

8. Unverfügbarkeit in der Synthese

Untersuchungen zu Chemie und Biotechnologie im Zusammenspiel naturwissenschaftlicher und philosophischer Perspektiven

Werner Kogge und Michael Richter

»Während einzelne skeptische Naturforscher von der chemischen Synthese nicht einmal einen unmittelbaren Nutzen für die Biologie erwarten, sind im großen Publikum übertriebene Vorstellungen besonders über die wirtschaftlichen Folgen einer solchen Entdeckung verbreitet. Durch die glänzenden Leistungen der chemischen Synthese auf dem Gebiet der Farben, Heilmittel, Riechstoffe, Sprengstoffe, Süßstoffe usw. ist die Welt in den letzten 50 Jahren so verwöhnt worden, daß sie alles für möglich hält und deshalb in dem künstlichen Eiweiß die billige und gute Volksnahrung der Zukunft erblickt. Diese Hoffnung kam in der Öffentlichkeit zum lebhaften Ausdruck, als ich vor Jahresfrist eine Zusammenfassung meiner synthetischen Versuche gab, und steigerte so weit, daß eine ausländische Zeitung unter dem Stichwort ›Nahrung aus Kohle‹ ein prächtiges Bild brachte, auf dem ein vornehmes Speisehaus mit einem Kohlenbergwerk durch ein chemisches Laboratorium in Verbindung gebracht war, und wo man die Transformation von Steinkohlen in schöne Speisen aller Art sehen konnte.« (Emil Fischer 1907)¹

»Die ›Philosophie der Chemie‹ oder die theoretische Grundlagen der modernen Chemie sind ursächlich mit der Entwicklung der chemischen Synthese verknüpft. Der Begriff der chemischen Synthese von Naturstoffen ist ein altes Problem der Philosophie überhaupt [...]. A priori gingen Jatrochemiker von der Möglichkeit der Synthese sogar *belebter* Naturstoffe aus unbelebten Material aus, indem sie der Palingenesie und der generatio aequivo-ca s. spontanea nachstrebten.«

1 | Emil Fischer: *Die Chemie der Proteine und ihre Beziehung zur Biologie*, Sitzungsberichte d. Königl. Preuß. Akad. d. Wissenschaften zu Berlin 1907, 35; abgedruckt in: Ders.: *Untersuchungen über Aminosäuren, Polypeptide und Proteine II* (1907-1919), (hg. von M. Bergmann), Berlin: Springer 1923, 1-21, S. 14f.

Weiter fährt er fort

»Erst als man statt der Synthese von chemischen *Elementen* diejenige von *zusammengesetzten* Körpern in Angriff nahm und als man statt der *belebten* Stoffe die *organischen* Körper unter *Ausschaltung* der Lebenskraft zu synthetisieren begann, erst dann wurde der wissenschaftlichen Erkenntnis als eine neue Komponente der Erfahrungssatz eingefügt: *Die chemischen Stoffe der unorganischen sowie der organischen Natur sind künstlich herstellbar!*« (Paul Walden 1928)²

»Heutzutage ist die chemische Wissenschaft recht weit fortgeschritten. Während sie voranschreitet und sich selbst immer weiter verfeinert, wird sie genutzt, um Fortschritte und Entdeckungen in einem beeindruckenden Aufgebot an Forschungsgebieten zu ermöglichen, z.B. in der Gesundheitspflege, Ernährung, Energieversorgung und in der Herstellung von Hochleistungsmaterialien sowie Werkzeugen, um komplexe biologische Vorgänge zu beobachten, zu enträtseln und zu nutzen. [...] Die Leistungsfähigkeit der Chemie leitet sich hauptsächlich von ihrer Fähigkeit ab, die molekulare Struktur zu verstehen, sie zu synthetisieren und in ihr durch molekulares Design und Synthese eine Funktion zu schaffen.« (Kyriacos C. Nicolaou 2013)³

»[Drew] Endy believes it will someday be possible for anyone to participate in the design of synthetic organisms. He imagines a new class of professionals similar to today's graphic designers that will design new biological devices on laptops and then send those designs by email to gene foundries.« (Drew Endy 2007)⁴

»Creation of a Bacterial Cell Controlled by a Chemically Synthesized Genome.« (Daniel Gibson et al. 2010)⁵

Diese Zitate dokumentieren eine Annahme weitreichender Möglichkeiten der chemischen, biochemischen und biotechnischen Synthese, die die Herstellung von neuartigen Stoffen und Prozessen bis hin zur Herstellung künstlicher biolo-

2 | Paul Walden: Die Bedeutung der Wöhlerschen Harnstoffsynthese, in: *Die Naturwissenschaften*, 16, 1928, 835-849, S. 848.

3 | Kyriacos C. Nicolaou: Vom Aufkommen des Molekülkonzepts zur Kunst der Molekülsynthese, in: *Angewandte Chemie*, 125, 2013, 141-157, S. 141.

4 | Zitiert nach ETC Group (2007): *Extreme genetic engineering: An introduction to Synthetic Biology*. www.etcgroup.org/upload/publication/602/01/synbioreportweb.pdf. (www.etcgroup.org/en/node/602 January 16, 2007 D (Abruf 17.8.2012), S. 34; Vgl. auch Drew Endy: Foundations for engineering biology, in: *Nature*, 438, 2005, 449-453, S. 451; Henk van den Belt: Philosophy of biotechnology, in: Anthonie Meijers (Hg.): *Philosophy of technology and engineering sciences*, Amsterdam: Elsevier 2009, 1301-1340, S. 1308.

5 | Daniel Gibson, John I. Glass, Carole Lartigue, C., et al.: Creation of a Bacterial cell controlled by a chemically synthesized genome, in: *Science*, 329(5987), 2010, 52-56.

gischer Systeme und sogar neuartiger Lebensformen in den Horizont des Machbaren rückt. Sie stammen aus der Zeit seit Beginn des 20. Jahrhunderts bis zur Gegenwart, ihre Wurzeln liegen in den Erfolgen der Chemie des 19. Jahrhunderts.

In den folgenden Ausführungen geht es uns um die Frage, auf welcher gedanklichen, konzeptuellen und praktischen Grundlage diese Annahme besteht. Wir wollen die Voraussetzungen untersuchen, unter denen es plausibel scheinen kann, mit dem Begriff der Synthese (weitgehend) unbeschränkte schöpferische Möglichkeiten zu assoziieren. Dabei geht es uns darum, diese Voraussetzungen kritisch auszuleuchten. Ziel ist es, einige Aspekte dessen, was der Annahme von unbeschränkten schöpferischen Möglichkeiten entgegensteht (und was unter dem Schlagwort ›Komplexität‹ häufig mehr verdeckt als herausgearbeitet wird), zu verdeutlichen. Dabei gehen wir davon aus, dass eine Sichtweise, die die sich der Beherrschung entziehenden Momente der stofflichen und lebendigen Natur in Rechnung stellt, zu einer angemesseneren Haltung führt, sowohl dieser Natur als auch den sie erforschenden Wissenschaften gegenüber.

Methodisch gehen wir so vor, dass wir unser Thema von zwei Seiten her beleuchten. Aus der Perspektive einer Reflexion von Theorie und Praxis in den chemischen Wissenschaften spüren wir den Momenten nach, an denen sich Risse zwischen dem Glauben an unbeschränkte Synthesemöglichkeiten und den tatsächlichen wissenschaftlichen Ergebnissen und Vorgehensweisen zeigen. Aus philosophischer Perspektive untersuchen wir, welche Denkfiguren, Begriffe und konzeptuelle Transformationen mit dieser Annahme verbunden sind. Die beiden Perspektiven werden alternierend und sich aufeinander beziehend im Text eingenommen.

8.1 DER BEGRIFF DER SYNTHESE: EIN PHILOSOPHISCHER EINSATZ

Auf die Frage, welches philosophische Thema mit ›Synthese‹ angesprochen ist, liegt eine Antwort nahe, die auf die Begriffsgeschichte des Wortes verweist, wie sie in philosophischen Lexika dokumentiert ist. Zwar sind die Verhältnisse in dieser Geschichte verwickelter als es zunächst scheint (dazu später), doch es ist zu bemerken, dass das altgriechische Wort ›synthesis‹ mitsamt seiner lateinischen Übersetzung ideengeschichtliche Traditionsstränge bildete, in denen es bis ins zwanzigste Jahrhundert eine gewichtige Rolle im Nachdenken über Erkenntnis und Wissenschaft spielte.

Bevor historische Verwicklungen des Begriffs in einigen Aspekten beleuchtet werden, soll hier zunächst anders angesetzt werden: und zwar direkt bei der Frage, was am Begriff der Synthese uns denn im philosophischen Sinne zu frappieren in der Lage ist. Wo liegt heute eine Frage, wo zeigt sich ein Problem von weitreichender Bedeutung in unserem Begriff der Synthese?

Im heutigen Sprachgebrauch findet sich ›Synthese‹ (wo nicht explizit auf philosophische Themen verwiesen wird) in sehr allgemeiner Verwendung (z.B.

»das Bauwerk ist eine Synthese unterschiedlicher Einflüsse«) und im chemisch-technischen Kontext, der Alltagssprachlich sehr vertraut geworden ist, bis hin zum geläufigen Ausdruck ›Synthetik‹ für Kunstfasertextilien. Geläufig ist auch das Begriffspaar Analyse/Synthese, in dem ›Synthese‹ als Zusammensetzung von Elementen ein Pendant zur ›Analyse‹ bildet, die ein Ganzes in seine Elemente auflöst. Dieses Bild nun ist es, das bei näherer Betrachtung immer mehr Fragen aufwirft. Es hat zwar den Anschein, dass im Sinne von Zerlegung und Verbindung mit Analyse und Synthese schlicht zwei einander gegengerichtete Handlungsarten angesprochen sind. Doch sind denn die Begriffe der Synthese und der Analyse in dieser Weise schon bestimmt? Sind sie schlicht Fremdwörter für deutsche Wörter wie Zerlegung und Zusammensetzung?

