

### **3 SIMULATION ALS NEUE SYMBOLISCHE FORM DES FORSCHENS**

---

Computer geben Einblicke in das Innere der Phänomene, indem sie das gesamte Gebiet der Mannigfaltigkeiten als mathematischen Möglichkeitsraum eröffnen. Genau hierin liegt der zweite Schritt der wissenschaftlichen Revolution der Neuzeit begründet (vgl. Glimm 1990), oder präziser ausgedrückt: Der Computer vollendet die wissenschaftliche Revolution der Neuzeit, indem er die bereits im mathematischen Formalismus enthaltenen Möglichkeitsräume numerisch entfaltet.<sup>1</sup> Die Quantität der Rechenkraft schlägt hier qualitativ zu Buche. Diese Vollendung kann mit Martin Heidegger gesprochen auch als Wesenserfüllung der Neuzeit gesehen werden, deren Grundvorgang „die Eroberung der Welt als Bild ist. Das Wort Bild bedeutet jetzt: das Gebilde des vorstellenden Herstellens. [...] Dabei] setzt der Mensch die uneingeschränkte Gewalt der Berechnung, der Planung und der Züchtung aller Dinge ins Spiel. Die Wissenschaft als Forschung ist eine unentbehrliche Form dieses Scheinrichtens in der Welt, eine der Bahnen, auf denen die Neuzeit mit einer den Beteiligten unbekannten Geschwindigkeit ihrer Wesenserfüll-

---

1 Diese Extensivierung der numerischen Berechnung wird jedoch auch kritisiert als „the old vocabulary of sequential equations and numbers“ (Bailey 1996: 4). James Bailey argumentiert, dass „symbolic numbers, equations, and the formulation of universal laws are what people and thought are good at. Electronic circuits are good at different things [..., e.g.] at letting higher level behavior emerge from the interplay of millions of tiny operations, all interacting with each other in parallel, handing on each its own little bit of understanding. [...] As a result, a whole new set of parallel intermaths is coming to the fore to challenge the sequential maths of the Industrial Age, which had only humans to carry them out“ (Bailey 1996: 4).

lung zurast“ (Heidegger 1938/1977: 94). Das Bild zeigt sich in den Visualisierungen der computerexperimentellen Resultate. Doch es ist kein Bild der Welt, sondern ein Bild der ‚Gebilde des vorstellenden Herstellens‘, konkret: der codierten Modelle der Rechenvorschriften mathematischer Gebilde. Das vorstellende Herstellen der Moderne ist dabei nirgends deutlicher realisiert als in den Algorithmen – dem perfekten Medium dieses vorstellenden Herstellens – insofern als Algorithmen Vorstellungen zugleich symbolisch repräsentieren als auch deren Herstellung indizieren. Dieses vorstellende Herstellen charakterisiert die symbolische Form der Simulation als neues Erkenntnisinstrument. Die Neuheit ergibt sich aus den Möglichkeiten des Herstellens (numerische Realisierung) und dessen Vorrang im Unterschied zum bloßen Vorstellen (Formalismus) der Neuzeit – zumindest mathematisch (nicht technisch) gesehen. Vorstellen ist dabei durchaus in der Doppeldeutigkeit der Interpretation Heideggers gemeint als anschauliches Vorstellen, beispielsweise durch ein mathematisches Modell, aber auch als Vor-die-Welt-Stellen im Sinne der deduktiv-induktiven und hypothetisch-deduktiven Forschungsstile. Das Vor-die-Welt-Stellen verstellt dabei nicht nur, kritisch gesprochen, den direkten Blick auf diese, sondern erweitert, positiv gewendet, die Wahrnehmung von Welt.

Die Fragen, die aus diesem neuen Sicheinrichten in der Welt folgen, lauten: Wie verändert sich wissenschaftliche Erfahrung und das, was als wissenschaftlich real gilt? Und, falls eine solche Veränderung sich aktuell vollzieht, welchen Einfluss hat dies auf unsere Lebenswelt? Denn, wie sich bereits bei der wissenschaftlichen Revolution der Neuzeit zeigte: „In the seventeenth century old practices changed and new ones appeared. Those changing practises represent shifts in the meaning of experience itself – shifts in what people saw when they looked at the events in the natural world“ (Dear 1995: 13). Diese Veränderung des wissenschaftlichen Blicks hatte Folgen über die Wissenschaft hinaus, denn die „Realität, die die Physik beschreibt, [ist] zur Realität der technologischen Gesellschaft geworden. Das physikalische Weltbild ist das Weltbild dieser Gesellschaft. Kein Wunder also, dass die physikalische Erkenntnis zum Ideal von Erkenntnis überhaupt werden konnte, denn diese Art der instrumentellen Beobachtung von Realität fügt sich passgenau in ein Selbstbild der Gesellschaft, das wesentlich durch eben diese Beobachtungsweise erst entstanden ist“ (Frederichs 1999: 21).

Welchen neuen Erfahrungs begriff der Wissenschaft und welches Selbstbild der Gesellschaft sich aus der Vollendung der wissenschaftlichen Revolution durch den Computer ableiten werden, gilt es zu untersuchen. Dazu wird es notwendig sein, näher auf den Computer als Me-

dium sowie auf die (maschinentauglichen) Algorithmen als neue mathematische Sprache und den dadurch initiierten Medien- und Sprachwandel in der Wissenschaft einzugehen. Da sich mit dem Medien- und Sprachwandel ein Wandel der symbolischen Form wissenschaftlicher Forschung abzeichnet, liegt es nahe hier den epistemischen Kern des Wandels der Wissenschaft im Zeitalter des Computers zu vermuten.

## **Symbolische Formen des Forschens**

In seiner dreibändigen *Philosophie der Symbolischen Formen* untersuchte Ernst Cassirer 1923 bis 1929 unterschiedliche Erfassungsmöglichkeiten der Welt wie den Mythos, die Sprache und die Wissenschaft (vgl. Cassirer 1923/1988, 1924/1987, 1929/1990). Er rekonstruierte die bereits ausführlich dargestellte Entwicklung der Wissenschaft anhand ihrer Symbolisierungsleistung. Sein Symbolbegriff greift den von Heinrich Hertz auf, der 1894 in seinen *Principien der Mechanik* schrieb: „Wir machen uns innere Scheinbilder oder Symbole der äußeren Gegenstände, und zwar machen wir sie von solcher Art, daß die denknotwendigen Folgen der Bilder stets wieder die Bilder seien von den naturnotwendigen Folgen der abgebildeten Gegenstände“ (Hertz 1894: 1).<sup>2</sup> Cassirer ist jedoch nicht wie Hertz der Meinung, dass es zwischen Natur und Geist eine Übereinstimmung geben muss und daher die Bilder Abbilder naturnotwendiger Folgen sind. Vielmehr zeigt sich für Cassirer die Abgeschlossenheit der symbolischen Formen gerade an den Scheinbildern der Physik. „Die Begriffe, mit denen er [Hertz] operiert, die Begriffe des Raumes und der Zeit, der Masse und der Kraft, des materiellen Punktes und der Energie, des Atoms oder des Äthers sind freie ‚Scheinbilder‘, die die Erkenntnis entwirft, um die Welt der sinnlichen Erfahrung zu beherrschen und als gesetzlich-geordnete Welt zu übersehen, denen aber in den sinnlichen Daten selbst unmittelbar nichts entspricht“ (Cassirer 1923/1988: 17). Die Fortschritte in der Naturwissenschaft zeigen sich in der „zunehmenden Verfeinerung ihres Zeichensystems [...]. Die scharfe Erfassung der Grundbegriffe der Galileischen Mechanik gelang erst, als durch den Algorithmus der Differentialrechnung gleichsam der allgemeine logische Ort dieser Begriffe bestimmt und ein allgemeingültiges mathematisches Zeichen für sie geschaffen war“ (Cassirer 1923/1988:

---

2 Hertz schreibt weiter: „Damit diese Forderung überhaupt erfüllbar sei, müssen gewisse Übereinstimmungen vorhanden sein zwischen der Natur und unserem Geist“ (Hertz 1894: 1). Ob man diesem Korrespondenzgedanken zwischen Geist und Natur zustimmt, hängt von der jeweiligen wissenschaftstheoretischen Perspektive ab.

17). Dies ist möglich, weil das „Zeichen keine bloß zufällige Hülle des Gedanken, sondern sein notwendiges und wesentliches Organ“ ist (Cassirer 1923/1988: 18). Die begriffliche Bestimmung besteht in der Fixierung in Zeichen und dies gilt für jegliche Art geistigen Schaffens, nicht nur für die Wissenschaft. Dabei sind diese Zeichen nicht als Abbilder zu verstehen, sondern sie bergen eine eigentümliche Doppelnatur in sich, „ihre Gebundenheit ans Sinnliche, die doch zugleich eine Freiheit vom Sinnlichen in sich schließt“ (Cassirer 1923/1988: 42). Diese Doppelnatur macht es möglich mit den Symbolen Prägungen zu erzeugen, welche die unterschiedlichen Wirklichkeitsformen wie Mythos, Wissenschaft und Religion überhaupt erst möglich machen. „Der Mythos und die Kunst, die Sprache und die Wissenschaft sind in diesem Sinne Prägungen zum Sein: sie sind nicht einfach Abbilder einer vorhandenen Wirklichkeit, sondern sie stellen die großen Richtlinien der geistigen Bewegung, des ideellen Prozesses dar, in dem sich für uns das Wirkliche als Eines und Vieles konstituiert“ (Cassirer 1923/1988: 43).

