

2 Chiralität – zur Entstehung und Entwicklung einer chemischen Tatsache

„Chemistry must become the astronomy of the molecular world“ – Alfred Werner, 1905. (Zit. n. Ramberg, 2003, S. 277).

Die Geschichte der Chiralität ist eng mit den grundlegenden Etablierungs- und Konfigurationsprozessen der chemischen Felder des 19. und 20. Jahrhunderts verknüpft. Anhand dieses Fallbeispiels lässt sich auf verschiedenen Ebenen nachvollziehen, wie die Chemie sich im 19. Jahrhundert in der akademischen Landschaft als eigenständige Disziplin etablieren und sich zu dem heterogenen Feld entwickeln konnte, das sie gegenwärtig darstellt. Die molekulare Spiegelasymmetrie erwies sich insbesondere für die Ergründung und Erschließung der molekularen Welt von Bedeutung. So ist die Geschichte der Chiralität untrennbar mit der Entwicklung einer konsistenten Strukturtheorie des Molekularen sowie der Verknüpfung von chemischen Eigenschaften und physikalischen Kräften verwoben. Auch die Sprache der Chemie wurde bezüglich der Formelsprache, Nomenklatur sowie Modellvorstellungen des Molekularen in der Auseinandersetzung mit der Händigkeit von Molekülen nachhaltig geprägt (Cintas, 2007). Die Chiralität wird daher zu den bedeutendsten Entdeckungen in der Chemiegeschichte gezählt, die das Weltbild der Disziplin zum gegebenen Zeitpunkt revolutionierte und bis heute prägt (Frenking, 1998). Mit der Erschaffung wie Abgrenzung eines eigenen Phänomenbereichs der molekularen Welt ging eine kontinuierliche Emanzipation der Chemie als eigenständige Wissenschaft einher sowie eine Stabilisierung ihrer Position im disziplinären Gefüge der Wissenschaften als Ergebnis fortlaufender Grenzarbeit.

Im Kanon der Chemiegeschichtsschreibung hat sich die Chiralität bereits früh etabliert (Cohen, 1912) und nimmt in diesem bis heute eine zentrale Rolle ein, denn die Geschichte der Chemie kann nicht wiedergegeben werden, ohne auf dieses basale Konzept Bezug zu nehmen (Birch, 2016, S: 72ff.). Die Geschichte der Chiralität erzählt gewissermaßen von der Wanderung eines molekularen Konzepts, das seinen Ursprung in der organischen Chemie nahm und von sich

dort aus in Biowissenschaften, Physik und die neueren, hybriden Technowissenschaften wie *Molecular Life Sciences* oder Materialwissenschaften bewegte. Das Konzept der Chiralität ist durch zahlreiche Felder hindurchgewandert und hat dort insbesondere an den hybriden Grenzbereichen der Chemie ihre Spuren hinterlassen, wurde aber auch durch diese stetigen Reibungen selbst laufend verändert. In diesem Prozess der Grenzarbeit zwischen chemischen, geologischen, biologischen und physikalischen Wissenschaften waren die Definitionen, Aneignungen und Umdeutungen von Begriffen und Konzeptionen an den Schnittstellen von Disziplinen stetigen Aushandlungsprozessen ausgesetzt und so präsentieren sich Chiralität wie auch die molekulare Welt nicht als homogene, unveränderliche Größen der Natur. In Anbetracht ihrer *Gemachtheit* lassen sie sich vielmehr als Konstruktionen mit einer widerspenstigen Materialität verstehen, die in ihrem techno-sozialen Kontext zu betrachten sind (Barad, 1999).

Die folgenden Ausführungen stützen sich dabei auf den bestehenden chemiehistorischen Forschungsstand zur Geschichte der frühen Stereochemie.¹ Diese Befunde und Zusammenhänge werde ich entsprechend des vorgestellten theoretischen Rahmenwerkes von Grenzarbeit und Grenzobjekten neuen Lesarten unterziehen und aufzeigen, welche Funktion die Chiralität und die Narration ihrer Entdeckung für Vertreter/innen der Chemie und der Chemiehistoriografie einnimmt. Es wird dargelegt, wie im Diskurs die Chiralität für die *Boundary Work*, die laufende Unterscheidungsarbeit zwischen dem Chemischen und dem Nicht-Chemischen, fruchtbar gemacht und als genuin chemischen Gegenstand vereinnahmt und inszeniert wird. Die in den inhaltlichen Kapiteln verhandelte Grenzarbeit der Chemie angesichts der Hybridisierung wissenschaftlicher Felder ist in ihren Grundzügen bereits in diesen historischen Ereignissen angelegt.

2.1 Der lange Weg zum dreidimensionalen molekularen Weltbild

Die Chiralität wird in der Historiografie des Faches als eine der fundamentalen Konzeptionen der Chemie gehandelt und die kanonisierten Meilensteine ihrer Entdeckung gelten im Zusammenhang mit der Begründung der Stereochemie als Sternstunden (Birch, 2016, S. 72ff.). In der historiografischen Perspektive zeigt sich, wie die Geschichte der Chiralität mit der Geschichte der entstehenden Stereochemie im 19. Jahrhundert verwoben war und wie sich an deren Schnittstelle

1 Siehe: (Gal und Cintas, 2013; Gal, 2013b; Gal, 2006; Gal, 2013a; Hargittai und Hargittai, 1996; Levere, 2001a; Lichtenthaler, 1992; Mauskopf, 2006; Meinel, 2004; Noorduyn et al., 2009; Le Poidevin, 2000; Ramberg, 2000; Ramberg, 2003; Ramberg, 2014; Van der Spek, 2006; Weisberg, 2012).

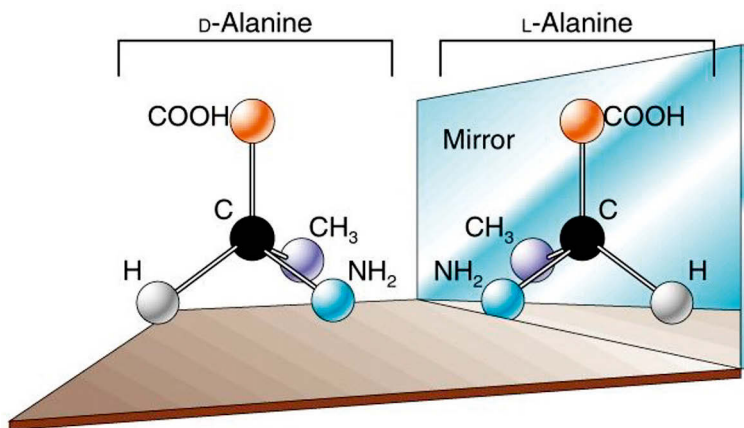
mit der Kristallografie ein molekulares chemisches Weltbild herausbilden und etablieren konnte (Mauskopf, 2006, S. 4). Insbesondere der Übergang von der zwei- zur dreidimensionalen Vorstellung von der Struktur chemischer Stoffe wird in der Chemieggeschichte mit der Feststellung einer strukturellen Spiegelasymmetrie und Unterschieden bezüglich der Polarisierung von Licht in Verbindung gebracht (Ramberg, 2003, S. 1f.). Die Geschichte der Chiralität fällt in ihrer Frühphase mit der systematischen Suche nach unbekannten chemischen Elementen zusammen, sowie mit der Entwicklung einer chemischen Formelsprache und der Erschließung, Beschreibung und symbolischen Repräsentation einer molekularen Welt (Mauskopf, 2006, S. 13). Die Chemie hat sich in diesem Zusammenhang einen eigenen epistemischen Raum geschaffen, der zumindest für einige Zeit nach außen hin abgrenzbar gewesen ist. Physikalische Kräfte, Eigenschaften und Gesetze wie die optische Aktivität, deren Effekte auch in der molekularen Welt wahrnehmbar sind, waren bereits in der Zeit der frühen Stereochemie Gegenstand von disziplinärer *Boundary Work* und Chemiker/innen pflegten einen ambivalenten Umgang mit ihnen. Reduzierbarkeit und Physikalismus drohten den mühsam überwundenen Status einer Hilfswissenschaft wiederzubeleben und es galt deutlich zwischen physikalischen und chemischen Eigenschaften und Prozessen zu unterscheiden.

Chemieprofessorin Pejačević: Also unter Chiralität verstehe ich laienhaft erst einmal die Links- und Rechtshändigkeit in der Natur. Also die Nicht-Deckungsgleichheit von Bild und Spiegelbild. Da gibt es natürlich höhere Dimensionen von Chiralität und andere Definitionen aber das ist für mich das Evidenteste wenn man morgens aufsteht und die Handschuhe vertauscht wenn man aus der Tür geht.

Chiralität, das vom altgriechischen Äquivalent *cheír* (Hand) abgeleitete Kunstwort für Händigkeit, zielt in seiner grundlegenden Bedeutung auf eine Links-Rechts-Asymmetrie in der Natur ab. Der Begriff beschreibt all jene Dinge, die zwar jeweils in einer linken und einer rechten Version vorliegen können, die sich sonst jedoch in allen weiteren Eigenschaften gleichen (Riehl, 2010, S. 1). Es bezeichnet somit all jene Gegenstände, die sich nicht vollständig beschreiben lassen, ohne auf deren Eigenschaft einer inhärenten Rechts-Links-Asymmetrie zu verweisen (ebd.). Diese spezifische Form der Asymmetrie wird als Spiegelbild-Asymmetrie bezeichnet, denn im Falle händiger bzw. chiraler Objekte sind Bild und Spiegelbild eines Objektes nicht miteinander in Deckung zu bringen (Hargittai und Hargittai, 1996). Diese Definition geht auf Lord Kelvin² im Jahre 1884 zurück: „*I call any geometrical figure, or any group of points, chiral, and say it has chirality, if its image in a plane mirror, ideally realized, cannot be brought to coincide with itself*“ (Thomson, 1894, S. 619; Fußnote).

2 Lord Kelvins voller Name lautet William Thomson, 1st Baron Kelvin (1824 – 1907), was in wissenschaftshistorischen Darstellungen häufig zu Verwirrung führt.

Die Hände sind entsprechend ein naheliegendes Beispiel für chirale Objekte, wird man wie die oben zitierte Professorin der anorganischen Chemie in einer Interviewsituation dazu aufgefordert, über Chiralität zu sprechen und diese zu definieren. So weist ein Paar menschlicher Hände in der Regel dasselbe Gewicht auf, hat den gleichen anatomischen Aufbau und Siedepunkt, allerdings sind sie mit ihrem jeweiligen Spiegelbild nicht in Deckung zu bringen. Eine rechte Hand kann man drehen und wenden wie man möchte, man müsste sie in sich umstülpen um aus ihr eine linke Hand zu schaffen. In diesem Zusammenhang wird der Begriff der Spiegelasymmetrie³ synonym für Händigkeit bzw. Chiralität verwendet. Die Hände sind somit in der Relationskategorie von rechts und links gefasst, ohne die sie sich nicht vollständig beschreiben lassen (vgl. Abb. 2.1). Eine Hand kann nicht abschließend beschrieben werden ohne auf diese Relationskategorie zu verweisen, sie ist stets entweder rechts oder links ausgerichtet (McManus, 2002). Als achiral werden hingegen Gegenstände bezeichnet, die, ob symmetrisch oder asymmetrisch, mit ihrem Spiegelbild in Deckung zu bringen sind, sprich: die weder links oder rechts ausgerichtet, gedreht oder gewunden sind. In Chemievorlesungen wird zu diesem Zweck häufig die Demonstration vorgenommen, dass der/die Dozent/in vergeblich versucht, einen linken Handschuh über die rechte Hand zu streifen.



Schematische Darstellung und Demonstration der molekularen Händigkeit anhand der spiegelbildlichen Isomere des Alanins. Copyright 1999 John Wiley and Sons, Inc. All rights reserved.

3 Neben der Spiegelbild-Asymmetrie kennt die Geometrie noch weitere Formen der Asymmetrie, die bei Formen vorliegt, die zwar ebenfalls nicht symmetrisch sind, sich aber nicht verhalten wie Bild und Spiegelbild (Hargittai und Hargittai, 2009, S. 25ff.).

