

3. Mathematik als Phänomentechnik der Synthese

Gabriele Gramelsberger

3.1 EINLEITUNG

Interpretiert man die Synthese als Überschreitung des Bestehenden, indem neue Kombinationen und Rekonfigurationen von theoretischen Konzepten erforscht und im Labor synthetisiert werden, dann lassen sich die aktuellen Entwicklungen in Biologie, Chemie und Materialwissenschaften als Praktiken der Wirklichkeitserzeugung verstehen. Diese Praktiken der Wirklichkeitserzeugung zeigen sich materiell im Entstehen zuvor nicht existierender Materialien, Moleküle und Mikroorganismen.¹ Neben den technowissenschaftlichen Konzepten der heutigen Wissenschaftsphilosophie hat bereits Anfang des 20. Jahrhunderts Gaston Bachelard eine Philosophie formuliert, die als erste der wissenschaftlichen Wirklichkeitserzeugung und dem technisch-konstruktiven Charakter der Wissenschaft Rechnung trägt.² Denn für Bachelard sucht die Wissenschaft

»im Experiment [...] nach Möglichkeiten, das Konzept zu komplizieren, es gegen den Widerstand des Konzeptes anzuwenden, um so die Anwendungsbedingungen zu verwirklichen, die die Wirklichkeit nicht zustande gebracht hat. An diesem Punkt merkt man, daß die Wissenschaft ihre Objekte verwirklicht, ohne sie jemals ganz fertig vorzufinden. Die Phänome-

1 | Zwar erzeugt Technik per se neue Entitäten, doch zeichnen sich die neuen Syntheseentitäten durch eine andere Forschungslogik aus. Vgl. in diesem Band Kapitel 1 Einleitung – Synthesis. Neue Logik der Forschung sowie Abschnitt 3.4.

2 | Vgl. Gaston Bachelard: *Der neue wissenschaftliche Geist* (1934), Frankfurt a.M.: Suhrkamp 1988; Gaston Bachelard: *Die Bildung des wissenschaftlichen Geistes. Beitrag zu einer Psychoanalyse der objektiven Erkenntnis* (1938), Frankfurt a.M.: Suhrkamp 1987; Gaston Bachelard: *Die Philosophie des Nein. Versuch einer Philosophie des neuen wissenschaftlichen Geistes* (1940), Frankfurt a.M.: Suhrkamp 1978.

notechnik erweitert die Phänomenologie. Ein Konzept wird in dem Maße wissenschaftlich, wie es technisch wird, wie mit ihm eine Technik der Verwirklichung einhergeht.«³

Experimente in diesem Sinne verstanden sind ›realisierte Theorien‹ und die daraus resultierenden Phänomene tragen die ›Prägemale‹ der Theorie in sich.⁴ Die Bestandssphäre der Phänomenotechnik der Wissenschaft charakterisiert sich durch diese Prägemale und deren rationale und ›surrational‹ Verfassung.⁵ Schon Immanuel Kant beschrieb diesen technischen Konstruktivismus der Wissenschaft als Nötigungscharakter. Etwa, wenn »Galilei seine Kugel die schiefe Fläche mit einer von ihm selbst gewählten Schwere herabrollen, oder Toreicelli die Luft ein Gewicht, was er sich zum voraus dem einer ihm bekannten Wassersäule gleich gedacht hatte, tragen ließ«.⁶ Dabei wurde den Naturforschern, so Kant, klar, dass die »Vernunft nur das einsieht, was sie selbst nach ihrem Entwurf hervorbringt,« und dem Philosophen wird klar, »daß sie [Naturforscher] mit Prinzipien ihrer Urteile nach beständigen Gesetzen vorangehen und die Natur nötigen müsse[n] auf ihre Fragen zu antworten«.⁷

Ein aktuelles Beispiel des phänomenotechnischen Potenzials der Wirklichkeitserzeugung geben die Materialwissenschaftler Martin Jansen und J. Christian Schön in diesem Band.⁸ »Grundlage unseres Ansatzes«, schreiben sie, »ist die Projektion der gesamten Welt der bekannten und der noch nicht hergestellten, aber existenzfähigen chemischen Verbindungen auf eine Energielandschaft.«⁹ Diese im Computer als Konfigurationsraum realisierte Energielandschaft ordnet jedem Punkt eine Atomkonfiguration zu, »und alle Atomkonfigurationen, die gemeinsam eine lokal ergodische Region auf der Beobachtungszeitskala bilden, stellen in ihrer Gesamtheit eine existenzfähige (meta)stabile chemische Verbindung auf dieser Zeitskala dar.«¹⁰ Nicht jede potenziell mögliche Atomkonfiguration ist tatsächlich realisierbar. Die Idee dieses neuen, da deduktiven Paradigmas der bisher empirisch orientierten Synthetischen Chemie und Materialwissenschaft ist die ›Herstellungsgleichung‹, dass jedem Minimum der Energielandschaft eine

3 | Bachelard, *Die Bildung des wissenschaftlichen Geistes*, 1987, S. 111.

4 | Vgl. Bachelard, *Der neue wissenschaftliche Geist*, 1988, S. 18.

5 | Zum Begriff der Surrationalität vgl. Abschnitt 3.3.

6 | Immanuel Kant: *Kritik der reinen Vernunft* (1781, 1787), (herausgegeben von Raymond Schmidt), Hamburg: Meiner 1993, Vorrede B XII.

7 | Kant, *Kritik der reinen Vernunft*, 1993, Vorrede B XIII.

8 | Vgl. in diesem Band den Beitrag Jansen, Schön, ›Design‹ in der chemischen Synthese – eine Fiktion?, 2013.

9 | Jansen, Schön, ›Design‹ in der chemischen Synthese – eine Fiktion?, in diesem Band Kapitel 7, S. 110.

10 | Jansen, Schön, ›Design‹ in der chemischen Synthese – eine Fiktion?, in diesem Band Kapitel 7, S. 110.

existenzfähige Verbindung entspricht.¹¹ »Insbesondere bei tiefen Temperaturen entspricht der Bereich um jedes Minimum der potenziellen Energie einer existenzfähigen Verbindung.«¹² Dies deckt sich mit der in der Einleitung beschriebenen Forschungslogik der Synthetischen Wissenschaften als ›Analyse, Rekombination und Synthese‹ von Theorie, die zur Extrapolation von neuen Entitäten führt. Diese werden im Laufe der Forschung zu empirischen Entitäten mit neuen Eigenschaften, wenn sie sich im Labor synthetisieren lassen.

Die Fragen, die sich im Folgenden stellen, sind: Deckt sich das Potenzial der Wirklichkeitserzeugung der Synthetischen Wissenschaften tatsächlich mit Bachelards Phänomenotechnik? Welche Rolle kommt der Mathematik dabei zu? Lässt sich die Mathematik als Phänomenotechnik des Synthetischen verstehen, insbesondere im Zeitalter der Computereperimente?¹³ Wenn ja, wie weit trägt die Mathematik über das Empirische hinaus? Oder, mit Kant gesprochen, wie weit kann sie die ›Natur‹ zu Antworten nötigen?