Wir brauchen uns nur zu vergegenwärtigen, dass, wenn wir beispielsweise ein Puzzle aus seinen Teilen zusammensetzen, wir nicht von Synthese sprechen würden – so wenig wie von Analyse, wenn wir es zerlegen. Wird aus Ziegelsteinen eine Mauer aufgeschichtet, so gereicht das ebenso wenig zu einer Synthese wie ihr Abtrag zu einer Analyse. Das Begriffspaar Synthese/Analyse verlangt offenbar mehr als bloße Zusammensetzung und Zerlegung. Wir verstehen darunter offenbar etwas Bestimmteres – ›besondere Weisen‹ der Zusammenfügung und Auflösung. Doch worin könnte dieses Spezifische bestehen? Dass nicht jede Zusammenfügung als eine Synthese gelten kann, ist klar: Offenbar muss daraus etwas entstehen, doch was? Sollen wir sagen: ein ›Ganzes‹? Doch auch das vollständig gesetzte Puzzle kann als ein ›Ganzes‹ bezeichnet werden – gleichwohl bleibt es dabei: Ein solches Ganzes ist nicht ganz durch Synthese.

Der Ausdruck ›Analyse eines Puzzles‹: wenn jemand die Puzzleteile nach der Bildvorlage vorsortiert, z.B. nach Farbe, Zugehörigkeit zu bestimmten Bildelementen etc.: Könnten wir dann nicht von einer Analyse sprechen? – Vielleicht. So wäre Analyse mit Zerlegung nach bestimmten Kriterien verbunden. Das Ganze würde zerlegt und zugleich sortiert nach bestimmten Unterscheidungsmerkmalen. Woher aber sind diese gewonnen? Zeigt sich von selbst, wie zu zerlegen und zu sortieren ist? Offenbar gelangen wir hier an einen prekären Punkt: Denn es erschließt sich nicht von selbst, woher die Leitvorgaben – oder sollen wir sagen: ›Prinzipien‹? – der Zerlegung und Sortierung zu nehmen sind. Sicherlich hätte die Analyse des Puzzles etwas mit dem Puzzlebild, mit seiner Gliederung und seinem Aufbau zu tun. Doch ebenso offensichtlich ist, dass unterschiedliche Analysten unterschiedlich gliedern und sortieren könnten.

Fraglich bliebe auch, ob in Bezug auf die Zusammensetzung eines Puzzles aus gefertigten Teilen überhaupt von ›Synthese‹ gesprochen werden kann, auch wenn die Zusammensetzung einer Analyse im genannten Sinne nachfolgte. Spricht man in der Erstellung eines Puzzles von Synthese, so wäre wohl eher an die Bildkomposition zu denken, also daran, wie etwa im Vorgang des Entwerfens die Bildwirkung aus Quellen der Farbigkeit, der Proportion und Formgebung erwächst. Synthese bedeutete also auch hier weit mehr als bloße Zusammensetzung. Der Begriff zeigt sich verwiesen auf weitere Begriffe wie ›Ganzes‹, ›Ord-

nung«, »Gliederung«, »Sortierung«, »Unterscheidung«, »Merkmal« und »Prinzip«. Eine ganze Kohorte philosophischer Grundbegriffe tritt zum Vorschein, wenn wir daran rühren, was wir meinen, wenn wir von Synthese sprechen. Es wird also darum gehen müssen, Synthese im Kontext solcher Begriffe zu verstehen. Doch wollen wir zunächst sehen, was heute unter dem Begriff der Synthese in der Chemie tatsächlich verstanden wird.

8.2 DER BEGRIFF DER SYNTHESE IM SPRACHGEBRAUCH IN DER CHEMIE

Der Begriff Synthese hat in der Chemie als »chemische Synthese« eine zentrale Bedeutung gefunden. In diesem Wortsinne verstehen Chemiker darunter den planmäßigen und praktisch realisierbaren Aufbau von chemischen Verbindungen aus anderen chemischen Verbindungen oder Elementen.⁶ Das Gegenstück zur chemischen Synthese ist die chemische Analytik, mit der das Ziel verfolgt wird, chemische Substanzen hinsichtlich ihres chemischen Aufbaus und ihrer Eigenschaften aufzuklären. Beide Disziplinen bedingen und ergänzen sich gegenseitig. So kann zum Beispiel Synthese eine wichtige Rolle bei der Analytik spielen. Die Notwendigkeit der Aufklärung solcher synthetischen Prozesse durch instrumentelle Analytik und bioanalytische Verfahren gilt auch für die Biosyntheseforschung, die sich mit der Synthese in Organismen oder durch Substrukturen von Organismen, wie beispielsweise Enzyme, beschäftigt.

Die chemische Synthese beschreibt die Herstellung von Ziel-Verbindungen (Produkten) aus einer oder mehreren Ausgangsstoffen (Edukten) unter definierten Reaktionsbedingungen und meist unter Verwendung einer bestimmten Apparatur. Das Produkt unterscheidet sich vom Edukt-Material in seinen Eigenschaften, welche aber nicht einfach aus der molekularen Struktur ohne eigens angestellte Analytik ableitbar sind.

Die Umsetzung einer chemischen Synthese oder die Produktion von chemischen Verbindungen ist im Wesentlichen in folgenden Ablauf eingebettet: 1.) Syntheseplanung, 2.) Synthesedurchführung (ein- oder mehrstufige chemische Reaktion oder Stoffumwandlung, 3.) Isolation des Produkts oder der Produkte, 4.) Charakterisierung des jeweiligen Produkts (Analytik). Demnach geht der Synthese die Syntheseplanung voraus. Diese beinhaltet Literaturrecherche, um zu sehen, ob wirklich ein neuer Stoff synthetisiert wird und ob bereits eine Synthesevorschrift besteht. Im Falle der Synthese von neuen Verbindungen folgen Testexperimente (wie Löslichkeitsversuche der Edukte, Reinheitstests und Synthesen im analytischen Maßstab, d.h. mit Mengen, die für die notwendige Analytik

6 | Etliche Kurzbeschreibungen zum Verständnis von chemischer Synthese finden sich im Artikel von Kyriacos C. Nicolaou: Vom Aufkommen des Molekülkonzepts zur Kunst der Molekülsynthese, in: *Angewandte Chemie*, 125(2013), 141-157, S. 151.

ausreichend sind), um erste Erkenntnisse für die Synthesebedingungen zu gewinnen. Eine gründliche, auch energetische Abschätzung des Reaktionsablaufs und der Stabilitäten möglicher Intermediate und Produkte anhand des auf Papier gezeichneten vorgeschlagenen Reaktionsschemas und Mechanismus, inklusive der Berechnung der Stöchiometrie der Reaktionspartner, ist oft notwendig und angelehnt an bekannte, analytisch beschriebene Beispiele für Reaktionstypen sowie an bekannte Werte strukturell ähnlicher Verbindungen.

In der Entwicklung von Synthesen neuer Verbindungen kann das Betrachten der Synthese homologer Verbindungen lohnenswerte Hinweise geben, bei ganz neuen Verbindungen die Betrachtung der Energetik der sich bildenden und brechenden Bindungen. Energetische Berechnungen für den Reaktionsverlauf sind letztlich auch deshalb wichtig, um die Synthese problemlos apparativ steuern zu können.

Eine Strategie zur Isolation von Zwischenprodukten in Mehrstufensynthesen gehört zur optimalen Syntheseplanung, wie auch die Wahl günstiger und strukturell einfach aufgebauter Ausgangsstoffe. Dabei spielt in der organischen Chemie der Begriff des ›Synthons‹ eine große Rolle. Unter einem Synthon versteht man eine strukturelle Einheit innerhalb eines Moleküls, das für einen Syntheseschritt verwendet wird.⁷ Weitere wichtige Aspekte sind heutzutage die Optimierung der Atomökonomie, Nachhaltigkeit und Umweltverträglichkeit eines Prozesses und die Minimierung der allgemeinen der Synthese (einschließlich der Apparatur etc.).

Synthesechemiker orientieren sich bei der Planung und Durchführung einer chemischen Synthese am geeignetsten Reaktionstyp für einen geplanten Umsatz einer Verbindung und möchten sicherstellen, dass die gewünschte chemische Reaktion möglichst quantitativ abläuft, das bedeutet, dass ein vollständiger Umsatz der Edukte zum gewünschten Produkt ohne Nebenreaktionen stattfindet. Der zentrale Umformungsschritt bei einer chemischen Synthese ist die chemische Reaktion. Wichtige Parameter zur Charakterisierung einer chemischen Reaktion sind kinetische und thermodynamische Größen. Diese werden für definierte Reaktionsbedingungen wie gegebener Temperatur, Druck, Stoffmengenkonzentrationen und Reaktionszeit beschrieben. Ein erwähnenswertes Prinzip ist, dass manche Reaktionen unter kinetischer Kontrolle, andere dagegen unter thermodynamischer Kontrolle ablaufen können. Ganz wichtig, besonders in der Naturstoffsynthese, sind Phänomene der Chemo-, Regio- und Stereoselektivität.⁸ Die Reaktionen in der organischen Chemie umfassen zahlreiche Reak-

7 | Vgl. Elias J. Corey: General methods for the construction of complex molecules, in: *Pure and Applied Chemistry*, 14, 1967, 19-37.