Solange der Blick nur auf die Wirklichkeit gerichtet ist, schreibt Cassirer im dritten Band seiner *Philosophie der Symbolischen Formen*, ergibt sich ein Verhältnis unproblematischer Gewissheit zwischen Individuum und Welt. Tritt jedoch die Wahrheit in Form von Erkenntnis – als sich einen Begriff von der Welt machen – auf den Plan, so verändert sich das Verhältnis in ein prinzipiell anderes. „Alle bisherigen sichersten und zuverlässigsten Zeugen der ‚Wirklichkeit‘, die ‚Empfindung‘, die ‚Vorstellung‘, die ‚Anschauung‘ werden jetzt vor ein neues Forum gefordert und vor ihm verhört. Dieses Forum des ‚Begriffs‘ und des ‚reinen Denkens‘ wird nicht erst in dem Moment aufgerichtet, indem die eigentlich-philosophische Besinnung einsetzt; es gehört schon den Anfängen jeder wissenschaftlichen Weltbetrachtung an. Denn schon hier begnügt sich der Gedanke nicht damit, das in der Wahrnehmung oder Anschauung Gegebene einfach in seine Sprache zu übersetzen, sondern er vollzieht an ihm eine charakteristische Formveränderung, eine Umprägung“ (Cassirer 1929/1990: 330). Diese Umprägungen zeigen sich am Zweck der wissenschaftlichen Begriffe, Regeln der Bestimmung aufzustellen, die sich am Anschaulichen zu bewähren haben. Diese Regeln werden als „eine universelle Denkleistung erfaßt und als solche durchschaut. Und diese Schau ist es, die nunmehr eine neue Form des Durchblicks, der geistigen ‚Perspektive‘ erschafft“ (Cassirer 1929/1990: 331).

Hier kommt der Zahl als Denktypus die entscheidende Rolle zu, insofern sie dasjenige Zeichensystem zur Verfügung stellt, das Form- und Strukturbestimmungen par excellence ermöglicht. Daher fällt die Mathematik und mit ihr die Wissenschaft immer wieder auf die Zahl zurück. Doch dieser Rückbezug auf die Zahl durchläuft verschiedene Sta-

dien der Abstraktion bzw. im Sinne Cassirers verschiedene symbolische Formen, beginnend bei der symbolischen Form des Ausdrucks im Mythos.<sup>3</sup> Sowohl der Mythos, als auch die griechische Mathematik haben die Zahl zum Grundmotiv ihrer Weltbetrachtung auserkoren, allerdings in jeweils unterschiedlicher Weise. Der Mythos nimmt die Zahl als Wesenheit, die Mathematik fasst sie als Begriff.<sup>4</sup> Solange die Zahl in der griechischen Mathematik jedoch an räumliche Gegebenheiten gebunden war, blieb sie Anzahl einer konkreten Menge, und mit ihr blieb die Forschung auf die sinnlich-gegebene Welt bezogen. Erst als „die rein logische Natur der Zahl erkannt wird, kommt es zur Grundlegung einer reinen Wissenschaft der Zahl [...] und die Zahl] hört auf ein physisch-Dingartiges zu sein oder nach der Analogie irgendwelcher empirischer Objekte bestimbar zu sein“ (Cassirer 1929/1990: 331). Als solchermaßen logische Entität schafft die Zahl eine Distanz zwischen sich und der Wirklichkeit, welche die streng theoretischen Begriffe überhaupt erst ermöglicht und durch reine Denkarbeit Einsichten in die Wirklichkeit schafft, je mehr sie von dieser absieht. Durch diese erschaffende oder prägende Kraft der Zahl und der theoretischen Begriffe vollzieht sich ein Bruch mit der unmittelbaren Anschaulichkeit. Die Erkenntnis löst sich „aus der Verflechtung mit der konkreten und individuell-bestimmten ‚Wirklichkeit‘ der Dinge heraus, um sie sich rein als solche in der Allgemeinheit ihrer ‚Form‘, in der Weise ihres Beziehungs-Charakters zu vergegenwärtigen. Es genügt ihr nicht mehr, das Sein selber in den verschiedenen Richtungen des beziehentlichen Denkens zu durchmessen, sondern sie fordert und sie erschafft sich für diesen Prozeß auch ein universelles Maßsystem. Dieses System ist es, das im Fortgang des theore-

- 
- 3 Cassirer unterscheidet im Wesentlichen drei symbolische Formen: Die Sphäre des Ausdrucks, die der sinnlich-gegebenen Wirklichkeit in direkten Ausdrucksbestimmungen Existenz zugesteht (Mythos). Die Sphäre der Darstellung, die in Form der Sprache zwar mimischen Ausdruckswert besitzt, aber durch zunehmende Loslösung von der sinnlich-gegebenen Wirklichkeit über Analogien zur Darstellungsform (Aussagesätze) und schließlich rein auf sich selbst bezogen zur symbolischen Sphäre der Bedeutung gelangt (Mathematik, Logik). Die Sphäre der Bedeutung konstituiert sich aus diesem rein symbolischen Gebrauch der Sprache als Zeichensystem, in welchem die Sprache zu sich selbst gelangt. Sie ist losgelöst von jeglicher sinnlich-gegebenen Wirklichkeit, aber bezogen auf diese. Diese neue Form der Bezogenheit zeigt sich in den wissenschaftlichen Begriffen und deren Durchblick auf die sinnlich-gegebene Wirklichkeit als neue geistige Perspektive.
  - 4 In der Philosophie der Pythagoreer lassen sich beide Versionen, die mythische und die mathematische Auffassung der Zahl, noch finden. Die Zahl ist aber auch der Ursprung der Schrift (vgl. Koch 1997). Die Differenzierung zwischen Sprache und Schrift erfolgt in Cassirers Philosophie nur implizit, wenn er vom rein symbolischen Gebrauch der Sprache spricht.

tischen Denkens immer fester gegründet und immer umfassender gestaltet wird“ (Cassirer 1929/1990: 332, 333). Dabei wird die Ordnung nicht mehr durch die Gegenstände der Welt vorgegeben, sondern durch die selbständige Tätigkeit des Denkens hergestellt.

Dies ist jedoch nur möglich, indem sich ein Reich der Symbole in voller Freiheit herausbildet, das Schemata entwirft, an welchen die wissenschaftliche Wirklichkeit ausgerichtet wird, indem die Wortzeichen der natürlichen Sprache zu Begriffszeichen der theoretischen Wissenschaft werden.<sup>5</sup> Dabei verändert sich die logische Dimension der Zeichen, die alles anschaulich-Repräsentative ablegen und zu reinen Bedeutungszeichen werden und als solche nur auf sich selbst bezogen sind. Jegliche mimische oder analogische Formung wird gegenstandslos und es bleibt die rein symbolische Formung übrig, in der die Sprache zu sich selbst kommt und in Folge auch die Wissenschaft. „Damit stellt sich eine neue Weise des ‚objektiven‘ Sinnbezugs dar, die sich von jener Art der ‚Beziehung auf den Gegenstand‘, wie sie in der Wahrnehmung oder der empirischen Anschauung besteht, spezifisch unterscheidet“ (Cassirer 1929/1990: 334).<sup>6</sup> Die Frage, was die Begriffszeichen der Wissenschaft, losgelöst vom anschaulich-Repräsentativen bedeuten, beantwortet Cassirer mit deren Form- und Strukturbestimmungen, die Ordnungen des Möglichen bezeichnen, nicht des gegebenen Wirklichen. Mathematik und Wissenschaft versinken dadurch jedoch nicht in einen bloßen Formalismus, sondern nehmen in anderer Form Bezug auf Wirklichkeit. Denn die Form- und Strukturbestimmungen zielen nicht auf die Dinge, sondern auf das Gefüge der Dinge ab. In dieser Art der Bestimmung tritt die Aktivität der Zeichen, die sie von Beginn an auch in vorwissenschaftlichen Kontexten haben, in ihrer vollen Kraft hervor. Denn der Begriff, realisiert als Zeichen, ist nicht ein „gebahnter Weg [...], in dem das Denken fortschreitet, als [...] vielmehr eine Methode, ein Verfahren der Bahnung selbst [...]. In dieser Bahnung kann das Denken völlig selbständig verfahren: es bindet sich nicht an feste Zielpunkte, die im

- 
- 5 „Auch diese Schemata können freilich nicht im leeren Raum des bloßen, des schlechthin ‚abstrakten‘ Denkens stehen bleiben. Sie bedürfen des Haltes und einer Stütze – aber sie entnehmen dieselbe nicht mehr einfach der empirischen Dingwelt, sondern sie schaffen sie sich selbst“ (Cassirer 1929/1990: 333).
  - 6 Die logische Dimension des Zeichens in diesem Sinne gedacht versteht unter Begriff „mit Kant nichts anderes als die ‚Einheit der Regel‘, durch die eine Mannigfaltigkeit von Inhalten zusammengehalten und in sich selbst verknüpft wird“ (Cassirer 1929/1990: 334, 235). Allerdings erfasst der Begriff die Mannigfaltigkeiten nicht im Sinne eines Klassenbegriffes, wie er in der mengentheoretischen Konzeption der Logik angelegt war, sondern eines Funktionsbegriffes.

Gegebenen schon fertig vorliegen, sondern es stellt neue Ziele auf, und fragt, ob ein Weg und welcher Weg zu ihnen hinführt“ (Cassirer 1929/1990: 356).

Ebenso wie die „Sprache fortschreitet, als sie gleichsam ‚zu sich selbst kommt‘ [...] aus der Phase des ‚mimischen‘ und des ‚analogischen‘ Ausdrucks schreitet die Sprache zur rein symbolischen Formung fort [– wiederholt die Wissenschaft] den gleichen Weg. Auch sie gewinnt die ‚Nähe‘ zur Natur nur dadurch, daß sie auf sie verzichten lernt – daß sie sich das Gegebene in eine ideelle Ferne rückt“ (Cassirer 1929/1990: 483).<sup>7</sup> Dieser rein symbolische Gebrauch der Zeichen ermöglicht es, in die Mathematik und auch in die Wissenschaft imaginäre Entitäten einzuführen, über deren Existenz und Realität seit langem diskutiert wird. Die Bedingung der tatsächlichen Konstruierbarkeit der griechischen Geometrie, die Orientierung der aristotelischen Wissenschaft am Sinnlich-Gegebenen oder die Unterordnung der rationalen Naturerkennnis bei René Descartes unter den Raum – und später bei Immanuel Kant unter die reinen Anschauungsformen von Zeit und Raum – dienen der Verhinderung des Imaginären und der Rückbindung an die Wirklichkeit als gegenständlichen Anwendungskontext.<sup>8</sup> Doch nicht alle folgen dieser Selbstbeschränkung. So löst Leibniz etwa die strenge Orientierung Descartes an der Raumform der *res extensa* als bedingender Form der Erkenntnis auf, indem er jede mögliche logische Form zulässt und somit zu imaginären Entitäten respektive zum ‚nouveau calcul des transcendantes‘ gelangt. Die Diskussion darüber, ob diese Entitäten existieren, erübrigt sich jedoch, wenn Existenz nicht substanzlogisch und in diesem Sinne anschaulich auf das Sinnlich-Gegebene hin, sondern der mathematischen Form der Objektivierung entsprechend funktionslogisch verstanden wird. Der Verlust des Anschaulichen ist, so Cassirer, für den Fortgang der mathematischen wie physikalischen Begriffsbildung notwendig, denn eine „Trennung in eigentliche und uneigentliche, in angeblich ‚reale‘ und angeblich ‚fiktive‘ Elemente [...] würde] die methodische Einheit der Mathematik zerstören“ (Cassirer 1929/1990: 468). Geraade durch das Imaginäre, oder die ‚idealen Elemente‘, wie Cassirer sie