3.2 PHÄNOMENOTECHNIK(EN)

Für Bachelard ist der Charakter der Wissenschaft ein technischer, in dem Sinne als der ›Modus operandi‹ der Wissenschaft – das Experimentieren, das Beobachten, das Messen – instrumental verfasst ist und in der Erzeugung, nicht Entdeckung von Phänomenen besteht. »Die wahre wissenschaftliche Phänomenologie,« so Bachelard, »ist daher ihrem Wesen nach Phänomenotechnik. Sie verstärkt das, was hinter dem Erscheinenden durchscheint. Sie lernt aus dem, was sie konstruiert.«¹⁴ Diese Betrachtungsweise hat verschiedene Implikationen zur Folge. Es wird deutlich, dass wissenschaftliche Objekte oder Phänomene nicht wie die der Alltagserfahrung unmittelbar gegeben, sondern instrumentell hergestellt sind. Dieser technische Realismus ist ein »Realismus zweiter Ordnung« und eine charakteristische »Eigentümlichkeit des heutigen wissenschaftlichen Denkens« mit einem »ganz anderen noumenalen Reichtum« als die Lebens-

11 | »Die einzig notwendige Voraussetzung für die Herstellbarkeit einer Verbindung ist, dass sie einem lokalen Minimum zuzuordnen ist, also mindestens kinetisch stabil ist. [...] Synthesechemie zu betreiben heißt in unserem Bild, die Landschaft der freien Enthalpie zu erkunden, was in der Vergangenheit überwiegend experimentell durch den präparativ arbeitenden Chemiker betrieben wurde.« Jansen, Schön, ›Design‹ in der chemischen Synthese – eine Fiktion?, in diesem Band Kapitel 7, S. 111.

12 | Jansen, Schön, ›Design‹ in der chemischen Synthese – eine Fiktion?, in diesem Band Kapitel 7, S. 110.

13 | Vgl. Gabriele Gramelsberger: *Computereperimente. Zum Wandel der Wissenschaft im Zeitalter des Computers*, Bielefeld: transcript 2010.

14 | Bachelard, *Der neue wissenschaftliche Geist*, 1988, S. 18.

welt.¹⁵ Der technische Realismus – als ein permanenter Prozess der Realisierung wissenschaftlicher Objekte und Phänomene verstanden – »deformiert« das (Aristotelische) Allgemeinverständliche der Lebenswelt und führt notwendigerweise zu einem epistemologischen Bruch mit der Alltagserfahrung.¹⁶ Die Deformation oder Transformation eines Objektes in ein wissenschaftliches Objekt durch seine »Problematisierung« hat Hans-Jörg Rheinberger wie folgt beschrieben:

»What is achieved in this [epistemological] act is the transformation of something that had been taken as given into a problem. A scientific object is a phenomenon that has been drawn into a cycle of rectification; it is not constituted once for ever, but it remains a scientific object only through its being constantly reconstituted and rectified. The epistemological rupture serves to mark the transition from everyday knowledge to the act of scientific thinking, while at the same time it inscribes itself into this very act and thus becomes an intrinsic hallmark of a continued scientific engagement with the world.«¹⁷

Dieser Prozess der Transformation ist kein einheitlicher, sondern implementiert unterschiedliche epistemologische Bedingungen. Dies ist sowohl zeitlich-historisch als auch methodologisch zu verstehen. Wissenschaft fragmentiert sich in epistemologische Regionen und Zeitlichkeiten. »The »electrical reality« of the nineteenth century is quite different from the electrical reality« of the eighteenth century.«¹⁸ Das hat zur Folge, dass Wissenschaftsphilosophie diesem Pluralismus Rechnung tragen und die jeweiligen epistemologischen Regionen einzeln untersuchen muss.¹⁹ Bachelard selbst versteht seinen Ansatz als »angewandten

15 | Bachelard, *Der neue wissenschaftliche Geist*, 1988, S. 11. »Während das Ding an sich aufgrund des Ausschlusses allen Phänomenalen ein Noumenon darstellt, scheint uns die wissenschaftliche Wirklichkeit aus einer noumenalen Struktur zu bestehen, welche die Achsen des Experimentierens zu kennzeichnen vermag. Wissenschaftliche Erfahrung ist solcherart als bestätigte Vernunft zu begreifen.« Ebd., S. 11.

16 | Vgl. Bachelard, *Die Bildung des wissenschaftlichen Geistes*, 1987, insb. Kapitel II. Das erste Hindernis: Die erste Erfahrung, S. 59ff; Bernhard Waldenfels: *Bruchlinien der Erfahrung: Phänomenologie, Psychoanalyse, Phänomenotechnik*, Frankfurt a.M.: Suhrkamp 2002.

17 | Hans-Jörg Rheinberger: Gaston Bachelard and the Notion of »Phenomenotechnique«, in: *Perspectives on Science*, 13(3), 2005, 313-328, S. 320.

18 | Bachelard zitiert in Rheinberger, Gaston Bachelard and the Notion of »Phenomenotechnique«, 2005, S. 326. Vgl. auch ebd., S. 316 bzgl. der epistemologischen Fragmentierung der Wissenschaft.

19 | Bachelard formuliert damit etwa zur selben Zeit wie Ludwik Fleck die Forderung nach Laborforschung. »He even went so far as to postulate that each interesting problem, each experiment, or even each equation required a philosophical reflection of its own.« Rheinberger, Gaston Bachelard and the Notion of »Phenomenotechnique«, 2005, S. 117. Darüberhinaus, muss »eine Philosophie der Naturwissenschaften, die nicht utopisch sein will,

Rationalismus«, der eine Synthese von Realismus und Rationalismus, von Erfahrung und Vernunft versucht. Da diese Synthesen je nach den epistemologischen Bedingungen veränderlich sind, sind sie nicht einfach philosophisch zu fassen.²⁰ Dennoch ist die Erfassung des Hybriden notwendig, da »der Geist der Synthese, [...] die moderne Wissenschaft beseelt« und dieser Geist besitzt »eine ganz andere Tiefe und eine größere Freiheit [...] als die cartesische Zusammensetzung.«²¹ Daher fordert Bachelard eine »nicht-Cartesianische Epistemologie«, die die Reduktion der Methode Descartes' überwindet und in der Erfassung der »Komplizierung« wissenschaftlicher Objekte und Phänomene besteht. Diese Komplizierung ist die eigentliche Aufgabe der Wissenschaft. Analog zu Ernst Cassirer sieht Bachelard die Charakteristik der modernen wissenschaftlichen Konzepte in ihrer Relationalität und Funktionalität.²² Doch die Relationalität erschöpft sich nicht im Zusammensetzen einfacher Elemente als »eins und eins« wie dies die Cartesische Epistemologie auszeichnet.²³ Vielmehr gilt es, den »Realismus des Zusammengesetzten und die Kraft der Emergenz zu beachten«, denn die moderne Naturwissenschaft »legt ihre Klarheit ins epistemologische Kombinieren und nicht in die gesonderte Betrachtung kombinierter Objekte.«²⁴

Die Tendenz zur Komplizierung zeigt sich an den reichhaltigeren Konzepten der modernen Naturwissenschaft und ihrer Logik der »Vervollständigung«, die in der »sukzessiven Approximation« der Erfahrung besteht. Moderne wissenschaftliche Begriffe sind nicht nur vollständiger, sondern allgemeiner als neuzeitliche Begriffe, denn sie umfassen mehr Anwendungsfälle und Realisierungsmöglichkeiten. Bachelard expliziert dies an verschiedenen Beispielen: an der modernen Geometrie, die einen umfassenderen Gruppenbegriff als den der Verschiebungen (Euklidische Geometrie) entwickelt, ohne den die moderne Physik nicht denkbar

[...] versuchen eine Synthese dieser drei Charakteristika [rationale, technische und soziale Objektivität] zu formulieren.« Gaston Bachelard: *Epistemologie. Ausgewählte Texte*, Frankfurt a.M.: Ullstein 1974, S. 155. Vgl. Ludwik Fleck: *Entstehung und Entwicklung einer wissenschaftlichen Tatsache. Einführung in die Lehre vom Denkstil und Denkkollektiv*, (1935), Frankfurt a.M.: Suhrkamp 1994.

20 | Letztendlich bedarf dies einem »philosophischen Pluralismus« beziehungsweise einer »differentiellen wissenschaftlichen Philosophie [...] als Gegenstück zur integralen Philosophie der Philosophen«. Bachelard, *Die Philosophie des Nein*, 1987, S. 26 und 28.

