fremde Zeichen, nicht von innen heraus durch Selbstbesinnung.“ Vgl. Platon: Paidros, 1988c, S. 103

<sup>134</sup> Beispielsweise kann durch Änderung der Parameterwerte das Verhalten der Simulation getestet werden. Es ist aber auch denkbar, anhand der Simulationsbilder Manipulationen durchzuführen, wie dies im molecular modelling der Fall ist.

# 1. Abbildungsverzeichnis

Abb.	Seite	Titel	Quelle [Autor, Datum,Seite]
-	3	Kelvin-Helmholtz-Instabilitäten	Kaufmann/Smarr, 1994, 21
1	43	Symbolsysteme	Gramelsberger
2	49	Kurve zu $y = x^2$	Devlin, 1997, 93
3	52	Begrenztes Wachstum	Devlin, 1997, 105
4	52	Unbegrenztes Wachstum	Devlin, 1997, 105
5	52	Logistisches Wachstum	Devlin, 1997, 105
6	59	Speicherschaltung	Schauer, 1976, 36
7	64	Zählkalkül	Thiel, 1995, 115
8	86	Systemkonzept	Bossel, 1989, 11
9	90	Liniengraphik	Fortner, 1995, 100
10	90	Streugraphik	Fortner, 1995, 102
11	90	3D-Oberflächendarstellung	Fortner, 1995, 125
12	90	Konturendarstellung	Fortner, 1995, 126
13	90	Vektordarstellung	Fortner, 1995, 127
14	92	Isosurface-Darstellung	Teschner et al., 1994, 100
15	94	Flugzeugumgebung	SCAI-Report, 1998, 16
16	94	Crashsimulation	Galbas et al., 1997, 45
17	94	Herzklappensimulation	Barkkee et al., 1997, 32
18	95	Methanflammensimulation	Hempel, 1997, 50
19	97	Stoßwellen eines Jets	Kaufmann/Smarr, 1994, 76
20	97	Simulationsvergleich (Gitter)	Kaufmann/Smarr, 1994, 79
21	97	Kelvin-Helmholtz-Instabilitäten	Kaufmann/Smarr, 1994, 21
22	111	Zeichen-Zustand-Relation	Gramelsberger
23	127	Wasserstoffatom	unbekannt
24	128	VAX Simulation	Kaufmann/Smarr, 1994, 58
25	128	Cray-1 Simulation	Kaufmann/Smarr, 1994, 58
26	136	Schneeflocken	Robin, 1992, 42
27	136	Sehvorgang	Robin, 1992, 71
28	136	Prisma	Robin, 1992, 84
29	136	Teilchenspuren	Robin, 1992, 143
30	136	Stammbaum	Robin, 1992, 162
31	136	Morphologie der Fische	Robin, 1992, 209
32	138	Kelvin-Helmholtz-Instabilitäten	Kaufmann/Smarr, 1994, 21

## 2. Quellenverzeichnis

<b>Nr.</b>	<b>Datum</b>	<b>Ausdruck</b>	<b>Autor/Quelle</b>	<b>URL/ Manuskript</b>
1	--	25.08.1999	Kolb, Peter: Universität Heidelberg, Informatik	C-Kurs <a href="http://www.gs.uni-heidelberg.de/~sass/ckurs/">http://www.gs.uni-heidelberg.de/~sass/ckurs/</a>
2	Feb. 1995		Mattern, Friedrich: TH Darmstadt, FB Informatik	Modellierung und Simulation (Vortragsmanuskript)
3	18.06.1998	03.08.1998	Meuer, Hans-Werner: Universität Mannheim, Rechenzentrum	TOP 500 <a href="http://www.top500.org/top500.list.html">http://www.top500.org/top500.list.html</a>
4	--	--	Sprenger, Thomas C./Gross, M.H. u.a.: ETH Zürich, Computer Science Department	A Framework for Physically-Based Information Visualization (Manuskript)
5	1989	--	Müller-Krumbhaar, H.: Forschungszentrum Jülich	Computersimulation in der Physik (Vorlesungsmanuscript des 20. IFF-Ferienkurses in der KFA Jülich)
6	12.03.1999	06.08.1999	Lorenz, Peter: Universität Magdeburg, Institut für Informatik	Einführung in Modellierung, Simulation und Animation <a href="http://isgsim.cs.uni-magdeburg.de/~pelo/s1g/sa1/sa1.shtml">http://isgsim.cs.uni-magdeburg.de/~pelo/s1g/sa1/sa1.shtml</a>

### 3. Literaturverzeichnis

- Abel**, Günter [1995]: Sprache, Zeichen und Interpretation, in: Trabant, (Hg.), 1995, S. 165-190
- Abraham**, Ralph H./Shaw, Ch. [1988ff]: Dynamics - The geometry of behavior, 4 Bde., Santa Cruz
- Aho**, A.V./Ullmann, J.D. [1995]: Foundation of Computer Science, New York
- Andersen**, Peter B. [1994]: Katastrophen und Computer, in: Zeitschrift für Semiotik, Bd 16, Heft 1-2/94, S. 29-50
- Andersen**, Peter B. /Øhrstrøm, P. [1994]: Hyperzeit, in: Zeitschrift für Semiotik, Bd 16, Heft 1-2, 1994, S. 51-68
- Aristoteles** [1970]: Metaphysik, Stuttgart
- Aristoteles** [1959]: Poetik, Paderborn (herausgegeben von Paul Gohlke)
- Aristoteles** [1998]: Analytiken, Hamburg (herausgegeben von Hans Günter Zekel)
- Arnheim**, Rudolf [1974]: Anschauliches Denken. Zur Einheit von Bild und Begriff, Köln
- Ars Electronica** (Hg.) [1989]: Philosophien der neuen Technologie, Berlin
- Assmann**, Aleida [1993]: Exkarnation. Gedanken zur Grenze zwischen Körper und Schrift, in: Huber/Müller (Hg.), 1993, S.133-155
- Bacon**, Francis [1990]: Neues Organon, 2 Bde., Hamburg (herausgegeben von Wolfgang Krohn, Original 1620)
- Baker**, Gordon[1987]: Moderne Sprachtheorie aus philosophischer Sicht, in: Wimmer, (Hg.), 1987, S. 77-98
- Barwise**, Jon/Etchemendy, J. [1992]: Visual Information and Valid Reasoning, in: Burkholder, (Hg.), 1992, S.160-182
- Bastide**, F. [1988]: The iconography of scientific texts: principles of analysis, in: Lynch/Woolgar (Hg.), 1988, S. 187-230
- Baudrillard**, Jean [1978]: Agonie des Realen, Berlin
- Baudrillard**, Jean [1982]: Der symbolische Tausch und der Tod, München
- Bechmann**, G. et a.[1995]: Sozialwissenschaftliche Konzepte einer interdisziplinären Klimawirkungsforschung, Karlsruhe (Studie des Instituts für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse, Forschungszentrum Karlsruhe)
- Becker**, Oskar [1959]: Die philosophische Frage nach der Grenze der mathematischen Denkweise, in: Thiel (Hg.), 1982, S. 369-379
- Becker-Lemgau**, Ulrich/Hackenberg, M.G./Steckel, B./Tilch, R. [1998]: Parallel Multigrid in the Simulation of Metal Flow, in: D'Hollander/Joubert/Peters/Trottenberg (Hg.), 1998, S. 195-202
- Bennett**, B.S. [1995]: Simulation fundamentals, Englewood Cliffs
- Bense**, Max [1975]: Semiotische Prozesse und Systeme in Wissenschaftstheorie und Design, Ästhetik und Mathematik, Baden-Baden
- Bergson**, Henri [1948]: Denken und schöpferisches Werden, Meisenheim
- Bernays**, Paul [1982]: Über den Platonismus in der Mathematik, in: Thiel (Hg.), 1982, S. 223-241
- Bernays**, Paul [1977]: Gesichtspunkte zur natürlichen Ontologie, in: Weingartner/Morscher (Hg.), 1977, S. 9-18
- Bitz**, Thomas [1994]: Ich seh' in 3-D, in: Screen Multimedia 8/94, S. 53-58
- Black**, Max [1970]: How do pictures represent?, in: Gombrich/Hochberg/Black (Hg.), 1970, S. 95-130
- Blanke**, Börries [1998]: Modelle des ikonischen Zeichens, in: Zeitschrift für Semiotik Bd. 20, 3-4/98, S. 285-303
- Blanke**, Börries [1998]: Semiotische Perspektiven auf das Bild, in: Zeitschrift für Semiotik Bd. 20, 3-4/98, S. 219-224
- Blasche**, Siegfried/Mittelstraß, J. (Hg.) [1995]: Enzyklopädie Philosophie und Wissenschaftstheorie, Bd. 3, Stuttgart - Weimar
- Bley**, Horst [1994]: Kompendium Medizin und Technik. Grundlagen und Anwendungen der Elektrophysik, Elektromedizin, Elektrotherapie, Bildgebenden Verfahren, Labordiagnostik, Informatik, Gräfelting
- Blühdorn**, Hardarik [1998]: Bild und Wirklichkeit, in: Zeitschrift für Semiotik, Bd. 20, 3-4/98, S. 305-315
- Blumenberg**, Hans [1989]: Höhlenausgänge, Frankfurt/M.
- Blumenberg**, Hans [1998]: Paradigmen zu einer Metaphorologie, Frankfurt/M.