- 
- 7 Dieser Durchgang durch die symbolischen Formen im Laufe der Wissenschaftsentwicklung ist im Kontext der Simulation entscheidend, denn dadurch wird der Simulation respektive ihrer Resultate jegliche mimische Funktion der Wirklichkeit auf Basis eines naiven Bildvergleichs abgesprochen.
- 8 Insofern gibt Kant in der *Kritik der reinen Vernunft* weniger eine Philosophie der Mathematik, als eine Philosophie der Anwendbarkeit der Mathematik.

nennt, wird jedoch die Vereinheitlichung der Mathematik gewährleistet. Denn diese schreitet in ihrer Entwicklung insofern voran, als sie sich „dazu entschließt, einen reichen Begriff von Beziehungen, die es zuvor einzeln betrachtet und untersucht hatte, in einen geistigen Brennpunkt zu versammeln und mit einem Symbol zu bezeichnen“ (Cassirer 1929/1990: 468). Bei diesem Fortgang der Erkenntnis dringt die Mathematik notwendigerweise in Bereiche des Imaginären vor, seien es irrationale Zahlen wie  $\pi$  oder  $e$ , imaginäre Größen, nicht-Euklidische Geometrien oder das Infinitesimale. Die Entwicklung des Differentialkalküls ist für Cassirer bislang die reifste Frucht dieses fortschreitenden Prozesses der mathematischen Erkenntnis in idealiter.

„Er [Differentialkalkül] hatte sich bereits auf den verschiedenen Gebieten – in der Begründung der Dynamik durch Galilei, in der Lehre von den Maxima und Minima bei Fermat, in der Theorie der unendlichen Reihen, in dem sog. ‚umgekehrten Tangentenproblem‘ usf. – betätigt, ehe er allgemein erkannt und allgemein fixiert war. Newtons Zeichen  $x$  und Leibniz’ Zeichen:  $dy/dx$  leisten zunächst nichts anderes, als daß sie diese Fixierung vollziehen: sie bezeichnen einen gemeinsamen Richtpunkt für Untersuchungen, die zuvor auf getrennten Wegen verliefen. In dem Augenblick, als dieser Richtpunkt einmal bestimmt und in einem Symbol festgehalten war, erfolgte gleichsam eine Kristallisation der Probleme: von allen Seiten her schießen sie jetzt zu einer logisch-mathematischen Form zusammen. Abermals erweist das Symbol hier jene Kraft [...] die Kraft der Verdichtung. Es ist, als würde durch die Schöpfung des neuen Symbols eine gewaltige Energie des Denkens aus einer relativ diffusen Form in eine konzentrierte Form übergeführt. [...] Sie brauchte nur das, was in den neu geschaffenen Symbolen aufgewiesen und implizit gesetzt war, zur vollständigen expliziten Erkenntnis zu erheben“ (Cassirer 1929/1990: 468, 469).

Diese Verdichtung kraft der Symbole ist eine Form der Aktivität der Zeichen im Sinne eines ‚Verfahrens der Bahnung selbst‘. Die Verdichtung und Bahnung verläuft im rein symbolischen Umgang mit der Sprache anders als im mimischen oder analogischen. Die Bahnung erschließt neue Weisen der rein symbolischen Konstruktion wie das Differentialkalkül in seiner weiteren Ausgestaltung als Analysis des Infinitesimalen. Diese konstruktive Kraft der rein symbolisch verwendeten Zeichensysteme prädestiniert diese als symbolische Maschinen, nicht nur in der Mathematik, sondern auch in der wissenschaftlichen, insbesondere in der physikalischen Begriffsbildung. Als solche vereinheitlichen sie die verschiedenen Erkenntnisformen der Wissenschaft, sofern „Induktion“ und „Deduktion“, „Erfahrung“ und „Denken“, „Experiment“ und „Rechnung“ [...] sich] in der Umsetzung des Gegebenen in die Form einer rei-

nen Zahl-Mannigfaltigkeit begegnen und zusammenschließen“ (Cassirer 1929/1990: 503). Dabei nutzt die Physik respektive die Wissenschaft kein ungeordnetes System von Mannigfaltigkeiten, sondern ein geordnetes, dessen Ordnungsverhältnis sich aus dem Reihenprinzip generiert. Durch Relationen wie Beieinander, Zueinander, Aufeinanderfolgend, etc. sind verschiedene Mannigfaltigkeits-Typen generierbar. Auch hier spielt die Zahl eine herausragende Rolle, insofern sie Reihenbildungen par excellence ermöglicht, so wie im Induktionsprinzip der natürlichen Zahlen. Sofern die einzelnen, empirisch beobachteten oder gemessenen Reihenwerte durch Grenzwerte und -ideen ersetzt werden, nach welchen die empirischen Reihen konvergieren, vermag es die Wissenschaft, die theoretischen Begriffe und ihre operativen Maschinen auf die Wirklichkeit zu übertragen. Die Grenzidee des materiellen Punktes in der Mechanik oder des Kontinuums der reellen Zahlen sind ebenso Beispiele hierfür wie der starre Körper, das ideale Gas oder der vollkommene Kreisprozess (vgl. Cassirer 1929/1990: 502ff). In diesen Grenzideen und -werten liegt die bereits thematisierte Extremalisation der mathematischen Modelle wissenschaftlicher Kontexte begründet. Sie sind notwendig, so Cassirer, um die Beobachtungen überhaupt in „mögliche Subjekte für physikalische Urteile“ zu überführen (Cassirer 1929/1990: 502).

## Von der Schrift zum Computer

Cassirer unterscheidet nicht explizit zwischen gesprochener Sprache und Schrift. Wenn man jedoch den rein symbolischen Sprachgebrauch betrachtet, handelt es sich immer um die formale Manipulation von schriftbasierten Zeichen und Zeichenketten. Wenn Cassirer daher David Hilberts Ausspruch, ‚Am Anfang war das Zeichen‘, öfter zitiert, so weist er genau auf diesen rein formalistischen Sprachumgang basierend auf Schrift hin. Insofern sieht er auch das Leibnizsche Programm der Ars characteristica als rein schriftzeichenbasiertes Unterfangen bei Hilbert fortgeführt. Ein solcher formalistischer Zeichenumgang kehrt den Bezug zur Wirklichkeit von einer darstellenden in eine erzeugende Funktion um. Nicht der Beschreibung, sondern dem Verfahren wird dabei das Primat eingeräumt. „Das Gesetz umfasst nicht nur eine Unendlichkeit möglicher Anwendungsfälle, sondern es lässt sie aus sich hervorgehen. Mit dieser Einsicht aber kehrt die moderne Mathematik, auf durchaus eigenen und neuen Wegen, im Grunde wieder zu dem Punkt zurück, von dem Leibniz als Methodiker des mathematischen Denkens seinen Ausgang genommen hatte. [...] In diesem Sinne betont auch Weyl, daß man, um zu einer wahrhaft sicheren und tragfähigen Grundlage der Analysis

zu gelangen, von dem reinen Verfahren der ‚Iteration‘ seinen Ausgang nehmen müsse“ (Cassirer 1929/1990: 431, 432). Damit gewinnt, epistemologisch gesehen, der Funktionsbegriff gegenüber dem Substanzbegriff den Vorrang und die Mathematik gründet sich ein weiteres Mal in der Zahl, genauer gesagt: in deren Erzeugungsverfahren. Die Iteration als Prozess des ins Unendliche möglichen Fortgangs einer Reihe bestimmt den logischen Aufbau der Mathematik. Und dieser Aufbau wird sich vor allem im Computer als Medium und in der neuen Sprache der (maschinentauglichen) Algorithmen bewähren.

Cassirers Philosophie gibt den Stand der Mathematik und der Wissenschaft bis in die 1920er Jahre wieder. Sein Interesse an der Iteration wie am Funktionsbegriff ist kein operatives, auf die tatsächliche Ausführung hin ausgerichtetes, sondern – entsprechend den Möglichkeiten des beginnenden 20. Jahrhunderts – ein logisches, das nach den Formalismen der Verfahren fragt. Noch bewegen sich Mathematik und Wissenschaft mit ihren Symbolmanipulationen auf der Oberfläche des Papiers und damit im Rahmen der analytischen Handhabung der Formalismen. Dabei nutzen sie die Verdichtung als maßgebliche Kraft der Symbole.