8 | Vgl. Reinhard Brückner: *Reaktionsmechanismen: organische Reaktionen, Stereochemie, moderne Synthesemethoden*, Heidelberg/Berlin: Spektrum 2003.

tionstypen und Namensreaktionen, deren Kenntnis zum Handwerkszeug jedes Chemikers gehört.⁹

8.3 SKRIPTURALES REAKTIONSSCHEMA UND ›GEEIGNETSTER REAKTIONSTYP‹: EIN SCHRIFTTHEORETISCHER ASPEKT

Bei der Syntheseplanung spielt das schriftliche Reaktionsschema eine zentrale Rolle, bei der Durchführung der ›geeignetste Reaktionstyp‹. ›Eine‹ Antwort auf die Frage, was der Annahme weitreichender oder gar unbeschränkter Möglichkeiten durch chemische Synthese zugrunde liegt, weist in eine medien- und schrifttheoretische Richtung. Ursula Klein hat gezeigt, dass die vom schwedischen Chemiker Jacob Berzelius eingeführten chemischen Formeln nicht bloß Aufzeichnungen chemischer Verbindungen im Sinne ihrer Repräsentation darstellen, sondern zugleich als Werkzeuge, als ›papertools‹ zu betrachten sind.¹⁰ Die Möglichkeit nämlich, auf Papier Kombinationen chemischer Bestandteile versuchsweise herzustellen, umzuschreiben, ja: die Kombinationen beliebig zu verändern, macht die Zeichen und ihre Verknüpfungen zu einem Baukasten, bei dem – genau genommen – jedes Zeichenelement als Material und als Werkzeug der Manipulation dienen kann. In der Schrifttheorie spricht man vom ›operativen Aspekt‹ des Schriftzeichens. Dem liegt die Beobachtung zugrunde, dass schriftlichen Zeichenelementen nicht nur die Möglichkeit der Bezugnahme auf Anderes (Referenz), der Verdauerung und sinnlichen Vergegenwärtigung (ästhetische Präsenz), sondern auch der operativen Manipulation eignet, was sich am eindrücklichsten im schriftlichen Rechnen, aber auch beispielsweise im musikalischen Komponieren in Notenschrift und eben auch in der chemischen Formelschreibweise äußert.¹¹

Ein eindrückliches Beispiel dafür, wie die schriftliche Praxis in der Chemie die Herstellung und Komposition chemischer Verbindungen möglich erscheinen lässt, indem sie ihre schriftliche Darstellbarkeit vor Augen führt, demonstriert Klein, wenn sie aus dem Text *Mémoire sur les ethers composés* von Jean Baptiste Dumas und Polydore Boullay von 1828 zitiert:

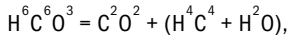
9 | Viele chemische Reaktionen sind nach dem Namen ihrer Entdecker benannt (wie die Wöhlersche Harnstoff-Synthese). Weitere Beispiele dafür finden sich in: Brückner, *Reaktionsmechanismen*, 2003.

10 | Vgl. Ursula Klein: *Experiments, Models, Paper-Tools. Cultures of Organic Chemistry in the Nineteenth Century*, Stanford: Stanford University Press, 2003.

11 | Werner Kogge, Gernot Grube: Zur Einleitung: Was ist Schrift?, in: Gernot Grube, Werner Kogge und Sybille Krämer (Hg.): *Schrift. Kulturtechnik zwischen Auge, Hand und Maschine*, München: Fink, 2005, 9-21.

»In der Tat, nach der Analyse von Th. de Saussure enthalten diese Zucker $\text{C}^6\text{H}^7\text{O}^{31/2}$, was wir repräsentieren als $\text{H}^6\text{C}^6\text{O}^3 + \text{HO}^{1/2}$, indem wir das halbe Atom Wasser als Kristallwasser betrachten.

Es verbleibt also:



das heißt, dass der Zucker der Stärke repräsentierbar ist durch gleiche Volumina Kohlensäure und Alkohol. Unter diesem Gesichtspunkt können der Zucker des Zuckerrohrs und der der Stärke als Carbonate von Bicarboniertem Wasserstoff betrachtet werden, die sich nur darin unterscheiden, dass ersterer zweimal weniger Kristallwasser enthält als der zweite.«¹²

Wir können uns also das System der chemischen Formelschreibweise gleichsam als ein ›ideales Labor‹ vorstellen, in dem willkürlich Verbindungen zusammengestellt werden können, um zu sehen, was sich aus einer bestimmten Konfigurationsvariante ergibt oder was in ihr impliziert sein könnte. Es können Verbindungen entworfen, oder – wie man heute sagt – ›designed‹ werden, unabhängig von Restriktionen des chemischen Materials und der Umstände. Diese Möglichkeit des Entwurfs scheint eine nachhaltige Quelle des Machbarkeitsglaubens in Chemie und Biotechnologie zu sein – was in Anbetracht der aktuellen Konjunktur des Design-Begriffs in diesen Bereichen deutlich wird.¹³

Die chemische Formelschreibweise war aber nicht die einzige Quelle der sich ausbreitenden Erwartungen an chemische Synthese. Als 1858 Friedrich August Kekulé das Theorem der Kohlenstoff-Kohlenstoff-Verbindungen entwickelte, also der kettenförmigen Moleküle, die in verschiedensten Anordnungen konfiguriert jeweils andere Molekülarten ergeben, wurde es noch bedeutend plausibler, eine explizite Analogie zwischen chemischer und skripturaler Welt herzustellen, und damit die Suggestion zu nähren, mit chemischen Elementen könnte operativ verfahren werden wie mit Elementen eines schriftlichen Notationssystems.

Dem entgegen steht das Problem des ›geeignetesten und möglichen Reaktionstyps‹ in der Durchführung der chemischen Synthese. Was macht einen Reaktionstyp zur Beschreibung einer chemischen Umformung geeignet und wie müssen solche Vorgehen eingeordnet werden?

12 | Jean Baptiste André Dumas, Polydore Boullay: *Mémoire sur les ethers composés*, in: *Annales de Chimie et de Physique*, 37, 1828, 15-53, S. 47f. Zitiert nach: Klein, *Experiments, Models, Paper-Tools*, 2003, S. 144. Übersetzt in Ursula Klein: *Experimente, Modelle, Paper-Tools. Kulturen der organischen Chemie im 19. Jahrhundert* (Habilitationsschrift), Universität Konstanz 1999, S. 218.

13 | Vgl. Martin Jansen, J.C. Schön: Design in chemical synthesis – An illusion?, in: *Ange wandte Chemie*, (Int. Edition), 45, 2006, 3406-3412 sowie der übersetzte Artikel in diesem Band Kapitel 7 ›Design‹ in der chemischen Synthese – eine Fiktion?

8.4 DIE ORGANISCHE CHEMIE: TECHNISIERUNG DER LEBENSKRÄFTE

Mit dem Entdecken der organischen Synthese 1828 durch Wöhler, der zeigte, dass er Harnstoff ohne Zuhilfenahme eines Organismus synthetisieren konnte, schien die Annahme einer ›vis vitalis‹ obsolet zu werden. Damit vereinnahmte die Synthese-Chemie mit ihrer neuen Disziplin quasi diese bis dahin alles Organische gestaltende Kraft.

»Erst als man statt der Synthese von chemischen ›Elementen‹ diejenige von *zusammengesetzten* Körpern in Angriff nahm und als man statt der *belebten* Stoffe die *organischen* Körper unter *Ausschaltung* der Lebenskraft zu synthetisieren begann, erst dann wurde der wissenschaftlichen Erkenntnis als eine neue Komponente der Erfahrungssatz eingefügt: *Die chemischen Stoffe der unorganischen sowie der organischen Natur sind künstlich herstellbar!*«¹⁴

Die Wöhlersche Harnstoff-Synthese wird deshalb trotz diverser Wegbereiter als Startpunkt der organischen Synthese-Chemie betrachtet. Damals gelang es Wöhler, als »Doktor der Medizin, Chirurgie und Geburtskunde«¹⁵ gewissermaßen der Chemie der Lebewesen nahestehend, aus Ammoniumisocyanat Harnstoff (als Umlagerungsprodukt) zu synthetisieren,¹⁶ der bis dato nur aus lebenden Organismen isoliert werden konnte. Wöhler schrieb an seinen Lehrer Berzelius »[...] ich muss ihnen erzählen dass ich Harnstoff machen kann, ohne eine Niere oder überhaupt ein Tier [...] nötig zu haben.«¹⁷

Eine wesentliche Untermauerung des Begriffs ›organische Synthese‹ wurde durch die experimentellen Arbeiten von Herman Kolbe erbracht. Er synthetisierte 1845 erstmals in geplanter Weise Essigsäure aus CS_2 , Cl_2 und H_2O , also aus anorganischen Materialien, und zeigte damit die Möglichkeit auf, von der anorganischen zur organischen Natur eine Brücke zu schlagen.¹⁸ In der Folge entwickelte sich die organische Synthese rapide und das Verständnis der Synthese-Chemiker wurde durch die Verbannung der ›vis vitalis‹ vom rein technischen Verständnis abgelöst und damit von Arbeitsmethoden beherrscht, die Organismen wesensfremd sind.

Die enormen Fortschritte innerhalb der organischen Chemie führten auch dazu, dass enorme Erwartungen für die Gesellschaft durch synthetische Leistungen formuliert wurden. Diese Formulierungen reichen von »Wenn einst der

14 | Walden, Die Bedeutung der Wöhlerschen Harnstoffsynthese, 1928, S. 848.

15 | Walden, Die Bedeutung der Wöhlerschen Harnstoffsynthese, 1928, S. 837.

16 | Nicolaou, Vom Aufkommen des Molekülkonzepts zur Kunst der Molekülsynthese, 2013, S. 150.

17 | Walden, Die Bedeutung der Wöhlerschen Harnstoffsynthese, 1928, S. 836.

18 | Walden, Die Bedeutung der Wöhlerschen Harnstoffsynthese, 1928, S. 839.

große Plato das Weltganze [...] durch *Götter* erschaffen ließ, so werden dereinst die *Chemiker-Techniker* aus Luft, Kohlensäure, Wasserdampf und Erde ihre Synthesen der *organischen Stoffwelt* vollführen!« bis zum pathetischen Fazit »Die *Erde* aber selbst bleibt der begrenzte Kampfplatz ums Dasein für die Menschenmilliarden. Möge die große Symphonie des Weltgeschehens eine erhöhte Konsonanz gewinnen, indem die chemische Synthese ihrerseits ein *wirksames Instrument des Friedens und Wohlergehens* der Menschheit wird!«¹⁹

Eine in der Synthesechemie allgegenwärtige Frage ist, neben den Aspekten »was« und »woraus« etwas synthetisiert wird, immer schon die Frage nach dem, »wie« es synthetisiert wird, die besonders von Friedrich Mohr 1868 gestellt wurde. Er forderte in Bezug auf organische Stoffe, den Weg zu finden »[...] *auf welchem die Natur diese Stoffe aus Kohlensäure, Wasser und Ammoniak bildet.*«²⁰ Es ist erstaunlich, dass 100 Jahre nach der ersten organischen Synthese als ein Ziel der Synthesechemie für das kommende Jahrhundert klar formuliert wird, dass der Weiterentwicklung der chemischen Synthese mittels Enzymen und Katalysatoren sowie Energiesteigerungen eine große Bedeutung zukommt:

»Das höchste und reizvollste Objekt der experimentellen Forschung ist nun die *lebende Natur* selbst. Ihren *Chemismus* zu erforschen, aus dem Reich der *Lebensvorgänge* *neue Provinzen* auch für die chemische Synthese abzuringen, dies ist eines der Ziele der chemisch-synthetischen Forschung im *zweiten* Jahrhundert ihres Bestehens. »Zurück zur lebenden Natur!« [...]«²¹

Die hier angesprochenen Aspekte sind tatsächlich Gegenstand aktueller Forschung und Entwicklung, sofern sie nicht schon in vielen Lebensbereichen in Prozessen oder Produkten erfolgreich etabliert sind.