- Bochenski**, I.M./Menne, A. [1954]: Grundriß der Logistik, Paderborn
- Bochenski**, I.M./Menne, A. [1983]: Grundriß der formalen Logik, Paderborn
- Boehm**, Gottfried (Hg.) [1995]: Was ist ein Bild?, München
- Bogarín**, Jorge [1991]: Zeichen, Zahlen und Sein: Semiotik als ontologische Rahmentheorie der Mathematik, in: Zeitschrift für Semiotik, Bd 13, Heft 3-4, 1991, S. 237-246
- Böhme**, Gernot [1991]: Die Natur im Zeitalter ihrer technischen Reproduzierbarkeit, in: Kunstforum, Nr. 114, Jul./Aug. 1991, S. 166-177
- Böhme**, Gernot/Daele, W. van den/Krohn, W. [1977]: Experimentelle Philosophie. Ursprünge autonomer Wissenschaftsentwicklung, Frankfurt/M.
- Bolik**, Sybille (Hg.) [1999]: Medienfiktionen: Illusion – Inszenierung – Simulation, Frankfurt/M. u.a.
- Bolz**, Norbert [1990]: Theorie der neuen Medien, München
- Bolz**, Norbert [1992]: Die Welt als Chaos und als Simulation, München
- Bolz**, Norbert/Kittler, F./Tholen, Ch. (Hg.) [1994]: Computer als Medium, München
- Bolz**, Norbert [1994a]: Computer als Medien – Einleitung, in: Bolz/Kittler/Tholen (Hg.), 1994, S. 9-18
- Boole**, George [o.Dat.]: An Investigation of the Laws of Thought, on which are founded the Mathematical Theories of Logic and Probabilities., New York (Original 1854)
- Boole**, George [1965]: The Mathematical Analysis of Logic. Being an Essay towards a Calculus of Deductive Reasoning, Oxford (Original 1847)
- Booß-Bavnbek**, Bernhelm [1990]: Gegen unfundierte, verantwortungslose computergestützte Modellierung, in: Randow (Hg.), 1990, S. 138-157
- Booß-Bavnbek**, Bernhelm [1990a]: Rationalität und Scheinrationalität durch computergestützte mathematische Modellierung, in: Reuter (Hg.), 1990, S. 148-167
- Borgmann**, Albert [1986]: Philosophical Reflections on the Microelectronic Revolution, in: Mitcham/Huning (Hg.), 1986, S. 189-204
- Born**, Rainer [1981]: Information und Wirklichkeit – Wissenschaftstheorie als Provokation, in: Schauer/Tauber (Hg.), 1981, S. 198-126
- Bornet**, Gérard [1995]: Booles (Zeichen-)Modell des Geistes. Die metaphorische Wurzel der algebraischen Logik, in: Danneberg et al. (Hg.), 1995, S. 246-267
- Borsche**, Tilman (Hg.) [1998]: Blick und Bild im Spannungsfeld von Sehen, Metaphern und Verstehen, München
- Bossel**, Hartmut [1987]: Computermodelle für die Plananalyse: Hierarchie, Zielorientierung, Szenarien, in: Lenk/Ropohl (Hg.), 1978, S. 127-150
- Bossel**, Hartmut [1989]: Simulation dynamischer Systeme. Grundwissen, Methoden, Programme, Braunschweig -Wiesbaden
- Bourbaki**, N. [1974]: Die Architektur der Mathematik, in: Otte (Hg.), 1974, S. 140 - 160
- Braitenberg**, Valentin/Hosp, I. (Hg.) [1995]: Simulation. Computer zwischen Experiment und Theorie, Reinbek bei Hamburg
- Brakke**, Erik/Ho, D.P./Wolf, K. [1997]: Herzklappen, Drehmomentwandler, Fährschiffe und andere Probleme, in: Der GMD-Spiegel 3/1997, S. 30-32
- Braun**, Martin [1979]: Differentialgleichungen und ihre Anwendungen, Berlin – Heidelberg - New York
- Bredenkamp**, Horst [1997]: Das Bild als Leitbild. Gedanken zur Überwindung des Anikonismus, in: Hoffmann/Joerges/Severin (Hg.), 1997, S. 225-246
- Breger**, Herbert [1986]: Leibniz' Einführung des Transzendenten, in: Heinekamp (Hg.), 1986, S. 119-132
- Breidert**, Wolfgang [1984]: Berkeleys Kritik an der Infinitesimalrechnung, in: Heinekamp (Hg.), 1986, S. 185-191
- Bremer**, Hartmut/Habermeier, S./Wladarsch, S. (Hg.) [1994]: Chaos und Strukturbildung. Proceedings der 3. Jahrestagung der Chaosgruppe e.V., München
- Brickmann**, Jürgen [1984]: Raster Computer Graphics in Molecular Physics, in: International Journal of Quantum Chemistry: Quantum Chemistry Symposium 18, 1984, S. 647-659
- Brickmann**, Jürgen [1988]: Fraktale Dimension in der Chemie, in: Gerok et al. (Hg.), 1988, S. 229-247
- Brickmann**, Jürgen [1989]: Graphische Workstationen in der Chemie, in: GIT Fachz. Lab. 9/89, S. 810-812

- Brickmann, Jürgen** [1992]: Molecular graphics: how to see a molecular scenario with the eyes of a molecule, in: J. Chim. Phys. 89/1992, S. 1709-1721
- Brickmann, Jürgen/Heiden, W. /Vollhardt, H. /Zachmann, C.-D.** [1995]: New Man-Machine Communication Strategies in Molecular Modelling, in: The proceedings of the twenty-eighth Hawaii international conference on system science, S. 273-282
- Brickmann, Jürgen/Knapp, W.** [1984]: Der Computer ersetzt das Labor, in: Bild der Wissenschaft 3/84, S. 38-42
- Brockman, John** [1996]: Die dritte Kultur. Das Weltbild der modernen Naturwissenschaft, München
- Bullinger, H.-J./Riedel, O./Rößler, A.** [1995]: Virtual Reality as a Focal Point between New Media and Telecommunication, in: Virtual Reality World '95, S. 11-17
- Burckhardt, Hans** [1980]: Logik und Semiotik in der Philosophie von Leibniz, München
- Burkhardt, Armin:** Geballte Zeichen: Das Symbol und seine Deutung, in: Zeitschrift für Semiotik, Bd. 18 4/98, S. 461-482
- Burkholder, Leslie (Hg.)** [1992]: Philosophy and the Computer, Boulder - San Fransisco - Oxford
- Burricher, C./Inhetveen, R./Kötter, R. (Hg.)** [1986]: Technische Rationalität und rationale Heuristik, Paderborn u.a.
- Bynum, Terrel W./Moor, J. H.** [1998]: The Digital Phoenix: How Computers are Changing Philosophy, Oxford - Malden
- Cahn, Michael** [1997]: Die Rhetorik der Wissenschaft im Medium der Typographie. Zum Beispiel die Fußnote, in: Rheinberger/Hagner/Wahrig-Schmidt (Hg.), 1997, S. 91-110
- Canty, Morton J.** [1995]: Chaos und Systeme. Eine Einführung in Theorie und Simulation dynamischer Systeme, Braunschweig - Wiesbaden
- Carl, Wolfgang** [1974]: Existenz und Prädikation, München
- Carnap, Rudolf** [1961]: Der logische Aufbau der Welt, Hamburg (Original 1928)
- Carnap, Rudolf** [1986]: Einführung in die Philosophie der Naturwissenschaft, Frankfurt/M. (herausgegeben von Martin Gardner, Original 1966)
- Carnap, Rudolf** [1993]: Mein Weg in die Philosophie, Stuttgart
- Cassirer, Ernst** [1985]: Symbol, Technik, Sprache: Aufsätze aus den Jahren 1927 – 1933, Hamburg
- Cassirer, Ernst** [1985a]: Das Symbolproblem und seine Stellung in der Philosophie (1927), in: Cassirer, 1985, S. 1-21
- Casti, John L.** [1997]: Would-be-worlds. How simulation is changing the frontiers of science, New York u.a.
- Christen, Olaf** [1997]: Bessere Ernten mit dem Computer? Simulationen in der Agrarforschung/Unzulängliche Modelle beschränken die Aussagekraft, in: FAZ 15.1.1997, Nr.12, S. N2
- Church, A.** [1936]: Unsolvable problem of elementary number theory, in: Amer. J. Math., Bd. 858, S. 345 – 363
- Church, A.** [1936a]: A note on the Entscheidungsproblem, in: J. Symb. Logic, Bd. 1, S. 40 – 41, cor. S. 101 – 102
- Comte, Auguste** [1956]: Rede über den Geist des Positivismus, Hamburg (herausgegeben von Iring Fetscher, Original 1844)
- Couffignal, Louis** [1955]: Denkmaschinen, Stuttgart
- Coulmas, Florian** [1981]: Über Schrift, Frankfurt/M.
- Coy, Wolfgang** [1994]: Gutenberg und Turing: Fünf Thesen zur Geburt der Hypermedien, in: Zeitschrift für Semiotik, Bd 16, Heft 1-2, 1994, S. 69-74
- Coy, Wolfgang** [1994a]: Aus der Vorgeschichte des Mediums Computer, in: Bolz/Kittler/Tholen (Hg.), 1994, S. 19-28
- Coy, Wolfgang et al. (Hg.)** [1992]: Sichtweisen der Informatik, Braunschweig - Wiesbaden
- Coyne, Richard** [1995]: Desining Information Technology in the Postmodern Age. From Method to Metaphor, Cambridge - London
- Curry, Haskell B./Feys, R./Craig, W.** [1958]: Combinatory Logic I., Amsterdam
- Danneberg, L. et al. (Hg.)** [1995]: Metapher und Innovation, Bern u.a.
- Davies, Paul (Hg.)** [1989]: The New Physics, Cambridge u.a.
- Davis, Douglas** [1975]: Vom Experiment zur Idee. Die Kunst des 20. Jahrhunderts im Zeichen von Wissenschaft und Technologie. Analysen, Frankfurt/M.

- Davis**, Martin (Hg.) [1964]: The Undecidable. Basic Papers On Undecidable Propositions, Unsolvability Problems And Computable Functions, Hewlett - New York
- Deken**, Joseph [1984]: Computerbilder: Kreativität und Technik, Basel u.a.
- Deleuze**, Gilles [1992]: Differenz und Wiederholung, Frankfurt/M.
- Deleuze**, Gilles [1995]: Die Falte: Leibniz und der Barock, Frankfurt/M.
- Derrida**, Jaques [1974]: Grammatologie, Frankfurt/M.
- Descartes**, René [1972]: Regeln zur Ausrichtung der Erkenntniskraft, Hamburg (herausgegeben von Lüder Gäbe, Original 1628/29)
- Descartes**, René [1978]: Von der Methode des richtigen Vernunftgebrauchs und der wissenschaftlichen Forschung, Hamburg (herausgegeben von Lüder Gäbe, Original 1637)
- Descartes**, René [1981]: Geometrie, Darmstadt (herausgegeben von Ludwig Schlesinger, Original 1637)
- Devlin**, Keith [1994]: Muster der Mathematik: Ordnungsgesetze des Geistes und der Natur, Heidelberg - Berlin
- Dijkum**, Cor van [1995]: Computers and Construction of Everyday Life, in: Wallner/Schimmer (Hg.), 1995, S. 117-128
- Dretske**, Fred [1986]: Minds, Machines and Meaning, in: Mitcham/Huning (Hg.), 1986, S. 97-110
- Dudman**, Viktor H. [1976]: From Boole to Frege, in: Schirn (Hg.), 1976a, S. 109-138
- Earnshaw**, R. A./Wiseman, N. [1992]: An Introductory Guide of Scientific Visualization, Berlin
- Ebbinghaus**, Hans-Dietrich [1970]: Turing-Maschinen und berechenbare Funktionen I., in: Jacobs (Hg.) 1970, S. 1-20
- Ebbinghaus**, Hans-Dietrich [1970a]: Aufzählbarkeit, in: Jacobs (Hg.) 1970, S. 64-113
- Ebbinghaus**, Hans-Dietrich [1970b]: Turing-Maschinen und berechenbare Funktionen III., in: Jacobs (Hg.) 1970, S. 55-63
- Eco**, Umberto [1985]: Semiotik und Philosophie der Sprache, München
- Eco**, Umberto [1994]: Einführung in die Semiotik, München
- Eco**, Umberto [1995]: Im Labyrinth der Vernunft. Texte über Kunst und Zeichen, Leipzig
- Eco**, Umberto [1997]: Die Suche nach der vollkommenen Sprache, München
- Ehrenspeck**, Yvonne [1996]: Aisthesis und Ästhetik. Überlegung zu einer problematischen Entdifferenzierung, in: Mollenhauer/Wolf (Hg.) [1996], S. 201-230
- Engelsman**, Steven B. [1984]: Orthogonaltrajektorien im Prioritätsstreit zwischen Leibniz und Newton, in: Heinekamp (Hg.) [1986], S. 144-156
- Estes**, Charles R. [1994]: The Real-World Connection, in: Simulation & Gaming 25/4, S. 456-463
- Faulstich**, Werner [1991]: Medientheorie: Einführung und Überblick, Göttingen
- Feilke**, Helmuth/Schmidt, S. J. [1995]: Denken und Sprechen. Anmerkungen zur strukturellen Koppelung von Kognition und Kommunikation, in: Trabant (Hg.), 1995, S. 269-297
- Feldbusch**, E. [1985]: Geschriebene Sprache, Untersuchung zu ihrer Herausbildung und Grundlegung ihrer Theorie, Berlin - New York
- Figge**, Udo L. [1991]: Computersemiotik, in: Zeitschrift für Semiotik, Bd 13, Heft 3-4, 1991, S. 321-330
- Fischer**, Ernst P. [1997]: Das Schöne und das Biest. Ästhetische Momente in der Wissenschaft, München - Zürich
- Fischer**, Martin [1996]: Der Computer - Konstruktion von Realität durch Schrift?, (Philosophische Magisterarbeit), FU Berlin, KIT-Report 128, Technische Universität Berlin
- Fischer**, Martin [1997]: Schrift als Notation, in: Krämer/Koch (Hg.) 1997, S. 81 - 98
- Fischer**, Peter (Hg.) [1996]: Technikphilosophie. Von der Antike bis zur Gegenwart, Leipzig
- Fleck**, Ludwig [1980]: Entstehung und Entwicklung einer wissenschaftlichen Tatsache. Einführung in die Lehre vom Denkstil und Denkkollektiv, Frankfurt/M. (Original 1935)
- Foerster**, Heinz von [1993]: Wissen und Gewissen: Versuch einer Brücke, Frankfurt/M.
- Ford**, Joseph [1989]: What is chaos, that we should be mindful of it?, in: Davies (Hg.), 1989, S. 348-372
- Fortner**, Brand [1995]: The Data Handbook. A Guide to Understanding the Organization and Visualization of Technical Data, New York