Ein auf sich selbst bezogener Symbolumgang entfaltet jedoch eine neue Kraft: Operativität. Für diese operative Kraft der Symbole bedarf es jedoch eines anderen Mediums als des Papiers. Vielmehr wird ein dynamisches und offenes Medium benötigt. Während die Verdichtung die Begrenzung der Fläche nutzt, um anstelle der „Sukzession der Denkschritte [...] eine reine Simultanität des Überblicks“ zu geben, wie durch „die Fortbildung der Technik und Methodik des mathematischen Beweises durch Leibniz“ (Cassirer 1929/1990: 453), so genügt dies nicht für die Operativität.<sup>9</sup> Das Blatt Papier als Ort der Simultanität des Überblicks und der Beweis respektive die Deduktion als das primäre Operationsverfahren im Sinne der Verdichtung auf der Oberfläche dieses stati-

---

9 „Es läßt sich auch rein geschichtlich verfolgen, wie Descartes‘ Skepsis gegen die Sicherheit des deduktiven Verfahrens die eigentlich bewegende und treibende Kraft für Leibniz‘ ‚Beweistheorie‘ geworden ist. Soll der mathematische Beweis wahrhaft stringent sein, soll ihm wirkliche Überzeugungskraft innewohnen, so muß er aus der Sphäre der bloßen Erinnerungs-Gewißheit gelöst und über sie hinausgehoben werden. [...] Nur das symbolische Denken vermag diese Leistung zu vollbringen. Denn die Natur desselben besteht eben darin, daß es nicht mit den Denkinhalten selber operiert, sondern jedem Deninhalt ein bestimmtes Zeichen zuordnet, und daß kraft dieser Zuordnung eine Verdichtung erreicht wird, durch welche es möglich wird, alle Glieder einer komplexen Beweiskette in eine einzige Formel zu konzentrieren, und sie mit einem Blick, als eine gegliederte Gesamtheit, zu umfassen“ (Cassirer 1929/1990: 453, 454)

schen Mediums wird durch die Operativität gesprengt. Operativität, die in der Regel an das rekursive Erzeugungsverfahren der Zahl gekoppelt ist, überwindet die limitierende und statische Fläche des Papiers in mehrfacher Weise: In Form des numerischen Ausrechnens fällt die Operativität in zwei Teile, zum einen in die Erstellung eines Schemas (Berechnungsplan) und zum anderen in die Ausführung dieses Schemas (Berechnung).<sup>10</sup> Darüber hinaus beschränkt sie sich – im Unterschied zur rein symbolischen Umformung der Deduktion – nicht auf das Papier, sondern bricht immer wieder aus, sofern prozessuale Instrumente wie Zirkel, Rechenschieber oder mechanische Rechenmaschinen zum Einsatz kommen. In diesem Sinne bringt die Operativität eine anders gelagerte Kraft der symbolischen Form als die Verdichtung hervor. Sie buchstabiert so zusagen die verdichteten Formalismen aus und entfaltet diese in nahezu unendlich viele Einzelzeichen. Der ungemein denkökonomische Ansatz der Verdichtung wird konterkariert und pures Berechnen respektive Simulieren gilt manchen Mathematikern daher als intellektuell anspruchslos (vgl. Ulam 1980).

Doch was bedeutet es, Verdichtung in Operativität zu transformieren und die Formalismen auszubuchstabieren? Die Operativität nimmt hier einen anderen Weg als die Verdichtung. Nicht die Deduktion oder der Beweis stellen den Kern des operativen Verfahrens dar, sondern die prozessuale Planung und Berechnung. Durch diesen Vorgang enthüllt die operative Kraft der Symbole die instrumentale oder technische Seite der Sprache, die nicht nur ein Darstellungsmittel des Denkens im Begriff, sondern des Erfassens im Sinne eines Wirkens ist. In diesem Wirken betätigt sich die Sprache produktiv. Daher spricht Sybille Krämer von den operativen Verfahren der formalen Zeichensysteme als ‚symbolische Maschinen‘ und Cassirer vom ‚Werkzeug des Geistes‘ (vgl. Krämer 1988, 1990; Cassirer 1930/2004), ohne jedoch die Entfaltung der operativen Kraft dieser Maschinen oder Werkzeuge in ihrer technischen Dimension zu untersuchen. Die Logik des Instrumentalen liegt nicht in der Verdichtung und Komprimierung, sondern – wenn man Heidegger folgen will – im Her-vor-bringen aus der Verborgenheit im Sinne eines Entbergens. Dieses Entbergen ist jedoch im Falle der symbolischen Maschinen nicht auf eine sinnlich-gegebene Wirklichkeit bezogen wie im Falle der materialen Technik, sondern auf den verdichteten Formalismus. „Das Entscheidende der *téχνη* [techné] liegt somit keineswegs im Handeln und Hantieren, nicht im Verwenden von Mitteln, sondern in

---

<sup>10</sup> Hier ist natürlich nicht von einfachen mathematischen Operationen wie der Addition, sondern von der Lösung komplexer Funktionen die Rede.

dem genannten Entbergen. Als dieses, nicht aber als Verfertigen, ist die *téχyn* ein Her-vor-bringen“ (Heidegger 1949/1962: 13). Heidegger nimmt in seinem Artikel *Die Frage nach der Technik* vor allem auf energiefördernde Technologien als Formen moderner Technik Bezug und differenziert daher die Entbergung weiter als Herausforderung durch das Auf- und Erschließen der verschiedenen Energien, durch Umformung, Speicherung, Verteilung und Umschaltung (vgl. Heidegger 1949/1962).<sup>11</sup> Die Technik steht hier keineswegs im Kontrast zur Naturwissenschaft, insbesondere der Physik. Denn nach Heidegger zeigt sich diese Art des technischen Entbergens bereits in der neuzeitlichen, exakten Naturwissenschaft, in ihrer Art des Vorstellens der Natur „als einen berechenbaren Kräftezusammenhang“ (Heidegger 1949/1962: 21).

„Die neuzeitliche Physik ist nicht deshalb Experimentalphysik, weil sie Apparaturen zur Befragung der Natur ansetzt, sondern umgekehrt: weil die Physik, und zwar schon als reine Theorie, die Natur daraufhin stellt, sich als einen vorausberechenbaren Zusammenhang von Kräften darzustellen, deshalb wird das Experiment bestellt, nämlich zur Befragung, ob sich die so gestellte Natur und wie sie sich meldet“ (Heidegger 1949/1962: 21). Die Physik ist die Wegbereiterin des Wesens der Technik. „Darum kann die Physik bei allem Rückzug aus dem bis vor kurzem allein maßgebenden, nur den Gegenständen zugewandten Vorstellen auf eines niemals verzichten: daß sich die Natur in irgendeiner rechnerisch feststellbaren Weise meldet und als ein System von Informationen bestellbar bleibt“ (Heidegger 1949/1962: 22).

Ähnlich Cassirer sieht Heidegger das Umkehrverhältnis von Wissenschaft und Wirklichkeit in der Berechnung beziehungsweise in der spezifischen symbolischen Form der Wissenschaft begründet. Interessant ist nun an Cassirers Charakterisierung des Symbolischen und an Heideggers Charakterisierung des Technischen, insbesondere der energiefördernden Techniken, dass hier etwas konvergiert, das in der Erfindung des Computers seinen Ausdruck findet. Durch das Zusammentreffen von Symbol und Energie wird nicht nur ein neues Medium geschaffen, sondern eine neue symbolische Form der Forschung. Um die operative Kraft des rein symbolischen Sprachgebrauchs tatsächlich zur Wirkung zu bringen, bedarf es eines Aktes der Entbergung besonderer Art. Dieser Akt des Entbergens besteht in der technischen Erschließung des Instrumentalen der Sprache durch die Umsetzung ihrer operativen Kraft in die

---

11 „Dies geschieht dadurch, daß die in der Natur verborgene Energie aufgeschlossen, das Erschlossene umgeformt, das Umgeformte gespeichert, das Gespeicherte wieder verteilt und das Verteilte erneut umgeschaltet wird. Erschließen, umformen, speichern, verteilen, umschalten sind Weisen des Entbergens“ (Heidegger 1949/1962: 16).

tatsächliche Operativität des Prozesses. Indem die Fluidität der Energie derart erschlossen, umgeformt, gespeichert, verteilt und umgeschaltet wird, dass dadurch die Sukzession der Reihung in der Zeit implementierbar wird, lässt sich die Operativität der symbolischen Maschinen technisch realisieren. Daher ist der Computer eine Maschine, die nicht den Raum, sondern die Zeit technisch bestellt und erst dadurch das Instrumentale der Sprache als Wirkung, also technisch, erschließen kann.

Dies hat grundlegende Folgen für den Umgang mit Mathematik. Solange Mathematik im Raum, sprich auf dem Papier operiert, ist das „mathematische ‚Tun‘ [...] ein rein intellektuelles Tun, das nicht in der Zeit verläuft, sondern das ein Grundmoment, auf dem die Zeit selbst beruht, das Moment der ‚Reihung‘, erst selbst ermöglicht“ (Cassirer 1929/1990: 433). Doch während das mathematische Tun auf dem Papier die Reihung nicht in ein empirisches Nacheinander zerlegt, sondern gerade mit dem Grundmoment der Zeit symbolisch hantiert, zerlegt der Computer – durch das Ausbuchstabieren dieses Prinzips in der Zeit als eine tatsächlich hergestellte Sukzession – die Reihung. Da die Reihung die Grundoperation ist, auf der das Reich der Zahlen basiert, kann ein Computer nur ein Rechner sein. Er bedarf insofern einer rechnenden Version der Logik, wie sie in der Booleschen Algebra gegeben ist, um die Zeit zu bestellen. Mit dieser Art der Bestellung des Zeitlichen verschmelzen im Computer die symbolischen Maschinen mit der energieverarbeitenden Maschine und bilden das gesuchte Medium zur Entfaltung der operativen Kraft des rein symbolischen Sprachgebrauchs in seiner technischen Dimension. Die Werkzeuge des Geistes werden zu tatsächlich realisierten Werkzeugen.