21 | Bachelard, *Der neue wissenschaftliche Geist*, 1988, S. 22, 23.

22 | Vgl. Ernst Cassirer: *Substanzbegriff und Funktionsbegriff. Untersuchungen über die Grundfragen der Erkenntniskritik*, Berlin: Verlag Bruno Cassirer 1910. Vgl. auch Hans Jörg Sandkühler: *Kritik der Gewißheit. Zeitgenossenschaft – Ernst Cassirers Philosophie der symbolischen Formen und Gaston Bachelards Épistémologie*, in: Birgit Recki (Hg.): *Philosophie der Kultur – Kultur des Philosophierens: Ernst Cassirer im 20. und 21. Jahrhundert*, Hamburg: Meiner 2012, 203-232.

23 | Vgl. in diesem Band Beitrag 2 »und«. Bruchstellen im Synthetischen.

24 | Bachelard, *Der neue wissenschaftliche Geist*, 1988, S. 142, 143.

wäre; an der nicht-Newtonschen Mechanik, in der die Masse kein einfacher Begriff mehr ist, sondern eine Funktion der Geschwindigkeit; usf.²⁵ Entscheidend dabei ist, dass die modernen Grundbegriffe der Wissenschaft realisierte rationale Begriffe sind, abhängig vom Experiment und den verwendeten Instrumenten, die selbst ›realisierte Theorie‹ sind und den wissenschaftlichen Objekten und Phänomenen ihre ›Prägemale‹ aufdrücken.²⁶ Historisch betrachtet resultiert dies in verschiedene Stadien der Wissenschaftsentwicklung, die Bachelard von einem naiven Realismus über einen klassischen Rationalismus bis hin zum diskursiven Rationalismus der modernen Wissenschaft unterscheidet.²⁷

3.3 DIE ROLLE DER MATHEMATIK IN DEN MODERNEN WISSENSCHAFTEN

Die Arbeitsweise des ›Modus operandi‹ der Naturwissenschaften (Experimentieren, Beobachten, Messen) ist in den letzten Jahrzehnten von der Wissenschaftsforschung ausgiebig untersucht worden.²⁸ Was jedoch selten Berücksichtigung findet, ist die prinzipiell mathematische Verfasstheit der modernen Wissenschaft. Bachelard ist neben Cassirer einer der wenigen Wissenschaftsphilosophen, der die Rolle der Mathematik ausreichend würdigt. Seine *Philosophie des Nein* ist eine Philosophie der angewandten Mathematik und *Der neue wissenschaftliche Geist* ist ein mathematischer. Ziel letzteren Buches ist es aufzuzeigen, »was wir unter der Realisierung des Rationalen oder allgemeiner unter der Realisierung des Ma-

25 | Vgl. Bachelard, *Der neue wissenschaftliche Geist*, 1988, insb. erstes bis viertes Kapitel; Hans Wußnig: *Die Genesis des abstrakten Gruppenbegriffes. Ein Beitrag zur Entstehung der abstrakten Gruppentheorie*, Ost-Berlin: VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften 1969.

26 | Dies gilt aber im Grunde schon für die neuzeitliche Physik, wie von Kant als Nütigungscharakter beschrieben, doch sind die Instrumente einfacher und noch im Bereich des Anschaulichen verhaftet. Vgl. Domenico Bertoloni: *Thinking with Objects. The Transformation of Mechanics in the Seventeenth Century*, Baltimore: John Hopkins University Press 2006.

27 | Vgl. Bachelard, *Die Philosophie des Nein*, 1987, S. 55ff; Ernst Cassirer: *Philosophie der Symbolischen Formen* (1923, 1924, 1929), 3 Bde., Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft 1988, 1987, 1990.

28 | Vgl. beispielsweise Bruno Latour: *Science in Action*, Cambridge: Harvard University Press 1987; Hans-Jörg Rheinberger: *Experimentalsysteme und epistemische Dinge. Eine Geschichte der Proteinsynthese im Reagenzglas*, Göttingen: Wallenstein 2001; Karin Knorr Cetina: *Die Fabrikation von Erkenntnis. Zur Anthropologie der Naturwissenschaft*, Frankfurt a.M.: Suhrkamp 2002 sowie die zahlreichen Fallstudien der Science and Technology Studies (STS).

thematischen verstehen.«²⁹ Und das Ziel der *Philosophie des Nein* ist es, die Vervollständigung der modernen Wissenschaftskonzepte durch ihre Komplementierung als prinzipiell mathematische zu rekonstruieren. Es ist die Diskursivität des ›diskursiven Rationalismus‹ der modernen Wissenschaft, die aus der Mathematik resultiert. Bachelard selbst hat die Unterschätzung der Rolle der Mathematik für die moderne Wissenschaft seitens der Philosophie kritisiert. »Immer wieder ist gesagt worden«, schreibt er 1934,

»die Mathematik sei eine Sprache, ein bloßes Ausdrucksmittel. Man hat sich daran gewöhnt, in ihr ein Werkzeug zu erblicken, ein Werkzeug im Dienste einer ihr selbst bewußten, mit vormathematischer Klarheit ausgestatteten, über reine Ideen gebietende Vernunft. Eine solche Segmentierung mag an den Ursprüngen des wissenschaftlichen Geistes sinnvoll gewesen sein, als die ersten anschaulichen Bilder noch suggestive Kraft hatten und zum Aufbau von Theorien beitrugen. [...] In den neuen Doktrinen dagegen hat der wissenschaftliche Geist, indem er sich von den naiven Bildern entfernt, in gewisser Weise größere Homogenität erlangt; hier ist er gänzlich präsent in seiner mathematischen Aktivität. Oder genauer noch: Die mathematische Aktivität ist die eigentliche Achse der Entdeckung; nur der mathematische Ausdruck ermöglicht es, das Phänomen zu denken.«³⁰

Präziser kann die Rolle der Mathematik für die moderne Forschung nicht beschrieben werden. Die Frage nun ist, wie die mathematische Aktivität im Prozess der wissenschaftlichen Realisierung genau zu verstehen ist? Bachelard hat dies anhand zahlreicher Beispiele verdeutlicht. Am eindrucksvollsten ist vielleicht seine Darstellung der Mechanik von Paul Dirac und dessen Begriff der negativen Masse, der die Physik komplementär vollendet. Dieser Begriff, so Bachelard, wäre für die Physiker des 19. Jahrhunderts undenkbar gewesen. Anders die Physik des 20. Jahrhunderts, die der Logik des ›warum nicht‹ folgt und nach der Möglichkeit der Legitimierung eines solchen Begriffs im Experiment fragt und damit der Realisierung den Vorrang vor der Realität gibt. Dies gilt auch für den Begriff der negativen Energie.³¹ Was hier durch das mathematische Konzept negativer Größen in der Wissenschaft zum Ausdruck kommt – und das ist nur ein Beispiel, wenn auch ein sehr eingängiges – ist die Dialektik des diskursiven Rationalismus, der als ›Surrationalismus‹ über den klassischen Rationalismus hinausführt, indem er seinen ›anagogischen Träumen‹ nachgeht. Denn

29 | Bachelard, *Der neue wissenschaftliche Geist*, 1988, S. 10.

30 | Bachelard, *Der neue wissenschaftliche Geist*, 1988, S. 57.

31 | Vgl. Bachelard, *Die Philosophie des Nein*, 1987, S. 48ff. »Seine [Diracs] ingeniose Interpretation [der negativen Energie] konnte zunächst als rein geistige Konstruktion erscheinen. Aber die experimentelle Entdeckung des positiven Elektrons durch Blackett und Occialini brachte schon bald eine unerwartete Bestätigung der Auffassung Diracs.« Ebd., S. 51.