- Forrester**, Jay [1973]: World Dynamics, Cambridge Mass.
- Franke**, Herbert/Helbig, H. [1988]: Die Welt der Mathematik. Computergrafik zwischen Wissenschaft und Kunst, Düsseldorf
- Franzen**, Winfried [1995]: Die Sprache und das Denken. Zum Stand der Diskussion über den "linguistischen Relativismus", in: Trabant (Hg.), 1995, S. 249-268
- Frege**, Gottlob [1964]: Begriffsschrift und andere Aufsätze, Darmstadt (Original 1879)
- Frege**, Gottlob [1988]: Die Grundlagen der Arithmetik: eine logisch mathematische Untersuchung über den Begriff der Zahl, Hamburg (Original 1884)
- Frege**, Gottlob [1993]: Logische Untersuchungen, Göttingen (herausgegeben von Günther Patzig)
- Frege**, Gottlob [1994]: Funktion, Begriff, Bedeutung. Fünf logische Studien, Göttingen (herausgegeben von Günther Patzig)
- Freyer**, Hans [1987]: Herrschaft, Planung und Technik. Aufsätze zur politischen Soziologie, Weinheim
- Friemel**, M.-J./Müller-Schonberger G./Schütt A. (Hg.) [1990]: Forum`90 Wissenschaft und Technik. Neue Anwendungen mit Hilfe aktueller Computer-Technologien, Berlin u.a.
- Frühwald**, Wolfgang [1995]: Die Informatisierung des Wissens. Zur Entstehung der Wissensgesellschaft in Deutschland, in: Alcatel SEL, Broschüre zur Stiftungsfeier 1995, S. 5-14
- Furlan**, Peter [o.Dat]: Das gelbe Rechenbuch 1 für Ingenieure, Naturwissenschaftler und Mathematiker. Lineare Algebra, Differentialrechnung, Dortmund
- Galbas**, Hans G./Görg, B./Kolp, O./Thole C.-A. [1997]: Schnelle parallele Kontaktverfahren zur Crashesimulation, in: Der GMD-Spiegel 3/1997, S. 44-46
- Galison**, Peter [1995]: Aufbau/Bauhaus: Logischer Positivismus und architektonischer Modernismus, in: Dtsch. Z. Philos. 43 (1995) 4, S. 653-685
- Galison**, Peter [1997]: Die Ontologie des Feindes. Norbert Wiener und die Vision der Kybernetik, in: Rheinberger/Hagner/Wahrig-Schmidt (Hg.), 1997, S. 281-324
- Gálvez**, J.P. [1989]: Referenz und Theorie möglicher Welten. Darstellung und Kritik der logisch-semantischen Theorie in der sprachanalytischen Philosophie, Frankfurt/M.
- Geach**, P.T.[1975]: Names and Identity, in: Guttenplan (Hg.), 1975, S. 139-158
- Gebauer**, Gunter [1995]: Einführung in das Kolloquium "Symbol und Sprache: Interpretationswelten", in: Lenk (Hg.), 1995, S. 261-263
- Geier**, Manfred [1995]: Als die Philosophen schreiben lernten. Langzeitwirkungen einer medialen Revolution, in: Trabant (Hg.), 1995, S.127-144
- Gendolla**, P. [1997]: Über Simulationsmodelle, in: Schanze/Ludes (Hg.), 1997, S. 172-182
- Gerhardt**, Martin/Schuster, H. [1995]: Das digitale Universum. Zelluläre Automaten als Modelle der Natur, Braunschweig - Wiesbaden
- Gericke**, Helmuth [1970]: Geschichte des Zahlbegriffs, Mannheim - Wien - Zürich
- Gerok**, Wolfgang et al. (Hg.) [1988]: Ordnung und Chaos in der unbelebten und belebten Natur, Stuttgart
- Gierl**, Lothar [1992]: Grundfunktionen für kognitive offene medizinische Expertensysteme, in: Biometrie und Informatik in Medizin und Biologie 2/1992, S. 52-59
- Giesecke**, Michael [1992]: Sinnenwandel, Sprachwandel, Kulturwandel. Studien zur Vorgeschichte der Informationsgeschichte, Frankfurt/M.
- Glaser**, Wilhelm R. [1996]: Repräsentation bei Maschinen, in: Zeitschrift für Semiotik, Bd. 18 2-3/96, S. 169-189
- Göbel**, Martin/Müller, H. /Urban, B. (Hg.) [1995]: Visualization in Scientific Computing, Wien - New York
- Gold**, Peter [1991]: Darstellung und Abstraktion. Aporien formaler Ästhetik, Frankfurt/M.
- Gombrich**, Ernst H./Hochberg J. /Black, M. [1970]: Art, Perception and Reality, Baltimore – London
- Gombrich**, Ernst H. [1986]: Kunst und Illusion. Zur Psychologie der bildlichen Darstellung, Stuttgart u.a.
- Goodman**, Nelson [1988]: Tatsache, Fiktion, Voraussage, Frankfurt/M.
- Goodman**, Nelson [1993]: Weisen der Welterzeugung, Frankfurt/M.
- Goodman**, Nelson [1995]: Sprachen der Kunst. Entwurf einer Symboltheorie, Frankfurt (Original 1968)
- Goodman**, Nelson/Elgin, C. [1988]: Revisionen: Philosophie und andere Künste und Wissenschaften, Frankfurt/M.

- Goody, Jack** (Hg.) [1986]: Literacy in Traditional Societies, London,
- Gottfried-Wilhelm-Leibniz-Gesellschaft** (Hg.) [1983]: Leibniz - Werk und Wirkung. i.V. Internationaler Leibniz-Kongreß. Vorträge, Hannover
- Gramelsberger, Gabriele** [1996]: Theorie – Simulation – Experiment. Computergestützte Simulation als erkenntnistheoretische Erweiterung der Erklärungs- und Prognosemöglichkeiten in den Naturwissenschaften, (Philosophische Magisterarbeit) Universität Augsburg, Philosophische Fakultät I
- Gramelsberger, Gabriele** [1999]: Zur Intersubjektivität ikonischer Wissensvermittlung und deren Wahrheitsfähigkeit, in: Hofmann (Hg.), 1999, S. 61-75
- Grebner, K./May F.** [1995]: Applications of Virtual Reality Techniques in the Industry Selected Examples, in: Virtual Reality World '95, S. 451-468
- Greenleaf, Newcomb** [1992]: Algorithm: A New Paradigm in Mathematics, in: Burkholder (Hg.), 1992, S. 195-210
- Gröller, Eduard** [1994]: Chaostheorie und Computergraphik, in: Bremer/Habermeier/Wladarsch (Hg.), 1994, S. 73-86
- Großklaus, Götz** [1993]: Natur-Raum: von der Utopie zur Simulation, München
- Großklaus, Götz** [1995]: Medien-Zeit, Medien-Raum. Zum Wandel der raumzeitlichen Wahrnehmung in der Moderne, Frankfurt/M.
- Grunwald, Armin** [1998]: Das Prädiskursive Einverständnis. Wissenschaftlicher Wahrheitsbegriff und prozedurale Rechtfertigung, in: Z.f. allg. Wissenschaftstheorie, 29/1998, S. 205-223
- Gunzenhäuser, Rul** [1975]: Maß und Information als ästhetische Kategorien. Einführung in die ästhetische Theorie G.D. Birkhoffs und die Informationsästhetik, Baden-Baden
- Guttenplan, Samuel** (Hg.) [1975]: Mind and Language, Oxford
- Haas, Marianne** [1989]: Blumen der Wissenschaft. Oder: die zufällige Ästhetik der High-Tech, in: Katalog zur Ausstellung ArtBit Computer in der Kunst im Computer vom 4.11.1989 - 3.12.1989, S. 70-84
- Habermas, Jürgen** [1997]: Theorie des kommunikativen Handelns. Bd. 1: Handlungsrationalität und gesellschaftliche Rationalisierung, Frankfurt/M.
- Habermas, Jürgen** [1997a]: Theorie des kommunikativen Handelns. Bd. 2: Zur Kritik der funktionalistischen Vernunft, Frankfurt/M.
- Hacking, Ian** [1996]: Einführung in die Philosophie der Naturwissenschaften, Stuttgart
- Hagner, Michael** [1997]: Zwei Anmerkungen zur Repräsentation in der Wissenschaftsgeschichte, in: Rheinberger/Hagner/Wahrig-Schmidt (Hg.), 1997, S. 339-356
- Harbordt, Steffen** [1974]: Computersimulation in den Sozialwissenschaften, 2 Bde., Reinbek b. Hamburg
- Harbordt, Steffen** [1978]: Probleme der Computersimulation, in: Lenk/Ropohl (Hg.), 1978, S. 151-165
- Hartkopf, Werner** [1987]: Dialektik – Heuristik – Logik. Nachgelassene Studien, Frankfurt/M. (herausgegeben von Hermann Baum)
- Hartmann, Stephan** [1996]: The World as a Process, in: Hegselmann et al. (Hg.), 1996, S. 77-100
- Hastedt, Heiner** [1994]: Aufklärung und Technik. Grundprobleme einer Ethik der Technik, Frankfurt/M.
- Hege, Hans-Christian/Polthier, K.** [1997]: Collected Abstracts of the International Workshop Visualization and Mathematics '97, Berlin
- Hegselmann, Rainer** [1995]: Die Chaostheorie - Eine Herausforderung für Philosophie und Wissenschaftstheorie, in: Lenk (Hg.), 1995, S. 157-159
- Hegselmann, Rainer et al.** (Hg.) [1996]: Modelling and Simulation in the Social Sciences from the Philosophy of Science Point of View, Dordrecht u.a.
- Heiden, Wolfgang/Brickmann, J.** [1994]: Segmentation of protein surfaces using fuzzy logic, in: J.Mol. Graphics, 1994, Vol.12, June, S. 106-115
- Heinekamp, Albert** (Hg.) [1986]: Dreihundert Jahre "Nova methodus" von G.W. Leibniz (1684-1984): Symposium der Leibniz-Gesellschaft im Congresszentrum "Leewenhorst" in Noordwijkerhout (Niederlande), 28.-30. August 1984, Stuttgart
- Heintz, Bettina** [1993]: Die Herrschaft der Regel. Zur Grundlagengeschichte der Computer, Frankfurt
- Hempel, Carl G.** [1977]: Aspekte wissenschaftlicher Erklärung, Berlin New York (Original 1965)
- Hempel, Rolf** [1997]: CMD und NEC: Zusammenarbeit im wissenschaftlichen Höchstleistungsrechnen, in: Der GMD-Spiegel 3/1997, S. 50-52