8.5 BEGRIFFSGESCHICHTLICHE ASPEKTE: ARISTOTELES, EUKLID UND DIE REZEPTION

Offenbar schwanken die mit dem Begriff der Synthese verbundenen Assoziationen zwischen der Vorstellung einer (nahezu) willkürlich planbaren Zusammensetzung aus Einzelteilen einerseits und der Entstehung eines neuen Herstellungsweges andererseits, der nur unter Voraussetzung eines umfassenden Verständnisses des betreffenden Naturbereichs und großer praktischer Erfahrung zustande kommen kann. Während der erste Fall im Anwenden einer Technik nach gegebenen Regeln besteht, ist im zweiten Fall ein Typ von Wissen und Könnerschaft erforderlich, der sich auch in ausdauernder Praxis bildet und be-

19 | Walden, Die Bedeutung der Wöhlerschen Harnstoffsynthese, 1928, S. 848.

20 | Walden, Die Bedeutung der Wöhlerschen Harnstoffsynthese, 1928, S. 843.

21 | Walden, Die Bedeutung der Wöhlerschen Harnstoffsynthese, 1928, S. 849.

währt – ein Motiv, das in der Aristotelischen Philosophie von zentraler Bedeutung ist. Überhaupt ist es naheliegend anzunehmen, dass das Schwanken im modernen Verständnis von Synthese etwas mit der Geschichte des Begriffs zu tun hat. Im Folgenden sollen nun einige entscheidende Punkte und Wendungen dieser Geschichte skizziert werden, um ein klareres Bild von begrifflichen Unterschieden in diesem Bereich zu gewinnen.

Wenn wir versuchen, den Begriff der Synthesis in seinem historischen Hintergrund zu verorten, so geraten wir in eine zunächst verwirrende Situation. Geläufigerweise wird das Begriffspaar Analyse/Synthese auf Autoren der griechischen Antike zurückgeführt, nämlich auf Euklid und Aristoteles. Doch bei genauerer Hinsicht findet sich ein entsprechendes Begriffspaar im griechischen Denken gar nicht. Zwar kann Analysis als ein Schlüsselbegriff der Aristotelischen Philosophie gelten – titelgebend für zwei Hauptwerke (*Erste Analytik* und *Zweite Analytik*), doch ist der ›analysis‹, die in diesen und anderen Schriften erläutert wird, nicht unmittelbar ›synthesis‹ als Pendant zur Seite gestellt. Analysis ist ein Begriff aus den methodischen Schriften des Aristoteles. Er bezeichnet die Zergliederung (wörtlich: Auflösung) eines Satzes in die vorausgesetzten Schlussformen, Prämissen und Prinzipien. *Synthesis* dagegen ist ein Begriff aus den Aristotelischen Schriften zu Physik und Metaphysik. Er steht im Zusammenhang damit, wie etwas aus Anfangsgründen aufgebaut ist oder entsteht. Tatsächlich findet sich in den Aristotelischen Werken keine Textstelle, in der ›analysis‹ und ›synthesis‹ als Komplementärbegriffe erläutert oder auch nur gemeinsam erwähnt werden.

Diese Zusammenstellung taucht erstmals in einem Zusatz zu dem mathematischen Grundlagenwerk *Die Elemente* von Euklid auf. Dort liest man: »Was ist eine Analysis und was eine Synthesis? Eine Analysis ist die Zugrundelegung des Gefragten als anerkannt um seiner auf anerkannt Wahres führenden Folgerungen willen. Eine Synthesis ist die Zergliederung des Anerkannten um seiner auf Vollendung oder Ergreifung des Gefragten führenden Folgerungen willen.«²²

Liest man zuweilen, Aristoteles habe methodische Leitlinien aus den Euklidischen Elementen übernommen, so steht dem schon die Chronologie entgegen: Aristoteles war bereits gut zwei Jahrzehnte tot, als *Die Elemente* verfasst wurden (Aristoteles 384-322; Verfassung der Euklidischen *Elemente* zwischen 305 und 285).²³ Der zitierte Textteil zu Synthesis und Analysis ist sicher noch weit später hinzugefügt worden, vermutlich von dem um 100 n. Chr. lebenden Mathematiker und Ingenieur Heron von Alexandrien. Darauf deuten Passagen aus den Euklid-

22 | Euklid: *Die Elemente*, Buch 1-13, (hg. u. übers. von Clemens Thaer), Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft 1963, S. 386f.

23 | Vgl. für Aristoteles Otfried Höffe: *Aristoteles*, München: Beck 1996, S. 288. Vgl. für Euklid: *Paulys Realencyclopädie der classischen Altertumswissenschaft*, (hg. von Georg Wissowa), 11. Halbband, Stuttgart: Alfred Druckenmüller 1907, 1003-1052, S. 1004.

Kommentaren des Proklus (nach 400 n. Chr.) und des al-Nairizi (um 920 n. Chr.) hin.²⁴

Das wissenstheoretische Vorbild, an das die Euklid-Kommentatoren die mathematische Methode anpassten, findet sich in einem Text der Aristotelischen Ethik besonders prägnant ausgedrückt. Dort erläutert Aristoteles in Bezug auf den Begriff des Überlegens (›bouleúesthai‹ – im Sinne von ›praktisch Bedenken‹), dass Gegenstand dieser Geistestätigkeit nicht das Ziel, sondern das Mittel sei, um ein Ziel zu erreichen. Dabei gibt er einem Begriff der ›analysis‹ Kontur als einer Tätigkeit, die auf einen Endpunkt führt, welcher wiederum auch einen Ausgangspunkt bietet. Aristoteles schreibt:

»[...] nachdem man sich ein Ziel gestellt hat, sieht man sich um, wie und durch welche Mittel [das Ziel] zu erreichen ist; wenn es durch verschiedene Mittel möglich scheint, sieht man zu, durch welches es am leichtesten und besten erreicht wird; und wenn es durch eines regelrecht verwirklicht wird, fragt man wieder, wie es durch dasselbe verwirklicht wird, und wodurch wiederum jenes, bis man zu der ersten Ursache gelangt, die als letzte gefunden wird. Auf diese so beschriebene Weise verfährt man analysierend, d.h. zergliedernd, wie wenn es sich um die Konstruktion einer geometrischen Figur handelte. Doch ist nicht jedes Suchen ein Überlegen, z.B. das Suchen des Geometers nicht: dagegen ist jede Überlegung ein Suchen, und das, was bei der Zergliederung als Letztes herauskommt, ist bei der Verwirklichung durch die Handlung das Erste.«²⁵

In der Analogie zur Geometrie tritt Aristoteles aus dem Kontext der praktischen Philosophie heraus und ordnet die praktische Fragestellung in einen allgemein wissenstheoretischen Rahmen ein. Jedoch bezieht sich diese Analogie nur auf den Weg ›hin‹ zur ersten Ursache auf die Analysis. Ausgehend ›von‹ der ersten Ursache findet sich hier kein mathematisches Verfahren, sondern ein unmittelbar auf Wirklichkeit bezogenes praktisches Tun. In den Analytiken steht an dieser Stelle ebenfalls kein mathematisches, sondern ein logisches Verfahren, nämlich der ›syllogismos‹, der aus Voraussetzungen methodisch auf das schließt, was aus ihnen folgt.

24 | Anthony Lo Bello (Hg.): *The Commentary of al-Nayrizi on Books II-IV of Euclid's Elements of Geometry*, Leiden/Boston: Brill 2009, S. 22; Jürgen Schönbeck: *Euklid*, Basel: Birkhäuser 2003, S. 202. Eventuell fand diese Hinzufügung auch erst im Euklid Kommentar des Neuplatonikers Proklos Diadochos im 5. Jahrhundert n. Chr. statt. Vgl. Hans-Jürgen Engfer: *Philosophie als Analysis. Studien zur Entwicklung philosophischer Analysiskonzeptionen unter dem Einfluss mathematischer Methodenmodelle im 17. und frühen 18. Jahrhundert*, Stuttgart: Frommann-Holzbog 1982, S. 72.

25 | Aristoteles: *Nikomachische Ethik* (auf der Grundlage der Übersetzung von Eugen Rolles, hg. von Günther Bien), Hamburg: Meiner 1985, 1012b16-25.

Um zu verstehen, welche begrifflichen Überlagerungen und Verwirrungen in der Aristoteles-Rezeption entstanden sind, müssen folgende Punkte der Aristotelischen Philosophie berücksichtigt werden, die ich hier nur kurz erläutern kann:

1. *Epagogé, Induktion und Analysis*: An zwei prominenten Stellen der Aristotelischen Schriften, nämlich am Beginn der *Metaphysik* und am Ende der *Zweiten Analytik* erklärt Aristoteles, wie der Mensch zu den ersten Ursachen und Prinzipien gelangt – also zu dem, worauf auch die Analyse führt. Er beschreibt diesen Weg als einen stufenförmigen Aufbau von der Erfahrung als Verallgemeinerung von sinnlichen Wahrnehmungen über die sprachliche und begriffliche Erfassung der Erfahrung in Wissen/Wissenschaft (»epistemé«) und Kunst/Können (»techné«) bis hin zu den ersten Ursachen und Prinzipien, nach denen sich das Erfasste verhält. In welcher Beziehung steht nun dieser Weg, den Aristoteles mit dem Begriff der »epagogé« (ins Lateinische mit »Induktion« übersetzt) fasst, zu der Tätigkeit der Analysis? Man muss hier zwischen einem genealogischen und einem reflexiven Aspekt dieses Erkenntnisweges unterscheiden:²⁶ Während »epagogé« sich darauf bezieht, wie Erkenntnis der ersten Ursachen und Prinzipien überhaupt entsteht, bezeichnet »analysis« die besondere Tätigkeit der sprachlichen Reflexion, durch die innerhalb von Wissen/Wissenschaft und Kunst/Können die ersten Ursachen und Prinzipien expliziert werden. Da in der Rezeptionsgeschichte diese Differenzierung aber verwischt wurde, kam es zur Überblendung von »epagogé« und »analysis«, was letztere zu einem genuinen Erkenntnismittel aufwertete und erstere (unter dem Begriff Induktion) logifizierte.