»das anagogische Träumen ist in seinem gegenwärtigen wissenschaftlichen Elan nach unserer Auffassung ganz wesentlich von der Mathematik bestimmt. Es strebt nach mehr Mathematik, nach komplexeren, zahlreicheren mathematischen Funktionen. Verfolgt man die Bemühungen des zeitgenössischen Denkens um ein Verständnis des Atoms, dann hat man den Eindruck, als bestände die Hauptrolle des Atoms darin, die Menschen zu zwingen, Mathematik zu treiben.«³²

Die vormals durch anschauliche Bilder transportierte Klarheit der Cartesischen Epistemologie wird in der modernen Wissenschaft durch die »operative Klarheit« der Mathematik ersetzt. In der Sprache Cassirers: »Das axiomatische Denken der Mathematik ist es, das selbst erst die möglichen Subjekte« der modernen Forschung setzt.³³

Ein weiteres Beispiel Bachelards ist die durch die Tensorrechnung ermöglichte Allgemeinheit der Physik.³⁴ So wie das Mikroskop die Mikrobiologie hervorbrachte, so bringt die Tensorrechnung erst die moderne Physik hervor.³⁵ Das entscheidend Neue dabei ist, dass die Tensorrechnung nicht einfach nur ein neues Darstellungsmittel ist, sondern als solches eine völlig neue Generalisierungsfähigkeit ermöglicht und damit eben eine neue Physik. Diente die Generalisierung bislang der Zusammenfassung der empirischen Induktion, so bezeichnet in der »neuen relativistischen Wissenschaft [...] ein einziges mathematisches Symbol mit mannigfaltiger Bedeutung die tausend Merkmale einer verborgenen Realität; das Denken ist [keine Zusammenfassung abgeschlossener Erfahrung mehr, sondern] ein

32 | Bachelard, *Die Philosophie des Nein*, 1987, S. 53.

33 | Ernst Cassirer: *Philosophie der Symbolischen Formen: Phänomenologie der Erkenntnis* (1929), 3. Bd., Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft 1990, S. 471. Ganz ähnlich argumentiert Bachelard, beispielsweise wenn er schreibt, dass die Quantentheorie »diese Debatte [des Entdeckens der Grundbegriffe] übrigens auf unerwartete Weise beenden [könnte], indem sie ganz neue Prinzipien für die mathematische Definition von Erfahrungsbegriffen bereitstellt.« Bachelard, *Der neue wissenschaftliche Geist*, 1988, S. 161.

34 | Ein Tensor lässt sich als eine mehrdimensionale Matrix vorstellen. Eine Zahl ist ein Tensor 0-ter Stufe, Vektoren sind Tensoren erster Stufe und eine Matrix ist ein Tensor 2-ter Stufe. Beispielsweise ist der mechanische Spannungstensor ein Tensor 2-ter Stufe (Stärke der Spannung). 1890 entwickeln Gregorio Ricci-Curbastro und Tullio Levi-Civita die Tensorrechnung für Riemannsche Mannigfaltigkeiten, auf die später Albert Einstein zur Formulierung seiner allgemeinen Relativitätstheorie zurückgreift. Vgl. Adalbert Duschek: Der Tensorbegriff und seine Bedeutung für die Physik: Die geometrischen Grundlagen, in: *Physikalische Blätter*, 10(9), 1954, 389-395; Adalbert Duschek: Der Tensorbegriff und seine Bedeutung für die Physik: Tensoralgebra, in: *Physikalische Blätter*, 10(10), 1954, 436-444; Adalbert Duschek: Der Tensorbegriff und seine Bedeutung für die Physik: Tensoranalysis, in: *Physikalische Blätter*, 11(5), 1955, 203-215.

35 | Vgl. Bachelard, *Der neue wissenschaftliche Geist*, 1988, S. 57f.

Programm zur Realisierung von Erfahrung.«³⁶ Die mathematische Möglichkeit ist den Phänomenen nicht beigelegt, sondern konstituiert diese und gehört für Bachelard deshalb zum realen Phänomen, selbst wenn dies der unmittelbaren Erfahrung widerspricht. Ohne die mathematische Möglichkeit wären die empirischen Erkenntnisse nur in einem ungeordneten Nebeneinander denkbar. Es sind nicht die empirischen Erkenntnisse selbst, die mathematisch sind, sondern ihre rationale Zusammenstellung, die eben auch dem dialektischen ›warum nicht‹ folgen kann. Moderne Wissenschaft, so Bachelard, geht über einen naiven Realismus hinaus, weil sie dank der Mathematik alle ›Erfahrungsmöglichkeiten‹ denkt und in experimentelle Möglichkeiten umsetzt. Dies gilt umso mehr für die Bereiche der modernen Forschung, die einer direkten Erfahrbarkeit nicht mehr zugänglich sind. Das

»Mögliche [ist] gleichsam an das Reale herangerückt, hat einen Ort und eine Funktion in der Organisation von Erfahrung erlangt. [...] Von dieser mathematischen Organisation der experimentellen Möglichkeiten kehrt man auf sehr viel geraderen Wegen zur Erfahrung zurück. Und die Realität findet sich als Spezialfall des Möglichen wieder.«³⁷

Was Bachelard hier beschreibt, ist der Umkehrprozess, der sich in der modernen Wissenschaft und ihrer hypothetisch-deduktiven Forschungslogik vollzieht. Dieser Umkehrprozess lässt sich nicht als kontinuierliche Entwicklung von der Newtonschen zur relativistischen Physik verstehen, sondern stellt einen Bruch dar.³⁸

Wie sich das Wechselspiel zwischen mathematischer Erfahrungsmöglichkeit und wissenschaftlicher Realisierung vollzieht und dass die mathematischen Erfahrungsmöglichkeiten nicht beliebig oder fiktiv sind, sondern letztendlich immer die experimentellen Umsetzungen organisieren, zeigt die Debatte um die beobachtbaren Größen zu Beginn der Quantentheorie. Es ist Werner Heisenberg, der 1925 formuliert, dass

»die formalen Regeln, die allgemein in der Quantentheorie zur Berechnung beobachtbarer Größen (z.B. der Energie im Wasserstoffatom) benutzt werden [...] Beziehungen enthalten zwischen Größen, die scheinbar prinzipiell nicht beobachtet werden können (wie z.B. Ort, Umlaufzeit des Elektrons), daß also jenen Regeln offenbar jedes anschauliche physikalische Fundament mangelt, wenn man nicht immer noch an der Hoffnung festhalten will, daß

36 | Bachelard, *Der neue wissenschaftliche Geist*, 1988, S. 59. »Die Tensorrechnung verlangt, daß wir nichts vergessen [...] Wir haben es hier mit einer rationalen Erweiterung des cartesischen Verfahrens mnemotechnischer Aufzählung zu tun.« Ebd., S. 59.

37 | Bachelard, *Der neue wissenschaftliche Geist*, 1988, S. 61.