- Henle**, P. [1975]: Sprache, Denken, Kultur, Frankfurt/M.
- Hermes**, Hans [1978]: Aufzählbarkeit, Entscheidbarkeit, Berechenbarkeit. Einführung in die Theorie der rekursiven Funktion, Berlin – Heidelberg - New York
- Hess-Lüttich**, Ernest W.B./Müller, J. E./Zoest, A. van (Hg.) [1998]: Signs & Space. Raum & Zeichen: An International Conference on the Semiotics of Space and Culture in Amsterdam, Tübingen
- Hiebel**, Hans H. (Hg.) [1997]: Kleine Medienchronik. Von den ersten Schriftzeichen zum Mikrochip, München
- Hilbert**, David [1965]: Gesammelte Abhandlungen, 3 Bde., New York (Original 1932, 1933, 1935)
- Hilbert**, David [1965a]: Axiomatisches Denken, in: Hilbert, D., 1965, 3. Bd., S. 146-156
- Hilbert**, David [1965b]: Neubegründung der Mathematik, in: Hilbert, D., 1965, 3. Bd., S. 157-177
- Hilbert**, David [1965c]: Naturerkennen und Logik, in: Hilbert, D., 1965, 3. Bd., S. 378-387
- Hochgesang**, M. [1969]: Mythos und Logik im 20. Jahrhundert, München
- Hodges**, Andrew [1994]: Alan Turing, Enigma, Wien - New York
- Hoelzer**, Helmut [1994]: 50 Jahre Analogcomputer, in: Bolz/Kittler/Tholen (Hg.), 1994, S. 69-90
- Hoffmann**, Ute/Joerges, B. /Severin, I. (Hg.) [1997]: Logicons. Bilder zwischen Theorie und Anschauung, Berlin
- Hofmann**, Wilhelm (Hg.) [1999]: Die Sichtbarkeit der Macht. Theoretische und empirische Untersuchungen zur visuellen Politik, Baden-Baden
- Horwood**, N. (Hg.) [1986]: Mathematical and Computational Concepts in Chemistry, Chichester
- Hoßfeld**, Friedel [1991]: »Grand Challenges« - Wie weit tragen die Antworten des Supercomputing?, Forschungszentrum Jülich, KFA-ZAM-IB-9117
- Hoßfeld**, Friedel [1992]: Wissenschaftliches Rechnen - Motor der Rechenentwicklung, Forschungszentrum Jülich, KFA-ZAM-IB-9215
- Hoßfeld**, Friedel [1996]: Partielle Differentialgleichungen: Die permanente Herausforderung, in: Nagel (Hg.), 1996, S. 1-9
- Hoyningen-Huene**, Paul/Hirsch, G. (Hg.) [1988]: Wozu Wissenschaftsphilosophie? Positionen und Fragen zur gegenwärtigen Wissenschaftsphilosophie, Berlin - New York
- Huber**, Jörg/Müller, Alois M. (Hg.) [1993]: Raum und Verfahren, Basel -Frankfurt/M.
- Hüppe**, Angelika [1984]: Prägnanz. Ein gestalttheoretischer Grundbegriff, München
- Huning**, A./Mitcham, C. (Hg.) [1987]: Technikphilosophie im Zeitalter der Informationstechnik, Braunschweig
- Idensen**, Heiko [1994]: Bild-Schirm-Denken. Anual für hypermediale Diskurstechniken, in: Bolz/Kittler/Tholen (Hg.), 1994, S. 245-266
- Iglhaut**, Stefan (Hg.) [1994]: Illusion und Simulation: Begegnungen mit der Realität, Ostfildern
- Jacobs**, Konrad [1970]: Selecta Mathematica II, Berlin - Heidelberg - New York
- Jäger**, Ludwig/Stetter, Christian [1986]: Zeichen und Verstehen, Aachen
- Janich**, Peter [1986]: Naturwissenschaften in der Technik und Technik in der Naturwissenschaft, in: Burrichter/Inhetveen/Kötter (Hg.), 1986, S. 41-52
- Janich**, Peter [1995]: Information als Konstruktion, in: Max/Stelzner (Hg.), 1995, S. 470-483
- Janich**, Peter [1997]: Kleine Philosophie der Naturwissenschaften, München
- Jessen**, Eike/Quandel, G. [1998]: Wissenschaftskommunikation ohne Grenzen, in: Spektrum der Wissenschaft - Dossier: Die Welt im Internet, S. 12-15
- Joerges**, Bernwald [1995]: Prosopopoietische Systeme. Probleme konstruktivistischer Technikforschung, in: Technik und Gesellschaft, Bd. 8/95, S. 31-48
- Joerges**, Bernwald [1996]: Technik, Körper der Gesellschaft: Arbeiten zur Techniksoziologie, Frankfurt/M.
- Jonas**, Hans [1973]: Organismus und Freiheit, Göttingen
- Jonas**, Hans [1973a]: Der Adel des Sehens. Eine Untersuchung zur Phänomenologie der Sinne, in: Jonas, H., 1973, S. 198 - 219
- Jorna**, René J. [1990]: Wissenschaftsrepräsentation in künstlichen Intelligenzen. Zeichentheorie und Kognitionsforschung, in: Zeitschrift für Semio, Bd 12, Heft 1-2, 1990, S. 9-24
- Jung**, Werner [1995]: Von der Mimesis zur Simulation: eine Einführung in die Geschichte der Ästhetik, Hamburg

- Jungk**, R. (Hg.) [1969]: Menschen im Jahr 2000, Frankfurt
- Kablitz**, Andreas/Neumann, G. (Hg.) [1998]: Mimesis und Simulation, Freiburg i. Breisgau
- Kahn**, Friedrich-Karl [1970]: Turing-Maschinen und berechenbare Funktionen II, in in: Jacobs (Hg.) 1970, S. 21-54
- Kamper**, Dieter [1991]: Mimesis und Simulation. Von den Körpern zu den Maschinen, in: Kunstforum, Nr. 114, Jul./Aug. 1991, S. 86-94
- Kang**, Sungho/Szygenda, S. A. [1994]: Automatic Simulator Generation System, in: Simulation Dec./1994, S. 360-367
- Kanitscheider**, Bernulf [1995]: Die Relevanz der Chaostheorien für die Philosophie, in: Lenk (Hg.), 1995, S. 169-183
- Kant**, Immanuel [1993]: Kritik der reinen Vernunft, Hamburg (Original 1781/1787)
- Kaufmann**, William J./Smarr, Larry L. [1994]: Simulierte Welten. Moleküle und Gewitter aus dem Computer, Heidelberg – Berlin - Oxford
- Kedrowskij**, Oleg [1984]: Wechselbeziehung von Philosophie und Mathematik im geschichtlichen Entwicklungsprozeß, Leipzig
- Kertész**, András [1991]: Die Modularität der Wissenschaft: konzeptuelle und soziale Prinzipien linguistischer Erkenntnis, Braunschweig
- Kevles**, Daniel J. [1992]: Historisches Vorwort, in: Robin, 1992, S. 11-19
- Kittler**, Friedrich [1985]: Aufschreibesysteme 1800. 1900, München
- Kittler**, Friedrich [1989]: Fiktion und Simulation, in: Ars Electronica (Hg.), 1989, S. 57-80
- Kittler**, Friedrich [1994]: Protected Mode, in: Bolz/Kittler/Tholen (Hg.), 1994, S. 209-220
- Klagenfurt**, Kurt [1995]: Technologische Zivilisation und transklassische Logik. Eine Einführung in die Technikphilosophie Gotthard Günthers, Frankfurt/M.
- Klüver**, Jürgen [1995]: Soziologie als Computerexperiment. Modellierung soziologischer Theorien durch KI- und KL-Programmierung, Braunschweig - Wiesbaden
- Knoell**, Dieter Rudolf [1994]: Zur gesellschaftlichen Stellung der Kunst zwischen Natur und Technik. Bd 2: Neopositivismus zwischen Elitekunst und Massenproduktion, Hildesheim – Zürich - New York
- Koch**, Peter/Krämer, S. (Hg.) [1997]: Schrift, Medien, Kognition. Über die Exteriorität des Geistes, Tübingen
- Koch**, Peter [1997a]: Graphé. Ihre Entwicklung zur Schrift, zum Kalkül und zur Liste, in: Koch/Krämer (Hg.), 1997, S. 43-82
- Kock**, Ronny: Intelligente Systeme simulieren, in: Design & Elektronik - Zukunftstechnologien, S. 46-47
- Köhler**, Wolfgang [1971]: Die Aufgabe der Gestaltpsychologie, Berlin – New York
- Kohl**, Stephan [1996]: Guy of Warwick: Von der mittelenglischen Handschrift zum Renaissancedruck, in: Röcke/Schäfer (Hg.), 1996, S. 71-84
- Konersmann**, Ralf (Hg.) [1997]: Kritik des Sehens, Leipzig
- Kosslyn**, Stephen M./Pomerantz J. R.[1992]: Bildliche Vorstellungen, Propositionen und die Form der inneren Repräsentanz, in: Münch (Hg.), 1995, S. 253-289
- Kötter**, Rudolf [1986]: Technische Rationalität und rationale Heuristik - ein Problemaufriß, in: Burrichter/Inhetveen/Kötter (Hg.), 1986, S. 9-16
- Kowol**, Uli/Krohn, W. [1995]: Innovationsnetzwerke. Ein Modell der Technikgenese, in: Technik und Gesellschaft, Bd. 8/95, S. 77-105
- Krämer**, Sybille [1988]: Symbolische Maschinen. Die Idee der Formalisierung in geschichtlichem Abriß, Darmstadt
- Krämer**, Sybille [1989]: Geistes-Technologien. Über syntaktische Maschinen und typografische Schriften, in: Technik und Gesellschaft, Bd. 5/89, S. 38-52
- Krämer**, Sybille [1990]: Die Suspendierung des Buchstäblichen. Über die Entstehung metaphorischer Bedeutungen, in: Allg. Z.f. Philosophie 15/2, S. 61-69
- Krämer**, Sybille [1991]: Berechenbare Vernunft. Kalkül und Rationalismus im 17. Jahrhundert, Berlin - New York
- Krämer**, Sybille [1991a]: Zur Begründung des Infinitesimalkalküls durch Leibniz, in: Philosophia Naturalis 28, S.117-146
- Krämer**, Sybille [1992]: Symbolische Erkenntnis bei Leibniz, in: Z.f. philosophische Forschung 46/2, S. 224-237