2. *Die Rolle der ersten Ursachen und Prinzipien*: Um der Aristotelischen Konzeption in ihrer Eigenheit gerecht zu werden, müssen insbesondere die Begriffe der ersten Prinzipien und Ursachen geklärt werden. Prinzip (»arché«) und Ursache (»aitía«) werden von Aristoteles weitgehend als eine semantische Einheit behandelt (»alle Ursachen sind Prinzipien«)²⁷. Beide Begriffe beziehen sich auf das Wo-durch und das Woher in einem Sinne, der nicht mit einer modernen Vorstellung von Kausalketten identifiziert werden darf. Vielmehr bezeichnen beide Begriffe die konstitutiven Faktoren, die sowohl zur Entstehung als auch zum Verständnis einer Sache vorausgesetzt werden müssen: »Allgemeines Merkmal [...] ist, daß es ein Erstes ist, wovon her etwas ist, wird, oder erkannt wird.«²⁸ Erste Ursachen und Prinzipien lassen sich also als so etwas wie Konstituenten verstehen: Bedingungen, deren Gegeben- und Wirksamsein wir für eine Sache oder Entwicklung voraussetzen müssen und können.

26 | Vgl. zu dieser Unterscheidung Höffe, *Aristoteles*, 1996, S. 53.

27 | Aristoteles: *Metaphysik*, 1. Halbband, (Neubearb. d. Übers. v. Hermann Bonitz mit Einl. u. Komm. hg. von Horst Seidl), Hamburg: Meiner 1989, 1013a.

28 | Aristoteles, *Metaphysik*, 1989, 1013a.

3. *Synthesis und Ursachenlehre*: Aristoteles differenziert den Begriff der Ursache näher in seiner Lehre von den vier Ursachen: Stoff-, Form-, Beweg- und Zielursache. Während die Moderne nur die Bewegursache als Ursache im engeren Sinne akzeptiert, erschien es im griechischen Denken sinnvoll, ebenso Stoff, Form und das Telos eines Geschehens als Konstituenten für eine Gegebenheit gleichwertig zu behandeln. Der Begriff der Synthesis spielt im Rahmen dieser Ursachenlehre bei Aristoteles eine spezielle Rolle: Wenn Aristoteles nämlich erklärt, wie etwas aus einem Stoff zu etwas Bestimmten wird, so schlüsselt er dies so auf, dass die »Ganzheit (*hólon*), die Zusammensetzung (*synthesis*) und die Form (*eidos*)« diese Bestimmung ergeben.²⁹ Synthesis ist hier also als ein Bestimmungsaspekt im Bereich der Formung von Gegebenheiten konzipiert.

Beziehen wir diese drei Punkte auf die Rezeptionsgeschichte, so wird deutlich, welche einschneidenden konzeptionellen Veränderungen mit der Einführung von Analysis und Synthesis als Begriffspaar verbunden waren: Indem Synthesis aus dem Kontext der Ursachenlehre herausgelöst und als Komplementärbegriff zu einem Analysis-Konzept eingesetzt wurde, das seinerseits von einem sprachlogisch-reflexiven Konzept zu einem Konzept genereller Erkenntnisgewinnung ausgeweitet wurde, konnte ein Bild entstehen, dem gemäß es möglich erscheinen konnte, mit sprachlogischen Mitteln konstitutive Bestandteile zu erschließen, die in umgekehrter Richtung – auf konstruktivem Wege – sich zu bestimmten Entitäten zusammensetzen lassen. Dass in dieser logisch reduzierten Form der Synthesis die Bedingungen der Stoff-, der Beweg- und der Zielursache und auch die Bedingungen der jeweiligen Form und Ganzheit (um hier die Aristotelische Ursachensystematik zu vervollständigen) hinter das Konzept einer Zusammensetzung aus Bestandteilen zurücktrat, wird als eine der Quellen des mit dem Synthesis-Begriff verknüpften modernen Machbarkeitsglaubens angesehen werden müssen.

Anders gesagt: In der Geschichte der Rezeption wurden zwei aristotelische Begriffe, nämlich »analysis« und »syllogismos«, die beide eine Funktion bloß innerhalb des »logos« haben, mit dem Begriffspaar »epagógé« (lateinisch: Induktion) und »synthesis« überblendet (wobei dieser Begriff der »synthesis« weder als Pendant zur logischen »analysis«, noch als Pendant zur epistemologischen »epagógé« in der aristotelischen Philosophie vorkommt, vielmehr nur eines der ontologisch-epistemologischen Prinzipien innerhalb der aristotelischen Wirklichkeitskonzeption ist). Indem dabei der Begriff der Synthesis sowohl dem Begriff der logischen »analysis« als auch dem der epistemologischen »epagógé« in einem allgemeinen Sinne von Ableitung und Beweisführung als Pendant diene, entstand die Tendenz, diese beiden Aspekte, miteinander zu verschmelzen und eine logische Deduktion als gegenläufige Bewegung zur Induktion zu verstehen, die ihrerseits in

29 | Aristoteles: *Metaphysik*, 1013b. Vgl. Aristoteles: *Physik*, 1. Halbband, (Übers., mit Einl. u. Anm. hg. v. Hans Günter Zekl), Hamburg: Meiner 1987, 195a.

dieser Neuinterpretation zu einem bloß logischen Verfahren wurde. Diese Tendenz prägte sich immer da aus, wo ohnehin die (Aristoteles fremde) Annahme vorausgesetzt war, dass die Ordnung der Welt im Grunde in logisch-mathematischer Form besteht – wo also (aristotelisch gesprochen) das Abstrakte dem Konkreten vorausgesetzt wird. Während, gemäß Aristoteles, in den konkreten Wesenheiten jeweils verschiedene Prinzipien wirksam sind, die sie jeweils konstituieren und die erst gleichsam nachholend und nur unter der Bedingung vorhergegangener ›epagogé‹ durch ›analysis‹ reflexiv-logisch erschlossen werden, entsteht nun ein Bild, demgemäß die Prinzipien durch Analyse logisch-mathematischer Formen erschlossen und aus den Prinzipien durch logisch-mathematische Synthese Formen gebildet werden können. Ein Bild, dem gemäß der Mensch durch die bloße Beherrschung logisch-mathematischer Verfahren konstruktiv tätig werden kann – und zwar nicht nur innerhalb eines Bereiches logischer Abstraktion, sondern – so war man dann im Selbstbewusstsein der Renaissance bereit zu glauben und zu denken – innerhalb der als mathematisch verfasst gedachten Ordnung der Wirklichkeit selbst.

Ist es nicht mehr als naheliegend, dass dieser Konstruktionsgedanke und dieser Machbarkeitsglaube für die Neuzeit bestimmend wurden? Und dass der Begriff der Synthese, als er sich in der Chemie mit der Erfolgsgeschichte der Herstellung von Stoffen verband, zu einem Zentralbegriff dieses Denkens und Glaubens werden musste – sodass sich im Begriff der Synthese die Frage bündelte, wozu der Mensch mit seinen wissenschaftlich-technischen Verfahren in der Lage sein kann?

In der Denkfigur einer Synthese aus Einzelteilen – im Unterschied zum Verständnis einer Sache aus dessen Konstitutionsbedingungen – liegt eine Quelle eigentümlicher Verkürzungen und Ausblendungen. Das zeigt sich am deutlichsten dort, wo die Vorstellung von Synthesevorgängen explizit einem Baukastenmodell folgt (wie etwa im Lego-Baustein-Bild, das in der Frühphase der Synthetischen Biologie prominent wurde (dazu später mehr). Gemäß diesem Denkschema können aus einzelnen Bausteinen, die in Größe, Form und anderen Eigenschaften differieren, in freier Variation unterschiedliche Gebilde hergestellt werden. Mit der Zusammensetzung eines Puzzles hat der Aufbau aus Bausteinen gemeinsam, dass das Ganze aus einer Zusammenfügung bestimmbarer dinglicher Einzelteile entsteht. Doch es gibt auch einen Unterschied: Während im Fall des Puzzles bereits durch die Form der Einzelteile bestimmt ist, wie das Ganze aussehen wird, bietet ein herkömmlicher Baukasten (etwa aus Holzbausteinen) die Möglichkeit, aus demselben Bausatz ganz unterschiedliche Gebilde aufzuführen. Die Bauelemente lassen unterschiedliche Kombinationen zu, sodass aus ihnen prinzipiell unbeschränkt viele Varianten hergestellt werden können. Wird allerdings nach einem vorgegebenen Plan gebaut, dann gleicht sich der Fall dem der Puzzle-Zusammensetzung an: Der Plan definiert, was durch die Bauelemente unterdeterminiert ist; er bestimmt Position und Verbindung der Elemente zueinander. Als Unterschied zwischen den Fällen bleibt bestehen, dass beim Puzzle

bereits die Elemente durch ihre Gestalt die Bauform des Ganzen determinieren, während dies im planmäßigen Bau mit Bausteinen erst durch den Plan des Ganzen geschieht; was wiederum bedeutet, dass die Unterdeterminierung der Bauelemente in Bezug auf das Ganze Freiheiten in der Planung, mithin auch die Verwendung nach unterschiedlichen Plänen erlaubt.