Doch wofür der Physiker Lord Kelvin mit dem Begriff der Chiralität im Jahre 1884 einen einheitlichen Namen fand, der sich gegen konkurrierende Bezeichnungen wie der Dissymmetrie durchsetzte und etablierte, war nicht seine eigene Entdeckung (Gal, 2007). Mit dem Begriff der Chiralität hatte sich 1904 ein Konzept sedimentiert, das bis dahin ein halbes Jahrhundert benötigt hatte, um eine Vielzahl an chemischen und physikalischen Phänomenen durch kollektives *sense making* sowie Ein- und Abgrenzungen zu einem epistemischen Komplex zu verweben, der unter einem gemeinsamen Begriff vereint werden konnte. Jahrzehnte der Experimente, Beweisführungen, Veröffentlichungen, Falsifizierungen, polemische Schriftwechsel und akademische Institutionalisierungen waren diesen scheinbar singulären Entdeckungen vorausgegangen (Ramberg, 2003). Dieser Entstehungs- und Etablierungsprozess ereignete sich in den sich überlappenden Bereichen der frühen organischen Struktur- bzw. Stereochemie (ca. 1840er bis 1880er Jahre) und der Kristallografie, die in der Folge geschildert werden. Die Geschichte der Chiralität nachzuvollziehen ist von besonderem Interesse, denn es zeigt sich, dass hier grundlegende Dichotomien und Grenzziehungen der chemischen Felder angelegt wurden: zwischen anorganischer und organischer Chemie; zwischen physikalischen Kräften und chemischen Eigenschaften sowie die Unterscheidung zwischen belebter und unbelebter Materie (Ramberg, 2000, S. 53f.).

In der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts erlebte die akademische Chemie eine Professionalisierung. Es gelang ihr, sich an den Hochschulen Europas als eigenständige akademische Disziplin zu etablieren und sich von ihrem Status als Hilfswissenschaft im Dienste der Medizin, des Minenwesens und der Geologie zu emanzipieren (Powers, 2012). Es waren einflussreiche Zentren chemischer Gelehrsamkeit entstanden, wobei insbesondere die organische Chemie eine führende Rolle einnahm (Ramberg, 2003, S. 11). In ihrer historischen Narration gruppieren sich die Institutionen hierarchisch um einzelne Persönlichkeiten, wie etwas das chemische Institut der Universität Gießen⁴, dessen Leiter Justus Liebig neue Standards in der Ausstattung von Chemielaboren setzte, die europaweit Schule machte (Morris, 2015, S. 86ff.). Insbesondere in Deutschland⁵ und Frankreich⁶ bewegten sich dabei die historisch kanonisierten Zentren dieser Bewegung, was in

-
- 4 Zum Überblick über die Zentren und Peripherien der europäischen akademischen und industriellen Chemielandschaft des 19. Jahrhunderts siehe (Knight, 1998; Homburg et al., 1998).
 - 5 Zu den einflussreichsten Zentren der organischen Chemie gehörten zur Mitte des 19. Jahrhunderts folgende Hochschulstandorte und prominente Lehrstühle: München und Gießen (Justus Liebig), Berlin (Wilhelm Hofmann), Würzburg (Johannes Wislicenus, Emil Fischer, Arthur Hantzsch), Bonn (August Kekulé), Leipzig (Maximilian Kolbe), Heidelberg (Robert Bunsen, später August Kekulé) (Ramberg, 2003, S. 13).
 - 6 In Frankreich bestand das Zentrum der organischen Chemie überwiegend in Paris mit der Herausbildung erster Fachverbände und angesehenen Chemikern wie Louis Pasteur, Claude Louis Berthollet und Joseph Louis Gay-Lussac (Bensaude-Vincent und Stengers, 1996, S. 97).

Anbetracht der zeithistorischen Ereignisse wie dem Deutsch-Französischen Krieg (1870-1871) und der rasch fortschreitenden Industrialisierung beider Länder nicht selten zu Reibungen in der chemischen *community* führte, die trotz akademischen Austausches durch sich permanent verschiebende Ländergrenzen zerschnitten wurde (Vaupel, 2007). So führten Entwicklungen und Entdeckungen einzelner Chemiker/innen insbesondere im Kontext des Industriekapitalismus gar zu einer nationalen Identifikation mit dem chemischen Fortschritt und einer ideologischen Vereinnahmung (Fell, 2000, S. 9ff.). Aus den wissenschaftlichen Leistungen Louis Pasteurs oder Antoine de Lavoisiers wurden dadurch *französische*, wie es der elsässische Chemiker Adolphe Wurtz 1868 auf den Punkt bringt: „*La chimie est une science française: elle fut constituée par Lavoisier d'une immortelle mémoire*“.⁷ Die Geschichte der Chiralität ist daher u.a. in diesem historisch-gesellschaftlichen Klima zu verorten, die sich primär zwischen deutschen, niederländischen und französischen Hochschulen abspielten, stets begleitet von nationalistischen Ressentiments und Verzögerungen in der Rezeption aufgrund von Sprachbarrieren (Van der Spek, 2006).

Der Startpunkt der Geschichte der Chiralität wird in der Chemiegeschichte in der Überlappung zweier damals emergenter Felder in den 1840er Jahren verortet: Kristallografie und (organische) Stukturchemie, die sich zu jener Zeit einander in einigen Punkten annäherten. Mitte des 19. Jahrhunderts bildete sich die Kristallografie allmählich aus der dem Minen- und Hüttenwesen dienlichen Boden- und Gesteinskunde sowie der Mineralogie heraus und knüpfte in ihrer Beschreibung kristalliner Gebilde zunehmend Beziehungen mit den chemischen Wissenschaften (Mauskopf, 2006; Klein, 2016). Diese waren rasch von beidseitigem Interesse, denn die Kristallisation zählte neben Destillation, Stofftrennung und Aufreinigung zu den grundlegenden Methoden der im Aufstieg begriffenen organischen Chemie und stellte diese vor neue epistemische und methodische Herausforderungen. In diesem Zusammenhang näherten sich diese beiden Felder einander an, zumal nicht nur im Berg auf *natürlichem* Wege entstandene kristalline Formationen wie Minerale, sondern auch zunehmend im Labor hergestellte, aufgereinigte und synthetische Kristalle von Salzen und Säuren für beide Seiten von Interesse waren (Ramberg, 2003, S. 4ff.). Vertreter/innen der organischen Chemie, die zum gegebenen Zeitpunkt in die kollektive Hervorbringung der molekularen Welt involviert waren, beschäftigten sich nicht nur mit Synthesen von Naturstoffen oder künstlichen Farbstoffen, sondern auch zunehmend damit, wie sich die makroskopisch beobachtbaren Stoffveränderungen, Reaktionen und

7 Zitiert nach (Partington, 1961, S. 488). Dies rief in der Folge den Unmut deutscher Kolleg/innen wach, die Lavoisier gar die Zugehörigkeit zur Chemie in Abrede stellten und ihn als Physiker bezeichneten, während sie die Errungenschaften deutscher Chemiker hervorhoben (ebd.).

Stoffzusammensetzungen klassifizieren und einheitlich beschreiben lassen (Meinel, 2004).

Basierend auf der Trennung und Aufreinigung von Stoffen wurde die elementare Zusammensetzung von Stoffen und Gemischen bestimmt und diese in einer intersubjektiv intelligiblen, rationalen Formel bzw. einer Strukturformel wiedergegeben. Die theoretische Grundlage für diese Bestrebungen lieferte John Dalton (1766 – 1844). Er unterschied erstmals systematisch zwischen Element und Verbindung und begründete eine Atomtheorie, die besagt, dass chemische Verbindungen aus in sich nicht mehr teilbaren elementspezifischen Atomen bestehen, die ein ebenso elementspezifisches Atomgewicht (bzw. Atommasse) aufweisen. Bei chemischen Reaktionen werden die Atome im Molekül jeweils neu geordnet, niemals aber zerstört (Brock, 1993, S. 140ff.). Daltons Atomtheorie prägte zwar die Suche und Klassifikation chemischer Elemente, denn fortan orientierten sich eine Reihe von Wissenschaftler/innen an der spezifischen atomaren Masse von Elementen (Van Tiggelen, 2001), löste aber auch Kontroversen aus, denn längst nicht alle waren vom sog. Atomismus überzeugt (Mauskopf, 2006, S. 13). Es gilt an dieser Stelle zudem anzumerken, dass das Atom des 19. Jahrhunderts nicht der heutigen Konzeptionen entspricht. Der Atombegriff diente Dalton eher als eine Heuristik, eine symbolische Vorstellung davon, wie die kleinsten Teilchen eines Elementes bezüglich Masse und Gewicht beschaffen sein müssen (Ramberg, 2003, S. 52).

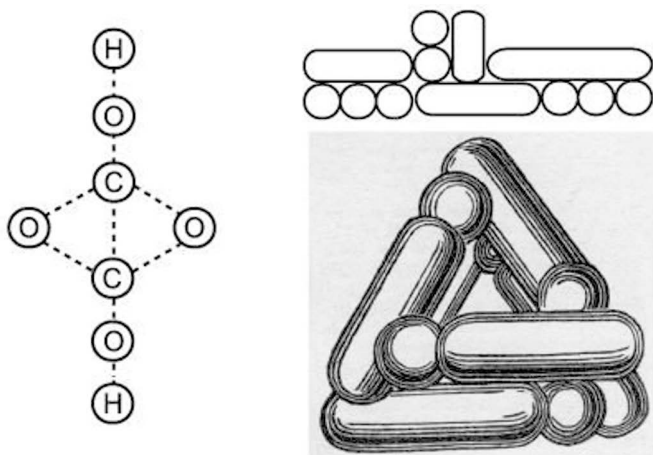
Auch wenn Daltons Theorie längst nicht auf Konsens stieß und noch viele Variablen und Parameter im Dunkeln blieben, bot der Atomismus Chemiker/innen ein pragmatisches mentales Modell, das der Beschäftigung mit der Suche nach neuen Elementen dienlich war (Steinhauser, 2014, S. 39ff.). Mit der wachsenden Zahl bekannter Elemente und Erkenntnissen darüber, wie diese sich zueinander verhalten, wurden zu diesem Zweck immer ausgefeiltere Experimentalsysteme und Messapparaturen entwickelt, etwa Justig Liebig's „Kali-Apparat“, der in der Lage war, bei einer Probe einer Kohlenstoffverbindung durch Verbrennung und Bindung von Kohlenstoff an eine eingefüllten Kalium-Lauge das jeweilige Verhältnis von Kohlenstoff, Sauerstoff, Wasserstoff und Stickstoff zu bestimmen (Liebig, 1831). Mit diesem Gerät waren in der Folge nicht nur präzisere stoffliche Bestimmungen möglich, sondern auch entsprechende Beschreibungen der Positionen von Atomen in einer Struktur. Aus diesen entwickelten sich schließlich erste Heuristiken von Reaktionsgleichungen und Summenformeln. Jöns Jakob Berzelius, der als Begründer der organischen Chemie gilt, führte in den 1820er

Jahren eine Fomelkonvention ein, die auf Abkürzungen von Elementnamen⁸ und Dalton'schen Massezahlen beruhte (Berzelius, 1806).

Daltons Verfahren zur Bestimmung des elementspezifischen Gewichtes von Atomen wurde von späteren Chemiker/innen entsprechend aufgegriffen, weiterentwickelt und auch in grafische Strukturformeln übersetzt (Bensaude-Vincent und Simon, 2012a). Diese Versuche, eine Brücke zwischen makroskopischer Welt von Materialien und Stoffen und einer darunterliegenden, molekularen zu schlagen, schlugen sich insbesondere in der (Bild-)Sprache der modernen Chemie nieder (Cintas, 2007). Bekannte Chemiker/innen des 19. Jahrhunderts wie August Kekulé, Aleksandr Butlerov oder Alexander Crum Brown entwickelten eine Reihe an grafischen Struktur- und Molekülmodellen (vgl. Abb. 2.2), die dies zum Ausdruck brachten und sich nach und nach gegeneinander durchsetzten und in die Lehrbücher der organischen Chemie integriert wurden (Meinel, 2004). Die sich fortschreitend weiterentwickelnden Strukturformeln dienten als symbolische Repräsentationen des molekularen Raumes, der in diesem Zusammenhang durch die organische Strukturchemie konstituiert wurde (Ramberg, 2003, S. 52). Darüber hinaus erweisen sie Strukturformeln beim *reasoning* über die Eigenschaften von molekularen Verbindungen als hilfreich. So wurden zunehmend die Mechanismen *hinter* den Experimenten im Labor theoretisch nachvollziehbar sowie intersubjektiv kommunizierbar (ebd., S. 28ff.).