- Krämer**, Sybille [1995]: Philosophie und Neue Medien. Einleitende Überlegungen zum Kolloquium: "Code, Medium, Computer: Künstliche Welten", in: Lenk (Hg.), 1995, S. 185-189
- Krämer**, Sybille [1997]: Schrift und Episteme am Beispiel Descartes', in: Koch/Krämer (Hg.), 1997, S. 105-126
- Krämer**, Sybille [1997a]: Kalküle als Repräsentation. Zur Genese des operativen Symbolismus in der Neuzeit, in: Rheinberger/Hagner/Wahrig-Schmidt (Hg.), 1997, S. 111-122
- Krämer**, Sybille (Hg.) [1998]: Medien, Computer, Realität: Wirklichkeitsvorstellungen und Neue Medien, Frankfurt/M.
- Krämer**, Sybille (Hg.) [1998a]: Das Medium als Spur und Apparat, in: Krämer, (Hg.), 1998, S. 73-94
- Krämer-Friedrich**, Sybille [1986]: Information Measurement and Information Technology: a Myth of the Twentieth Century, in: Mitcham/Huning (Hg.), 1986, S. 17-28
- Krause**, Egon [1996]: Einige grundsätzliche Aspekte numerischer Strömungssimulation, in: Nagel (Hg.), 1996, S. 13-24
- Krausser**, P. [1971]: Eine Rahmentheorie für kritische System- und Prozeßanalysen von wissenschaftlichen Forschungsprozessen, in: Lenk (Hg.), 1971, S. 221-236
- Kravagna**, Christian (Hg.) [1997]: Privileg Blick. Kritik der visuellen Kultur, Berlin
- Kremer**, M. (Hg.) [1994]: Supercomputingcenter'94, HLRZ Jülich
- Kripke**, Saul [1993]: Name und Notwendigkeit, Frankfurt/M. (Original 1972)
- Krönig**, D./Lang, M. (Hg.) [1991]: Physik und Informatik – Informatik und Physik. Arbeitsgespräch München, 21./22. November 1991 Proceedings, Berlin u.a.
- Kuhlmann**, Stefan [1984]: Computer als Mythos, in: Technik und Gesellschaft, Bd. 3/84, S. 91-106
- Kuhn**, Thomas S. [1993]: Die Struktur wissenschaftlicher Revolutionen, Frankfurt/M.
- Kwinter**, Sanford [1995]: Das Verdrachten und Schwinden der Welt, in: 128 Arch+: Architektur in Bewegung - Entwerfen am Computer 9/95, S. 73-79
- Laborda**, Alfonso Pérez de [1984]: Newtons Fluxionsrechnung im Vergleich zu Leibniz' Infinitesimalkalkül, in: Heinekamp (Hg.), 1986, S. 239-257
- Langer**, Susanne [1965]: Philosophie auf neuem Weg. Das Symbol im Denken, im Ritus und in der Kunst, Mittemwald
- Laugwitz**, Detlef [1984]: Die Weiterentwicklung Leibnizscher Begriffe und Methoden durch Leonard Euler, in: Heinekamp (Hg.), 1986, S. 232-238
- Leeuwen**, Cees van/Leeuwen, L. van [1990]: Wie werden Symbole wahrgenommen? Die Antworten von Helmholtz und Koffka, in: Zeitschrift für Semiotik, Bd 12, Heft 1-2, 1990, S. 63-74
- Leibniz**, Gottfried W. [1903]: Hauptschrift zur Grundlegung der Philosophie, Hamburg (herausgegeben von Ernst Cassirer)
- Leibniz**, Gottfried W. [1960]: Fragmente zur Logik, Berlin (herausgegeben von Franz Schmidt)
- Leibniz**, Gottfried W. [1972]: Sämtliche Schriften und Briefe. III. Reihe, 1. Bd. Philosophischer Briefwechsel, Berlin (herausgegeben von der deutschen Akademie der Wissenschaften zu Berlin)
- Leibniz**, Gottfried W. [1973]. Die philosophischen Schriften, 7 Bde., Hildesheim (herausgegeben von C.I. Gerhardt)
- Leibniz**, Gottfried W. [1993]: Allgemeine Untersuchung über die Analyse der Begriffe und Wahrheiten, Hamburg (herausgegeben von Franz Schupp)
- Leibniz**, Gottfried W. [1995]: Fünf Schriften zur Logik und Metaphysik, Stuttgart (herausgegeben von Herbert Herring)
- Lenders**, Winfried [1996]: Virtuelle Welten als Repräsentationen, in: Zeitschrift für Semiotik, Bd. 18 2-3/96, S. 277-295
- Lenk**, Hans (Hg.) [1971]: Neue Aspekte der Wissenschaftstheorie, Braunschweig
- Lenk**, Hans [1972]: Erklärung und Prognose, Freiburg
- Lenk**, Hans/Ropohl, G. (Hg.) [1978]: Systemtheorie als Wissenschaftsprogramm, Königstein
- Lenk**, Hans [1986]: Socio-Philosophical Notes on the Implications of the Computer Revolution, in: Mitcham/Huning (Hg.), 1986, S. 239-246
- Lenk**, Hans (Hg.) [1995]: Neue Realitäten - Herausforderung der Philosophie. 16.Dt. Kongreß für Philosophie Sept. 1993, Berlin

- Lenzen**, Wolfgang [1995]: Frege und Leibniz, in: Max/Stelzner (Hg.), 1995, S. 82-92
- Leopold**, Cornelia [1991]: Semiotik und die Grundlagen der Mathematik, in: Zeitschrift für Semiotik, Bd 13, Heft 3-4, 1991, S. 247-256
- Levy**, Pierre [1996]: Universalität ohne Totalität, Hannover
- Loeck**, Gisela [1986]: Der cartesische Materialismus, Maschine, Gesetz und Simulation, Frankfurt/M. u.a.
- Lohse**, Hartwig [1995]: Virtuelle Seitenblicke, in: OS/2 Inside, Oktober 1995, S. 94-97
- Lopes**, Dominic [1996]: Understanding Pictures, Oxford
- Loviscach**, Jörn [1995]: Fledermäuse. Zeigegeräte für 3D-Eingabe, in: c't 1995, Heft 11, S. 192-194
- Loviscach**, Jörn [1995a]: Maß-Arbeit. 3D-Scanner in Hard- und Software, in: c't 1995, Heft 11, S. 196-198
- Lüdtke**, K. [1995]: Interdisziplinarität und Wissensentwicklung, in: Journal for general Philosophy Science, 26/1993, S. 93-117
- Lux-Endrich**, Astrid/Wachsmann, A. (Hg.) [1998]: Konstruierte Wirklichkeiten: Modellbildung und Simulation in den Wissenschaften, Tutzing
- Luyten**, Norbert A. (Hg.) [1986]: Wirklichkeitsbezug wissenschaftlicher Begriffe. Gleichnis oder Gleichung?, Freiburg - München
- Lynch**, Michael/Woolgar, S. (Hg.) [1988]: Representation in scientific practice, Cambridge
- Lynch**, Michael [1988a]: The externalized retina: Selection and mathematization in the visual documentation of objects in the life sciences, in: Lynch/Woolgar (Hg.), 1988, S. 153-186
- Maanen**, Jan A. van [1984]: Die Mathematik in den Niederlanden im 17. Jahrhundert und ihre Rolle in der Entwicklungsgeschichte der Infinitesimalrechnung, in: Heinekamp (Hg.), 1986, S. 1-13
- Maas**, Jörg F. (Hg.) [1993]: Das sichtbare Denken. Modelle und Modellhaftigkeit in der Philosophie und den Wissenschaften, Amsterdam - Atlanta
- Maas**, Jörg F. [1993a]: Das sichtbare Denken oder das Modell zur Wirklichkeit. Eine Einführung, in: Maas (Hg.), 1993, S. 1 - 12
- Maccormac**, Earl R. [1986]: Men and Machines: The Computational Metaphor, in: Mitcham/Huning (Hg.), 1986, S. 157-170
- Mader**, Alois (Hg.) [1996]: Computersimulation: Möglichkeiten zur Theorienbildung und Ergebnisinterpretation, St. Augustin
- Mainzer**, Klaus [1986]: Rationale Heuristik und Problem Solving, in: Burricher/Inhetveen/Kötter (Hg.), 1986, S. 83-98
- Mainzer**, Klaus [1990]: Die Evolution intelligenter Systeme, in: Zeitschrift für Semiotik, Bd 12, Heft 1-2, 1990, S. 83-106
- Mainzer**, Klaus/Schirmacher, W. (Hg.) [1994]: Quanten, Chaos und Dämonen. Erkenntnistheoretische Aspekte der modernen Physik, Mannheim u.a.
- Mainzer**, Klaus [1995]: Computer - Neue Flügel des Geistes? Die Evolution computergestützter Technik, Wissenschaft, Kultur und Philosophie, Berlin - New York
- Mainzer**, Klaus [1995a]: Zeit. Von der Urzeit zur Computerzeit, München
- Malcev**, A.I. [1974]: Algorithmen und rekursive Funktionen, Braunschweig
- Marsal**, Dietrich [1991]: Was ist Mathematik?, in: Zeitschrift für Semiotik, Bd 13, Heft 3-4, 1991, S. 221-236
- Max**, Ingolf/Stelzner, W. (Hg.) [1995]: Logik und Mathematik. Frege-Kolloquium Jena 1993, Berlin - New York
- McCormick**, B.H. u.a. (Hg.) [1987]: Visualization in Scientific Computing, Computer Graphics 21, 6, Nov./1987, New York
- McDonell**, Neil [1983]: Are pictures unavoidable specific? in: Synthesis 57/1983, S. 83- 98
- McLuhan**, Marshall [1962]: The Gutenberg Galaxy, Toronto
- McLuhan**, Marshall [ 1967]: The Medium is the Massage. An Inventory of Effects, New York u.a.
- Meessen**, August [1986]: Begriffsbildung und Modellvorstellung in der Physik, in: Luyten (Hg.), 1986, S. 11 - 46
- Menne**, Albert [1988]: Folgerichtig Denken. Logische Untersuchungen zu philosophischen Problemen und Begriffen, Darmstadt
- Meier-Oeser**, Stephan [1993]: Die Entlastung von der Mühsamkeit des Denkens. Zeichentheoretische Bemerkungen zur Urgeschichte artifizieller Intelligenz im 17. Jahrhundert, in: Maas (Hg.), 1993, S. 13 - 30