Das Lego-Baustein-Bild erweist sich vor diesem Hintergrund als verführerische Metapher: Es suggeriert freie Konstruierbarkeit nach planmäßigen Entwürfen – und zugleich eine Kombinatorik nach eindeutigen Regeln. Denn die Noppen der Lego-Bausteine lassen ja keine kontinuierlich-unbestimmte Weise der Verknüpfung von Elementen zu, sondern immer nur bestimmte distinkte Kombinationen; sie funktionieren als ein digitales, nicht als ein analoges System (im Sinne der Unterscheidung von digital und analog, wie sie z.B. in Bezug auf Uhren verwendet wird und wie sie der Philosoph Nelson Goodman expliziert hat). So entsteht das Bild der Möglichkeit einer freien und dennoch Schritt für Schritt planbaren, nach eindeutigen Vorgaben realisierbaren Konstruktion.

Wie verhält sich nun die chemische Synthese zu diesen Denkfiguren? Lässt sich die Syntheseplanung mit der Anleitung vergleichen, die etwa einem Lego-Schiffsbaukasten beiliegt und die Schritt für Schritt angibt, welche Elemente wie zusammenzusetzen sind? Wie frei ist die Planung in der chemischen Synthese? Offenbar ist es der Chemie ja gelungen, nicht nur Naturstoffe zu rekonstruieren, sondern neuartige Stoffe, Kunststoffe, zu konstruieren. Was aber beschränkt die Möglichkeiten solcher Synthese? Warum kann nicht nach Belieben konstruiert werden?

8.6 GRENZEN DER SYNTHESE IN DER CHEMISCHEN PRAXIS

Grundsätzlich lassen sich nur chemisch existenzfähige Verbindungen synthetisieren und in ausreichenden Mengen unter definierten Bedingungen isolieren. Deshalb ist eine beliebige Synthese nach Strategien des künstlichen/künstlerischen Designs nicht möglich. Eine eindeutige Korrelation oder Vorhersage zwischen molekularer Struktur und der Funktion einer chemischen Verbindung oder deren Eigenschaften ist, wenn überhaupt, nicht leicht möglich. Diese Tatsache verschärft sich ganz besonders zum Beispiel bei der Frage, wie synthetische Verbindungen mit biologischen Strukturen wechselwirken (Wirkstoffforschung).

Bei einer Synthese sind annähernd vollständige (quantitative) Umsätze von Edukten zu Produkten möglich, jedoch nicht die Regel. Unter bestimmten Bedingungen laufen meist auch Nebenreaktionen ab. Das heißt klar: die geplante Trajektorie von Edukt(en) zu Produkt(en) besteht dann zwar, aber unter den gewählten Bedingungen neben ihr auch weitere. Präzise Rückschlüsse bei fehlender Produktbildung werden je nach Problem schnell schwierig und erfordern moderne, teils aufwendige Analytik – beispielsweise auch unter Zuhilfenahme von Modellverbindungen. Die Skalierung von kleinen Reaktionsansätzen (mit

Mengen, die für analytische Zwecke nützlich sind) hin zu großen (präparativen) Ansätzen ist nicht leicht zu bewerkstelligen. Ein und derselbe Syntheseprozess ist auch meist nicht hundertprozentig reproduzierbar, das heißt in Sachen Umsatz, Ausbeute, eventuell Stereoselektivität, nicht stets identisch.

Chemische Verbindungen sind überhaupt nur realisierbar innerhalb einer bestimmten Energielandschaft. Das Verständnis des Designs in der Synthese oder der planvollen Schöpfung jeder beliebigen Verbindung ist somit obsolet und Synthese-Chemiker sind höchstens die Entdecker chemischer Welten³⁰ und angewiesen auf die Qualität der Analytik zur jeweiligen Zeit.

8.7 NEUE ERWARTUNGEN FÜR DIE MÖGLICHKEITEN VON SYNTHESE: DER EINSATZ DER MOLEKULARBIOLOGIE³¹

In einem der Grundlagentexte der modernen Genetik, in Erwin Schrödingers Schrift *Was ist Leben?* von 1944, heißt es: »Die Chromosomstrukturen [...] sind zugleich Gesetzbuch und ausübende Gewalt, Plan des Architekten und Handwerker des Baumeisters.«³²

Die Möglichkeit, Text und Handlungsmacht zusammenzudenken, ist in unserem Zeitalter der Computertechnik und der programmierten Steuerungsmechanismen so selbstverständlich geworden, dass es gar nicht mehr leicht ist, die darin unreflektiert verwobenen Metaphern voneinander zu lösen (auch eine Form der Analyse).

Wie sich Text und Exekutive zusammendenken lassen, wird verständlicher, wenn man an technische Apparaturen denkt, die Zeichenkomplexe in physische Signale verwandeln und rückverwandeln. Betrachtet man diese Maschinen für sich, sieht es sehr wohl so aus, als könnte ein Text (z.B. ein Programm) einen Prozess, auch einen Produktionsprozess steuern. Was in dieser Verwendung der Grundform des Computers als allgemeine Idee allerdings herausgekürzt wird, ist die schlichte Tatsache, dass jeder Computer, jede nachrichtenverarbeitende Apparatur, so eingerichtet ist, dass es bestimmte Zeichen in genau definierter Weise prozessiert, dass also die Letztinstanz der Exekutive nicht beim Text liegt, sondern bei denen, die den Automaten einrichten und einstellen.

30 | Vgl. Jansen, Schön, »Design« in der chemischen Synthese – eine Fiktion?, in diesem Band Kapitel 7.

31 | Eine frühere Version des folgenden Textabschnittes findet sich in: Werner Kogge: Spurenlesen als epistemologischer Grundbegriff: Das Beispiel der Molekularbiologie, in: Werner Kogge, Sybille Krämer, Gernot Grube (Hg.): *Spur. Spurenlesen als Orientierungstechnik und Wissenskunst*, Frankfurt a.M.: Suhrkamp 2007, 182-221.

32 | Erwin Schrödinger: *Was ist Leben? Die lebende Zelle mit den Augen des Physikers betrachtet* (1944), München: Piper 1987, S. 57.

Gestützt wurde diese verkürzte Konzeption vermutlich auch dadurch, dass die Auffassung des Organismus als eines Automaten – von Descartes und La Mettrie bis von Neumann – über eine Jahrhunderte alte Tradition verfügte. Ein Automat, der einen Text enthält und durch diesen Text gesteuert wird, konnte daher eine von Grund auf plausible Vorstellung sein. So genügte es zu vernachlässigen, dass die DNA ihre Funktion nur in einer vollständig eingerichteten Zelle zu erfüllen vermag, um sie zu einem – qua Text unbewegten, qua Transkriptions- und Translationsmechanismus bewegenden – ursprünglichen und ursächlichen Akteur im Zellgeschehen zu machen.

Die Macht dieser historisch tief gegründeten Evidenzen lässt erst verständlich werden, warum eine Verschmelzung gleich zweier urmetaphysischer Denkfiguren den Kern einer neuen Wissenschaft bilden konnte. Als nämlich ein knappes Jahrzehnt nach dem Erscheinen von Schrödingers Werk die Struktur der DNA als eine stabile Anordnung diskreter Elemente in Form einer Doppelhelix beschrieben wurde, war das Feld aufs Beste bereitet, diese Molekülstruktur in der Doppelrolle eines Informationsspeichers und seiner eigenen Exekutionsinstanz aufzufassen. So war es für Francis Crick, dem Mitentdecker der Doppelhelix, ausgemacht, dass die auf ihr angeordneten Gene sowohl den Text der Erbinformation vollständig enthalten, als auch – kausal und aktiv – Entwicklung und Funkzionieren des Organismus determinieren, was er in seinem berühmten »zentralen molekularbiologischen Dogma« zum Ausdruck brachte, das besagt, dass die Information von der DNA auf die Proteine übertragen werden kann, aber nicht in die Gegenrichtung, und dass diese Übertragung als »präzise Bestimmung der Sequenz« zu verstehen sei.³³ Obwohl in der Folge die entscheidenden Fortschritte klassischer biochemischer Arbeit erzielt wurden, blieb das von Schrödinger formulierte Amalgam aus Zeichensystem, Akteurialität und Automatenhaftigkeit bestehen. So formulieren Jacob und Monod, die Entwickler des in den 1960er Jahren führenden Operon-Modells der Molekularbiologie: »Wie die Entdeckung der Regulator- und Operatorgene [...] zeigt, enthält das Genom nicht nur eine Reihe von Bauplänen, sondern ein koordiniertes Programm der Proteinsynthese sowie die Mittel zur Kontrolle ihrer Ausführung.«³⁴

Noch zu Beginn der 1990er Jahre schrieb Walter Gilbert, einer der Initiatoren der Genom-Sequenzierung: »Drei Milliarden Basen einer DNA-Sequenz passen auf eine einzige Compact-Disc (CD), und man wird eine CD aus der Tasche ziehen und sagen können: »hier ist ein Mensch; ich bin es!«³⁵ Und er verknüpfte

33 | Francis Crick: On Protein Synthesis, in: *Symposium for the Society of Experimental Biology* 12, 1958, 138-163, S. 153. (Eigene Übersetzung, Hervorhebung im Original).

34 | François Jacob, Jacques Monod: Genetic Regulatory Mechanisms in the Synthesis of Proteins, in: *Journal of Molecular Biology*, 3, 1961, 318-356 zitiert nach: Evelyn Fox Keller: *Das Jahrhundert des Gens*, Frankfurt a.M.: Campus 2001, S. 107.