Entlang dieser Verschmelzungslinie vollzieht sich der bereits angesprochene Perspektivwechsel, der ein neues mathematisches Tun verlangt, wie es sich in den maschinentauglichen Algorithmen als neue Sprache, in den codierten Modellen der Rechenvorschrift und schließlich in der Simulation zeigt. Daher stellt der Computer nicht nur eine notwendige Bedingung der Simulation respektive der Computerexperimente dar, sondern ein neues Prinzip, das zwar als Berechnung per Hand auf der Oberfläche des Papiers ‚simuliert‘ werden kann, das aber erst im Computer zur Realisierung kommt. Denn die tatsächlich hergestellte Sukzession der Reihung darf man sich nicht wie das Aufschreiben von Zahlenreihen auf dem Papier vorstellen. Auf der Fläche des Papiers ist das Aufschreiben nur als ein nacheinander Hinschreiben der einzelnen Werte einer Reihe denkbar. Im Computer verläuft die Sukzession hingegen als Überschreibung ganz im Sinne des Operationsverfahrens der Iteration respektive Rekursion. Der aus dem vorherigen Wert errechnete

Wert überschreibt diesen und dient zur Berechnung des nächsten Wertes usf. bis der Prozess an das Ende kommt oder angehalten werden muss. In dieser Form der Überschreibung entfaltet die Sukzession in der Zeit die Entwicklung eines Zahlenwertes aus sich selbst gemäß der Anweisung des Formalismus.<sup>12</sup>

## Experimentalisierung der Mathematik

Die Frage, die sich aus diesem Medienwechsel – der auch ein Wechsel vom Raum in die Zeit ist – ergibt, lautet: Welche Folgen hat dies für die Mathematik? Dass sich das mathematische Tun verändert, wurde bereits angedeutet. Es geht über das rein intellektuelle Tun hinaus und eröffnet einen neuen Handlungsräum. Dieser neue Handlungsräum konstituiert sich aus der technischen Erschließung der Operativität des Symbolischen und zeigt sich im Entfernen der in den verdichteten Formalismen enthaltenen Reihungen (Trajektorien). In genau diesem Sinne ermöglicht der Computer den dritten Typus der empirischen Extension, der auf die sinnliche, unvermittelte Wahrnehmung und ihre technische Erschließung durch Beobachtungs- und Messinstrumente folgt. Allerdings erschließt dieser dritte Typus nicht die sinnliche Wahrnehmung, sondern die mathematische Anschauung. Bereits Edmund Husserl nannte die automatisierte Extrapolation eine „völlig neuartige induktive Voraussicht“ (Husserl 1935/1996: 33). Die Frage, welche Folgen dies für die Mathematik hat, lässt sich daher in die Frage umformen: Welches mathematische Tun entspricht dem Forschen basierend auf dem dritten Typus der empirischen Extension, also im Möglichkeitsraum des Computers? Die Antwort ergibt sich aus den Folgen der technischen Erschließung. Diese geht nämlich mit zwei neuen Eigenschaften einher: der Sichtbarmachung und der Experimentalisierung. Machte die technische Erschließung der Wahrnehmung, basierend auf instrumentenvermittelnder Einsicht, das bislang Nichtwahrnehmbare sichtbar und damit den neuen Wahrnehmungsbereich experimentell zugänglich, so ermöglicht der dritte Typus der empirischen Extension den Einblick in das bislang mathematisch Unanschauliche und macht es dadurch experimentell zugänglich. Aufgrund der besonderen symbolischen Prägung der mathemati-

---

12 Dieser Unterschied zwischen dem Aufschreiben auf Papier, also im Räumlichen, und dem Überschreiben im Computer, also im Zeitlichen, markiert den entscheidenden Unterschied zwischen beiden Medien. Da der Computer ein fluides Medium ist, entspricht das permanente Überschreiben seiner fluiden Logik mehr, als das statische Speichern eines Zustandes (vgl. Gramelsberger 2001).

schen Anschauung und der spezifischen Kraft der Operativität des Symbolischen geht die Experimentalisierung, basierend auf Operativität, der Sichtbarmachung voraus. Die primäre Folge der Technisierung der operativen Kraft der mathematischen Symbolsysteme ist daher die Experimentalisierung der Mathematik selbst.<sup>13</sup> Die Mathematik wird dabei aus dem strengen Regelkanon der reinen Mathematik herausgelöst und den Bedingungen dieses dritten Typus der empirischen Extension unterworfen, der dem Prinzip der Stetigkeit folgt. In diesem Sinne könnte man sogar weiter folgern, dass die Mathematik durch den Computer zu einer empirischen Wissenschaft wird, deren maßgebliche Untersuchungsmethode das Experimentelle ist. Allerdings darf der Begriff des Empirischen hier nicht mimisch oder anschaulich auf das Sinnlich-Gegebene gerichtet verstanden werden, sondern funktionslogisch im Sinne der Umkehrung des Blicks als neuer geistiger Perspektive auf das Sinnlich-Gegebene, wie von Cassirer für die symbolische Form der Wissenschaft rekonstruiert; als Durchblick ins Innere der symbolisch rekonstruierten Phänomene.

In dem Moment, in dem das Experimentelle zur dominanten Form des mathematischen Tuns avanciert, konstituiert der Computer als Computerlabor – analog dem Experimentallabor – den Ort, um das symbolische Instrumentarium und damit die Objekte der Mathematik zum experimentellen Untersuchungsgegenstand zu machen. Er tut dies, indem er die Objekte der Mathematik in der Zeit zur Wirkung bringt. Das Computerlabor unterscheidet sich vom klassischen Experimentallabor vor allem in einem Punkt: die Gegenstände, mit welchen hantiert wird, sind nicht materialer, sondern rein symbolischer Natur. Im Computerlabor werden die technologisch-epistemischen Texturen der Wissenschaft selbst zum Gegenstand der Forschung, sofern diese mathematisch formulierbar sind.<sup>14</sup> Aber ebenso wie im Experimentallabor geht es um die Entde-

- 
- 13 Zwar zeigt sich dieser experimentelle Charakter bereits vor der Einführung der Computer in der numerischen Erforschung der symbolischen Maschinen auf dem Papier. Doch wird hier das Experimentelle nur simuliert, insofern das nötige Experimentallabor (Computer als Zeitmedium) und mit ihm die entsprechenden Experimentalssysteme (Modelle der Rechenvorschriften) und Experimente (Computerexperimente) noch fehlen. Erst in der Verschmelzung von Symbol und Energie ist die Voraussetzung für die Experimentalisierung der Mathematik geschaffen.
  - 14 Nicht alles lässt sich mathematisch darstellen, da es entweder an einem geeigneten mathematischen Instrumentarium fehlt oder sich die Theorie grundsätzlich der Mathematisierung entzieht. Beispielsweise basierte der Erfolg der Quantenmechanik auf der Entwicklung eines geeigneten mathematischen Instrumentariums und neuer mathematischer Objekte, während sich die Sozialökonomie einer durchgängigen Mathematisierung ent-

ckung von Neuem. Doch was ist das Neue der experimentellen Entdeckung und welche Art des Forschens steht dahinter?

„Ein Kennzeichen von Laboratorien ist,“ schreibt Karin Knorr Cetina in ihrer Studie über die *Fabrikation von Erkenntnis*, „daß sie eine Rekonfiguration des Systems der ‚Selbst-Anderen Dinge‘ implizieren, eine Rekonfiguration des ‚Phänomenfeldes‘, in dem Erfahrung in der Wissenschaft erzielt wird. Die beiden genannten Begriffe sind von Merleau-Ponty entlehnt, der mit dem System der ‚Moi-Autruï-les choses‘ nicht die objektive Welt unabhängig von menschlichen Akteuren und auch nicht die innere Welt subjektiver Eindrücke meint, sondern die Welt-bezogen-auf-Akteure. Die Laborstudien legen nahe, daß das Labor ein Mittel ist, um die Welt-bezogen-auf-Akteure so zu verändern, daß die Symmetrie zwischen Wissenschaftlern und Objektwelt zugunsten der ersten verändert wird“ (Knorr Cetina 2001: XIV).<sup>15</sup>

Diese Rekonfigurationen des Phänomenfeldes führen in mühevoller Forschungsarbeit zu Entdeckungen. Allerdings ist hier der Begriff des Entdeckens konstruktiv zu verstehen. „Gab es denn“, lässt Bruno Latour in seiner Studie über *Pasteur und seine Milchsäurefermente* fragen, „nicht schon Fermente, bevor Pasteur sie gestaltete?“. [...] Und die Antwort kann nur lauten: „Nein, sie existierten nicht, bevor er daherkam“ (Latour 2002: 175). Man könnte behaupten, Fermente hätten schon immer existiert, bevor sie von „Pasteur mit seinem durchdringenden Blick ‚entdeckt‘“ wurden (Latour 2002: 175). Doch Experimentieren bedeutet, Verschiebungen in einem permanenten Prozess des Differenzierens, des (Re-)Arrangierens, des Konkretisierens flüchtiger Spuren zu erzeugen. Im Laufe eines solchen Prozesses konfigurieren sich die Wissensbestände des Forschers und die Gestaltung der Experimentalsysteme laufend neu und bewegen sich schließlich auf die Entdeckung hin, die am Ende und nicht am Beginn der Forschung steht. In diesem Sinne meint Entdecken das sich Herausschälen einer neuen Entität durch das Wechselspiel von Vagheiten und Stabilisierungen, von epistemischen und technischen Dingen. Daher braucht Experimentieren Geschick und Meisterschaft. Geschick im Sinne von erfolgreich auf den Weg bringen, wie Heidegger

---

zieht: „Ein so verstandenes [mathematisiertes] Forschungsprogramm läuft zwangsläufig darauf hinaus, alles nicht-mathematisierbare Verhalten aus dem Untersuchungshorizont auszuschließen. Was mathematisch nicht auszudrücken ist, wird a priori als Verhaltensanomalie im Sinne von nicht-rational postuliert“ (Rolle 2005: 144, 145)

15 Karin Knorr Cetina bezieht sich hier auf Maurice Merleau-Pontys 1945 erschienenes Werk *Phénoménologie de la perception* (vgl. Merleau-Ponty 1945).

es auch für das Instrumentelle als Entbergen und Bestellen darlegte.<sup>16</sup> Denn experimentelle Forschung ist ein komplexes, epistemisches Unterfangen, das sich seinen Weg in „verwickelten Gebieten [suchen muss], wo es darauf ankommt, erst sehen und fragen zu lernen“ (Fleck 1935/1994: 111).<sup>17</sup> Aus dieser Perspektive entpuppt sich Forschung als kreativer Prozess, dessen Wissenschaftlichkeit durch das Diktum „größter Denkzwang bei kleinster Denkwillkürlichkeit“ (Fleck 1935/1994: 124) garantiert wird, dessen Natur aber mehr im Handwerk des Forschens, als in der Abbildung von Welt zu suchen ist. Der Grund dafür liegt auf der Hand: Wirklichkeit eins zu eins abzubilden würde wenig Erkenntnisgewinn bringen. Es sind die Hinzufügungen und Weglassungen, die Perspektivität, die Art der Übersetzungen und Transformationen, die Wissen aus der Differenzialität zur Wirklichkeit erzeugen. Forscher setzen dazu die Kulturtechniken der Schrift, des Bildes und der Apparate in einem bestimmten Modus der Re-Kontextualisierung ein. Sie nutzen diese als Werkzeuge zum Operieren mit vorläufigen Gegenständen (epistemischen Objekten), die es im weiteren Fortgang der Forschung zu stabilisieren gilt. Dieser Forschungsprozess kann sich über viele Jahre hinziehen, bis es zu einer Entdeckung kommt. Er kann aber auch scheitern.