Bei den zahlreichen chemischen Experimenten zur Bestimmung molekularer Strukturen und Stofftransformationen, die während der chemischen Reaktion erfolgen und der theoretischen Beschreibung dieser Phänomene, wurde man auf ein Kuriosum aufmerksam: So konnte es durchaus vorkommen, dass für mehrere Proben zwar dieselbe Summenformel (und auch Molekülmasse) gilt, sich die Atome aber bezüglich ihrer Anordnung in der molekularen Struktur unterscheiden oder gar verschiedene physikalische Eigenschaften aufweisen (Mauskopf, 2006, S. 5). Jöns Jakob Berzelius (1779 – 1848) beschrieb diesen Sachverhalt erstmals im Jahre 1831 mit dem Begriff der Isomerie (Berzelius, 1831). Das an die altgriechische Sprache angelehnte Kunstwort bedeutet „zusammengesetzt aus gleichen Teilen“. Sein Versuchsobjekt bildeten zwei verschiedene Formen der Weinsäure $C_4H_6O_6$ und ihrer Kaliumsalze, die zwar die gleiche chemische Zusammensetzung aus Kohlenstoff, Wasserstoff und Sauerstoff aufwiesen, allerdings unterschiedlich

8 Diese schriftlichen Abkürzungen wie etwa „C“ für Kohlenstoff und „S“ für Schwefel, die großteils heute noch gültig sind, ersetzen sukzessive symbolische Repräsentationen (die mit den Symbolsystemen der vormodernen Alchemie verwandt waren), wie sie etwa noch Dalton gebrauchte. Auf der epistemisch-praktischen Ebene war man dazu übergegangen, die vorwissenschaftlichen experimentalpraktischen Beschreibungen und technischen Anleitungen, die im Sinne des alchemischen Erbes eher handwerklichen Kochrezepten glichen, in rationale Formeln zu übertragen (Meinel, 2004).



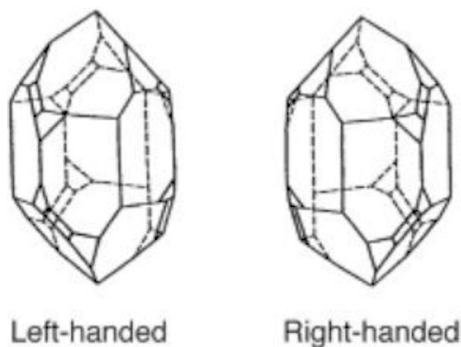
Vergleich zweier Molekülmodell-Konventionen, links nach Crum Brown (Oxalsäure), der die Elementensymbole als kreisförmige Atombällchen dargestellt und rechts Kekulé (Benzen-Ring mit Isopropylalkohol) in dessen typischer „Würstchen“-Darstellung.

auskristallisierten (Collet et al., 2006, S. 13). Dies veranlasste Berzelius und eine Reihe anderer Wissenschaftler/innen, die den Rätseln der Strukturchemie auf den Grund gingen, sich systematisch mit Kristallograf/innen in Verbindung zu setzen. Denn diese hatten bereits ein ähnliches Phänomen bei Kristallen beobachtet, die sich in ihrem Grundaufbau glichen, allerdings teilweise nur an einer Ecke Abnormitäten (Asymmetrien) aufwiesen (vgl. Abb. 2.3). Während der Chemiker Eilhard Mitscherlich (1894 – 1863) solche Kristalle als hemihedrisch bezeichnete (Mauskopf, 2006, S. 4), begründete der Kristallograf Carl Friedrich Naumann die Enantio-Terminologie in der Unterscheidung rechts- und links-orientierter räumlicher Kristallkörper (Gal, 2007).

Die fortschreitende Etablierung von Formelystemen, Nomenklaturen und Strukturmodellen bildeten in der Erschließung des molekularen Raumes sowie der Erlangung einer gewissen fachlichen Autonomie der Chemie einen wichtigen Ankerpunkt (Ramberg, 2003, S. 3). Die molekulare Struktur wurde seit den 1830er Jahren gewissermaßen zum Leitparadigma der organischen Chemie erhoben. Das klassische molekulare Modell ging davon aus, dass jede chemische Verbindung über eine charakteristische molekulare Struktur verfügt. Die Vorstellung der molekularen Struktur entsprach einem regelmäßigen Muster, das sich aus einer spezifischen Anzahl von Bindungen zwischen elementspezifischen Atomen ergibt. Gewissermaßen handelte es sich um eine theoretisch-abstrakte, aber dennoch empirisch überprüfbare Klassifizierung der bekannten chemischen Verbindungen und der Transformationen, die sie während einer chemischen

Reaktion durchlaufen (Ochiai, 2013; Ochiai, 2015). Ein essentieller Bestandteil der Strukturtheorie war das Konzept der chemischen Bindung und der Konfiguration eines Moleküls, die sich im Falle einer chemischen Reaktion in der Re-Kombination der Atome und Bindungen auf der Grundlage physikalischer Kräfte wie etwa der Elektrizität⁹ ausdrückt (Ochiai, 2013).

Im 19. Jahrhundert betrieben die Akteur/innen der organischen Chemie in ihren Auseinandersetzungen mit diesen theoretischen Prämissen großen Aufwand, chemische Eigenschaften, Begriffe und Theorien von physikalischen abzugrenzen. Dies wird insbesondere im Verhältnis zur optischen Aktivität von Stoffen deutlich, nicht zuletzt in ihrer Verwobenheit mit der Geschichte der Chiralität. Die optische Aktivität, die bereits seit 1815 bekannt war, führte die Vertreter/innen der Strukturchemie mit den



Geometrisch-schematische Gegenüberstellung enantiomorpher Quarzkristalle. Übernommen aus (Matsuura und Koshima, 2005).

nen der Kristallografie zusammen. An dieser Schnittstelle wird in der Chemiehistoriografie die Entdeckung der Chiralität durch Louis Pasteur im Jahre 1848 verortet. Die optische Aktivität¹⁰ bezieht sich auf die Fähigkeit von Stoffen auf die Polarisationsrichtung von Licht einzuwirken. Ziel dieser kristallografischen Experimente und Messungen war es, über die Symmetrieverhältnisse von Kristallen und ihrer physikalischen Eigenschaften, eine mathematisch formulierte,

9 Hierbei sind insbesondere die Valenz- und Typenlehre zu nennen, auf denen weite Teile der chemischen Strukturtheorie der 1830er Jahre beruhen. Die Valenzlehre geht auf August Kekulé (1829–1896) zurück, der davon ausging, dass die sog. Wertigkeit (= Valenz) eines Atoms eines chemischen Elements sich darüber definiert, wie viele Atome eines anderen Elements es im Falle einer Bindung an sich binden kann. Auf diese Weise setzen sich Moleküle aus regelmäßigen Bausteinen zusammen und Bindungen im Molekül entstehen durch die Gesetze der Elektrizität. Diese frühe Bindungstheorie bildete den Ausgangspunkt für Kekulé's Entdeckung des hexagonalen Benzolrings C_6H_6 , dessen vier Kohlenstoff-Atome gleichwertige Bindungen mit Wasserstoffatomen eingehen und eine gleichmäßige Struktur abbilden (Levere, 2001a, S. 137ff.).

10 Jean-Baptiste Biot (1774–1862) führte diesen Begriff um 1815 ein, nachdem eine Reihe Kristallograf/innen und Mineralog/innen wie John Herschel, René Just Haüy, Auguste Laurent und Gabriel Delafosse diese Eigenschaft bei verschiedenen kristallinen Gebilden, u.a. dem Quarz, beschrieben hatten (Gal, 2013a, S. 13).

rationale Theorie des Kristalls zu erarbeiten (Mauskopf, 2006, S. 8). In diesem heterogenen Denkkollektiv bewegte sich in den 1840er Jahren ein noch junger Professor für Chemie, der sich zum gegebenen Zeitpunkt zwar primär mit der Fermentation von Pflanzensäften beschäftigte, den damaligen Kenntnisstand zur optischen Aktivität von Stoffen aber entscheidend erweiterte: Louis Pasteur.

Louis Pasteur (1822 – 1895) griff die bereits von Berzelius untersuchten rätselhaften Kristalle der Weinsäure (gemeinhin als „Weinstein“ bekannt) auf und betrachtete sie unter dem Lichtmikroskop. Was Berzelius offenbar entgangen war, fiel Pasteur in einem bis heute in der Chemiegeschichte zelebrierten *Serendipity*-Moment¹¹ ins Auge (Pasteur, 1922a). Er erkannte, dass die an einer Ecke unterschiedliche Form der Weinsäurekristalle sich am ehesten dadurch beschreiben lässt, dass sie in rechter wie linker Form vorkommen. Er griff zur Pinzette und trennte die einzelnen Kristalle einer Probe entsprechend ihrer Rechts-Links-Asymmetrie in zwei separate Häufchen. Nach dem ebenfalls getrennt voneinander ablaufenden Einschmelzen der Kristalle zeigte sich bei einer Untersuchung im Polarimeter, dass die Flüssigkeiten in ihrer Fähigkeit, Licht zu polarisieren sich völlig entgegengesetzt verhielten (Pasteur, 1922c). Während der eine Stoff die Lichtwelle nach links ableitete, rotierte der andere das Licht rechts herum. Dies entsprach wiederum der Polarisationsrichtung in der jeweiligen Probe der aufgetrennten Ausgangskristalle (Pasteur, 1922b).

Damit war Pasteur ein entscheidender Brückenschlag im chemisch-physikalisch-kristallografischen *reasoning* gelungen, der auch zu einer fruchtbaren Zusammenarbeit zwischen Kristallografie und Strukturchemie führte, die vor Pasteurs Arbeiten wenig gemeinsame Überschneidungspunkte aufwiesen. Louis Pasteur wies 1848 nicht nur einen Zusammenhang von physikalischen Eigenschaften (der optischen Aktivität) und chemischer Struktur nach, sondern auch zwischen der Lösung und kristallinen Form eines Stoffes. Dieses Experiment wurde 2003 als „schönstes Experiment in der Geschichte der Chemie“ (Freemantle, 2003) bezeichnet und gilt als eine der Sternstunden der Chemiegeschichte. Pasteurs Versuch erweist sich als sehr präsent in den identitätsstiftenden Narrationen von Chemiker/innen, wie hier am Beispiel eines Professors der physikalischen Chemie deutlich wird:

11 Das Konzept der *Serendipity* beschreibt einen glücklichen Zufall, bei dem auf nicht bewusst geplantem Wege ein spontaner Einfall bzw. eine wichtige Entdeckung eintritt. Das Konzept der Serendipität ist heute Bestandteil von Innovationspolitiken und -konzepten insbesondere in den angewandten Natur- und Ingenieurwissenschaften mit hohem Bezug auf Produktentwicklung (Folkers, 2016, S. 197). Der Begriff der Serendipität geht auf die Legende der *Drei Prinzen von Serendip* zurück, der ein bedeutendes Narrativ der globalen Kulturgeschichte speiste (Schrott, 2018).

Emeritus Prof. Rameau: Der erste Chemiker—oder Naturwissenschaftler—sollte man sagen (1) der [den Zusammenhang von asymmetrischem Kristall und dessen Lösung] präzise erkannt hat, das wissen Sie wahrscheinlich auch, das ist PASTEUR. [...] Die Beobachtung war, dass er beim Salz in der Weinsäure-Kristalle bekam, die rechts- und linkshändig waren. Da gab's zwei FORMEN und dann hat er die wieder aufgelöst, dann hat er sie von HAND getrennt und rechtshändig und linkshändig herausgebildet [...]. Das war eine ganz bedeutende Erfindung. Ich hab Ihnen da mal ein, zwei mitgebracht [legt aus Steckmodellen gebildetes Molekülmodell auf den Tisch]. Violà, solche Modelle, die wir alle bauen, die (1) hatte er damals noch nicht, das kam ungefähr vierzig Jahre später. Aber dass die GRUNDSätzliche Chiralität in einem Molekül schon DRINsteckt, diese Idee kommt von Pasteur. Also ich persönlich habe so ein paar Lieblingsarbeiten und -Entdeckungen. (1) [Flüstert] Und das zählt zu meinen persönlichen Lieblingsentdeckungen.

Was Herr Rameau an dieser Stelle entsprechend würdigt, ist Louis Pasteurs Leistung, das Phänomen der Chiralität erstmals beschrieben und experimentell nachgewiesen zu haben. Zudem wusste Pasteur einen Zusammenhang zwischen der molekular-abstrakten und kristallin-makroskopisch feststellbaren händigen Asymmetrie herzustellen (Gal, 2007, S. 91). Wie auch er in seiner Ausführung betont, bewies Louis Pasteur eine erstaunliche Kreativität¹², zumal sie wie ihre Zeitgenossen auf keine konkrete Vorstellung von der molekularen Welt zurückgreifen konnten. Die molekulare Welt war erst im Entstehen; etliche Parameter und Prämissen, die heute selbstverständlich erscheinen, waren zum gegebenen Zeitpunkten vage Spekulationen, die Beweisführungen lückenhaft. Die zeithistorischen Dokumente belegen einen pragmatistischen Umgang mit der mikroskopischen Welt der Atome, Moleküle und Strukturen (Ochiai, 2015).