35 | Walter Gilbert: A Vision of the Grail, in: Daniel J. Kevles, L. Hood: *The Code of Codes. Scientific and Social Issues in the Human Genome Project*, Cambridge/London: Harvard

diese, in ihren Grundmotiven auf Norbert Wiener zurückgehende Vision,³⁶ mit einer bemerkenswerten Konklusion: »Zu wissen, dass wir von einer endlichen Informationssammlung determiniert sind, die erkennbar ist, wird unsere Sicht von uns selbst verändern. Eine intellektuelle Grenze wurde geschlossen und damit müssen wir fertig werden.«³⁷ Vor diesem Hintergrund kann es dann nicht verwundern, dass das vorläufig abgeschlossene Humangenomprojekt schließlich als »Entschlüsselung des Erbes der Menschheit«, als Blick in »Gottes genetische Karten« gefeiert wurde.³⁸

Die hier angesprochenen Motive sind in der Geschichte der Molekularbiologie so omnipräsent, dass das Netz der Verweise sich beliebig enger knüpfen ließe. Die Vorstellung, mit der DNA-Struktur über eine Ordnung zu verfügen, die sich lesen und deren Bedeutung sich durch Berechnung entschlüsseln ließe, war so verführerisch, weil in ihr das Versprechen lag, über ein Wissensgebiet in vollständiger Transparenz und Endgültigkeit verfügen zu können.³⁹ Es sah eine Zeit lang so aus, als wäre die ganze Komplexität und Dynamik des Organischen auf eine textuelle Struktur zurückzuführen. Diese textuelle Struktur, die auf der einen Seite die Lebensprozesse determiniert, wäre auf der anderen Seite der Wissenschaft in einem skripturalen Setting gegeben gewesen: Die Buchstabenfolge der DNA lässt sich in übersichtlichen Tableaus aufschreiben, sie lässt sich in ihren bedeutungsvollen Mustern kartieren, graphisch darstellen und mit Mitteln der Datenverarbeitung prozessieren. Hätte die DNA tatsächlich, wie angenommen worden war, die Lebensvorgänge vollständig in ihrer Struktur repräsentiert, dann wäre mit dem Abschluss der Sequenzierungen die Molekularbiologie als Wissenschaft an ihr Ende gekommen; sie hätte sich in eine Technik der Lektüre, Redaktion und Edition verwandelt.

Kritiker des Informationsdiskurses in der Molekularbiologie hatten seit langem schon zu bedenken gegeben, dass der isolierte Blick auf die DNA als ein sich

University Press 1992, 83-98, S. 96. Übersetzung nach Keller, *Das Jahrhundert des Gens*, 2001, S. 17.

36 | Bereits 1950 hatte Norbert Wiener, Mathematiker, Begründer der Kybernetik und Protagonist in den Frühzeiten moderner Genetik, die Ansicht geäußert, dass es kein prinzipielles, sondern lediglich ein technisches Problem sei, einen Organismus gleich einem Telegramm von einem Ort zum anderen zu übertragen: »[D]ie Tatsache, dass wir das Schema eines Menschen nicht von einem Ort zum anderen telegraphieren können, liegt wahrscheinlich an technischen Schwierigkeiten und insbesondere an der Schwierigkeit, einen Organismus während einer solchen umfassenden Rekonstruktion am Leben zu erhalten. Sie liegt nicht an der Unmöglichkeit der Idee.« Norbert Wiener: *Mensch und Maschmaschine: Kybernetik und Gesellschaft*, Frankfurt a.M.: Metzner 1958, S. 101.

37 | Gilbert, *A Vision of the Grail*, 1992, S. 96. Übersetzung nach Lily E. Kay: *Das Buch des Lebens. Wer schrieb den genetischen Code*, München: Hanser 2000, S. 17.

38 | Vgl. Ernst Peter Fischer: *Das Genom*, Frankfurt a.M.: Fischer 2002, S. 30ff.

39 | Kay, *Das Buch des Lebens*, 2000, S. 57.

selbsttätig ausführender Text von Instruktionen sowohl philosophisch unhaltbar als auch sachlich unangemessen ist. Den philosophisch entscheidenden Punkt hat insbesondere Susan Oyama in ihrem einflussreichen Buch *The Ontogeny of Information* von 1985 herausgearbeitet. Oyama zielt darin in erster Linie auf das Konzept der Information als einer Entität, die den Lebensprozessen präexistiert und sie steuert. Sie erkennt darin die von Ryle als »Geist in der Maschine«⁴⁰ beschriebene metaphysische Konstruktion einer mentalen Entität, die zugleich als kausaler Ursprung der körperlichen Aktivitäten fungiert; eine Konstruktion, die sie für ungeeignet hält, biologische Prozesse zu erfassen:

»Wo auch immer die kognitiv-kausale Funktion untergebracht ist, ob im Geist Gottes, in Drieschianischen Lebensenergien oder in kleinen Computerprogrammen in der Zelle, solange sie als präexistierend und separiert von ihrer materiellen Realisation angesehen wird, kann sie Lebensprozesse nicht beleuchten.«⁴¹

Auch auf der phänomenalen Ebene wurde die Verklärung der DNA zu einem ursprünglichen Bewegter scharf angegriffen. So schrieb etwa der Genetiker Richard Lewontin 1992 in seinem Artikel *The Dream of the Human Genome*:

»Die DNA ist ein totes Molekül und zählt zu den reaktionslosesten, chemisch trägsten Molekülen der Welt [...] Die DNA ist nicht nur unfähig, Kopien ihrer selbst herzustellen [...] sie ist auch nicht in der Lage, irgendetwas anderes zu ›machen‹. Die lineare Nukleotidsequenz in der DNA wird von der Zellmaschinerie benutzt, um zu bestimmen, welche Aminosäuresequenz in ein Protein eingebaut werden soll, und um festzulegen, wann und wo das Protein erzeugt werden soll.«⁴²

Die Verlagerung der Akteurialität von der DNA auf die Zellmaschinerie nimmt der DNA den exorbitanten Status, den ihr die Protagonisten der Molekularbiologie zugeschrieben hatten. Die gesamte Zelle und das Zytoplasma, das – wie Evelyn Fox Keller anmerkt – durch die »kraftvollen Metaphern ›Information‹ und ›Programm‹« von der »räumliche(n) Karte« der Wissenschaft verdrängt worden war,⁴³ erscheint im Zeitalter von Epigenetik und Postgenomics wieder auf der Bildfläche.

40 | Susan Oyama: *The Ontogeny of Information. Developmental Systems and Evolution*, Durham: Duke University Press 2000, S. 14 (eigene Übersetzung).

41 | Oyama, *The Ontogeny of Information*, 2000, S. 15 (eigene Übersetzung).

42 | Richard Lewontin: *It Ain't Necessarily So: The Dream of the Human Genome and Other Illusions*, New York: New York Review Books 2001 zitiert nach Evelyn Fox Keller: *Metaphern der Biologie im 20. Jahrhundert*, München: Kunstmann 1998, S. 41.

43 | Keller, *Metaphern der Biologie im 20. Jahrhundert*, 1998, S. 43.

8.8 VOM SUBSTITUT ZUM NUTZNIESSER DER NATUR: DIE BIOLOGISIERUNG DER CHEMIE

In Bezug auf die Vorhersage von enzymatischen Funktionalitäten und Biosynthesewegen ausgehend von DNA-Sequenzen lässt sich sagen, dass grundsätzlich Annotationen von Nukleotid-Sequenzen, also die Zuweisung einer bestimmten Protein-Funktion zu einem DNA-Abschnitt, bei genügend hoher Homologie beziehungsweise Identität der abgeleiteten Aminosäuresequenzen zwischen bekannten und noch nicht charakterisierten Proteinen häufig ein gutes Mittel zur Vorhersage einer Funktionalität bietet. Eine sichere Vorhersage der für eine ganz bestimmte Funktion notwendigen Veränderungen innerhalb der Gensequenz oder der durch sie codierten Aminosäuresequenz im Sinne einer gezielten Veränderung ist nicht leicht möglich. Oft wird für Änderungen der Funktion eines Proteins ein experimentelles Design benutzt, das randomisierte Schritte enthält und auch die Kenntnis der dreidimensionalen Struktur eines Proteins ist dafür oft von enormer Bedeutung. Das heißt, dass eine Vorhersage der vollständigen Funktion von neuen und noch nicht experimentell untersuchten Enzymen anhand von definierter Information etwa einer Nukleotid- oder Aminosäuresequenz allein nicht hinreichend möglich ist.

Um Biosynthesewege zu verstehen, ist es nützlich, einige zugrunde liegende Prinzipien zu verdeutlichen. Die entscheidenden Biomoleküle für die Biosynthese sind Enzyme, die eine Polypeptid-Grundstruktur besitzen und Reaktionen in einzigartiger Weise katalysieren. Enzym-Artefakte, die mit natürlich vorkommenden Enzymen gleichgesetzt werden können, sind nach momentanem Stand nicht »de novo« zu designen, da sich die Komplexität des Aufbaus in Kombination mit der Funktionsweise eines Enzyms zu weiten Teilen einer Planung entzieht. Das ist insbesondere der Fall, wenn es keine Vorlagen aus der Natur gibt. Es gibt jedoch einige beeindruckende Arbeiten in dieser Richtung und Kiss et al. schreiben im Schlusswort ihres Aufsatzes über computergestütztes Enzym-Design, dass Lösungen zur Herstellung von artifiziellen Enzymen »in Sicht« sind.⁴⁴ Dieser Aussage stehen die bisherigen Errungenschaften auf diesem Gebiet entgegen. Die generelle Frage nach dem sinnvollen Gebrauch des Begriffs »Design« in der chemischen Synthese, ob von kleinen organischen Molekülen wie Naturstoffen oder von Bio-Makromolekülen wie Enzymen, ist berechtigt.

Die Aufbruchsstimmung zur Vollendung der Synthesekenntnisse und dem vollständigen Verständnis von Enzymen hat sich seit Walden gehalten und wurde durch molekularbiologische und strukturelle Einblicke weiter genährt. Die Frage, ob die Möglichkeit einer »de novo« Synthese von Enzymen (quasi als Krönung der organischen Synthese) realisiert werden kann, ist letztlich ganz offen. Dieser Gedanke ist von Bedeutung für Felder wie das der Synthetischen Bio-

44 | Vgl. Gert Kiss, N. Çelebi-Ölçüm, R. Moretti, et al.: Computational Enzyme Design, in: *Angewandte Chemie*, (Int. Edition), 52, 2013, 5700-5725.

logie, die generell auf einem technischen Verständnis biologischer oder biomolekularer Prinzipien beruhen.⁴⁵

Biotransformationen sind grundsätzlich aus zwei Gründen für Synthesechemiker von Bedeutung: 1.) wegen der Fähigkeit von Mikroorganismen, wie zum Beispiel Bakterien, große Mengen an Biomasse und eine Fülle verschiedener Enzyme in kurzer Zeit zu produzieren (zu bio-synthetisieren), sowie 2.) der Nutzung der Chemo-, Regio- und Enantioselektivität von Enzymen. Außerdem kann die Biologie in Fällen nützlich sein, für die es keine klassische synthetische Lösung gibt, oder sie vermag eine Erweiterung des synthetischen Repertoires der Chemiker zu bieten.⁴⁶ Die Biosynthese und die klassische chemische Synthese ergänzen sich als analytische und synthetische Disziplinen.