38 | Allerdings unterschätzt Bachelard die konstruktive Rolle der Mathematik in der neuzeitlichen Physik. Vgl. Immanuel Kant: *Metaphysische Anfangsgründe der Naturwissenschaft* (1786), (hg. von Wilhelm Weischedel), Meiner: Hamburg 1983; Peter Dear: *Disciplines & Experience. The Mathematical Way in the Scientific Revolution*, Chicago: Chicago University Press 1995.

jene bis jetzt unbeobachtbaren Größen später vielleicht experimentell zugänglich gemacht [... und] als Abweichungen von der klassischen Mechanik«

interpretiert werden können.³⁹ Sein Vorschlag ist es daher, jede Hoffnung auf zukünftig mögliche Beobachtbarkeit fallen zu lassen und stattdessen eine quantentheoretische Mechanik mathematisch zu formulieren, die nur die beobachtbaren Größen enthält.⁴⁰ Er reformuliert die klassische Darstellungsweise durch eine quantentheoretische, die dann von Max Born und Pascual Jordan mathematisch ausformuliert wird. Born und Jordan beschreiben Heisenbergs Ansatz wie folgt:

»Sie bedeuten einen Versuch, den neuen Tatsachen – statt durch mehr oder weniger künstliche und gezwungene Anpassung an alte gewohnte Begriffe – durch die Schaffung eines neuen, wirklich angemessenen Begriffssystems gerecht zu werden. Heisenberg hat die physikalischen Gedanken, die ihn dabei geleitet haben, in so klarer Weise ausgesprochen, daß jede ergänzende Bemerkung überflüssig erscheint. Aber in formaler, mathematischer Hinsicht sind seine Betrachtungen, wie er selbst betont, erst im Anfangsstadium.«⁴¹

Ihre mathematische Formulierung nun besteht in der Ausgestaltung eines neuen Formalismus für die Physik, insofern sie das von Heisenberg formulierte Multiplikationsgesetz quantentheoretischer Größen als »den Mathematikern wohlbekanntes Gesetz der Multiplikation von Matrizen« erkennen und die Matrize als »Repräsentant einer physikalischen Größe [interpretieren], die in der klassischen Theorie als Funktion der Zeit angegeben wird.«⁴² Denn genau dieser funktionelle Zusammenhang mit der Zeit lässt sich in der Quantentheorie nicht mehr beobachten. Die klassische Mathematik, die sich mit Isaac Newtons und Wilhelm Leibniz' Infinitesimalkalkül und später mit Leonard Eulers Differenzialrechnung zum Darstellungsinstrument physikalischer Prozesse veränderlicher Größen par excellence entwickelt hat, versagt angesichts der nicht gleichzeitigen Beobachtbarkeit von Ort und Bewegung in der Quantenphysik. Wie Heisenberg darlegt, ist dies keine Schwäche der wissenschaftlichen Realisierung im Experiment, sondern eine prinzipielle Grenze wissenschaftlicher Beobachtung. Mehr noch, der stetige Charakter klassischer physikalischer Prozesse, der sich anschaulich in Kurvenverläufen von

39 | Werner Heisenberg: Über quantentheoretische Umdeutung kinematischer und mechanischer Beziehungen (1925), in: Max Born, Werner Heisenberg, Pascual Jordan: *Zur Begründung der Matrizenrechnung*, (hg. von Armin Hermann), Stuttgart: Battenberg 1962, 31-45, S. 31.

40 | Das Erkenntnisparadigma, dass alle Größen einer Theorie beobachtbar sein müssen, wurde von Albert Einstein 1905 eingeführt. Vgl. Peter Mittelstaedt: *Philosophische Probleme der modernen Physik*, Mannheim u.a.: Bibliographisches Institut 1981, insb. Kap. II.

41 | Max Born, Pascual Jordan: *Zur Quantenmechanik* (1925), in: Born, Heisenberg, Jordan, *Zur Begründung der Matrizenrechnung*, 1962, 46-76, S. 46.

42 | Born, Jordan, *Zur Quantenmechanik*, 1962, S. 47.

zeitabhängigen Funktionen zeigt – und eben die mathematische Meisterung des stetig gekrümmten als Bahn oder Trajektorie in der Zeit war der Verdienst des Infinitesimalkalküls von Newton und Leibniz –, wird durch die Quantensprünge ausgehebelt.⁴³ Heisenbergs Verdienst ist es, »die Idee von Elektronenbahnen mit bestimmten Radien und Umlaufperioden« zu verbannen, »weil diese Größen nicht beobachtbar« sind.⁴⁴ Statt Bewegung als Zeitfunktion bedarf es der mathematischen Beschreibung eines durch die Multiplikationsregel gewonnenen quadratischen Schemas von Übergangsamplituden. Dies bedarf aber eines diskreten Formalismus, der die Wahrscheinlichkeit der Übergänge von einem Zustand in den nächsten darstellbar macht. Die mathematische Erfahrungsmöglichkeit der Quantenmechanik fordert die »Benutzung einer Matrizenanalyse an Stelle der gewöhnlichen Zahlenanalyse,« wobei die »Quadrate der Beträge der Elemente der das elektrische Moment eines Atoms darstellenden Matrix das Maß [...] für die Übergangswahrscheinlichkeit« sind.⁴⁵ Der neue Formalismus ermöglicht nicht nur die Erklärung zahlreicher experimenteller Befunde, sondern eröffnet neue experimentelle Realisierungen. Eines der Resultate der ausformulierten Theorie ist, dass Verbote der bisherigen Theorie bezüglich einzelner stationärer Zustände des Wasserstoffs, damit Kern und Elektron nicht zusammenstoßen, nicht mehr nötig sind.⁴⁶ D.h. die neue Theorie ist vollständiger als die alte.

Das Interessante an der frühen Phase der Quantentheorie Mitte der 1920er Jahre ist, dass binnen eines Jahres drei konkurrierende mathematische Forma-

43 | Nils Bohr zollte der Stetigkeit der klassischen Mechanik mit seinem Korrespondenzprinzip Rechnung, indem er für große Quantenzahlen und geringfügige Energieänderungen diese als kontinuierlich begriff, um damit die klassische Mechanik als Approximation beibehalten zu können. Da aber Schwingung neben der Frequenz auch Intensität hat, d.h. die stationären Zustände entsprechen einer charakteristischen Frequenz und aus dieser lässt sich die Intensität »erraten«, versagt hier, wie Einstein zeigte, Bohrs Korrespondenzprinzip und damit die Analogie zur klassischen Mechanik und ihrer Mathematik. Denn Einstein konnte »durch eine neue Ableitung der Planckschen Strahlungsformel« zeigen, »dass man den klassischen Begriff der Intensität der Ausstrahlung durch den statistischen Begriff der Übergangswahrscheinlichkeit ersetzen muss: zu jedem Platz in unserem Schema [Energiezustufen der stationären Zustände der Elektronen] gehört (neben der Frequenz $\nu_{mn} = (E_u - E_m)/h$) eine bestimmte Wahrscheinlichkeit für den Übergang unter Ausstrahlung oder Einstrahlung.« Max Born: Die statistische Deutung der Quantenmechanik (Nobelvortrag gehalten am 11.12.1954), in: Born, Heisenberg, Jordan, *Zur Begründung der Matrizenrechnung*, 1962, 1-12, S. 3.

44 | Born, Die statistische Deutung der Quantenmechanik, 1962, S. 4.

45 | Born, Jordan, *Zur Quantenmechanik*, 1962, S. 47 und 48.

46 | Vgl. Max Born, Werner Heisenberg, Pascual Jordan: *Zur Quantenmechanik II* (1925), in: Born, Heisenberg, Jordan, *Zur Begründung der Matrizenrechnung*, 1962, 77-135, S. 120; Werner Heisenberg: Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik, in: *Zeitschrift für Physik*, 43, 1927, 172-198.

lisierungen auftreten. Die Matrizenrechnung von Heisenberg, Born und Pascal, Paul Diracs Formalismus nicht-kommutativer Symbole sowie Erwin Schrödingers Wellenfunktion, der damit einen Anschluss an die klassische Mechanik versucht und zeigt, dass Matrizen- und Wellenmechanik äquivalent sind. Es ist Heisenbergs statistische Deutung von Schrödingers Wellenfunktion von 1927, die seine Ungenauigkeitsrelation enthält, die der neuen Quantentheorie schließlich zum Durchbruch verhilft.⁴⁷ Aus dieser Erfahrung des Bruches mit der klassischen Mechanik gewinnt Born 1954 in seinem Nobelvortrag die Einsicht für die neu entstehende Elementarteilchenphysik, »dass vermutlich Verfeinerung der mathematischen Methoden nicht ausreichen wird, [...] sondern dass irgendwo in unserer Lehre ein durch keine Erfahrung gerechtfertigter Begriff steckt, den wir eliminieren müssen, um freie Bahn zu gewinnen.«⁴⁸ Das Spiel zwischen mathematischer und experimenteller Realisierung eröffnet sich also auf ein Neues. Dies bestätigt Bachelards ›differenzielle Philosophie‹ des epistemologischen Bruchs sowie der epistemologischen und historischen Regionen. Es zeigt aber auch, dass mathematische und wissenschaftliche Realisierung nicht unabhängig voneinander sind, sondern sich gegenseitig bedingen: Die mathematische Aktivität als die ›eigentliche Achse der Entdeckung‹ muss sich ändern, wenn dies die wissenschaftliche Realisierung durch das Experiment erfordert; hat die mathematische Aktivität ›freie Bahn‹ ermöglicht sie eine Vielzahl von Entdeckungen durch die neue Organisation der experimentellen Realisierung.