- Merkuryeva**, Galina V./Merkuryev, Y. A. [1994]: Knowledge Based Simulation Systems - A Review, in: Simulation Feb./1994, S. 74-89
- Merleau-Ponty**, Maurice [1993]: Die Prosa der Welt, München
- Mersch**, Dieter (Hg.) [1998]: Zeichen über Zeichen. Texte zur Semiotik von Pierce bis Eco und Derrida, München
- Mersch**, Dieter/Nyíri, J.C. (Hg.) [1991]: Computer, Kultur, Geschichte: Beiträge zur Philosophie des Informationszeitalters, Wien
- Mertins**, Kai/Rabe, M. [1992]: Rechnergestützte Planung von Fertigungssystemen. Simulation als Werkzeug des Fabrikplaners, in: Technica 13/92, S. 16-21
- Mertins**, Kai/Furgac, I./Rabe, M. [1993]: Planungssicherheit durch Simulation. Untersuchung des innerbetrieblichen Materialflusses für das Produktionszentrum Berlin der Krone AG, in: Technica 9/93, S. 12-18
- Mesarovic**, M./Pestel, E. [1974]: Menschheit am Wendepunkt, Stuttgart
- Meschowski**, Herbert [1967]: Denkweisen großer Mathematiker. Ein Weg zur Geschichte der Mathematik, Braunschweig
- Meschowski**, Herbert [1985]: Wandlung des mathematischen Denkens. Eine Einführung in die Grundlagenprobleme der Mathematik, München - Zürich
- Meschonnic**, Henri [1995]: Humboldt heute denken, in: Trabant (Hg.), 1995, S.67-89
- Metzger**, Wolfgang [1986]: Gestalt-Psychologie: ausgewählte Werke aus den Jahren 1950 – 1982, Frankfurt/M.
- Meuer**, Hans-Werner/Schumacher Robert [1995]: Höchstleistungsrechner im Universitätsbereich der Bundesrepublik, in: PIK 18/1 1995, S. 35-38
- Mitcham**, Carl/Huning, A. (Hg.) [1986]: Philosophy and Technology II. Information Technology and Computers in Theory and Practice, Dordrecht u.a.
- Mitchell**, William J.T. [1986]: Iconology: Image, Text, Ideology, Chicago
- Mitchell**, William J.T. [1994]: Picture Theory: Essays on Verbal and Visual Representation, Chicago - London
- Mitchell**, William J.T. [1997]: Der Pictorial Turn, in: Kravagna (Hg.), 1997, S. 15-40
- Mollenhauer**, K./Wolf C. (Hg.) [1996]: Aisthesis/Ästhetik. Zwischen Bewußtsein und Wahrnehmung, Weinheim
- Molzberger**, Peter/Zemanek, G. (Hg.) [1985]: Software-Entwicklung: Kreativer Prozeß oder formales Problem?, Stuttgart
- Morneburg**, Heinz (Hg.) [1995]: Bildgebende Verfahren für die medizinische Diagnostik, München
- Morris**, Charles W. [1972]: Grundlagen der Zeichentheorie. Ästhetik und Zeichentheorie, München (Original 1938)
- Morris**, Charles W. [1998]: Grundlagen der Zeichentheorie, in: Mersch (Hg.), 1998, S. 57-75
- Moser**, S. [1971]: Technologie und Technokratie. Zur Wissenschaftstheorie der Technik, in: Lenk (Hg.), 1971, S. 169-178
- Muckenhaupt**, Manfred [1986]: Text und Bild, Tübingen
- Mücl**, Wolfgang [1981]: Simulation als methodisches Problem, in: Schauer/Tauber (Hg.), 1981, S. 188-206
- Müller**, Karl H. [1991]: Symbole, Statistik, Computer, Design: Otto Neuraths Bildpädagogik im Computerzeitalter, Wien
- Müller**, Klaus: Möglich, wirklich, virtuell - oder was? Zu einer philosophischen Konsequenz der neuen Medien, in: Bertelsmann Briefe 140, S. 65-67
- Münch**, Dieter (Hg.) [1995]: Kognitionswissenschaft. Grundlagen, Probleme, Perspektiven, Frankfurt/M.
- Münch**, Richard [1995]: Dynamik der Kommunikationsgesellschaft, Frankfurt/M.
- Münker**, Stefan/Roesler, A. (Hg.) [1997]: Mythos Internet, Frankfurt/M.
- Myers**, David [1999]: Simulation as Play: A Semiotic Analysis, in: Simulating & Gaming 30/2, S. 147-162
- Nagel**, W. E. (Hg.) [1996]: Partielle Differentialgleichungen, Numerik und Anwendungen. Manuskript der Vorlesungen der Sommerschule vom 2. bis 6. September 1996 im Forschungszentrum Jülich, Jülich
- Neswald**, Elisabeth [1998]: Und noch mehr über Metaphern? Zur Metaphernforschung der 90er Jahre, in: Allg. Z. f. Philosophie, 23/3, 1998, S. 259-277
- Neunzert**, Helmut [1990]: Von Modellen und wie man sie nutzt, in: Friemel/Müller-Schonberger/Schütt (Hg.), 1990, S. 10-21

- Neunzert**, Helmut [1995]: Mathematik und Computersimulation: Modelle, Algorithmen, Bilder, in: Braitenberg/Hosp (Hg.), 1995, S. 44-55
- Neurath**, Otto [1991]: Gesammelte bildpädagogische Schriften, 3 Bde., Wien (herausgegeben von Rudolf Haller und Robin Kinross, Original 1931)
- Neurath**, Otto [1991a]: Bildhafte Pädagogik im Gesellschafts- und Wirtschaftsmuseum in Wien, in: Neurath 1991, 3. Bd., S. 197-206
- Niebel**, Wilhelm [1991]: Zur Logik und Semiotik der neuzeitlichen Mathematik: Der Tractatus der "Regulae von Descartes, in: Zeitschrift für Semiotik, Bd 13, Heft 3-4, 1991, S. 283-299
- Niemitz**, Carsten [1995]: Evolution und Sprache, in: Trabant (Hg.), 1995, S. 298-327
- Nietzsche**, Friedrich [1968]: Erkenntnistheoretische Schriften, Frankfurt/M. (Original 1873)
- Ohlson**, David [1977]: From utterance to text: the bias of language in speech and writing, in: Harvard Educational Review 47, 3, S. 257-281
- Ohno**, Christine [1995]: Paradigmen der Bedeutungsanalyse von Aristoteles bis Greimas: Referenz, Differenz und Typisierung, in: Zeitschrift für Semiotik, Bd 17, Heft 3-4, 1995, S. 319-353
- Ong**, Walter J. [1987]: Oralität und Literalität. Die Technologisierung des Wortes, Opladen
- Orth**, Ernst W. [1985]: Zur Konzeption der Cassirerschen Philosophie der symbolischen Formen. Ein kritischer Kommentar, in: Cassirer, 1985, S. 165-201
- Otte**, Michael/Jahnke, H.N./Mies, Th./Schubring G. (Hg.) [1974]: Mathematiker über die Mathematik, Berlin – Heidelberg - New York
- Padilla-Gálvez**, Jesús [1995]: Die formale Arithmetik und die Begriffsschrift als Spiel, in: Max/Stelzner (Hg.), 1995, S. 120-129
- Paetzold**, Heinz [1994]. Die Realität der symbolischen Form: die Kulturphilosophie Ernst Cassirers im Kontext, Darmstadt
- Pape**, Helmut [1989]: Erfahrung und Wirklichkeit als Zeichenprozeß. Charles S. Peirces Entwurf einer Spekultativen Grammatik des Seins, Frankfurt/M.
- Pape**, Helmut (Hg.) [1991]: Charles S. Peirce Naturordnung und Zeichenprozeß. Schriften über Semiotik und Naturphilosophie, Frankfurt/M.
- Pape**, Helmut (Hg.) [1994]: Kreativität und Logik. Charles S. Peirce und das philosophische Problem des Neuen, Frankfurt/M.
- Pape**, Helmut [1997]: Die Unsichtbarkeit der Welt. Eine visuelle Kritik neuzeitlicher Ontologie, Frankfurt/M.
- Paul**, S. [1977]: Wesenszüge der mathematischen Modellierung physikalischer und biologischer Sachverhalte, in: Dt. Z. f. Philosophie 25/1, S. 212-226
- Pearce**, David/Wolenski, J. (Hg.) [1988]: Logischer Rationalismus. Philosophische Schriften der Lemberg-Warschauer Schule, Frankfurt/M.
- Peckhaus**, Volker [1996]: Logik, Mathesis universalis und die allgemeine Wissenschaft: Leibniz und die Wiederentdeckung der formalen Logik, Berlin
- Peirce**, Charles S. [1934]: Collected Papers of Charles Sanders Peirce, Bde., herausgegeben von Charles Hartshorne und Paul Weiss, Cambridge
- Peirce**, Charles S. [1998]: Neue Elemente, in: Mersch (Hg.), 1998, S. 37-56
- Peitgen**, Heinz-Otto [1995]: Chaos in der Ordnung - Ordnung im Chaos. Gedanken zur Chaosforschung, in: Lenk (Hg.), 1995, S. 160-168
- Peterson**, Ivars [1998]: Mathematische Expeditionen. Ein Streifzug durch die moderne Mathematik, Heidelberg
- Pickover**, Clifford A. [1992]: Visions of the future: art, technology and computing in the twenty-first century, New York
- Platon** [1988]: Sämtliche Dialoge, 7 Bde., Hamburg (herausgegeben von Otto Appelt)
- Platon** [1988a]: Parmenides, in: Platon, 1988, Bd. IV, S. 51-134
- Platon** [1988b]: Timaios, in: Platon, 1988, Bd. VI, S. 29-142
- Platon** [1988c]: Phaidros, in: Platon, 1988, Bd. II, S. 67-129
- Polya**, G. [1949]: Schule des Denkens. Vom Lösen mathematischer Probleme, Bern
- Popper**, Karl R. [1989]: Logik der Forschung, Tübingen
- Popper**, Karl R. [1995]: Objektive Erkenntnis. Ein evolutionärer Entwurf, Hamburg (Original 1972)