Enzymatische Synthesen und Biosynthese-Schritte werden erst in jüngerer Zeit häufiger genutzt. Besonders wichtige Hürden, die in der Etablierung solcher Verfahren genommen werden müssen, sind das Umrüsten oder Neubauen von Prozessanlagen samt kostenaufwendiger Prozessoptimierungen, da klassisch-chemische und biochemische Prozesse nicht immer leicht zu kombinieren sind. Wichtigste Hilfestellung aus den Geisteswissenschaften könnten hier Denkfiguren sein, die weg vom mechanizistischen Denken führen und wertvoller und praktikabler sind für die Diskussion von Reaktionen und Synthesen als die bisherigen Metaphern.⁴⁷

Der Begriff Biosynthese steht für die Synthese von Metaboliten und Naturstoffen in biologischen Systemen, ausgehend von natürlich vorkommenden Substanzen. Im weiter gefassten Sinne fallen darunter auch Synthesen, die mit Hilfe von biologischen Strukturen, wie Enzymen, als Biokatalysatoren durchgeführt werden. Synthesen in biologischen Systemen unterscheiden sich rein von der Chemie her nicht von klassischen Synthesen. Anders formuliert: Ein Lebewesen oder ein Chemiker sind in der Lage, eine große Anzahl chemisch identischer existenzfähiger Moleküle zu synthetisieren. Die Natur erschafft das ihr Notwendige im Rahmen der fortwährenden Evolution, so wie der Synthesechemiker zu weiten Teilen nach seiner Planung und Intuition. Allerdings unterscheidet sich die Art und Weise, »wie« künstliche organische Synthesen und Biosynthesen realisiert werden deutlich voneinander. Das »wie« bezüglich der Synthese rückt hier ganz besonders in den Mittelpunkt.

Biosynthesereaktionen umfassen die Synthesen von vielzähligen Verbindungen, die für Lebewesen essenziell sind. Sie sind meist aus Enzym-Kaskadenreak-

45 | Vgl. Werner Kogge, M. Richter: Synthetic biology and its alternatives. Descartes, Kant and the idea of engineering biological machines, in: *Studies in History and Philosophy of Biological and Biomedical Sciences* 44(2), 2013, 181-189.

46 | James E. Lerescheu, H.-P. Meyer: Chemocatalysis and Biocatalysis (Biotransformation): Some Thoughts of a Chemist and of a Biotechnologist, in: *Organic Process Research & Development*, 10, 2006, 572-580.

47 | Vgl. Kogge, Richter, Synthetic biology and its alternatives, 2013.

tionen aufgebaut, die von Sequenzen aus einzelnen Enzymen, aus Enzymkomplexen oder Mega-Synthasen aufgebaut sind. Naturgemäß unterscheiden sie sich schon allein durch den »apparativen Aufbau« in einer Zelle. Biosynthesewege sind in lebenden Systemen evolvierbar. Interessant ist die Tatsache, dass bei manchen Organismen die Zahl der Naturstoffe größer ist als die der Genprodukte. Somit müssen Enzyme und Biosynthesewege für die Erzeugung molekularer Diversität genutzt werden. Für die Erzeugung bioaktiver Stoffe haben Richard Firn und Jones ein eindrückliches Modell aufgestellt.⁴⁸ Es baut auf der Poly-Reaktivität von Enzymen und der Annahme, dass Bioaktivität von Naturstoffen selten ist. Im sogenannten Matrix-Modell können alle Enzyme der metabolischen Matrix mehrere Syntheseschritte ausführen und somit kann eine hohe Zahl an Verbindungen »in vivo« synthetisiert und hinsichtlich ihrer Bioaktivität getestet werden. Dieses Screening unterscheidet sich als dynamischer Prozess grundsätzlich von zum Beispiel kombinatorischen Ansätzen der organischen Wirkstoff-Synthese. Ein Vergleich von Stoffgruppen mit biologischer Aktivität, bei denen einerseits Naturstoffe sowie auch Synthetika nach molekularem Aufbau und nach chemischen Gruppen analysiert wurden, lieferte erstaunliche Aufschlüsse. Nicht nur im atomaren Aufbau unterscheiden sich diese Substanzkollektionen bioaktiver Stoffe deutlich, sondern auch im Vorkommen und in der Zusammensetzung hinsichtlich chemischer Funktionalitäten. Außerdem kommen in den Arten, aus denen die Naturstoffe isoliert wurden, unterschiedlich viele Naturstoffe aus bestimmten chemischen Stoffgruppen vor.⁴⁹ Demnach decken bioaktive Naturstoffe einen besonderen Bereich der Chemie ab.

Es gibt in der Natur viele Biosynthesestufen und Wege, die sich als Variation von bestimmten Themen verstehen lassen. Grundsätzlich gilt für die »de novo« Synthese von Biosynthesewegen das Gleiche, was wir in Hinblick auf Enzyme gesagt haben.

8.9 EIN WORT ZUM SCHLUSS AUS SICHT DER (BIO)CHEMIE

Die chemische Synthese ist für das Leben im modernen Alltag unersetzlich und wesentlich für die technisierte Gesellschaft. Eine besondere Gefahr besteht im Glauben und in der Erwartung, alle lebenswichtigen Dinge beliebig synthetisieren zu können.

Die Erwartungen, die an die Synthese gerichtet werden, werden größer. Die Bedeutung von Synthese für Bereiche wie Gesundheit und Ernährung (Synthese

48 | Richard D. Firnu, C.G. Jones: Natural products – a simple model to explain chemical diversity, in: *Natural Product Reports*, 20, 2003, 382-391.

49 | Thomas Henkel, R.M. Brunne, H. Müller et al.: Statistical Investigation into the Structural Complementarity of Natural Products and Synthetic Compounds, in: *Angewandte Chemie*, (Int. Edition), 38, 1999, 643-647.

von Wirkstoffen, Implantaten, Zahnersatzmaterialien, Kosmetika, Lebensmitteln etc.) zeigt dies deutlich. Es entwickelt sich ein ökonomischer Markt, was wiederum dazu führt, dass hinsichtlich der wissenschaftlichen Forschung und Entwicklung von Synthesestrategien ein Spannungsverhältnis zwischen Unabhängigkeit der Forschung einerseits und der marktorientierten Konzeption von Forschung und Entwicklung im Korsett finanzieller Abhängigkeit andererseits entsteht. Aus dieser Marktorientierung resultiert eine entsprechende Kommunikation und Vermittlung nach außen, mit Konzepten, die Zeitgeist-Trends folgen, ohne über ein ausreichendes Regulativ durch einen radikal fragenden wissenschaftlichen Diskurs zu verfügen. Wünschenswert wäre an dieser Stelle eine konzeptuelle Reflexion unter Einbezug unterschiedlicher wissenschaftlicher Disziplinen aus Natur- und Geisteswissenschaften, die mehr Streitbarkeit innerhalb forschersicher Planung und Ausrichtung zulässt.⁵⁰ Die Wahrnehmung solcher Stimmen ermöglicht Interdisziplinarität und damit eine Bestimmung der Bedeutung von ›Synthesis‹ in einem umfänglicheren und angemesseneren Sinne. Kurzschlüssige Folgerungen, die zu schnell von besonderen Phänomenen zu allgemeinen Konzepten führen, ließen sich dadurch wahrscheinlich besser vermeiden. Gerade für solche Fälle, in denen die besonderen Phänomene noch nicht ausreichend verstanden sind, hat dies große Bedeutung.

Wir plädieren auch für mehr Beharrlichkeit hinsichtlich der gedanklichen Durchdringung von Forschungskonzepten, sodass ein konzeptuelles Verständnis des bereits Erreichten einer Orientierung an möglicherweise Erreichbarem nicht nachgeordnet wird – ohne dass dabei der Mut fehlt, Neuland zu erschließen.

Ein weiterer Aspekt ist hier zu bedenken: Das Selbstverständnis von Synthese und Biosynthese im Rahmen eines technisierten Denkens läuft Gefahr, dass die klassische chemische Synthese und die Biosynthese nicht als komplementäre Disziplinen angesehen werden und damit in ihrer jeweiligen Fülle nicht ausgeschöpft werden können. Damit werden die Möglichkeiten der Synthese deutlich eingeschränkt. Innerhalb der organischen Chemie stellt das Vorantreiben dieser Ergänzung und die Implementierung von biologisch orientierten Syntheseprinzipien im Rahmen von nachhaltigen Ansätzen und naturnaher Lösungen eine aussichtsreiche Strategie dar.

Die Belastung der organischen Synthese und Biosynthese mit überzogenen Erwartungen birgt die Gefahr, das Konzept der Synthese sowohl aus den theoretischen als auch aus den praktischen Zusammenhängen zu lösen, in denen es nur situiert und wirksam erscheinen kann. Die Chemie und Biowissenschaften haben mit der Synthetischen Biologie ein Feld eröffnet, das zwar so weit trägt, wie die Nutzung von schon vorhandenen, modifizierten, natürlichen Funktionssys-

50 | Vgl. Werner Kogge, B. Griesecke: C-ELSI. Für eine neue Rolle des Faktors Kultur in der Wissenschafts- und Technikgestaltung, in: Birgit Griesecke: *Fremde Wissenschaft? Konzepte geistes- und kulturwissenschaftlicher Wissenschaftsforschung*, Berlin: kadmos 2013.

temen reicht, das aber als ein allgemeiner Ansatz zur ›de novo‹ Herstellung von Enzymen und Biosynthesewegen oder gar Lebewesen kritisch betrachtet werden muss. Wissenschaftler, die noch nicht verstandene Themen und Prinzipien planmäßig im Sinne eines beliebigen Designs zur Synthese nutzen wollen, werden im Bereich der Synthesis somit mehr der Analytik dienen als der Synthese, die sie beabsichtigen.⁵¹

51 | Vgl. Kogge, Richter, *Synthetic biology and its alternatives*, 2013.