Im Computerlabor treffen nun der operative Modus der Re-Kontextualisierungen der experimentellen Forschung und die technische Erschließung der Operativität des Symbolischen der Mathematik aufeinander. Allerdings unterliegt das Handwerk der Fabrikation von Wirklichkeit im klassischen Experimentallabor Bedingungen, die nur in modifizierter Weise auf das Computerlabor übertragen werden können: Forschung im

---

16 „Das Wesen der modernen Technik bringt den Menschen auf den Weg jenes Entbergens, wodurch das Wirkliche überall, mehr oder weniger vernehmlich, zum Bestand wird. Auf einen Weg bringen – dies heißt in unserer Sprache: schicken. Wir nennen jenes versammelnde Schicken, das den Menschen erst auf einen Weg des Entbergens bringt, das Geschick“ (Heidegger 1949/1962: 24). Forschung als experimentelle Forschung wie auch Computerexperimente sind unter der Perspektive des Technischen und des Geschicks im herkömmlichen wie in Heideggers Wortsinn zu betrachten. Daher ist auch Mary Morgans bereits angesprochene Definition der Simulation als Technologie sehr zutreffend (vgl. Morgan 2004).

17 „Es besteht ein sehr verbreiteter Mythos über Beobachtung und Experiment. Das erkennende Subjekt figuriert als eine Art Eroberer vom Typus Julius Cäsars, der nach der Formel *veni-vidi-vici* seine Schlacht gewinnt. Man will etwas wissen, man macht die Beobachtung oder das Experiment – und schon weiß man es. Selbst Forscher, die manche Kämpfe gewannen, glauben dieses naive Märchen, wenn sie retrospektiv ihre eigene Arbeit betrachten“ (Fleck 1935/1994: 111).

Experimentallabor ist dem Zwang der Wirklichkeit untergeordnet, dessen Berücksichtigung ein maßgeblicher Teil der Forschung ist. Daher gehören materiale Widerständigkeit und experimentelles Scheitern prinzipiell zur experimentellen Wissenskultur. Dieses Forschungshandeln in der Wirklichkeit erhebt den Anspruch, Fakten von Fiktionen unterscheiden zu können. Andererseits sorgt es dafür, dass Forschung im Experimentallabor in theoretisch underdeterminierten Räumen stattfindet und macht die experimentelle Forschung zu einem mühsamen und langwierigen Geschäft. Forschungshandeln im Computerlabor hingegen unterliegt anderen Bedingungen. Der für die Forschung entscheidende Evidenzanspruch des materialen Zwangs löst sich auf, wenn Wissenschaftler mit rein symbolischen Objekten respektive technologisch-epistemischen Texturen hantieren. Dies eröffnet für die Wissenschaft das problematische Terrain zwischen Fakt und Fiktion. Der symbolische Charakter der experimentellen Forschung kann nicht wie im klassischen Experimentallabor auf materiale Widerständigkeit und materiale Wiederholbarkeit als Korrektiv hoffen. Hier liegt die Crux der Computerexperimente: Sie agieren zwar in einem theoretisch überdeterminierten Experimentalraum, dieser bietet jedoch keinerlei Korrektiv in seiner experimentellen Anordnung, weder als materiales Korrektiv, noch als logisches basierend auf der Kohärenz des deduktiven Verfahrens.<sup>18</sup> Doch ähnlich wie mit dem Laxschen Äquivalenzsatz behilft sich hier die computerexperimentelle Forschung praktisch, indem sie den theoretisch überdeterminierten Experimentalraum nicht als Theorieraum, sondern als einen Möglichkeitsraum betrachtet und ihn als solchen zum Gegenstand der experimentellen Forschung macht. Denn analog zum Wirklichkeitsraum des Experimentallabors ist im Möglichkeitsraum bereits alles Entdeckbare enthalten. Das Entdeckbare muss im Laufe der experimentellen Forschung herausgeschält und stabilisiert werden im Sinne des Entbergens als Her-vor-bringen. Durch diesen Wechsel vom Theorie- zum Möglichkeitsraum wird computerexperimentelle Forschung überhaupt erst zur Forschung, denn ein wesentliches Kriterium von Forschung ist die Herstellung von Zukunft, wie dies bislang den Experimentallaboren vorbehalten war. „Forschung [...] produziert Zukunft: Differenz ist für sie konstitutiv. Technische Konstruktionen sind im Prinzip darauf angelegt, Gegenwart zu sichern. Für sie ist Identität in der Ausführung konstitutiv, sonst könnten sie ihren Zweck nicht erfüllen. Wenn der Impuls der Wissenschaft sich zur Technologie verfestigt, ge-

---

18 Auch das logische Korrektiv der Analytik fehlt, da die strukturelle Isomorphie zwischen mathematischem Modell und dem Modell seiner Rechenvorschrift nicht eindeutig beweisbar ist und die Simulationen hochgradig sensitiv gegenüber ihren numerischen Explizierungen sind.

hen wir ‚von der Zukunft zur erstreckten Gegenwart‘ über. Technische Gegenstände haben mindestens die Zwecke zu erfüllen, für die sie gebaut worden sind; sie sind in erster Linie Maschinen, die Antwort geben sollen. Ein epistemisches Objekt hingegen ist in erster Linie eine Maschine, die Fragen aufwirft“ (Rheinberger 2002: 29).

Insofern vollzieht sich auch im Computerlabor der permanente Wechsel von einer Antwort- zu einer Fragemaschine, von einem technischen zu einem epistemischen Forschungshandeln (vgl. Rheinberger 2002; Merz 2002). Dieser Wechsel zeigt sich im kontinuierlichen Wechselspiel zwischen Programmierung und Simulation im Laufe des Fortgangs der computerexperimentellen Forschung, wie am Beispiel der Vulkanparametrisierung dargestellt. Dieser Wechsel von einer Antwort- zu einer Fragemaschine gibt auch eine Antwort auf die Frage nach dem ambivalenten Status von Simulationen. Denn sofern der Experimentalraum nicht als Theorieraum, sondern als ein Möglichkeitsraum gehandhabt wird, stehen der experimentelle Charakter und die epistemischen Interessen in Form von Fragen im Vordergrund. Insofern der Möglichkeitsraum als Theorieraum gehandhabt wird – beispielsweise wenn analog zur hypothetisch-deduktiven Forschungslogik die Simulation als Antwortmaschine im Sinne von Prognosen zur Prüfung an Messdaten verwendet wird – stehen der theoretische Charakter und die technischen Interessen als Produzieren von Antworten im Vordergrund. In-silico Experimentsysteme und Computerexperimente erlauben also beides, und sie erlauben es gleichzeitig.

Je nachdem, ob der Fokus eher auf das Theoretische oder dass Experimentelle gerichtet ist, generiert computerexperimentelle Forschung Erkenntnisse mit unterschiedlichen Evidenzansprüchen. Dies bedeutet, dass es mindestens zwei Arten von Korrektiven für Simulationsresultate geben muss. Das erste Korrektiv ergibt sich aus dem klassischen Überprüfungs kriterium für Theorien im Sinne Karl Poppers, falls sich aus der Simulation eine Prognose ableiten lässt, die dann anhand von Messdaten bestätigt oder widerlegt werden kann. Diese Art von Korrektiv kann sich immer nur auf Einzelaussagen beziehen und wird zur Evaluation eines spezifischen in-silico Experimentsystems verwendet. Beispielsweise wenn ein Klimamodell mit Messdaten aus vorindustrieller Zeit gestartet wird und es gelingt, den aktuellen Zustand des Klimas wiederzugeben bzw. signifikante Messungen darzustellen. Doch diese Art der überprüfbaren Prognose sichert nur den Evidenzanspruch des jeweiligen Computerexperiments als Artikulation eines spezifischen Theoriebaukastens unter den gewählten Bedingungen. Indem die Anfangsbedingungen leicht variiert werden (Ensemble-Prognosen) beziehungsweise mehrere

Experimentalsysteme unter standardisierten Bedingungen miteinander verglichen werden (Modellvergleich), versucht man die Prognosegüte einzelner Experimente auf das gesamte Experimentalsystem zu übertragen, um hinreichend gute Antwortmaschinen für Zukunftsprojektionen zu erhalten. Diese Übertragung ist, wie bereits diskutiert, nur bedingt möglich und nur unter Wahrscheinlichkeitsannahmen, welche die klassischen Fehlerbalken ersetzen.<sup>19</sup>

Die zweite Art sind computerexperimentelle Korrektive. Der Konvergenztest als mathematisches Korrektiv ist hier ebenso zu verbuchen wie das informatische Korrektiv, das ein in-silico Experimentalsystem zuverlässig laufen muss und nicht abstürzen darf.<sup>20</sup> Der maßgebliche Erkenntnisgewinn besteht jedoch nicht darin, dass ein in-silico Experimentalsystem ein beliebig bestückter Theoriebaukasten ist, sondern dass es eine bestimmte Kombination von Theorieteilen darstellt. Diese Theorieteile, die zuvor in der Forschung für sich alleine standen, kommen erstmalig im in-silico Experimentalsystem zusammen. Im permanenten Wechselspiel zwischen Programmierung und Simulation wird das Zusammenspiel der Theorieteile hergestellt und hierin liegt der maßgebliche Erkenntnisfaktor der Computerexperimente begründet. Dabei wechselt computerbasierte Forschung zwischen Frage- und Antwortmaschine, zwischen epistemischen und prognostischen Korrekturen hin und her.<sup>21</sup> Dieses Wechselspiel programmiert das Experimentalsystem permanent neu, erprobt es und konfiguriert das Phänomenfeld, analog zum Experimentallabor, kontinuierlich um. Allerdings verändert sich im Computerlabor dabei nicht die Objektwelt-, sondern die Theoriwelt-bezogen-auf-Akteure zugunsten der Akteure. Durch diese Umkonfigurationen erneuern sich die computablen Wissensbestände der Forscher, weil die Erprobung von Kombinationen von bisher singulären Theorieteilen neue Instanziierung der Theorie darstellen und daher neue Einsichten generieren. Dabei schälen sich auch die Objekte heraus, die Zukunft in Form

- 
- 19 Diese Projektionsmöglichkeit in die Zukunft ist neu. Im Unterschied zu Laborexperimenten, die Zukunft in Form neuer Entitäten herstellen können, ist dieser Blick in die Zukunft der computerexperimentellen Forschung vorbehalten.
  - 20 „Irgendetwas in der Konvektion streikt und es ist ein richtiger Modellcrash. Das Modell steigt richtig aus“ (Interview 25, 2008).
  - 21 Als epistemisches Korrektiv sind Einsichten zu bewerten, die den Erfahrungen der Forscher widersprechen, beispielsweise während der Vulkanparametrisierung: „Man kann viel direkter sehen, was passiert. Mit diesem Boxmodell haben wir dann auch erkannt, dass etwas nicht richtig funktionierte, dass ein physikalischer Prozess überhaupt nicht angesprochen wurde, weil wir außerhalb des Gültigkeitsbereiches waren“ (Interview 25, 2008). Als prognostisches Korrektiv wäre die Evaluierung anhand des Pinatubo-Ausbruchs von 2001 zu werten.

neuer Entitäten herstellen und das Arbeiten mit Computerexperimenten zur Forschung werden lassen.