- Poser**, H. [1988]: Mathematische Weltbilder. Begründung mathematischer Rationalität, in: Hoyningen-Huene/Hirsch (Hg.), 1988, S. 289-313
- Poser**, Hans [1997]: Zeichentheorie und natürliche Sprache bei Leibniz, in: Koch/Krämer (Hg.), 1997, S. 127-148
- Posner**, Roland [1995]: Denkmittel als Kommunikationsmittel, in: Zeitschrift für Semiotik, Bd 17, Heft 3-4, 1995, S.247-256
- Post**, E. L. [1936]: Finite combinatory process-formulation, in: J. Symb. Log. Bd. 1, S. 103 - 105
- Primas**, Hans [1996]: Synchronizität und Zufall, in: Zeitschrift für Parapsychologie und Grenzgebiete der Psychologie 38/1-2 1996, S. 61-91
- Pylyshyn**, Zenon W. [1973]: What the mind's eye tells the mind's brain, in: Psychological Bulletin 80/1973, S. 1-24
- Quine**, Willard O. V. [1972]: Die Wurzel der Referenz, Frankfurt/M.
- Randow**, Gero von (Hg.) [1990]: Das kritische Computerbuch, Dortmund
- Randow**, Gero von [1990a]: Computer-Simulation: Bild statt Welt?, in: Randow (Hg.), 1990, S. 121-129
- Randow**, Gero von [1990b]: Eins, Null, Neues Denken. Wie blöd sind Computer?, in: Randow (Hg.), 1990, S. 9-14
- Rapp**, Friedrich [1971]: Die Technik in wissenschaftstheoretischer Sicht, in: Lenk (Hg.), 1971, S. 179-186
- Rapp**, Friedrich [1986]: Die Ambivalenz der Naturerkenntnis: empirische Gewißheit und begriffliche Perspektivität, in: Burrichter/Inhetveen/Kötter (Hg.), 1986, S. 53-70
- Rapp**, Friedrich [1986a]: The Theory-Ladness of Information, in: Mitcham/Huning (Hg.), 1986, S. 49-62
- Read**, Stephen [1997]: Philosophie der Logik. Eine Einführung, Reinbek b. Hamburg
- Recki**, Birgit [1991]: Mimesis: Nachahmung der Natur. Kleine Apologie eines mißverstandenen Leitbegriffs, in: Kunstforum, Nr. 114, Jul./Aug. 1991, S. 116-126
- Recki**, Birgit/Wiesing, L. (Hg.) [1997]: Bild und Reflexion, München
- Reich**, Jens [1996]: Die Informationslawine im Gefolge des Human Genom Projektes, in: Der GMD-Spiegel 4, S. 56-60
- Reuter**, A. (Hg.) [1990]: GI – 20. Jahrestagung I. Informatik auf dem Weg zum Anwender. Stuttgart, 8.-12. Okt. 1990, Proceedings, Berlin u.a.
- Rheinberger**, Hans-Jörg/Hagner, M. /Wahrig-Schmidt, B. (Hg.) [1997]: Räume des Wissens: Repräsentation, Codierung, Spur, Berlin
- Rheinberger**, Hans-Jörg/Hagner, M. /Wahrig-Schmidt, B. [1997a]: Räume des Wissens: Repräsentation, Codierung, Spur, in: Rheinberger/Hagner/Wahrig-Schmidt (Hg.), 1997, S. 7-22
- Richter**, Peter [1991]: Chaos: Das Weltbild der deterministischen Physik in der Krise, in: Sandkühler (Hg.), 1991, S. 114-122
- Risse**, Wilhelm [1970]: Die Logik der Neuzeit, 2 Bde., Stuttgart - Bad Cannstatt (Original 1964)
- Rittelmeyer**, Christian [1996]: Synästhesien. Entwurf zu einer empirischen Phänomenologie der Sinneswahrnehmung, in: Mollenhauer/Wolf (Hg.), 1996, S. 138-152
- Robertson**, George u.a. (Hg.): FutureNatural. Nature, Science, Culture, London - New York
- Robin**, Harry [1992]: Die wissenschaftliche Illustration. Von der Höhlenmalerei zur Computergrafik, Basel - Boston - Berlin
- Röcke**, Werner/Schäfer, U. (Hg.) [1996]: Mündlichkeit - Schriftlichkeit - Weltbildwandel: literarische Kommunikation und Deutungsschemata von Wirklichkeit in der Literatur des Mittelalters und der frühen Neuzeit, Tübingen
- Rojas**, Raúl [1997]: Konrad Zuses Rechenmaschinen: sechzig Jahre Computergeschichte, in: Spektrum der Wissenschaft, Mai 1997
- Ropohl**, Günter [1986]: Information Does Not Make Sense – Or: The Relevance Gap in Information Technology and Its Social Dangers, in: Mitcham/Huning (Hg.), 1986, S. 63-74
- Ropohl**, Günter [1995]: Eine Modelltheorie soziotechnischer Systeme, in: Technik und Gesellschaft, Bd. 8/95, S. 185-210
- Rothbart**, Daniel [1984]: The Semantics of Metaphor and the Structure of Science, in: Philosophy of Science 51, S. 595-615
- Rötzer**, Florian (Hg.) [1991]: Digitaler Schein: Ästhetik der elektronischen Medien, Frankfurt/M.

- Roy, Ascott** [1989]: Gesamtdatenwerk. Konnektivität, Transformation und Transzendenz, in: Kunstforum, Nr. 103, Sept./Okt. 1989, S. 100-106
- Sandbothe, Mike/Zimmerli, W.** (Hg.) [1994]: Zeit – Medien – Wahrnehmung, Darmstadt
- Sandkühler, Hans J.** (Hg.) [1991]: Wissenschaftliche Weltbilder, Bremen
- Sarnow, Karl** [1995]: Modell stehen. Simulation dynamischer und komplexer Systeme, in: c't 1995, Heft 4, S. 76-77
- Saussure, Ferdinand de** [1967]: Grundlagen der Allgemeinen Sprachwissenschaft, Berlin (Original 1916)
- SCAI** [1998]: Progress-Report, Institute for Algorithms and Scientific Computing (SCAI), GMD St. Augustin
- Schäfer, Ursula** [1996]: Individualität und Fiktionalität: Zu einem mediengeschichtlichen und mentalitätsgeschichtlichen Wandel im 12. Jahrhundert, in: Röcke/Schäfer (Hg.), 1996, S. 50-70
- Schamanek, Andreas/Kratky, K. W.** [1994]: Die Logistische Abbildung: Auswirkung der endlichen Rechengenauigkeit, in: Bremer/Habermeier/Wladarsch (Hg.), 1994, S. 157-165
- Schanze, Helmut/Ludes, P.** (Hg.) [1997]: Qualitative Perspektiven des Medienwandels, Opladen
- Schauer, Helmut/Tauber, M.** (Hg.) [1981]: Informatik und Philosophie, Wien - München
- Schauer, Helmut** [1983]: Computersysteme – Aufbau und Funktionsweise, Wien - New York
- Scheffe, Peter** [1987]: Informatik – Eine konstruktive Einführung, Mannheim u.a.
- Schickore, Jutta** [1999]. Sehen, Sichtbarkeit und empirische Forschung, in: Z. f. allg. Wissenschaftstheorie, 30/1999, S. 273-287
- Schier, Flint** [1986]: Deeper into Pictures. An Essay on Pictural Representation, Cambridge
- Schirn, Matthias** (Hg.) [1976]: Studien zu Frege I. Logik und Philosophie der Mathematik, Stuttgart - Bad Cannstatt
- Schirn, Matthias** (Hg.) [1976a]: Studien zu Frege III. Logik und Semantik, Stuttgart - Bad Cannstatt
- Schmidt, Siegfried J.** (Hg.) [1991]: Der Diskurs des Radikalen Konstruktivismus, Frankfurt/M.
- Schmölders, Claudia** [1997]: Am Anfang war das Bild. Oder: Ist die Sprache am Ende, in: Franfurter Rundschau, 3.5.1997, Nr 102, S. ZB 3
- Schneider, Hans Julius** [1995]: Begriffe als Gegenstände der Rede, in: Max/Stelzner (Hg.), 1995, S. 165-179
- Schnelle, Helmut** [1962]: Zeichensysteme zur wissenschaftlichen Darstellung. Ein Beitrag zur Entfaltung der Ars characteristica im Sinne von C.W. Leibniz, Stuttgart - Bad Cannstatt
- Schnelle, Helmut** [1996]: Die Natur der Sprache: die Dynamik der Prozesse des Sprechens und Verstehens, Berlin - New York
- Scholz, Oliver** [1998]: Wahrheitshintergrund und Interpretation, in: Studia philosophica 58, S. 27-54
- Scholz, Oliver** [1991]: Bild, Darstellung Zeichen. Philosophische Theorien bildhafter Darstellungen, Freiburg - München
- Scholz, Oliver** [1993]: When is a Picture?, in: Synthese 95, S. 95-106
- Schonberg, A.** (Hg.) [1988]: Simulation und Wirklichkeit, Köln
- Schönrich, Gerhard** [1995]: Selbstbewußtsein im Zeichenprozeß, in: Zeitschrift für Semiotik, Bd 17, Heft 3-4, 1995, S. 425-434
- Schüler, Wolfgang** [1983]: Grundlegungen der Mathematik in transzendentaler Kritik. Frege und Hilbert, Hamburg
- Schüling, H.** [1969]: Die Geschichte der axiomatischen Methode im 16. und beginnenden 17. Jahrhundert, Hildesheim - New York
- Schulte, Joachim/McGuinness, B.** (Hg.) [1992]: Einheitswissenschaft, Frankfurt/M.
- Schwegler, Helmut** [1991]: Wirklichkeit, Weltbild, Fiktion, in: Sandkühler (Hg.), 1991, S. 104-113
- Schwemmer, Oswald** [1990]: Die Philosophie und die Wissenschaften. Zur Kritik einer Abgrenzung, Frankfurt/M.
- Sebeok, Thomas/Umiker-Sebeok, J.** (Hg.) [1995]: Advances in Visual Semiotics. The Semiotic Web 1992-93, Berlin
- Sei, K.** (Hg.) [1990]: Von der Bürokratie zur Telekratie. Rumänien im Fernsehen, Berlin
- Seiler, Werner M.** [1991]: Formale Theorie partielle Differentialgleichungen, in: Krönig/Lang (Hg.), 1991, S. 318-326
- Simon, Josef** (Hg.) [1994]: Zeichen und Interpretation, Frankfurt/M.

- Simon**, Josef [1995]: Sprache als Zeichen betrachtet, in: Trabant (Hg.), 1995, S. 90-111
- Simon**, Josef (Hg.) [1997]: Orientierung in Zeichen. Zeichen und Interpretation III, Frankfurt/M.
- Smythe**, William E. [1990]: Wie sind Symbole zu interpretieren?, in: Zeitschrift für Semiotik, Bd 12, Heft 1-2, 1990, S. 47-62
- Snow**, C. P. [1993]: The Two Cultures, Cambridge Mass.
- Sommers**, Fred [1976]: Frege oder Leibniz?, in: Schirn (Hg.), 1976a, S. 11-34
- Sonesson**, Göran [1989]: Pictural Concepts. Inquiries into the semiotic heritage and its relevance for the analysis of the visual world, Lund
- Speck**, Josef (Hg) [1992]: Grundprobleme der großen Philosophen. Philosophie der Neuzeit, Bd. 6, Göttingen
- Stachowiak**, Herbert [1973]: Allgemeine Modelltheorie, Wien – New York
- Stachowiak**, Herbert [1978]: Erkenntnis in Modellen, in: Lenk/Ropohl (Hg.), 1978, S. 50-64
- Stadler**, F. (Hg.) [1993]: Scientific Philosophy: Origins and Developments, Dordrecht – Boston - London
- Stäudner**, Frank [1998]: Virtuelle Erfahrung: eine Untersuchung über den Erkenntniswert von Gedankenexperimenten und Computersimulationen in den Naturwissenschaften, (Dissertation) Universität Jena
- Stegmüller**, Wolfgang [1969 ff]: Probleme und Resultate der Wissenschaftstheorie und Analytischen Philosophie, 4 Bde., Berlin u.a.
- Stegmüller**, Wolfgang [1969] Wissenschaftliche Erklärung und Begründung, Berlin u.a.
- Steinbrenner**, Jakob/Winko, U. [1997]: Bilder in der Philosophie & in anderen Künsten & Wissenschaften, Paderborn u.a.
- Stekeler-Weithofer**, Pirmin [1986]: Grundprobleme der Logik: Elemente einer Kritik der formalen Vernunft, Berlin - New York
- Stekeler-Weithofer**, Pirmin [1991]: Syntaktik und Semantik in der Arithmetik und die Schranken künstlicher Intelligenz, in: Zeitschrift für Semiotik, Bd 13, Heft 3-4, 1991, S. 273-282
- Stetter**, Christian [1997]: Schrift und Sprache, Frankfurt/M.
- Stichweh**, Rudolf [1984]: Zur Entstehung des modernen Systems wissenschaftlicher Disziplinen: Physik in Deutschland 1740-1890, Frankfurt/M.
- Stix**, Gary [1995]: Publizieren mit Lichtgeschwindigkeit, in: Spektrum der Wissenschaft - Dossier: Die Welt im Internet, S. 16-21
- Ströker**, Elisabeth [1973]: Einführung in die Wissenschaftstheorie, Darmstadt
- Strothotte**, Christine/Strothotte, T. [1997]: Seeing Between the Pixels. Pictures in Interactive Systems, Berlin - Heidelberg
- Strothotte**, Thomas [1998]: Computational Visualization. Graphics, Abstraction, and Interactivity, Berlin - Heidelberg
- Sydow**, Achim [1996]: Computersimulation - ein Schlüssel zum Verständnis der Umwelt, in: Der GMD-Spiegel 4, 1996, S. 16-18
- Teichmann**, Klaus/Wilke, J. [1996]: Prozeß und Form "Natürlicher Konstruktionen". Der Sonderforschungsbereich 230, Berlin
- Teschner**, Michael/Henn, Ch./Vollhardt, H./Reiling, S./Brickmann, J. [1994]: Texture mapping: A new tool for molecular graphics, in: J. Mol. Graphics, Vol. 12 June, S. 98-105
- Tetens**, Holm [1986]: Modelle in der Physik, in: Burrichter/Inhetveen/Kötter (Hg.), 1986, S. 169-184
- Thiedeke**, Udo [1989]: Spurensuche, in: Katalog zur Ausstellung ArtBit Computer in der Kunst im Computer vom 4.11.1989- 3.12.1989, S. 20-27
- Thiel**, Christian [1976]: Gottlob Frege: Die Abstraktion, in: Schirn (Hg.), 1976, S. 243-264
- Thiel**, Christian (Hg.) [1982]: Erkenntnistheoretische Grundlagen der Mathematik, Hildesheim
- Thiel**, Christian [1992]: Kurt Gödel: Die Grenzen der Kalküle, in: Speck (Hg.), 1992, S. 138-181
- Thiel**, Christian [1995]: Philosophie und Mathematik. Eine Einführung in ihre Wechselwirkungen und in die Philosophie der Mathematik, Darmstadt
- Thomas**, H./Leiber, T. [1994]: Determinismus und Chaos in der Physik, in: Mainzer/Schirmacher (Hg.), 1994, S. 147-207