3.4 MATHEMATIK ALS PHÄNOMENOTECHNIK DES SYNTHETISCHEN

Grundsätzlich versteht Bachelard die Rolle der Mathematik in der modernen Wissenschaft als synthetische. Damit stellt er sich gegen die gängige Meinung der Philosophie, die mit der Formalisierung, Logisierung und Axiomatisierung der Mathematik den analytischen Charakter der Mathematik bestätigt sieht – allen voran Gottlob Frege.⁴⁹ Die Favorisierung des synthetischen Charakters der Mathematik generiert sich aus Bachelards nicht-Cartesischer Epistemologie, die eben nicht im logischen Zusammenfügen von einfachen Elementen besteht, sondern in der Vervollständigungstendenz der Begriffe als komplementäre, die der Logik des ›warum nicht‹ folgen. Diese modernen, da komplementären Begriffe lassen sich nur aus der mathematischen Beschreibung generieren, aus welcher sich die Relationalität der wissenschaftlichen Phänomene wie die Organisation ihrer experimentellen Realisierung ableiten. Dabei verdankt »die mathematische Beschreibung [...] ihre Klarheit nicht ihren Elementen, sondern ihrem Abschluß

47 | Vgl. Born, Die statistische Deutung der Quantenmechanik, 1962, S. 5ff.

48 | Born, Die statistische Deutung der Quantenmechanik, 1962, S. 12.

49 | Vgl. Gottlob Frege: *Die Grundlagen der Arithmetik. Eine logisch mathematische Untersuchung über den Begriff der Zahl* (1884), (hg. von Christian Thiel), Hamburg: Meiner 1988.

in einer Art Wissen um ihren synthetischen Wert.«⁵⁰ Generiert sich der Wert der Analytik Descartes aus der Abstraktion und damit aus der Entfernung von den Objekten, so zeigt sich der neue wissenschaftliche Geist in der »geistigen Modifikation, die aus den sukzessiven Approximationen der Erfahrung resultiert, insbesondere wenn solche Approximationen in fortgeschrittenen Stadien einen Reichtum offenbaren, der aus der ersten Information nicht zu ersehen war. Das gilt zum Beispiel für die Einsteinsche Konzeption, deren Reichtum und Komplexität mit einem Male die Armut der Newtonschen Auffassung hervortreten läßt.«⁵¹ Dies lässt sich schriftbildlich an den wesentlich komplexer aussehenden mathematischen Gleichungen der modernen Wissenschaft erkennen, aber auch inhaltlich an den Operatoren, die sie enthalten und die mögliche Übergangsprozesse von Anfangs- zu Endzuständen unter Berücksichtigung zahlreicher Faktoren formulieren.⁵² Im Unterschied dazu beschreibt die klassische Physik in der Tradition des Newtonschen Determinismus »metaphysisch« wie mathematisch einen eindeutig festgelegten Übergangsprozess von einem absolut bestimmbarsten Anfangsstand ausgehend – eine experimentell nicht realisierbare Annahme – in einen dadurch determinierten Endzustand.⁵³ Die Form deterministischer Gleichungen generiert sich dabei aus der Anschauung der stetigen Linie der Euklidischen Geometrie.⁵⁴

50 | Bachelard, *Der neue wissenschaftliche Geist*, 1988, S. 141.

51 | Bachelard, *Der neue wissenschaftliche Geist*, 1988, S. 141, 142.

52 | Vgl. Jun John Sakurai: *Modern Quantum Mechanics*, Boston: Addison-Wesley 1993.

53 | Born hat dies in seinem Nobelvortrag treffend zum Ausdruck gebracht: »Die Newtonsche Mechanik ist deterministisch in folgendem Sinne: Wenn der Anfangszustand (Lagen und Geschwindigkeit aller Teilchen) eines Systems genau gegeben sind, so lässt sich aus den mechanischen Gesetzen der Zustand zu jeder anderen Zeit (früher oder später) berechnen. Nach diesem Vorbild sind alle anderen Zweige der klassischen Physik aufgebaut worden.« Dies erfordert aber »die Möglichkeit absolut exakter Messung« des Anfangszustandes, um den Endzustand exakt vorherzusagen. »Hat es aber einen Sinn, ich meine: einen physikalischen, nicht metaphysischen Sinn, von absoluten Angaben zu sprechen?« Wohl kaum, d.h. »man muss auch die gewöhnliche Mechanik statistisch formulieren. [...] Der Determinismus der klassischen Physik erweist sich als Trugbild.« Born, *Die statistische Deutung der Quantenmechanik*, 1962, S. 9 und 10.

54 | Die Form deterministischer Gleichungen generiert sich aus der geometrischen Anschauung. Bachelard hat dies an der klassischen Darstellung der Streuung von Licht an Teilchen deutlich gemacht, die als Spiegelung interpretiert zu Lord Rayleighs Streuungsgleichung von 1897 führte. Analog »spiegelt« sich dies in der Gleichung wider: Licht »prallt« von einem Gasmolekül, das als elastisch schwingender Körper interpretiert wird, in Form einer Kugelwelle in alle Richtungen zurück. Vgl. Bachelard, *Der neue wissenschaftliche Geist*, 1988, S. 73ff. Im Unterschied dazu ist eine erste quantentheoretische Interpretation, »nicht an die Anwesenheit von elastisch schwingenden Elektronen geknüpft, sondern an Übergänge von einem stationären Zustand nach einem anderen.« Hendrik Kramers, Werner Heisenberg:

Folgt man also Bachelards Auffassung vom Synthesecharakter der Mathematik für die moderne Wissenschaft, dann ist die Mathematik die Phänomenotechnik der Synthese par excellence. Sie erst bringt neue Möglichkeiten der wissenschaftlichen Realisierung hervor. Die Charakteristik dieser Hervorbringung ist ihre prospektive Verfassung. Nicht die retrospektive Interpretation und Cartesische Abstraktion des empirisch Gegebenen, sondern die prospektive Hervorbringung des empirisch Konstruierten ist ihre Leistung. Deutlich wird dies an den Prognosen von Elementarteilchen allein auf Basis mathematisch-symmetrischer Vorhersagen der Gruppentheorie, aber besonders eindrucksvoll belegt sich diese Leistung aktuell in den Synthetischen Wissenschaften. Ähnlich wie die modernen quantenmechanischen Operatoren die Spektren möglicher Übergangsprozesse von Anfangs- zu Endzuständen zusammenfassen, birgt das Beispiel der Energielandschaft der Synthetischen Chemie die vollständige Formulierung der noch nicht hergestellten, aber existenzfähigen chemischen Verbindungen in sich. Und ähnlich wie in der Quantenmechanik sind die mathematischen Erfahrungsmöglichkeiten chemischer Verbindungen nicht beliebig oder fiktiv.⁵⁵

Selbiges gilt auch für die Synthetische Biologie, die die Prozesse biomolekularer Netzwerke designt, auch wenn die Bezeichnung dieser synthetischen Netzwerke als »Biobricks« oder »Device« einen objekthaften Charakter unterstellt. Das als erstes synthetisches Design der Synthetischen Biologie gewertete Device des »Repressilator« imitiert einen Oszillator.⁵⁶ Möglich ist dies, da Zellen in ihrem Verhalten durch Rückkopplungsprozesse organisiert und die Designprinzipien von Oszillatoren (negative und positive Rückkopplungen) seit dem 17. Jahrhundert bekannt sind.⁵⁷ Daher liegt es für die Synthetische Biologie nahe, Biobricks und Devices zu konstruieren, die sich an physikalisch-mathematischen Modellen von Feedbackmechanismen orientieren. Denn, »the »design principles« underlying the functioning of such [natural] intracellular networks remain poorly understood [... Therefore] we present a complementary approach to this problem: the design and construction of a synthetic network [repressilator] to implement a particular function.«⁵⁸ Der Rückkopplungsprozess des Repressilator basiert dabei auf der zeitlichen Oszillation in der Konzentration von drei Repressorproteinen:

Über die Streuung von Strahlung durch Atome, in: *Zeitschrift für Physik A*, 31(1), 1924, 681-708, S. 682.