In den 1870er Jahren fand gemäß chemiehistorischem Kanon ein weiterer Durchbruch in der Geschichte der Chiralität statt, der als besonders bedeutend für die Entstehung des molekularen Weltbilds gilt. So haben zwei Forscher zur gleichen Zeit, allerdings räumlich getrennt und unabhängig voneinander, festgestellt, wie die molekulare Spiegelasymmetrie zu erklären ist (Ramberg, 2003, S. 50). Die Chiralität von Molekülen rührt daher, dass ein asymmetrisches tetraedrisches Kohlenstoff-Atom in einer Verbindung vorliegt, das unter seinen vier

12 Chemiker/innen bedienen sich in der Selbstbeschreibung ihres Faches häufig Bezeichnungen der Chemie als *Central Science*, *Interdisciplinary Science* bzw. *Useful Science* (Breslow, 1997). Ein weitere zentrale Zuschreibung in diesem Zusammenhang ist die Kreativität der Chemie und der Chemiker/innen, die nicht nur mit der technoscientifischen Hervorbringung ihrer eigenen Gegenstände (namentlich im Rahmen von Synthesen) assoziiert wird, sondern auch mit einer verblüffenden *wissenschaftlichen* Kreativität von Chemiker/innen. Diese drückt sich etwa in geistvollen mentalen Schlussfolgerungen und Entdeckungen aus einem begrenzt verfügbaren oder bekannten Forschungsstand aus (Dolino, 2018).

Bindungspartnern verschiedene räumliche Konbinationmöglichkeiten der Atome zulässt. Diese stehen sich in einem Strukturmodell wie Bild und Spiegelbild gegenüber und korrelieren mit der optischen Aktivität des Stoffes, indem sie für die richtungsspezifische Rotation der Lichtwellen verantwortlich ist (ebd.). Diese Erkenntnis impliziert die Notwendigkeit, von einer dreidimensionalen molekularen Struktur und ihrer grafischen Repräsentationen auszugehen, anstatt einer zweidimensionalen, denn eine Rechts-Links-Asymmetrie ist in diesem Sinne nur in der dritten Dimension möglich (ebd.). Doch zunächst sei auf Jacobus Henricus Van 't Hoff und Joseph Achille Le Bel – die beiden Entdecker des tetraedrischen dreidimensionalen Kohlenstoffatoms – verwiesen und die jeweiligen Umstände ihrer simultanen Entdeckung erörtert, denn sie unterscheiden sich bezüglich der Denkkollektive, in denen sie sich bewegten und somit der zugrundeliegenden Präideen und der jeweiligen Rezeption.

Joseph Achille Le Bel (1847 – 1930) erschloss die dritte Dimension der Chemie nur zwei Monate nach seinem niederländischen Kollegen, als er 1874 seine Abhandlung „Sur des relations qui existent entre les formules atomiques des corps organiques et le pouvoir rotatoire de leurs dissolutions“ veröffentlichte (Le Bel, 1874). Nachdem Pasteur nach seiner Beschreibung der Dissymmetrie *anno* 1848 der Strukturchemie den Rücken gekehrt hatte und sich fortan verstärkt medizinischen und biochemischen Fragen widmete, griff Le Bel dessen Schlussfolgerungen zur optischen Aktivität wieder auf. In einem induktiven Schluss lieferte er den Nachweis, dass die optische Aktivität eines Stoffes der primäre Indikator für dessen Asymmetrie ist und sich entsprechend in einer dreidimensionalen, tetraedrischen Struktur von Kohlenstoffverbindungen ausdrücken muss. Jacobus Henricus Van 't Hoff (1852 – 1911) schien sich trotz der gleichen Erkenntnis von der dreidimensionalen Struktur der Kohlenstoff-Verbindung in seinem Werk „Vorschlag zur Ausdehnung der gegenwärtig in der Chemie gebrauchten Strukturformeln in den Raum nebst einer damit zusammenhängenden Bemerkung über die Beziehung zwischen dem optischen Drehvermögen und der chemischen Konstitution organischer Verbindungen“¹³ fast *spiegelbildlich* zu Le Bel zu verhalten. Während Le Bel sich eher am epistemischen Erbe der Kristallografie orientierte und an weiteren Erkenntnissen über die Mechanismen und Entstehungsweisen der optischen Aktivität als physikalische Eigenschaft interessiert war, wählte Van 't Hoff die molekulare Struktur zu seinem primären Untersuchungsgegenstand.

13 Der niederländische Originaltitel lautet: „Voorstel tot uitbreiding der tegenwoordig in de scheikunde gebruikte structuur-formules in de ruimte: benevents een daarmede samenhangende opmerking omtrent het verband tusschen optisch actief vermogen en chemische constitutie van organische verbindingen“. In der chemiehistorischen Literatur ist der abgekürzte Titel „Voorstel“ (zu Deutsch: Vorschlag) gebräuchlich (Van 't Hoff, Henricus J., 1874).

Er bewegte sich in einem europaweiten Netzwerk von Chemiker/innen der organischen Strukturchemie, die sich deutlich in seiner Terminologie widerspiegelten und entwickelte deren Erkenntnisse weiter. Er wählte im Gegensatz zu Le Bel in seiner Beweisführung ein deduktives Verfahren, das bei August Kekulé's Befunden zur Strukturchemie ansetzte, statt bei Pasteur und der optischen Aktivität von Kristallen. Van 't Hoff's Ziel war es, für die organische Chemie eine Theorie des Raumes einzuführen, die der Organik eine mathematische und geometrische Grundlage zuweist, die für möglichst viele Verbindungen gültig ist (Ramberg, 2003, S. 64, 323).

Obwohl beide Autoren den gleichen Sachverhalt nachgewiesen hatten, fiel die Rezeption der Werke völlig unterschiedlich aus. Van 't Hoff's Beweisführung erfuhr in seinem weitläufigen Netzwerk bedeutender Figuren der organischen Chemie eine stärkere Rezeption – und regte eine heftige Kontroverse zwischen den Machtzentren der Chemieinstitute an. Auch wenn etliche Chemiker/innen bereits vor Van 't Hoff's *Voorstel* ein eher räumliches Bild von Molekülstrukturen hatten, wurde dieses mit seinem Nachweis in der Strukturchemie allmählich manifest und die sich im Zuge dessen anpassenden Strukturmodelle wurden aufgrund ihrer Anschaulichkeit zu ikonografischen Repräsentationen der gesamten Chemie (ebd., S. 35). Kurz nach der Veröffentlichung erzielte Van 't Hoff begeisterte Rezensionen und seine Publikation wurde in diverse Sprachen übersetzt. Johannes Wislicenus etwa trat in den 1870er und 1880er Jahren als aktiver Förderer Van 't Hoff's auf, der dessen Theorie bekannt machte und auch eigene Forschungen daran anschloss. Doch er hatte auch Gegner: Hermann Kolbe (Universität Leipzig), seines Zeichens ein konservativer Chemiker und Inhaber des *Journals für Chemie und Physik*, torpedierte in dieser Funktion als *gatekeeper* derartige theoretische Neuerungen im chemischen Weltbild. Er empfand Van 't Hoff's Abhandlung über den asymmetrischen Kohlenstoff-Tetraeder und dessen räumliche Struktur als anmaßendes Ergebnis mangelnder chemischer Bildung und verfasste eine harsche Polemik (Rocke, 1987, S. 156).

Diese Anfeindungen gegen Van 't Hoff und dessen einflussreiche Förderer hielten die rasche Ausbreitung der Ideen Van 't Hoff's jedoch nicht auf, die er zudem mit einem ausgefeilten System edukativer Modelle populisierte. Aus Karton fertigte er dreidimensionale, farbig codierte Modelle verschiedener Säuren und verschickte sie an etliche chemische Lehr- und Forschungsanstalten (Van der Spek, 2006). Heute gelten Van 't Hoff's Stereo-Modelle (s. Abb. 2.4) als wegweisende Instrumente der Popularisierung chemischen Wissens und der Ausbildung einer spezifischen chemischen Ästhetik und dreidimensionalen Wahrnehmung, wie sie noch heute aktuell ist: „*Part of learning chemistry is learning to conceive of molecules in three dimensions, and how the shape of molecular affects their chemical and physical behaviour*“ (Ramberg, 2003, S. 2). In den 1890er Jahren gelangte Van 't Hoff's Ansatz nach Zürich, wo sie mit Arthur Hantzsch und Victor Meyer (1848 – 1897) zwei



Diese Fotografie (SL, aufgenommen im April 2018 im Museum Boerhaave, Leiden) zeigt die ersten stereochemischen Modelle, die Jacobus van 't Hoff angefertigt hat. Die edukativen Modelle sind aus Karton angefertigt, ca. einen Zentimeter breit im Durchmesser und stellen einen ersten Versuch dar, die Theorie der räumlichen spiegelasymmetrische Struktur bestimmter Stoffe wie der Weinsäure $C_4H_6O_6$ im 3D-Modell darzustellen. Die Modelle wurden an verschiedene Gelehrte verschickt und ermöglichten aufgrund ihrer Anschaulichkeit eine rasche Verbreitung der Theorie (Van der Spek, 2006).

weitere einflussreiche Fürsprecher gewann (ebd.). Aus der „Chemie des Raumes“, wie Van 't Hoff die Strukturchemie zu bezeichnen pflegte, wurde mit Victor Meyer die sog. Stereochemie. Diese Subdisziplin der Chemie wurde in der Folge zu einer ihrer Leitdisziplinen und spielte mit der Etablierung einer Fachsprache, symbolischen Repräsentation und Methodik eine wachsende Rolle in der Ausbildung einer chemischen Fachidentität (Bensaude-Vincent und Stengers, 1996, S. 156ff.). Die Entdeckung der Chiralität, die mit dem Nachweis der dreidimensionalen Struktur des asymmetrischen C-Atoms zusammenfällt, begründete damit einen zentralen Teilbereich der organischen Chemie, der zudem konstitutiv für die Etablierung der Chemie als autonome wissenschaftliche Disziplin war. Mit der Schaffung einer abstrakten molekularen Welt und einer eigenständigen Theorie, hat die Chemie sich einen eigenen epistemischen Raum geschaffen, der auch praktisch von Nutzen war, denn sie bildeten den Ausgangspunkt systematischer chemischer Synthese.

The pragmatic use of stereoformulas and the simultaneous appearance of reductionist models of the atom also beautifully illustrate the tension in ninete-

enth century chemistry between chemical and physical explanations. During much of the nineteenth century, chemists created a largely autonomous and non-mathematical discipline with unique ontological, epistemological, and methodological characteristics. Yet chemists always had the lurking conviction that chemistry would only become a 'true' science when it had been reduced to physical laws described by mathematics, and chemists therefore felt compelled to suggest a physical basis for chemical theories (Ramberg, 2000, S. 53).

Das ambivalente Verhältnis zwischen Chemie und Physik ist bereits früh in der Geschichte der Wissenschaften angelegt. Fragen nach Reduzierbarkeit und Physikalismus, aber auch nach dem Statusverhältnis von Hilfs- und Leitwissenschaft, zeigen sich in der Geschichte der Chiralität, wo sie in die Genese der frühen Stereochemie eingeschrieben ist. Die Abgrenzung der Chemiker/innen von der Physik und deren Eigenschaften, Theorien und Gegenstandsbereichen, zeigt sich u.a. in dem eher nachlässigen bzw. pragmatischen Umgang mit diesen. Chemiker/innen zeigten eine frühe Affinität für Konzeptionen des Atomismus, wobei sie sich trotz dessen Vagheit und Umstrittenheit handlungsfähig und erfolgreich mit anschließenden Erkenntnissen zur räumlichen Orientierung des Molekularen erwiesen (ebd., S. 51). Dennoch wurden zahlreiche Bestrebungen beobachtet, diese physikalischen Episteme zu Hilfsmitteln im theoretischen Verstehen chemischer Prozesse zu erklären oder so zu verstehen, dass etwa die elektrischen Prozesse während der chemischen Reaktion intrinsisch aus den chemischen Elementen hervorgingen, statt diese hervorzurufen (Ochiai, 2013; Nye, 1992). Die Präidee einer Hierarchie der Wissenschaften war u.a. infolge der Enzyklopädien im Zeitalter der Aufklärung virulent und mit der Geschichte der Chiralität verwoben. Die drohende Reduzierbarkeit chemischer Fragestellungen und Phänomene auf physikalische stand bereits bei Van 't Hoff im Raum und die im Zuge dessen betriebene Abgrenzung zur Physik ist in die molekulare Welt der Chemie vom Moment ihrer Erschließung an eingeschrieben. Denn Van 't Hoff's Leistung bestand auch u.a. darin, dass er chemische Struktur und physikalische Form miteinander verknüpfte, denn vor seinem *Voorstel* hatten physikalische Größen in der Chemie nur eine marginale Bedeutung (Ramberg, 2003, S. 3).