- Tibbetts**, P. [1988]: Representation and the realist-construtivist controversy, in: Lynch/Woolgar (Hg.), 1988, S. 69-84
- Toeplitz**, Otto [1972]: Die Entwicklung der Infinitesimalrechnung. Eine Einleitung in die Infinitesimalrechnung nach der genetischen Methode, Darmstadt
- Trabant**, Jürgen (Hg.) [1995]: Sprache denken. Positionen aktueller Sprachphilosophie, Frankfurt/M.
- Trottenberg**, Ulrich [1996]: Tele-Kooperation zwischen New York und Sankt Augustin, in: Der GMD-Spiegel 4, 1996, S. 65-68
- Trottenberg**, Ulrich [1989]: Quantensprünge in der Numerischen Simulation, in: Der GDM-Spiegel 3-4, 1998, S. 7-10
- Tufte**, Edward R. [1997]: Visual Explanations. Images and Quantities, Evidence and Narrative, Cheshire
- Turing**, Alan M. [1936-37]: On computable numbers, with an application to the Entscheidungsproblem, in: Proceedings of the London Mathematical Society, Bd. 2, Heft 42, S. 230-265, corrections ibid., S. 544-546
- Turing**, Alan M. [1964]: On computable numbers, with an application to the Entscheidungsproblem, in: Davis (Hg.), 1964, S. 115-153
- Tylee**, J.Louis [1995]: Chaos in a Real System, in: Simulation March 1995, S. 176-183
- Vattimo**, Gianni [1992]: Die transparente Gesellschaft, Wien (herausgegeben von Peter Engelmann)
- Venus**, Jochen [1997]: Referenzlose Simulation, Würzburg
- Virilio**, Paul [1993]: Krieg und Fernsehen, München
- Virilio**, Paul [1998]: Rasender Stillstand, München - Wien
- Waismann**, F. [1970]: Einführung in das mathematische Denken, München (Original 1936)
- Waldenfels**, Bernhard [1995]: Ein menschlicher Traum für Wachende: Zur Natürlichkeit und Künstlichkeit der Erfahrung, in: Lenk (Hg.), 1995, S. 190-204
- Wallner**, Fritz G./Schimmer, J. (Hg.) [1995]: Wissenschaft und Alltag: Symposiumbeiträge zum konstruktiven Realismus, Wien
- Walther**, E. [1974]: Allgemeine Zeichenlehre, Stuttgart
- Wedekind**, Hartmut [1992]: Objektorientierte Schemaentwicklung: ein kategorialer Ansatz für Datenbanken und Programmierung, Mannheim – Wien - Zürich
- Weingart**, Peter [1976]: Wissensproduktion und soziale Struktur, Frankfurt/M.
- Weingarten**, Rüdiger [1989]: Die Verkabelung der Sprache. Grenzen der Technisierung von Kommunikation, Frankfurt/M.
- Weingartner**, Paul/Morscher, E. (Hg.) [1977]: Ontologie und Logik. Vorträge und Diskussionen eines internationalen Kolloquiums (Salzburg, 21. - 24. September 1976), Berlin
- Weingarten**, Paul [1986]: Der Unterschied zwischen Gleichung und Gleichnis in wissenschaftstheoretischer Sicht, in: Luyten (Hg.), 1986, S. 135 - 167
- WeiB**, Hans [1995]: Einzigartiger Fahrsimulator beim Daimler-Benz-Konzern. Autotest auf virtuellen Straßen, in: Digital Magazin 2/95, S. 30-34
- Weizenbaum**, Joseph [1994]: Die Macht der Computer und die Ohnmacht der Vernunft, Frankfurt/M.
- Weizsäcker**, Ernst Ulrich von [1996]: Effizienzrevolution und intelligente Informationstechnik, in: Der GMD-Spiegel 4, 1996, S. 42-44
- Wiese**, Heike [1995]: Zahl und Numerale. Analyse natürlichsprachlicher Numeralkonstruktionen, Berlin
- Wiesing**, Lambert [1997]: Die Sichtbarkeit des Bildes. Geschichte und Perspektive der formalen Ästhetik, Reinbek b. Hamburg
- Willim**, Bernd [1995]: The Next Generation. Trend bei professionellen 3D-Anwendungen, in: c't 1995, Heft 11, S. 188-190
- Wimmer**, Rainer (Hg.) [1987]: Sprachtheorie: der Sprachbegriff in Wissenschaft und Alltag, Düsseldorf
- Winkler**, Hartmut [1997]: Docuverse. Zur Medientheorie der Computer, Regensburg
- Wise**, James A./ [1995].: Visualizing the Non-Visual: Spatial analysis and interaction with information from text documents, in: Proceedings of the IEEE Info. Vis. 95, S. 51-58
- Wittgenstein**, Ludwig [1963]: Tractatus Logico-philosophicus. Logisch-philosophische Abhandlung, Frankfurt/M. (Original 1921)

**Wittgenstein**, Ludwig [1984]: Tractatus logico-philosophicus. Werkausgabe Bd. 1: Tractatus logico-philosophicus, Tagebücher 1914-1916, Philosophische Untersuchungen, Frankfurt/M. (Original 1921, 1914-1916, 1945)

**Wriggers**, Peter/Meissner, U./Meynen, S./Boersma, A./Lämmer, L. [1995]: Numerische Simulation auf Parallelrechnern, in: thema Forschung der TH Darmstadt, 2/1995, Darmstadt

**Zimmerli**, Walther Ch. [1986]: "Stetigkeit" als Kategorie technisch-rationalistischer Rationalität, in: Burrichter/Inhetveen/Kötter (Hg.), 1986, S. 155-168

**Zimmerli**, Walther Ch. (Hg.) [1988]: Technologisches Zeitalter oder Postmoderne, München

**Zimmerli**, Walther Ch. [1989a]: Das anitplatonische Experiment. Bemerkungen zur technologischen Postmoderne, in: Zimmerli (Hg.), 1989, S. 13-35

**Zimmermann**, Rolf [1981]: Der "Skandal der Philosophie" und die Semantik. Kritische und systematische Untersuchungen zur analytischen Ontologie und Erfahrungstheorie, Freiburg - München

**Zoglauer**, Thomas [1995]: Der Informationsgehalt empirischer Modelle - zur Logik des semantischen Informationsbegriffs, in: Max/Stelzner (Hg.), 1995, S. 484-495

## **4. Lebenslauf**

Der Lebenslauf ist in der Online-Version aus Gründen des Datenschutzes nicht enthalten.

## 5. Danksagung

Ich möchte Frau Prof. Sybille Krämer für die Ermöglichung, Betreuung und Begutachtung dieser Arbeit sowie für ihre wertvollen Anregungen danken. Ihre Konzeption des operativen Symbolismus sowie ihre medienphilosophischen Überlegungen haben den Verlauf der Untersuchung in dokumentierter Richtung angestoßen und geprägt. Weiterhin danke ich Herrn Dr. Oliver Scholz für seine Begutachtung der Arbeit. Seine Überlegungen zu Bildern und Bildtheorien stellten für mich eine wichtige Quelle zur Erörterung des Status der Simulationsbilder dar. Desweiteren möchte ich mich bei Herrn Prof. Jochen Brüning vom Institut für Mathematik der Humboldt Universität Berlin für die Begutachtung der Arbeit und sein Interesse an einer philosophisch motivierten Arbeit zu einem mathematischen Thema bedanken.

Die Herausforderung wie Schwierigkeit der Arbeit lagen darin, sich in fremde Bereiche vorzuwagen und dort in philosophischem Verständnis Vorgehensweisen der Mathematik, der Informatik und mancher Naturwissenschaften zu analysieren. Dies geschah unter großer Vorsicht und in Respekt vor diesen Bereichen. Besonders die Erringung eines mathematischen Verständnisses numerischer Simulationen war mir dabei von großer Wichtigkeit. Da die mathematische Literatur einem Laien weitgehend verschlossen ist, und die Methode der numerischen Simulation partieller Differentialgleichungen ein relativ junges Gebiet darstellt, konnte ein Teil des notwendigen Verständnisses nur anhand persönlicher Gespräche gewonnen werden. Vor allem das in Kapitel III. eingeflossene Know How entstammt vier Gesprächen mit dem Mathematiker Ralf Massjung des Instituts für Numerik der RWTH Aachen, der im Rahmen seiner Doktorarbeit an einer Simulation der Navier-Stokes-Gleichungen arbeitet. Für seine Gesprächsbereitschaft und seine hilfreichen Erklärungen möchte ich mich bei ihm bedanken. Desweiteren basieren einige mathematische und technische Informationen auf einer Studie der Simulations- und Visualisierungstätigkeiten in wissenschaftlichen Institutionen, die von mir in loser Form in den Jahren 1995 bis 1999 durchgeführt wurde, und die durch die freundliche Unterstützung der DLR Berlin, der Forschungszentren Jülich und Karlsruhe, der Fraunhofer Gesellschaft Darmstadt, der GMD St. Augustin, der Technischen Hochschulen Darmstadt und Zürich sowie der Universität Augsburg möglich wurde. Schließlich danke ich Herrn Heinz Starkmann für das Korrekturlesen der Arbeit.