55 | Vgl. dazu Abschnitt 3.5.

56 | Vgl. Michael B. Elowitz, S. Leibler: A synthetic oscillatory network of transcriptional regulators, in: *Nature*, 403, 2000, 335-338.

57 | Vgl. Albert Goldbeter: Mechanism for oscillatory synthesis of cyclic AMP in *Dictyostelium discoideum*, in: *Nature*, 253, 1975, 540-542; Rene Thomas, R. D'Ari: *Biological Feedback*, Boca Raton, Florida: CRC Press 1990.

58 | Elowitz, Leibler, A synthetic oscillatory network of transcriptional regulators, 2000, S. 335.

»The first repressor protein, LacI from E.coli, inhibits the transcription of the second repressor gene, tetR from the tetracycline-resistance transposon Tn10, whose protein product in turn inhibits the expression of a third gene, cI from λ phage. Finally, CI inhibits lacI expression, completing the cycle.«⁵⁹

Um ein solches oszillierendes, biomolekulares Netzwerk im Labor zu synthetisieren, ist jedoch die mathematische Modellierung unabdingbar, um eine Analyse und Prognose des geeigneten Parameterbereichs durchführen zu können.⁶⁰ Denn Oszillation als Verhalten stellt sich nur unter spezifischen Bedingungen ein. Die Erkundung der mathematischen Erfahrungsmöglichkeiten im Computermodell, um eine Realisierung im Labor wahrscheinlich werden zu lassen, ist daher die Voraussetzung für die Synthese eines solchen artifiziell organisierten Netzwerkes. Durch die mathematische Analyse wissen die Forscher, was im Labor zu tun ist: »to increase the chances that the artificial network would function in the oscillatory regime two alterations to »natural components« were made.«⁶¹ Diese beiden Modifikationen bestehen in der Verwendung eines »Promoters«, ein Biobrick, das die Transkription bestimmter Gene initiiert. Dieser Promoter, bereits 1997 konstruiert, beschleunigt die Gentranskription enorm.⁶² Des Weiteren bedarf es der Einfügung eines »Tags« in das Design, um die Lebenszeit eines Proteins näher an die von mRNA anzugleichen, indem diese von Stunden auf 2 Minuten reduziert wird. »With these considerations in mind, we used standard molecular biology techniques to construct a low-copy plasmid encoding the repressilator.«⁶³ Tatsächlich zeigten 40 Prozent der Zellen so etwas wie ein Oszillationsverhalten, das sich aber nach einer Weile auflöste.

Dies ist nur eines von vielen Beispielen der mathematischen Ermöglichung neuer Designs. Die technischen Modifikationen lebender Zellen sind offensichtlich. Dabei ist die Grundannahme, dass Rückkopplungsprozesse in Organismen wie Oszillatoren funktionieren bereits eine mathematische, denn kaum ein Prozess ist mathematisch besser handhabbar als ein Oszillator. Tatsächlich lässt sich der Oszillator als universelles mathematisches Realisierungsmotiv auffassen, das seit der klassischen Mechanik über die Elektrodynamik bis hin zur Quantentheo-

59 | Elowitz, Leibler, A synthetic oscillatory network of transcriptional regulators, 2000, S. 335.

60 | Die Oszillation hängt von bestimmten Raten der Transkription der Repressorproteinkonzentration, der Translationsrate sowie der Abnahmerate der Proteine und der mRNA ab.

61 | Elowitz, Leibler, A synthetic oscillatory network of transcriptional regulators, 2000, S. 335.

62 | Vgl. Rolf Lutz, H. Bujard: Independent and tight regulation of transcriptional units in *Escherichia coli* via the LacR/O, the TetR/O and AraC/I1-I2 regulatory elements, in: *Nucleic Acids Research*, 25, 1997, 1203-1210.

63 | Elowitz, Leibler, A synthetic oscillatory network of transcriptional regulators, 2000, S. 335.

rie – die quantenmechanische Orientierung am Modell des harmonischen Oszillators generiert sich dabei aus dem »Umstand, daß die elektromagnetischen Grundgleichungen linear sind (Superpositionsprinzip)«⁶⁴ – die Wissenschaft beherrscht. Für die experimentelle wie computersimulierte Realisierung hat der Oszillator den entscheidenden Vorteil einer eindeutig identifizierbaren Phänomenologie, die den »Bildvergleich« – besser Kurvenvergleich – ermöglicht. Die Sichtbarmachung des oszillierenden Verhaltens, wie eben auf biomolekularer Ebene, ermöglicht es, den experimentellen Erfolg zu bestätigen und zu kontrollieren. Vergleicht man jedoch die Kurvenbilder der Oszillation des mathematischen Modells des Repressilators mit den experimentellen Daten des im Labor synthetisierten Repressilator, dann ist eine Oszillation für letztere nur mit viel gutwilliger Phantasie erkennbar.⁶⁵ Dies zeigt, dass der Prozess der wissenschaftlichen Realisierung in diesem Fall erst am Anfang steht. Um diesen Prozess zu beschleunigen, hat sich in den letzten Jahren eine »fast-track synthetic biology« entwickelt, die verstärkt auf die Rationalisierung und damit Mathematisierung der experimentellen Bedingungen setzt.⁶⁶ Der Begriff des »rationalen Designs« spiegelt dies wider:

»If synthetic biology is to advance, it is essential to identify techniques that increase the predictability of gene network engineering and decrease the amount of hands-on molecular biology required to get a functional network up and running. [...] Our strategy effectively moves component »tweaking« [in the laboratory] to the frontend of gene network engineering [with computers]. This arrangement is instinctively more rational than network retrofitting and is made feasible by the coupling with mathematical modeling.«⁶⁷

Umgesetzt bedeutet dies, durch mathematische Modellierung und Vorhersage eine Verbesserung der Biobricks zu erhalten. So wurden austauschbare »Timer« mathematisch modelliert und im Labor synthetisiert, die sich ähnlich technischen Komponenten nur in einem Parameterbereich voneinander unterscheiden, der Stärke des Promotors, der die Logik des Gennetzwerkes kontrolliert. Die Timer basieren dabei auf dem genetischen Netzwerkmotiv des 2000 synthetisier-

64 | Born, Jordan, *Zur Quantenmechanik*, 1962, S. 72.

65 | Vgl. Elowitz, Leibler, *A synthetic oscillatory network of transcriptional regulators*, 2000, S. 336f.

66 | Tom Ellis, X. Wang, J. Collins: Diversity-based, model-guided construction of synthetic gene networks with predicted functions, in: *Nature Biotechnology*, 27(5), 2009, 465-471, S. 465. Die Synthetische Biologie wird in der Wissenschaftsphilosophie als rein empirische Wissenschaft verstanden, die im Labor »herum probiert«. Vgl. beispielsweise Maureen O'Malley: Exploration, iterativity and kludging in synthetic biology, in: *Comptes Rendus Chimie*, 14, 2011, 406-412. Doch dieses Verständnis ist nicht haltbar.