An dieser Stelle sei jedoch abschließend die historische wie gegenwärtige Terminologie der stereochemischen Chiralitätsforschung angesprochen und die Kontroversen, die bis heute daraus hervorgehen (Mikhailov, 2018; Saha and Chakraborty, 2012). Sie geben einen weiteren vertieften Einblick in die Prozesse, mit denen die Chiralität zu einer spezifisch organisch-chemischen Eigenschaft wurde und zugleich erheblich bei der „Konstruktion einer chemischen Realität“ (Ramberg, 2003, S. 52) beteiligt war. Die heute gängige Bezeichnung der Chiralität für händige Molekülstrukturen wurde erst 1894 durch Lord Kelvin in Großbri-

tannien eingeführt. Mit diesem Begriff setzte sich auch allmählich die Enantio-Terminologie (Naumann, 1856) nach Carl Friedrich Naumann in der Stereochemie durch. Naumann hatte 1856 die Bezeichnung Enantiomer für Objekte eingeführt, die sich wie Bild und Spiegelbild zueinander verhalten. Kristalle mit einer Rechts-Links-Asymmetrie sind nicht mit ihrem Spiegelbild in Deckung zu bringen, daher rührt auch der altgriechische Term der Enantiomere, der entgegengesetzten Formen. Naumanns Studien und Terminologie wurden zunächst in der Kristallografie wenig rezipiert und auch wenn Pasteur und Biot sich mit ähnlichen Phänomenen beschäftigt hatten, griffen sie dessen Terminologie zunächst nicht auf. Auch in der organischen Strukturchemie blieb es zunächst bei Pasteurs Terminologie der Dissymmetrie, bis Felix Herrmann, ein Mitarbeiter Johannes Wislicenus', der Van 't Hoffs „La Chimie dans l'Espace“ 1877 ins Deutsche übersetzte und dabei die Begrifflichkeit des Enantiomorphismus aufgriff, die fortan in sämtlichen Neuauflagen und Übersetzungen Van 't Hoffs Verbreitung fand (Gal, 2007, S. 92). Doch in den 1890er Jahren setzte sich die Enantio-Terminologie in der Stereochemie durch und verknüpfte kristallografische mit stereochemischen Konzeptionen. Die Chiralität von Molekülen wie Kristallformationen brachte in beiden Bereichen Modelle hervor, die sich eindrücklich in gleichermaßen räumliche Zeichnungen von Kristallen und auch Molekülstrukturen ausdrücken ließen und ästhetisch besonders zugänglich waren.

Noch heute wird in der Stereochemie von Enantiomeren gesprochen, wenn bei einem chiralen Molekül verschiedene, in ihrer strukturellen Komposition spiegelasymmetrische Versionen vorliegen, die sich wie Bild und Spiegelbild verhalten und miteinander nicht in Deckung zu bringen sind (Petrucci et al., 2017, S. 1160). Nach der Cahn-Ingold-Prelog-Konvention werden die linksdrehenden Varianten als (S)-(-)-Enantiomer und die rechtshändigen als (R)-(+)-Enantiomer bezeichnet (Cahn et al., 1956). Chirale Stoffe kommen in der Natur selten in einer aufgereinigten, sprich: nach Enantiomeren getrennten Form vor, sondern in einem bestimmten Mischverhältnis, das je nach Stoff und dessen Umgebung variieren kann. Als Racemat bzw. racemische Mischung wird ein solches Gemisch bezeichnet, wenn beide Enantiomere im äquimolaren Verhältnis von 50:50 in einer Probe vorkommen. Der Begriff des Racemats leitet sich vom lateinischen *racemus* (Fruchtstand der Weintrauben) ab, eine Anleihe an Louis Pasteurs Weinsäure-Experiment, die als erste Racematspaltung gilt (Mauskopf, 2006). Dieser Versuch zur Auftrennung und Isolierung von Enantiomeren zählt im Kanon der Chemiegeschichte zu den zentralen Meilenstein in der Geschichte der Chiralität. Die Entdeckung der Chiralität wird darüber hinaus in den Kontext der Entstehung und Etablierung der analytischen und synthetischen Chemie sowie einer entsprechenden wissenschaftsbasierten Großindustrie gesetzt, wie in den folgenden Abschnitten erläutert wird.

2.2 Moleküle vom Reißbrett: die Anfänge chemischer Synthetik und Industrie

In diesem Abschnitt wird die Schnittstelle der neu entstandenen chemischen Wissenschaften und ihre Grenzarbeit mit den ebenfalls im Werden begriffenen biologischen Wissenschaften im späten 19. und 20. Jahrhundert erörtert. Die zentralen Diskursstränge der Chiralitäts-Geschichte des 20. Jahrhunderts zeichnen sich primär an der Schnittstelle zwischen organischer Chemie, Biochemie und Pharmakologie ab, deren Grenzen zunehmend in diesem Prozess verwischten und durchlässiger wurden (Gal, 2013b). Die molekulare Eigenschaft der Chiralität steht im Zusammenhang mit zentralen, kanonisierten Meilensteinen der drei Disziplinen. Darunter fällt erstens die Feststellung der Homochiralität des Lebens, denn Aminosäuren kommen in der Natur nur in ihrer L- vor, während Zucker nur in ihrer D-Form beobachtet wurden (Luisi, 2002). Zweitens erlebte die Chemie mit den analytischen und synthetischen Errungenschaften der Kohlenstoffchemie einen weiteren Transformationsschritt hin zu einer *Technoscience*, die ihren eigenen Gegenstand hervorzubringen vermag (Klein, 2005). War einmal die molekulare Struktur eines Stoffes entschlüsselt, ließen sich diese synthetisch herstellen, ihre Reaktionswege mit anderen Stoffen nachvollziehen oder dank Fortschritten in der Analytik in Proben wiedererkennen. Drittens rückten mit der Planbarkeit von Molekülen aufgrund immer evidenter werdender struktureller Modelle und analytischen Technologien mit der Zeit auch biologische Gegenstände in den Forschungsfokus von Chemiker/innen (Bensaude-Vincent und Simon, 2012c). Insbesondere die Forschung zur Fermentation in der Wein- und Bierherstellung erbrachte die Erkenntnis, dass es sich dabei um einen biologischen Stoffwechselprozess handelte, was die Manifestation der Hefe als Lebewesen und die Begründung der Mikrobiologie zur Folge hatte (Latour, 1993). Viertens spielte die Chiralität in der Molekularisierung der Lebenswissenschaften im Zusammenhang mit dem Aufstieg der Genetik eine erhebliche Rolle (Cintas, 2007). Darüber hinaus entwickelte sich an der Schnittstelle von Chemie und der Forschung zur belebten Welt alsbald eine chemische Industrie, ein Prozess auf den wiederum die konzeptionellen Erkenntnisse zur Chiralität einen erheblichen Einfluss ausübte.

Die mächtigen Lehrstühle und Institutionen der organischen Chemie, wie sie europaweit im späten 19. Jahrhundert etabliert waren, hatten nicht zuletzt davon profitiert, dass die Chemie u.a. über die Erkenntnisse der Stereochemie zunehmend aus ihren zahlreichen Mutterdisziplinen wie Mineralogie, Medizin und Naturgeschichte herausgeschält und mithilfe einer genuin chemischen Betrachtungsweise der Natur disziplinäre Autonomie erlangt hatte.¹⁴ Doch auch ent-

14 Die 1870er Jahre werden der Chemiegeschichte in diesem Zusammenhang häufig als „Golden Age“ (Bensaude-Vincent, 2018, S. 598) bzw. „Belle Époque“ (Bensaude-Vincent und Stengers,

scheidende Laborpraktiken und Technologien der Chemie wurden im Kontext der Auseinandersetzung von Chemiker/innen mit der (asymmetrischen) molekularen Struktur geprägt, namentlich der Trennung, Aufreinigung, Analyse und Synthese chiraler Stoffe. Die Etablierung der akademischen (organischen) Chemie war aber nicht nur durch ein Weltbild des Molekularen und eine epistemische Autonomie des Faches begünstigt worden, sondern auch durch die direkten Anwendungsmöglichkeiten in der chemischen Industrie, die sich Mitte des 19. Jahrhunderts herausbildete (Bösch, 2004). Sämtliche führenden Persönlichkeiten der akademischen organischen Chemie, wie Arthur Hantzsch, Johannes Wislicenus, Hermann Kolbe, August Kekulé, Robert Bunsen, deren wissenschaftliches Werk mit der Geschichte der Stereochemie untrennbar verbunden ist, verfügten über weitverzweigte Netzwerke mit der chemischen Industrie und waren nicht selten auch als Führungspersonlichkeiten in Chemiewerken wie der BASF, Bayer oder Ciba aktiv und trugen zu deren Erfolgsgeschichten bei (Reinhardt, 2000a; Reinhardt, 2000b).

Die dreidimensionale Vorstellung von der Struktur der molekularen Welt wirkte als Treiber für den Aufstieg der chemischen Industrie, zumal die Erforschung der Struktur kohlenstoffhaltiger Moleküle die Voraussetzung für die organische Synthesechemie bildete. Insbesondere die sog. Kohleleerindustrie trug hierzu bei, war sie doch in komplexer Art und Weise an strukturbezogenen Erkenntnisse der organischen Chemie geknüpft, deren primäres Betätigungsfeld mit der Strukturaufklärung und Synthese kohlenstoffbasierter Moleküle zusammenfiel (Bensaude-Vincent und Stengers, 1996, S. 181). Die Verarbeitung von Kohleleer und dessen Derivaten zu Basischemikalien der Farb-, Treib- und Arzneistoffindustrie stellte in diesem Sinne die erste *science based industry* dar, deren technischer Fortschritt den theoretisch formulierten Grundlagen häufig vorauseilte (Bösch, 2004). Die organische Chemie¹⁵ fungierte im 19. Jahrhundert als

1996, S. 208f.) des Faches gedeutet, was vor allem auf deren epistemische Unabhängigkeit und erfolgreiche „*conquest of an own territory*“ (ebd.) zurückgeführt wird, was jedoch nicht unumstritten ist (Bensaude-Vincent, 2018). Es wird insbesondere deutlich, wie sehr die Chemiegeschichte mit diesen Lesarten Teil der chemischen Grenzarbeit ist.

15 Der Begriff geht auf Jöns Jakob Berzelius zurück, der ihn 1806 im Kontext seiner Naturstoffsexperimente und Autorschaft von Lehrbüchern eingeführt hatte (Berzelius, 1806). Die Bezeichnung des Organischen geht auf den Bezug der Chemie auf die belebte Welt und den Körper zurück, was vor allem auf den frühen Schwerpunkt des Faches auf die chemische Zusammensetzung von Körpersäften sowie pflanzlichen und tierischen Produkten zurückging. Fette, Alkohole, Kohlenhydrate, Säuren und Proteine bildeten Makrostoffe wie Blut, Milch und Traubensaft auf der molekularen Ebene ab und bis zum Jahre 1880 waren bereits 15.000 verschiedene organische Verbindungen klassifiziert (Weyer, 2018b, S. 136 ff.), was ein deutliches Wachstum beschreibt, zumal 1844 erst 720 und 1870 etwa 10.700 organische Substanzen bekannt waren (Schummer, 1997).

chemische Leitdisziplin und legte mit den Erkenntnissen zur Struktur der molekularen Welt ein theoretisch-empirisches Gerüst für die Chemie als autonome Wissenschaft mit eigenem Wirklichkeitsbereich vor. Analog zu Legosteinen¹⁶ ließen sich Atome verschiedener Elemente entsprechend der bekannten Bindungsregeln im Modell zu Molekülen zusammenbauen und über eine Reihe von Reaktionswegen *materialisieren* bzw. selbst dann herstellen wenn der gewünschte Stoff in der Natur gar nicht vorkommt (Rosenfeld und Bhushan, 2000).

So ließen sich etwa aus dem banal anmutenden und scheinbar unbegrenzt verfügbaren Rohstoff der Steinkohle zahlreiche Alltagsprodukte herstellen, die zudem die etablierte dichotome Ordnung von natürlich – künstlich und belebt – nicht belebt aus den Angeln hoben (Leslie, 2005). Von einer Tier- und Pflanzenchemie (mit einem umstrittenen vorwissenschaftlichen Erbe der Alchemie) als Teil der Naturgeschichte, entwickelte sie sich zur chemischen Wissenschaft der Kohlenstoffverbindung (Ramberg, 2003, S. 15f.). Auch als Kohlenstoffchemie bezeichnet, gelang es der organischen Chemie mithilfe ihres synthetischen Gestaltungspotentials im frühen Industriezeitalter als bedeutender Fortschrittsmotor der westlichen Zivilisation wahrgenommen zu werden (Leslie, 2005). Ende des 19. Jahrhunderts hatte sich eine chemische Großindustrie etabliert, die europaweit nicht nur mit imposanten Fabrikanlagen sichtbar geworden war, sondern auch aufgrund der zahlreichen Arbeitsplätze und alltäglichen Produkte, von denen die Bevölkerung abhängig war, was sich sogar in der Kunstgeschichte niederschlug (Tschira, 2003).

16 Das Zusammenstecken von Legosteinen ist eine beliebte Metapher für die Praktiken der organischen Reißbrettsynthese, bei der Atome im Rahmen von chemischen Bindungen und Reaktionen scheinbar nahtlos und harmonisch ineinandergreifen (Quack, 2014, S. 64).