Doch was sind das für Objekte? Es sind sicherlich keine materialen Entitäten wie Fermente (vgl. Latour 2002), aber es sind symbolische Entitäten, die Herstellungsanleitungen für neue Objekte im Wirklichkeitsraum der Labore sind. Computerexperimente basieren auf der technischen Erschließung der symbolischen Operativität. Sie nutzen diese technisch für automatisierte Extrapolationen von Prognosen. Sie nutzen diese aber auch epistemisch, indem mit ihnen der aktuale Möglichkeitsraum erforscht wird. Dabei bahnt sich eine neue Art von Forschung ihren Weg, ausgehend von den überdeterminierten Theorieräumen, über den Computer, in den Wirklichkeitsraum der Labore. Dieser Transfer kann nur deshalb gelingen, da auch der Wirklichkeitsraum der Labore nur noch wenig mit der alltäglichen Lebenswelt zu tun hat, sondern selbst ein hochgradig technisch erschlossenes Terrain ist.<sup>22</sup> In diesem Transfer zeigt sich für die Computerexperimente vor allem die zweite Eigenschaft der technischen Erschließung der mathematischen Anschauung, die der Experimentalisierung nachgelagert ist: die Sichtbarmachung des bislang mathematisch Unanschaulichen. Sichtbarmachung in erster Linie verstanden als Handhabbarmachung. Diese neue Art von Forschung reicht dabei über das Computer- und das Experimentallabor hinaus und erzeugt Sinnverschiebungen in unserem alltäglichen Verständnis von Lebenswelt.

## Sinnverschiebungen

Sinnverschiebungen ergeben sich, so Edmund Husserl in seinem *Krisis* Vortrag von 1935, aus den Entwicklungen der Mathematik. Durch die Etablierung der mathematisierten Wissenschaften werden diese Sinnverschiebungen als universaler Kausalstil in unser Verständnis der Lebenswelt als Apriori einprogrammiert.<sup>23</sup> Beispielsweise als Idee der Objekti-

- 
- 22 Aus dieser technischen Erschlossenheit des Wirklichkeitsraumes im Experimentallabor als Labor-Realitäten resultiert nicht nur die Differenz zum lebensweltlichen Wirklichkeitsraum. Diese Erschlossenheit macht Forschung und Entdeckungen im Sinne von Entbergen als Her-vor-bringen erst möglich. Die Bedingungen, welchen die Labor-Realitäten unterliegen, sind als apriorisch technische den Bedingungen im Computerlabor ähnlich. Daher ist der Transfer zwischen beiden möglich.
  - 23 Das Eindringen dieses Kausalstils ist der co-evolutionäre Prozess von Wissenschaft und Gesellschaft, den Günther Frederick als das „physikalische Weltbild [...] das zum] Weltbild dieser Gesellschaft“ geworden ist, beschreibt (Frederichs 1999: 21).

vierbarkeit und Exaktheit von Welt durch die mathematische Idealisierung der Körperwelt, die „ex datis“, so Husserl, konstruierbar ist, als die Möglichkeit der indirekten Mathematisierbarkeit der Fülle sinnlich wahrnehmbarer Entitäten, oder als die ideale Praxis der „Limes-Gestalten“, die nicht nur die Idee der Unendlichkeit sowie der Approximation in die Wissenschaften einführt, sondern auch den unendlichen Progress des Forschens motiviert. Was dieser universale Kausalstil praktisch leistet, ist nicht weniger als „eine ins Unendliche erweiterte Voraussicht“ (Husserl 1935/1996: 54), die durch Berechnung möglich wird: „Vermöge der reinen Mathematik und praktischen Meßkunst kann man für alles dergleichen Extensionale an der Körperwelt eine völlig neuartige induktive Voraussicht schaffen, nämlich man kann von jeweils gegebenen und gemessenen Gestaltvorkommnissen aus unbekannte und direkter Messung nie zugängliche [Gestaltvorkommisse] in zwingender Notwendigkeit berechnen“ (Husserl 1935/1996: 33). Diese ‚neuartige induktive Voraussicht‘ konstituiert den dritten Typus der empirischen Extension und generiert damit die Voraussetzung für einen neuen Typus von Forschung. Die Simulation als Limes-Gestalt und angewandte Voraussicht par excellence ermöglicht es den Naturwissenschaften, rationale Extrapolationen zu erstellen. Extrapolationen, nicht nur in Form von Zukunftsprojektionen wie für das Wetter oder Klima von morgen, sondern auch als Herstellungsanleitungen zur Optimierung, Veränderung und Herstellung neuer, da möglicher Objekte, beispielsweise in Form genetischer Koordinaten zukünftiger Lebewesen oder atomarer Vorschriften für zu kreierende Moleküle und Materialien. Wie ist das möglich?

Der Computer transformiert nicht nur das mathematische Tun in ein experimentelles Tun in der Zeit, sondern er verändert auch den experimentellen Modus wissenschaftlicher Re-Kontextualisierungen. Erst letzteres schafft die Voraussetzung für den neuen Typ von Forschung, der Computer- und Experimentallabor miteinander verschränkt. Denn wenn im Computerlabor mit rein symbolischen Objekten respektive technologisch-epistemischen Texturen hantiert wird, bedeutet dies, dass nicht nur mit Theorie im Sinne symbolischer Maschinen, sondern mit bestimmten Resultaten des Forschens im Experimentallabor experimentiert wird: nicht mit den materialen Objekten, aber mit den Deskriptionen, die im Laufe der Experimentalforschung herausgearbeitet wurden. Denn Forschung im Experimentallabor erzeugt beides: das materiale Objekt wie auch seine Beschreibung. Diese Beschreibung kann als Theorie aufbereitet sein, sie birgt aber zugleich eine Beschreibung des Herstellungsverfahrens in sich. Denn das noch vorläufige Objekt als epistemisches

Objekt ist nichts weiter als „„eine Liste seiner Aktivitäten und Eigenschaften“, die „„den Gegenstand jedes Mal umdefiniert, wenn man diese Liste um einen Eintrag erweitert; man gibt ihm [dem epistemischen Objekt] jedes Mal eine neue Gestalt.“ [...] Um in einem solchen Prozeß des operationalen Umdefinierens einzutreten, benötigt man jedoch stabile Umgebungen, die man als Experimentalbedingungen oder als technische Dinge bezeichnen kann; die epistemischen Dinge werden von ihnen eingefäßt und dadurch in übergreifende Felder von epistemischen Praktiken und materiellen Wissenskulturen eingefügt“ (Rheinberger 2002: 25).<sup>24</sup> Dieser Prozess des operationalen Umdefinierens erfolgt im Labor in kleinen Schritten und unter kontrollierten Bedingungen, um lückenlose Beschreibungen der Operationen anfertigen zu können, die später als Herstellungsanleitungen dienen. Die Entdeckung besteht aus dem material erzeugten Produkt, aus der lückenlosen Beschreibung seiner Herstellung sowie der Dekodierung seiner epistemischen Verfassung in Form von Erklärung, Theorie und Prognose. Das Ziel empirischer Wissenschaft war es daher bislang, beide ontologisch differenzierten, aber über dieselbe Praktik verwobenen Resultate – sofern die Praktik des operationalen Umdefinierens sowohl Herstellungs- wie Beschreibungspraktik ist – parallel zu generieren. Entlang dieser Verwobenheit konstituiert sich der komplexe Prozess der Re-Kontextualisierung empirischer Wissenschaft als Wechselspiel von Deskription und Operation.