67 | Ellis, Wang, Collins, *Diversity-based, model-guided construction of synthetic gene networks with predicted functions*, 2009, S. 465 und 470.

ten ›Genetic Toggle Switch‹.⁶⁸ Das Ziel ist, »that we can quickly apply predictable networks built with our approach to control an industrially relevant phenotype. Such accurate control of flocculation timing provides a wide window of opportunity to harvest fermentation product from cells and could be applied to improve biomass recycling in the biofuels industry.«⁶⁹ Auf diese Weise soll das ›Engineering of Biology‹ praktikabler werden.⁷⁰

3.5 DESIGN ALS NÖTIGUNG?

Die abschließende Frage ist die nach den Grenzen der mathematischen Erfahrungsmöglichkeiten als Bedingungen der wissenschaftlichen Realisierung. Die Erfolge der Synthetischen Biologie haben die Rede vom Design in die Wissenschaft eingeführt; insbesondere vor dem Hintergrund einer eigenartig zirkulären Verkehrung der Blickrichtung:

»It is possible that the designs of natural biological systems are not optimized by evolution for the purposes of human understanding and engineering. [...] Briefly, for biologists, the ability to design and construct synthetic biological systems provides a direct and compelling method for testing our current understanding of natural biological systems.«⁷¹

Dies entspricht der Forschungslogik der Technowissenschaften wie von Alfred Nordmann beschrieben: »Technoscience knows only one way of gaining new knowledge and that is by first making a new world.«⁷² Doch wie weit geht die Kreation neuer Welten und geben sie tatsächlich Aufschluss über ›natürliche‹ Phänomene? Folgt man Bachelard, so ist eine solche Idee naiv, denn moderne Wissenschaft kreiert schon immer ihre eigenen (Labor-)Realitäten. Dennoch scheint es ›natürliche‹ Grenzen der Nötigung durch Design zu geben. So kritisieren Jansen und Schön die Rede vom Design in der Synthetischen Chemie, da die eingangs beschriebene ›Herstellungsgleichung‹ naturgesetzlich motiviert ist. Zwar

68 | Vgl. Timothy S. Gardner, C.R. Cantor, J.J. Collins: Construction of a genetic toggle switch in *Escherichia coli*, in: *Nature* 403, 2000, 339-342.

69 | Ellis, Wang, Collins, Diversity-based, model-guided construction of synthetic gene networks with predicted functions, 2009, S. 469.

70 | Für eine detaillierte Darstellung vgl. Gabriele Gramelsberger: The Simulation Approach in Synthetic Biology, in: *Studies in History and Philosophy of Biological and Biomedical Sciences*, 44(2), 2013, 150-157 sowie in diesem Band Kapitel 8 Unverfügbarkeit in der Synthese.

71 | Drew Endy: Foundations for engineering biology, in: *Nature*, 438, 2005, 449-453, S. 449.

72 | Alfred Nordmann: Of Landscapes and Caves and the Collapse of Distance in the Technosciences, in: *Danish Yearbook of Philosophy*, 41, 2006, 62-73, S. 63.

eröffnet sich durch die mathematisch berechnete Energielandschaft eine Vielzahl neuer, existenzfähiger chemischer Verbindungen und ein ›Random Walker‹ Programm kann stellvertretend für die Forscher die mathematische Landschaft danach durchforsten; doch dabei kann allenfalls etwas im Möglichkeitsraum entdeckt werden, so Jansen und Schön, nicht designt. Es sei die ›kombinatorische Explosion‹ der Computerchemie, die diesen falschen Eindruck der Designmöglichkeiten vermittele.⁷³

»Als besonders riskant sehen wir Vergleiche zwischen der Syntheseplanung in atomaren Dimensionen und Entwürfen und Realisierungen in der makroskopischen Welt an, wie sie gelegentlich herangezogen werden, um die Verwendung des Ausdrucks ›Design‹ in der Chemie zu veranschaulichen oder gar zu rechtfertigen. Aus Ziegelsteinen gemauerte Gebäude als Modelle für aus Strukturinkrementen aufgebaute dreidimensionale Festkörper wecken wenigstens in zweierlei Hinsicht falsche Assoziationen. Ziegelsteine sind in ihren Abmessungen über weite Bereiche, gemessen an der angestrebten Funktion, kontinuierlich durchstimmbare, die chemischen Strukturinkremente sind dies nicht. Sie sind zwar variabel, aber dies ist nicht durch den Chemiker beeinflussbar. Auch beim Zusammenfügen der makroskopischen Bausteine gibt es einen weiten, kontinuierlich nutzbaren Spielraum, die chemischen Strukturinkremente hingegen lassen sich nur in einer für eine bestimmte Kombination jeweils festgelegten und durch den Menschen unveränderbaren Weise miteinander verbinden.«⁷⁴

Diese Kritik richtet sich gegen die Grenzen der Technisierung wissenschaftlicher Objekte als ›einfache Elemente‹, die so einfach nicht sind. Das Abstraktionsziel der einfachen Wesenheiten hat schon Bachelard an Descartes Analytik als Entfernung von den realen Objekten und Phänomenen kritisiert, doch die Idee hält sich hartnäckig. Nicht zuletzt verdankt die Synthetische Biologie ihre Motivation dem erfolgreichen Marketing der Ziegelsteinmetapher (›Brickfication‹):⁷⁵ »One powerful technology for managing complexity is abstraction. [...] the parts and devices that comprise engineered biological systems should probably be redesigned and

73 | Vgl. auch Martin Jansen: Ein Konzept zur Syntheseplanung in der Festkörperchemie, in: *Angewandte Chemie*, 114, 2002, 3896-3917.

74 | Jansen, Schön, ›Design‹ in der chemischen Synthese – eine Fiktion?, in diesem Band Kapitel 7, S. 117.

75 | Der Begriff ›Biobrick‹ ist mittlerweile ein eingetragenes Markenzeichen und das Titelbild von *Science* im September 2011 zielt ein Lego-Bakterium mit dem Hinweis: »Bacteria constructed from toy bricks represent the potential of synthetic biology to design and construct genetic modules that can be used to introduce new functions into existing organisms or even to engineer new biological systems.« *Science*, 333(6047), 2011, S. 1235. Vgl. Tarja Knuuttila, A. Loettgers: Basic science through engineering? Synthetic modeling and the idea of biology-inspired engineering, in: *Studies in History and Philosophy of Biological and Biomedical Sciences*, 44(2), 2013, 158-169.

built anew so that they are simpler to model and easier to use in combination.«⁷⁶ Doch auch hier stellt sich die Frage nach den falschen Assoziationen, nach den Grenzen sowie danach, wie weit Organismen passend gemacht werden können. Wie das Beispiel des Repressilator andeutet, ist das Re-Design im Laboralltag nicht so einfach umsetzbar. Folgt man der Logik der wissenschaftlichen Phänomenotechnik Bachelards, so liegt es auf der Hand, dass die Synthetischen Wissenschaften weniger eine Vereinfachung als eine Komplizierung der Konzepte zum Ziel haben. Die scheinbare Einfachheit der Biobricks entpuppt sich als kompliziert; anders kompliziert als die »natürlichen« Komponenten, da technisch kompliziert. Und eben in dieser technischen Komplizierung folgen die Synthetischen Wissenschaften dem Nötigungscharakter der neuzeitlichen Wissenschaft, indem ihnen klar wird, dass die »Vernunft nur das einsieht, was sie selbst nach ihrem Entwurf hervorbringt.«⁷⁷

76 | Endy, *Foundations for engineering biology*, 2005, S. 451, 452.

77 | Kant, *Kritik der reinen Vernunft*, 1993, Vorrede B XIII.