Die erste vollständige Harnstoff-Synthese durch Friedrich Wöhler im Jahre 1828 markiert einen wichtigen Wendepunkt in diesem Zusammenhang: erstmals gelang es einem Chemiker durch Synthese einen natürlichen Stoff auf rein künstlichem Wege herzustellen. Die organische Vollsynthese erfolgte, ohne den Harnstoff wie noch bei Hermann Boerhaave im Jahre 1727 aus tierischem Harn zu extrahieren, sondern indem Wöhler eine Reaktion von Silbercyanat und Ammoniumchlorid herbeiführte und eines der Zwischenprodukte als Quelle des Harnstoffes identifizierte (Bensaude-Vincent, 2009). Die organische Synthese des Harnstoffes ($\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$) basierte – wie später zahllose weitere Naturstoffsynthesen – auf dem in einer Verbindung enthaltenen bzw. in einer Reaktion hinzugefügten Kohlenstoffatoms. Damit war eine bis dahin als unüberbrückbar geltende Grenze überschritten, denn zur Synthese organischer Moleküle benötigt es nicht zwangsläufig lebende Organismen, denn diese konnten aus unbelebten Ausgangsstoffen synthetisiert werden. Die Synthesen von Naturstoffen wie Säuren, Zuckern und Farbstoffen erwiesen sich dabei vor allem als Zeit- und Ressourcenersparnis, denn zuvor bestimmte das mühsame Extrahieren der gewünschten Stoffe auf einem biogenen Ausgangsmaterial den Arbeitsalltag im Labor.¹⁷

Die molekulare Chiralität erweis sich in Bezug auf die rationale und strategische Planbarkeit von molekularen Strukturen am Schreibtisch als besonders einflussreich, zumal sie dem industriellen Innovationsdispositiv der Zeit und dessen Ruf nach Gestaltbarkeit korrespondierte. Die dreidimensionale Darstellung von Molekülmodellen und Reaktionsgleichungen führte zu einer erhöhten Evidenz und im Zuge einer stetig wachsenden Anzahl nachvollziehbarer Reaktionswege und empirisch nachgewiesener Zusammensetzungen von Stoffen, wurden diese mithilfe der so reformierten Modelle, Theorien und Formeln zu plan- und prozessierbaren Entitäten einer *Technoscience* (Bensaude-Vincent und Stengers, 1996, S. 183). Das hybride Verhältnis zwischen belebter und unbelebter Materie sowie synthetischer wie natürlicher Welt verhalf der Chemie zum Status einer „*Technoscience avant la lettre*“ (Klein, 2005). An den Schreibtischen von Chemiker/innen in Industrie und Universitäten wurden Laborjournale mit Zeichnungen und Berechnungen gefüllt und diese schriftliche Arbeit avancierte zum essentiellen Bestandteil der praktischen chemischen Arbeit zwischen Labor und Büro (Ochiai, 2013, S. 152). Die räumliche Anordnung der Atome im Molekül führte in der Folge zu einer tentativen Verknüpfung von theoretischen *reasoning* und dem praktischen

17 Die Chemiegeschichte ist reich an Narrationen zu diesen aufwendigen und nicht selten betont ekelerregenden Vorhaben der prä-synthetischen Ära: Für die Gewinnung des Nukleins war etwa der Arzt Friedrich Miescher 1869 noch gezwungen, ganze Wagenladungen von mit Eiter verschmutzten Krankenhausverbänden zu verarbeiten um eine einzige Probe zu erhalten, die später den Ausgangsstoff für die Entdeckung der DNA bilden sollte (Dahm, 2008).

Hervorbringen und Gestalten des eigenen Forschungsgegenstandes. Die organische Chemie erhielt ein empirisch-wissenschaftliches Fundament, was die Autonomie des Faches festigte. Die Synthese organischer Stoffe aus anorganischen Ausgangssubstanzen ermöglichte der Chemie, ihren Gegenstand durch rationales *engineering* selbst hervorzubringen (Rosenfeld und Bhushan, 2000). Die Zusammenführung von dreidimensionalem Molekülmodell und organischer Synthese brachte eine epistemische Ordnung in die chaotisch anmutende, nicht unmittelbar sinnlich wahrnehmbare Welt des Molekularen und übersetzte sich sprachlich wie materiell in eine physische Realität (Hottois, 2013).

An dieser Stelle ist jedoch anzumerken, dass neben Reißbrett-Metaphorik und Serendipitäts-Narrativen, wie sie in den Erfolgsgeschichten der chemischen Synthese dominant sind, eine überwiegende Zahl neben den wenigen singulären, spektakulären Entdeckungen unsichtbar wird. Unrühmlich für die organische Chemie ist bis heute, dass sie im Falle von Synthesen häufig mit Kochrezepten arbeiten muss, die zum gewünschten Produkt führen, wenn man sie genau befolgt, allerdings ein rational nachvollziehbarer molekularer Mechanismus unbekannt ist (Bensaude-Vincent und Simon, 2012f). Aber auch umgekehrt sind nicht sämtliche Stoffe nach dem Stand der Technik synthetisierbar, selbst wenn die molekulare Struktur bekannt ist. Zwischen molekularer Mikroebene und molekularer bzw. stofflicher Makroebene befindet sich eine *black box* und der molekularen Auflösung haftet bis heute ein Hauch des Mystischen und Geheimnisvollen an (Folkers, 2011). Die Synthese ist ein unsichtbarer Prozess, dem eine geheimnisvolle Ordnung und Gesetzmäßigkeit zugrunde zu liegen scheint (Bensaude-Vincent und Simon, 2012c). Synthesen von (Natur-)Stoffen sind trotz aller technischen Hilfsmittel der Gegenwart nach wie vor aufwendig, zumal zahlreiche langwierige Synthesewege unter Berücksichtigung eines komplexen Zusammenspiels von Reagenzien, Lösungsmitteln und Energiezufuhr aufeinander angestimmt werden müssen. Insbesondere bei organischen Synthesen gilt es, Ausgangsstoffe in mehrere Zwischenprodukte zu konvertieren um ein entsprechendes *target molecule* herzustellen – mit ungewissen Erfolg, denn es kann an jedem Zwischenschritt dieser vielgliedrigen Reaktionskette scheitern (Rosenfeld und Bhushan, 2000). Nicht nur in der molekularen Struktur von organischen Stoffen, sondern auch in ihrer praktisch-experimentellen Erschaffung sind Chemiker/innen dazu gezwungen, mit einem hohen Maße an Komplexität und Ungewissheit umzugehen. Eine wichtige Konstante in diesem epistemischen Prozess ist die molekulare Struktur (Ochiai, 2013).

Als charakteristisches Beispiel für das Paradigma der organischen Synthesechemie, die mit ihren strukturbasierten Reißbrettmethoden akademische und industrielle Settings vereinte, dienen in der Chemiehistoriografie die Azofarbstoffe und anderer Derivate des Anilins (Simon, 1998). Wie in Abb. 2.5 zum „Teerbaum“ deutlich wird, bildeten sog. Anilin- bzw. Teerfarben zentrale Standbeine

der chemischen Industrie im 19. Jahrhundert. Das Anilin, strukturell betrachtet ein Benzolring, der an eine Aminogruppe bindet, wurde gewonnen, indem das Steinkohlöl (Naphtha) destilliert und mit einer Stickstoffverbindung versehen wird. Anilin wurde im Rahmen von Experimenten bekannt, die darauf abzielten, den natürlichen Textilfarbstoff Indigo zu synthetisieren, was Friedlieb Ferdinand Runge 1834 auch erstmals gelang. Mithilfe von August Kekulé's Formulierung des Benzolrings und der darauf basierenden Benzen-Theorie wurde in der Folge 1856 der erste künstliche Farbstoff hergestellt: das violette Mauvein durch William Perkins (Garfield, 2001). Die Synthese künstlicher Farbstoffe, die deutlich günstiger, farbechter und haltbarer waren als ihre natürlichen Äquivalente, wurde in der Folge zu einem wissenschaftlichen Großprojekt. Farben wie Fuchsin, Methylenblau und Manchestergelb brachten ihren Entdecker/innen lukrative Patente ein und unter den Inhaber/innen von Chemiefabriken eine wohlhabende industrielle Elite hervor (Leslie, 2005, S. 124). Vollsynthetisches Alizarinrot gehörte zu den anfänglichen Exportschlägern der 1865 neu gegründeten *Badischen Anilin- und Soda-Fabrik* (BASF) und ersetzte den aus den niederländischen Kolonien stammenden pflanzlichen Textilfarbstoff Krapp. Die Synthese des Indigoblaus durch Adolf von Baeyer im Jahre 1880 stellt einen besonderen Höhepunkt in der Geschichte der Teerfarben dar, denn durch die kostengünstige Synthese brach im Wettstreit der Kolonialmächte der Handel mit Naturstoff-Indigo ein, von dem bis dato v.a. das Britische *Empire* profitiert hatte (ebd., S. 75).

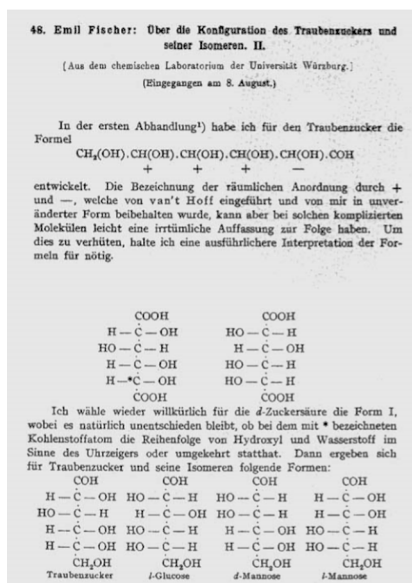
Anilin-Farben stellen die idealtypischen Produkte des neuen Paradigmas dar, im Sinne dessen Moleküle basierend auf ihrer Struktur am Reißbrett geplant, synthetisiert, patentiert, massenhaft hergestellt und vertrieben wurden. Darüber hinaus kennt die Chemiegeschichte noch weitere Produkte, die nach diesem Prinzip entstanden sind: Angefangen bei Treib- und Kraftstoffen, über Kunststoffe bis hin zu einer ganzen Reihe synthetischer Arzneimittelmoleküle und Lösungsmittel auf der Grundlage aromatischer Verbindungen (ebd., S. 8). Die Stereochemie und molekulare Asymmetrie einer Vielzahl von Verbindungen sorgte dafür, dass die theoretische Auseinandersetzung mit der praktischen Seite der Chiralität an dieser Stelle verknüpft wurde und war mit den Praktiken in der Teerfarbenindustrie verwoben (Collet et al., 2006, S. 19). Diese industriellen Anwendungen der organischen Chemie brachten ihr nicht nur Prestige und Wertschätzung ein, sondern sicherten ihr auch innerhalb der impliziten zeitgenössischen Vorstellung einer Hierarchisierung der Naturwissenschaften einen günstigen Platz zu. Die Chemie wurde als die verbindende Kraft zwischen den sich immer weiter entfernenden Großdisziplinen begriffen (Breslow, 1997). Diese Entwicklungen erwiesen sich im Laufe der Geschichte aber wieder als rückläufig, denn die chemische

Industrie hat ihr Ansehen nach einer Reihe von Skandalen und Katastrophen¹⁸ eingebüßt und die Feldgrenzen der Chemie sind angesichts der fortschreitenden Molekularisierung der Lebenswissenschaften und Entstehung von Material- und Nanowissenschaften insgesamt enger und durchlässiger geworden (Simon, 2012).

Ein weiterer Bereich der organischen Chemie, der eng mit der Geschichte der Chiralität verwoben ist, ist die Chemie der Kohlenhydrate bzw. von Zuckerverbindungen der 1880er und 1890er Jahre. Als deren Begründer gilt Emil Fischer (1852 – 1919), der ein umfangreiches Werk zur Klassifikation von Zuckermolekülen sowie eine erste systematische chemische Nomenklatur für chirale Moleküle und deren Enantiomere veröffentlichte (Ramberg, 2003, S. 243). Entsprechend dem um Umfänglichkeit bemühten Forschungsstil seiner Zeit, griff Fischer Van 't Hoff's und Le Bel's Bindungstheorie zum asymmetrischen, dreidimensionalen Kohlenstoff-Atom auf und verwendete sie, um die wachsende Zahl bekannter Zuckerverbindungen zu klassifizieren (ebd.). Bei der Klassifikation der damals bekannten – natürlichen wie synthetischen – Zuckerarten fiel auf, dass die stereochemische Konfiguration der Verbindungen zwingend berücksichtigt werden musste. Die Anwendung der Theorie des tetraedrischen Kohlenstoffatoms erfolgte bei Fischer erstmals 1888, als er bei der Synthese der als Mannose bezeichneten Substanz feststellte, dass diese in der Natur als optisches Isomer der Glukose vorkommt (Lichtenthaler, 1992, S. 1545). In seiner Publikation aus dem Jahre 1891 (Abb. 2.6) stellt er insgesamt 16 Stereoisomere der Glukose fest und schlägt vor, dass die Beziehungen zwischen den Monosacchariden stereochemischer Natur sind. Trotz dessen, dass bei allen die gleiche Summenformel vorliegt, führen die vier asymmetrischen Kohlenstoffatome in der Verbindung dazu, dass es zu $2^4 = 16$ unterschiedlich konfigurierten Varianten des Moleküls kommt (Fischer, 1891).