Dieser Modus wissenschaftlicher Re-Kontextualisierungen ändert sich nun durch den Computer grundlegend. Und zwar insofern, als der Computer nicht nur die Dekodierungen der epistemischen Verfassung materialer Objekte in Form von algoritmierter Theorie, sondern auch die lückenlosen Beschreibungsanleitungen sichtbar und experimentell handhabbar macht. Hier kommen die informatischen Bedingungen des Computerlabors zum Tragen, sofern sie die Rekonstruktion der Herstellungsverfahren und damit die technische Realisierung der operativen Kraft des Experimentellen – analog zur operativen Kraft des Symbolischen – ermöglichen. Allerdings handelt es sich um eine andere Form der Operativität, die sich nicht aus der mathematischen Rekursion ergibt, sondern aus der experimentellen Prozessualität beziehungsweise Kausalität. Denn erst die Lückenlosigkeit der Beschreibung entlang der empirischen Operationen erzeugt die wissenschaftlich nachvollziehbare ‚wenn, dann‘-Abfolge als symbolische Rekonstruktion kausaler Zusammenhänge im Experimentallabor. Diese ‚wenn, dann‘-Abfolgen werden nun durch die Algorithmen in den ‚do (if ... then ... else ... end

---

24 Hans-Jörg Rheinberger zitiert hier Bruno Latours Konzept der Liste aus dessen Laborstudie *Science in Action* (vgl. Latour 1987: 87ff).

if<sup>n</sup> end do, return<sup>c</sup>-Abfolgen rekonstruierbar. Daher ist der Computer nicht nur in hochgradig mathematisierten Kontexten wie der Physik als Computerlabor einsetzbar, sondern in der Domäne jeglicher experimentellen Forschung, insofern diese ‚wenn, dann‘-Abfolgen deskriptiv erzeugt. Ebenso wie mit dem Computer die automatisierte Extrapolation der Rekursion als ins Unendliche erweiterte Voraussicht möglich ist, wird auch die Extrapolation der kausalen Abfolgen als ins Unendliche erweiterte Voraussicht möglich. Beide unendlichen Voraussichten unterscheiden sich jedoch voneinander: Erstere wird als prognostische Projektion in die Zukunft, letztere wird als epistemische Projektion in neue Bereiche des Möglichkeitsraums in Form von Herstellungsverfahren neuer Objekte sichtbar und handhabbar. Auf mathematischer Ebene basieren sie jedoch auf derselben Funktionslogik der Limes-Gestalten und dies macht es so interessant, das Computerlabor dem Experimentallabor vorzuschalten. Denn es etabliert sich ein grundlegend neues Weltbezogen-auf-Akteure Verhältnis, indem mit den Herstellungsvorschriften selbst projektiv experimentiert werden kann, und zwar in der Weise, dass von diesen ‚Gebilden des vorstellenden Herstellens‘ Bilder generiert werden können, die greifbar und dadurch zum Objekt experimentellen Forschungshandelns werden. Diese Bilder basieren dabei einzig und allein auf der Funktionslogik der Limes-Gestalten im Gestaltungsgebiet der Mannigfaltigkeiten, insofern sich „die anschauliche geometrische Linie [...] in eine reine Wertfolge von Zahlen auflöst], die durch eine bestimmte arithmetische Regel miteinander verknüpft sind“ (Cassirer 1910: 95).<sup>25</sup>

Ein Beispiel für diesen neuen Modus der Re-Kontextualisierung wie auch der Sichtbarmachung und damit der neuen Form der Forschung bietet die Strukturchemie. Im Laufe der letzten dreihundert Jahre hat die Chemie ihre Struktursprache zu einem operativen Werkzeug entwickelt, das es ihr erlaubt, Moleküle und deren chemische und physikalische Eigenschaften numerisch zu beschreiben und in ihrer Dreidimensionalität symbolisch darzustellen.<sup>26</sup> Mit dieser theoriebasierten Darstellung

---

25 Insofern entspricht das visualisierte Resultat einer Simulation nie einer mimischen oder darstellenden Form von Sichtbarkeit, die einen Bildvergleich zwischen visualisierten Simulationsresultaten und Sinnlich-Gegebenen ermöglichen würde. Die Visualisierungen der Resultate der Computerexperimente sind keine Bilder der Welt, sondern allenfalls der mathematisierten, algorithmisierten und numerisch berechneten Theorie.

26 Die Stereochemie beschreibt die chemischen und physikalischen Moleküleigenschaften, basierend auf der dreidimensionalen Anordnung der Atome im Raum, die aus der Elektronenverteilung im Molekül resultieren. Diese Beschreibungen lassen sich im Computer numerisch darstellen und als

lassen sich neue, bisher nicht existierende Moleküle im Computer numerisch simulieren und deren potenzielle Eigenschaften vorhersagen. Der Bestand dieser Moleküle aus dem Computerlabor umfasst bereits rund siebzehn Millionen berechnete und in Datenbanken abgespeicherte Molekülverbindungen, von potenziell  $10^{100}$  möglichen Molekülen basierend auf dem aktuellen chemischen Wissen. „Das [...] eigentliche] Potential der generierten Daten liegt jedoch in der in ihnen verborgenen Information, die sich aus den Relationen zwischen den gesammelten Daten ergibt. Diese implizit in den Daten enthaltene Information wie beispielsweise die Ähnlichkeit zwischen verschiedenen Strukturdaten ist der zentrale Schlüssel für die Generierung von chemischen Modellen sowie zur Vorhersage von allgemeinen, chemischen Sachverhalten“ (Öllien 2002: 9). Die Logik chemischer Forschung verschiebt sich vom Hantieren mit Substanzen im Reagenzglas hin zur Erforschung des digitalen Terrains virtueller Moleküle und deren prognostizierter Eigenschaften. Entdeckungen in dieser digitalen und theoretisch komplett explizierten Welt des Computerlabors vollziehen sich in anderer Weise als dies bisher im Experimentallabor der Fall war. Bislang fand der Prozess der Stabilisierung neuer Entdeckungen auf dem theoretisch underdeterminierten Terrain der Experimentallabore als operationales Umdefinieren in stabilen Umgebungen statt. Forschen im Computerlabor vollzieht sich im Fall der Chemie auf Basis kombinatorischer, vergleichender und extrapolierender Praktiken im Umgang mit rein symbolischen Konfigurationen, die allesamt mathematisch-logischer Natur sind. Die neuen und für spezifische Zwecke, wie beispielsweise die Medikamentenentwicklung, selektierten Entdeckungen werden als komplett konstruierte Entitäten samt Herstellungsvorschrift im Computerlabor generiert und erst danach im Experimentallabor synthetisiert und in die Lebenswelt entlassen. Auf diese Weise, als computergestütztes ‚Design von Natur‘, entstehen neue Moleküle und Medikamente. In diesem epistemischen Potenzial der experimentellen Mathematik, die das Computerlabor zur Erforschung des Möglichkeitsraumes mathematischer Anschauung nutzt, liegt das Potenzial der Wissenschaft im Zeitalter des Computers. In ihm „[meldet sich] die Natur in [...] rechnerisch feststellbarer Weise [...] und [wird] als ein System von Informationen bestellbar“ (Heidegger 1949/1962: 22).

---

3D-stereo Bilder simulierter Moleküle visualisieren, welche die Forscher durch Datenbrillen als plastische Objekte wahrnehmen und mittlerweile auch als haptische Objekte mit Datenhandschuhen manipulieren können. Ihre haptischen Manipulationen werden dann in Herstellungsanleitungen zurückgerechnet.

Dieses Potenzial ist inspirierend wie beängstigend zugleich. Denn es ist davon auszugehen, dass dieser neue Typ von Forschung nicht nur die wissenschaftliche Erfahrung verändert, sondern auch das, was wissenschaftlich als real gilt. Nachdem die Eigenschaften der extremen Welt I in Form von mathematischen Idealisierungen der Körperwelt, die ex datus konstruierbar ist, bereits Eingang in die Lebenswelt gefunden haben, folgen nun die Eigenschaften der extremen Welt II. In diesen Veränderungen kommt die Umkehrung des Durchblicks ins Innere der Phänomene nicht nur in seiner verdichteten, symbolischen Form, sondern in auch seiner operativen Form voll zum Tragen. Die Frage, welche Folgen diese Operativität auf die Lebenswelt haben wird, ist nicht einfach zu beantworten. Sicherlich ist das dargestellte Design der Natur eine dieser grundlegenden Folgen. Dabei gehen das Design und der Blick tiefer als bisher, insofern die Natur nicht nur material, sondern zunehmend informationell als ein ‚System von Informationen bestellbar‘ wird. Auf diese Weise werden materiale Konstruktionen informationell angereichert und zwar in indirekter wie auch direkter Weise. Indirekt in der bisher üblichen Art und Weise neue Konstruktionen entsprechend technischer Konstruktionsvorschriften herzustellen. Direkt, indem materiale Komponenten so arrangiert werden, dass sie Informationen in sich tragen und auf Basis dieser Informationen Entscheidungen treffen. Beispiele wären hier adaptive Materialien, die sich den Umweltbedingungen anpassen können. Dabei kann es sich nicht um einen repräsentationalen Informationsbegriff handeln, sondern eben um einen operativen. Verfolgt man diesen Gedankengang weiter, dann zeigt sich, dass Computerexperimente einerseits die Vollendung der wissenschaftlichen Revolution der Neuzeit bedeuten, indem sie Mathematik und Quantifizierung operativ im Medium des Computers zur Anwendung bringen. Dass sie aber andererseits den Beginn einer neuen Wissenschaftsentwicklung markieren, der eine Umkehrung der empirischen Wissenschaft in eine konstruktive bedeutet. Konstruktiv, insofern die Empirie nicht als eine gegebene, sondern als eine umgestaltbare Folie der Wissenschaft über die bisherigen technisch erzeugten Welten und Laborrealitäten hinaus fungiert. Möglich ist dies nur durch die spezifische symbolische Form der Computerexperimente und der Entfaltung ihrer operativen Kraft. Diese ‚operative Kraft‘ kann den Zeichenraum des Computerlabors verlassen, wenn es technisch möglich ist, materiale Entitäten in immer höherer Auflösung – also von der Mikro- auf die Nanoebene – so zu manipulieren, wie dies die Simulation mit den symbolischen Entitäten im Computer macht. Die digitale Kette reicht dann vom Computer, über automatisierte Fertigungsmaschinen, in die Lebenswelt. 3D-Printing, wie es im Modellbau der Architektur, aber auch in der Herstellung von Haut auf Basis leben-

der Zellen zunehmend Einsatz findet, wäre ein Beispiel für das realweltliche Ende einer solchen digitalen Kette. Damit folgt nach der Transformation der mathematischen Symbolwelten in Mannigfaltigkeiten die Transformation der Lebenswelt in einen Raum manipulierbarer Mannigfaltigkeiten. Rekombinationen, Neukonfigurationen und Extrapolationen werden dadurch als Handlungsoptionen in einem hoch aufgelösten realweltlichen Setting möglich und diese Handlungsoptionen lassen sich digital und regelbasiert mit Hilfe der Computer steuern. Diese Entwicklung basiert dabei in erster Linie auf der höheren Auflösung des Raumes der Mannigfaltigkeiten als bisher für technische Konstruktionen üblich. Doch sie basiert nicht nur alleine darauf. Die steuerbare und kontrollierbare Operativität auf Symbolebene jenseits anschaulicher und geometrischer Vorstellungswelten eröffnet neue Entwicklungsmöglichkeiten im Design der Natur. In diesem Sinne begründet die Kulturtechnik des Rechnens eine neue Kulturtechnik der Konstruktion als rein typographisches Operieren mit Materialität.