Zuckerverbindungen weisen in der Regel multiple Stereozentren auf, was die chemische Synthese, Analytik und Produktentwicklung bis heute vor Herausforderungen stellt, denn mit dieser Eigenschaft geht eine erhebliche Komplexität einher. Fischer übersetzte diese Methode zur Bestimmung von Zuckern auf der Grundlage der Stereochemie in eine chemische Nomenklatur (Ramberg, 2003, S. 264). Diese erste Nomenklatur für chirale Moleküle richtet sich nicht nach der absoluten räumlichen Konfiguration eines Moleküls, sondern nach der Positionierung der Hydroxylgruppe (OH), die entweder links oder rechts vom Stereozentrum liegt. Die Stereoisomere werden mit D(+)(*dextro*) für rechtshändig bzw. L(-)(*levo*) für linkshändig bezeichnet. Auffällig ist, dass die sog. Fischer Konvention

18 An dieser Stelle sei angemerkt, dass die Semantik der Chemiekatastrophe mit dem in der Chemiegeschichte kritisierten Narrativ der Chemophobie in Verbindung steht ist zumal Unfälle in Atomkraftwerken beispielsweise nicht als Physik-Unfälle oder Physik-Katastrophen bezeichnet werden. Es empfiehlt sich daher, von Unfällen in Chemiefabriken zu sprechen.



Auszug aus Emil Fischers Publikation „Ueber die Configuration des Traubenzuckers und seiner Isomeren“ (Fischer, 1891) mit der von Fischer entworfenen strukturellen Repräsentation seiner stereochemischen Nomenklatur. Entnommen aus ebd.

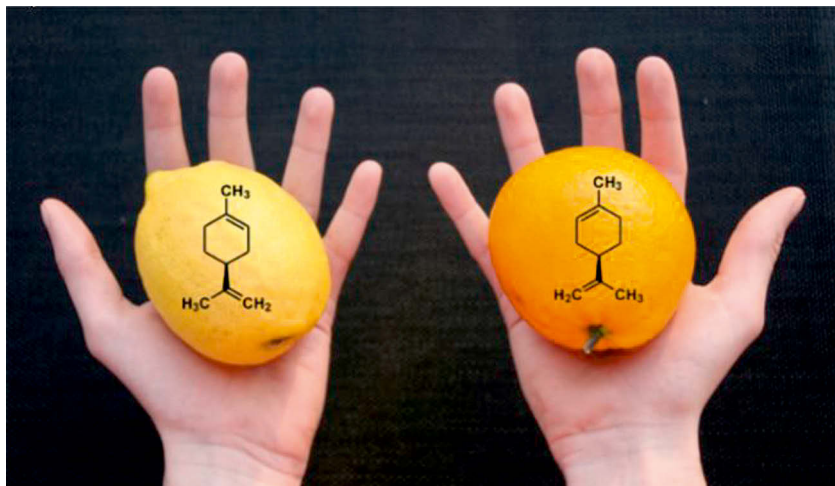
die Dreidimensionalität des tetraedrisches Kohlenstoff-Atoms gar nicht zu berücksichtigen scheint, sondern in der Modelldarstellung in die zweidimensionale Papierebene konvertiert (ebd.).

Zwischen Emil Fischers Konfiguration von Zuckermolekülen und Louis Pasteurs Ferment-Forschung liegt kein weiter Weg, sind doch Zucker ein essentieller Bestandteil der Stoffwechselung der Hefe. Emil Fischers Forschungsaufenthalt an der Universität Strasbourg anno 1876/77 hatte ihn mit Pasteurs einschlägigen Veröffentlichungen vertraut gemacht, nicht nur in Bezug auf die *disymétrie* der Weinsäure, sondern auch auf die Welt der Mikroorganismen, was zu einer bemerkenswerten Synthese führte (Lichtenthaler, 1992, S. 1543). Bald stellte Fischer fest, dass die von ihm klassifizierten Zuckerverbindungen von den mikroskopisch kleinen Hefepilzen unterschiedlich verarbeitet werden, was er auf die räumliche Konfiguration und optische Aktivität der Zuckermoleküle zurückführte. Der Zusammenhang zwischen Fermentationsprozess und molekularer Konfiguration war bereits Louis Pasteur 1857 aufgefallen (Gal, 2013a, S. 1630ff.), als dieser feststellte, dass Hefezellen beim Stoffwechselprozess ebenso zwischen rechts- und linkshändigen Kristallen unterscheiden, wie er selbst es in seinem berühmten Experiment zur Trennung der Weinsäure-Kristalle getan hatte:

Pasteur triumphed by sorting out the left crystal from the right with tweezers under a microscope, thus showing that the racemic acid was a combination of the two forms in equal proportion. This was by now a non-problematic feature of his laboratory, know-how and equipment. Could the ferment be as clever as Pasteur's own hands and eyes? Could it have an activity similar to his? Why not? Pasteur invents a setting in which the yeast will be asked to do what Pasteur did: sort out the left-handed from the right-handed. The result of the experiment is to grant the would-be actor a sorting competence similar to that of Pasteur, only much quicker. Who is this little guy able to do in a moment what Pasteur has been doing at great cost? (Latour, 1990, S. 61).

Diese Erkenntnisse zur biologischen Enantioselektivität von Mikroorganismen trug dazu bei, dass Pasteur die Hefe zunehmend als Lebewesen wahrzunehmen pflegte und prägte zudem seine Vorstellung von der Welt der Mikroben als eine belebte (ebd.). Entsprechend Bruno Latours Interpretation wurde bei Pasteur die Mikrobe erst dadurch als Lebewesen konstituiert, da es sich in der Lage erwies, auf der molekularen Ebene zwischen rechts und links zu *unterscheiden* (ebd., S. 62). Damit musste im Umkehrschluss angenommen werden, dass die Rechts-Links-Asymmetrie nicht nur eine Eigenschaft der Moleküle ist, sondern auch der Organismen. Arnaldo Piutti (1857 – 1928) ging einen Schritt weiter als Pasteur und Fischer und erschloss 1886 das Feld der Enantioselektivität (menschlicher) Rezeptoren, was hierfür als paradigmatisches Beispiel dient (Colli und Guarna, 2018). Mit der Trennung von D- und L-Asparagin (einem Derivat der Asparaginsäure), stellte er fest, dass die das rechtshändige D-Asparagin süßlich und das L-Asparagin eher bitter schmeckt (Gal, 2013a, S. 1634).

Die unterschiedlichen olfaktorischen Eigenschaften von Stereoisomeren stellen bis heute einen der zentralen Relevanzbereiche der molekularen Chiralität dar (Brenna et al., 2011). Die beiden populärsten Beispiele, bei denen menschliche Geruchs- und Geschmacksrezeptoren enantioselektiv arbeiten, sind Carvon und Limonen (vgl. Abb. 2.7). Demnach riecht reines R-Limonen nach Orangen, während das linkshändige nach Zitronen riecht und S-Carvon duftet nach Minze, während das rechtsdrehende den Geruch von Kümmel verströmt (Rüger et al., 2012). Der Nachweis, dass die räumliche chemische Struktur einer Verbindung mit biologischen Prozessen in Verbindung stand und zu unterschiedlichen Effekten im lebenden Organismus führen kann, erwies als besonders folgenreich für die Chemie. Die Chiralität wirkte gewissermaßen als Katalysator für die Expansion chemischer Modelle, Weltbilder und Methoden in die biologischen Felder, dem sog. *biological turn* (Laszlo, 2007, S. 349). Der hybride Grenzbereich, der sich im Zuge der Molekularisierung der Lebenswissenschaften herausgebildet und bis heute eine Vielzahl an molekularen *Technosciences* hervorgebracht hat, beschäftigt die Philosophie der Chemie bis in die Gegenwart (Bensaude-Vincent, 2009).



Schematische und illustrierte Darstellung der S(-) und R(+)-Enantiomere des Limonens C₁₀H₁₆. Übernommen aus (Scriba, 2011, S. 10).

Emil Fischer fuhr fort mit seinen Forschungen zur Stereoselektivität biologischer Systeme und stellte fest, dass nicht nur Zucker, sondern auch bei der chemischen Bindung von Enzymen im Organismus zwischen händigen Molekülen *unterschieden wird* (Fischer, 1895). Demnach bilden Enzyme, die als Katalysatoren (Beschleuniger) biochemischer Reaktionen (wie etwa Stoffwechselprozessen) im Körper fungieren in ihrer molekularen Struktur als sog. Bindetaschen, die strikt enantioselektiv sind (Pfaltz, 2001). Wie bei einem linksgeprägten Handschuh, *wählen* die Enzyme entsprechend diejenigen Enantiomere des Substrates (zu bindender Stoff) aus, die in die händige Taschenform passen. Wie bei einer rechten Hand, die nicht in einen linken Handschuh passt, werden stereochemisch nicht-passende Stoffe nicht verstoffwechselt. Entsprechend entstehen durch die enzymatische Katalyse Stoffsynthesen, die selbst chiral sind (Ahuja, 2011, S. 442). Für die theoretische Beschreibung wählte Fischer die Bezeichnung „Schlüssel-Schloss-Prinzip“, die in der Folge begeistert von der Fachöffentlichkeit aufgenommen wurde und bis heute als gewichtige Prädiee insbesondere bei der Vorstellung von Arzneistoffwirkung in Pharmakologie und Biomedizin funktioniert (Lichtenthaler, 1995; Parascandola und Jasensky 2012)

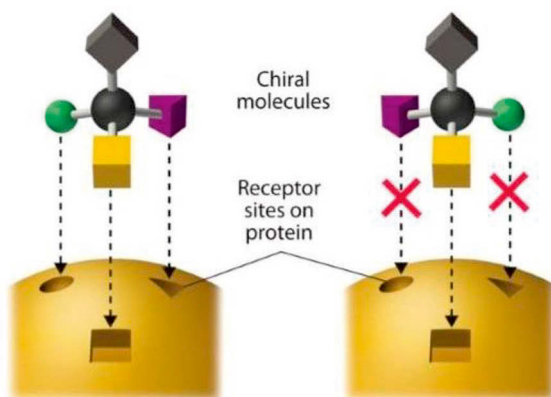
Vorbild waren bei Emil Fischers experimentellen Befunden ebenfalls die Hefepilzkulturen, die im Rahmen der Fermentation auf verschiedene Isomere der Glukose und anderer Zuckerverbindungen enantioselektiv reagierten. Die rasch anwachsende Disziplin der Biochemie erforschte die Prozesse der Biokatalyse nicht nur mehr in Mikroorganismen, sondern auch in komplexeren menschlichen

und tierischen Organismen. Die Biokatalyse bzw. Biosynthese diente als eines der evidentesten Erklärungsmuster für die Produktion von Körpersäften, Hormonen und anderen biochemischen Stoffwechselprozessen (Cornish-Bowden, 2011). Die Expansion chemischer Weltbilder in die Lebenswissenschaften wird an dieser Stelle besonders deutlich und auch die Rolle, die der Chiralität in diesem Zusammenhang zukommt, die ihre Wanderschaft durch die Disziplinen fortsetzte und mit dem Beginn des 20. Jahrhunderts in die Arzneimittelkunde einzog.

Seit bekannt war, dass die verschiedenen Enantiomere eines Stoffes unterschiedliche Wirkung haben können und das Schlüssel-Schloss-Prinzip auch in der Arzneimittelforschung eine steile Karriere angetreten hatte (Cushny, 1926), kam es in der pharmakologischen Forschung der 1880er bis 1920er Jahre zu einer regen Rezeption. Der Enantiomerenvergleich verschiedener Stoffe bezüglich seines pharmakologischen Wirkungsspektrums machte deutlich, dass auf die Eigenschaft der Chiralität im Molekül Rücksicht genommen werden muss (Gal, 2006, S. 16) und das Schlüssel-Schloss-Prinzip nach Emil Fischer (vgl. Abb. 2.8) avancierte zur Leitmetapher. 1933 legten Leslie Easson und Edgar Stedman infolge dieser Entwicklung ein umfassendes Review dieser Entwicklung sowie eine Theorie der enantioselektiven Wechselwirkung zwischen Rezeptor und Wirkstoff vor (Easson und Stedman, 1933). Dennoch dauerte es bis in die 1980er Jahre, dass die Arzneimittel-Gesetzgebung verschiedener Staaten die Erfassung des enantioselektiven Wirkungsspektrums im Rahmen der Arzneimittelzulassung regulierte und gesetzlich vorschrieb (Zeid, 2011). Insbesondere die Contergan-Katastrophe zeugt von einer massiven Rezeptionslücke in der Pharmakologie, denn weite Kreise der Biomedizin haben die Eigenschaft der Chiralität lange als eine rein chemische betrachtet und deshalb aus der pharmazeutischen Forschung und Entwicklung ausgeschlossen – mit dramatischen Folgen (Ariëns, 1984). Wie in Kapitel 4 und 5 gezeigt wird, hängt die fehlende Rezeption aber nicht mit bloßer Ignoranz, sondern mit der *Boundary Work* und disziplinären Inkommensurabilitäten zusammen. Insbesondere in interdisziplinären Bereichen der pharmazeutischen Produktentwicklung treten verschiedenste Felder in Interaktion, deren epistemischen Prämissen, ästhetischen Zugänge und Fachidentitäten in den feinen Übersetzungsnetzwerken nicht zueinander finden.

Die Beschreibung der basalen Vorgänge des Lebens auf der molekularen Ebene ist ohne Rücksichtnahme auf die räumliche Konfiguration der molekularen Einheiten nicht möglich und die Chiralität nimmt in diesem Zusammenhang eine besondere Stellung ein, denn die strukturelle Spiegelasymmetrie kleiner organischer Moleküle setzt sich auch in strukturell komplexen Biomolekülen fort (Flügel, 2011). So folgen nicht nur die biokatalytische Dynamik der Enzyme einer stereoselektiven Logik, sondern auch die sog. Bausteine des Lebens wie Proteine, Aminosäuren und Zucker bis hin zu komplexen Makromolekülen, die sich aus ihnen zu komplexen Einheiten mit multiplen stereogenen Zentren zusammen-

setzen *in vivo* (Ahuja, 2011). Die Natur präsentiert sich darüber hinaus in einer Homochiralität, denn die 20 in der Natur vorkommenden Proteine treten dort ausschließlich als linkshändige Moleküle auf, während Zuckerverbindungen nur in ihrer D-Form vorkommen. Sie lassen sich in anderen isomeren Konstellationen jedoch durch Synthese herstellen, wie es bereits Emil Fischer im Rahmen der 16 Isomere der Glukose gelungen war. Die Chiralität der Biologie wird im Diskurs als ein Universalismus präsentiert, der sich direkt aus der chemischen Chiralität ergibt (Luisi, 2016). Demnach pflanzt sich die Chiralität kleiner chemischer Moleküle in komplexen biologischen Molekülen fort, wie etwa in der rechtshändigen Doppelhelixstruktur der DNA (Brunner, 2001). Chirale Phänomene lassen sich darüber hinaus auch auf der Ebene von komplexen Makromolekülen, Zellen, Geweben und Organismen beobachten und es ergeben sich zahlreiche Implikationen für die Wirkstoffforschung im Bereich Pharmakologie, Umweltchemie, Agrochemie, synthetische Biowissenschaften und Lebensmittelchemie.¹⁹



Bei diesem Schema handelt es sich um eine verbreitete Darstellungsform des Chiralitätsprinzips in der Chemielehre. Es beinhaltet drei zentrale metaphorische Elemente: die Hände, den Spiegel und das tetraedrische Molekül, das im Sinne des Schlüssel-Schloss-Prinzips nach Emil Fischer je nach Enantiomerenform entweder in eine schematisch dargestellte Form eines Rezeptors passt oder nicht. Hier wird alltagsnahes inkorporiertes Wissen (Hände, Analogie zum Formenpuzzle für Kleinkinder) mit einem chemischen Prinzip und den Konsequenzen seiner Bioaktivität anschaulich verknüpft. Übernommen aus (Donohue, 2014).

So waren es jene Grenzbereiche zwischen Biochemie und Pharmazie, in denen die Chiralität um die Jahrtausendwende besonders präsent war und wichtige

19 Hierzu siehe insb. die (populärwissenschaftlichen) Arbeiten Henri Brunners (Brunner, 2001; Brunner, 2004; Brunner, 1999) und (Carreira und Yamamoto, 2012).

Forschungsfragen an den hybriden Grenzbereichen zwischen Biowissenschaften und Chemie aufwarf. Insbesondere die erfolgreichen enantioselektiven Synthesen komplexer Naturstoffmoleküle wie Vitamine, Hormone und Antibiotika, bei denen es gelungen war, Stoffe enantiomerenrein zu synthetisieren, wurden mit mehreren Chemie-Nobelpreisen ausgezeichnet (Blaser, 2010).²⁰ Zum einen wurde der Chiralität an den disziplinären Schnittstellen von Chemie, Lebenswissenschaften und zahlreichen biochemischen Ingenieurwissenschaften eine enorme Bedeutung für die Grundlagenforschung zugesprochen, denn man erhoffte sich ein tieferes Verständnis des Katalyseprozesses im Allgemeinen, der nach wie vor häufig eine *black box* darstellt und nur in wenigen Fällen bezüglich der molekularen Funktionsweise bekannt ist (Gal, 2013a). Zum anderen ergaben sich erhebliche Zugewinne für eine effizientere Produktion in der pharmazeutischen und biochemischen Industrie. Demnach ließen sich durch enantioselektive Katalysen etwa Pflanzenschutzmittel unter einem deutlich geringerem Energieaufwand erzeugen (Blaser, 2010).

Den Begriff der Homochiralität des Lebens wählte Lord Kelvin im Jahre 1904 in seiner Vorlesung (Thomson, 1894) basierend auf der Feststellung, dass einige Stoffe ausschließlich in ihrer L- bzw. D-Form in der Natur vorkommen. Eine mögliche ursächliche Begründung für diesen Sachverhalt liegt allerdings bis heute noch nicht abschließend vor und zählt zu den letzten ungeklärten „Welträtseln“ der Natur (Helbig, 2018, S. 231). Bis heute bestehen hierzu mehrere Theorien nebeneinander, die jeweils auf unterschiedlichen Präideen, fachkulturellen Prämissen und Positionierungen beruhen (Luisi, 2016, S. 8ff.). Dabei ist erstens die Theorie der *autopoiesis* zu nennen, die etwa von Louis Pasteur mit seiner Annahme vertreten wurde, dass das Leben nicht spontan aus dem Nichts heraus entstanden ist, sondern immer aus dem Lebendigen selbst hervorgeht. Dieser Ansatz sieht keine analytische Trennung zwischen der belebten und unbelebten Welt vor, alles befindet sich im Fluss des Werdens und Vergehens (ebd., S. 4). Dass die Entstehung des Lebens kein Zufall gewesen sein kann, nehmen auch die Vertreter/innen der zweiten zu nennenden theoretischen Strömung an. Der *ex lege* Ansatz geht davon aus, dass der Homochiralität des Lebens physikalische Grundprinzipien zugrunde liegen und vermutlich auf die Asymmetrie der Elementarteilchen zurückgehen (Quack, 2002) (siehe ausführlich dazu in Kapitel 6). Als dritte Theorie steht die Annahme im Raum, die Enantiodiskriminierung bei den molekularen

20 In diesem Zusammenhang ist insbesondere der Chemie-Nobelpreis aus dem Jahre 2001 zu nennen, der gemeinsam an William S. Knowles und Ryoji Noyori im Zusammenhang mit deren Arbeiten zur stereoselektiven Hydrierung in der Katalysforschung sowie Barry Sharpless für die Entwicklung der sog. Sharpless-Epoxidierung, einer heute weit verbreiteten asymmetrischen Katalyse-Reaktion, verliehen wurde (Anonymus, 2001).

Bestandteilen des Lebens sei durch ein rein zufälliges Zusammenspiel verschiedener Faktoren entstanden (Luisi, 2016, S. 69). Insbesondere die letzten beiden Ansätze stehen sich eher unversöhnlich gegenüber, berühren sie doch die chemiephilosophischen Grundprobleme der Reduzierbarkeit chemischer Phänomene auf physikalische Gesetze (Luisi, 2002). Viertens kommt noch die ebenfalls weit rezipierte Theorie hinzu, die Chiralität der Bausteine des Lebens sei mitunter gar nicht auf der Erde entstanden, sondern von externen Planeten über Kometen, an denen Aminosäuren hafteten (Pizzarello und Cronin, 1998).

So polarisierend die theoretischen Zugänge zur Entstehung der molekularen Homochiralität auf der Erde auch sein mögen, drücken sie doch aus, dass eine Erklärung zur Entstehung der Chiralität in Verbindung mit der Erklärung zur Entstehung des Lebens *per se* in Verbindung steht. An dieser Stelle in der Auseinandersetzung mit der Chiralität treten wieder entscheidende Grenzziehungen zutage, die das Feld der Chemie als Disziplin umreißen: einerseits zu den benachbarten epistemischen Räumen von Physik und Biowissenschaften und andererseits zwischen belebter – unbelebter Materie sowie organischen – anorganischen Verbindungen. Die Beschäftigung mit der Chiralität führt die biologische Evolution mit der chemischen Evolution (Abiogenese) zusammen und stellt die Frage nach den erdgeschichtlichen Entwicklungsschritten, an denen aus anorganischen und mineralischen Verbindungen (Wasser, Ammoniak) im Zusammenschluss mit Kohlenstoff organische wurden und diese im Verlauf des Eoarchaikums zu Zuckern, Lipiden, Aminosäuren formierten, aus denen sich wiederum Prokaryoten, Zellen und Organismen ergaben (Luisi, 2016). Die Chiralitäts-Geschichte spiegelt an dieser Stelle den Beginn einer Entwicklung wieder, die in den Feldern der Chemie bis heute beobachtet wird: die Expansion chemischer Epistemik und Methodik in die *Life Sciences* durch eine chemisch-molekulare Beschreibung lebendiger Phänomene.

Die Molekularisierung der *Life Sciences* und der (Bio-)Medizin wird in der Wissenschaftsgeschichte häufig in der Folgezeit nach dem Zweiten Weltkrieg mit dem Beginn der Genetik in Verbindung gebracht, allerdings zeigt ein Blick in die Geschichte der Chemie (der von Wissenschaftshistoriker/innen nach wie vor allzu oft gescheut wird), dass die Wurzeln doch in frühere Zeiten zurückreichen (Abschnitt 5.1). Der hybride und vielschichtige Grenzbereich zwischen organischer Chemie und Biochemie, wie er sich mit dem ausgehenden 19. Jahrhundert auftrat, erwies sich zudem als besonders fruchtbar für die Chiralitätsforschung. So wurden in den Bereichen Biotechnologie, Nanotechnologie und Pharmakologie zahlreiche Anwendungsbereiche erschlossen, die insbesondere auf fortschrittliche Methoden der organischen Analytik und Synthetik zurückzuführen sind. Die Trennung von Enantiomeren und Aufreinigung von chiralen Stoffen erforderte präzise Chromatografie-Geräte und war eng verwoben mit der sog. Apparate-Revolution in der Chemie der 1960er Jahre und stellt einen dritten zentralen

Wendepunkt in der Geschichte der Chiralität dar, was im folgenden Abschnitt näher erörtert wird. Die Quantentheorie ersetzte ab den 1920er Jahren sukzessive die Grundannahmen und Atommodelle der klassischen Mechanik, was auch für die Felder der Chemie – und ihr Verhältnis zur molekularen Welt – tiefgreifende Veränderungen mit sich führte. Dieser Wandel sei in Abschnitt 2.3 erneut mit Fokus auf die Chiralität wiedergegeben.

2.3 Die Kulturen der Chemie im Kontext von Quantenmechanik und NMR-Revolution

Folgt man der Chiralität durch den weiteren kanonisierten Verlauf der Chemiegeschichte des 20. Jahrhunderts, stößt man auf die Verschränkung von Quantenmechanik und der sog. Instrumentellen Revolution (Morris, 2002), die nach dem Zweiten Weltkrieg einsetzte und sich insbesondere in der Einführung der NMR-Spektroskopie in die Chemie niederschlug. Mit dem Aufkommen der Quantenmechanik wurden die Theorien und Modelle der klassischen Mechanik obsolet und durch das sog. Standardmodell als theoretisch-experimentelles Fundament der Physik ersetzt (Sieroka, 2014, S. 58f.). Dies zog auch für die Chemie erhebliche Konsequenzen nach sich: Zum einen ergab sich durch die neuen mentalen Modelle der Quantentheorie das Problem des sog. Physikalismus und der Annahme einer Reduzierbarkeit von chemischen auf physikalische Eigenschaften (Hendry, 2012). Die *Boundary Work* zwischen chemischen und physikalischen Feldern fällt in diesen Bereich besonders deutlich aus und hält bis in die Gegenwart an, wie in Kapitel 6 ausgeführt wird. Zum anderen ergaben sich durch eine theoretisch-konzeptionelle Annäherung zwischen Chemie und Physik erhebliche disziplinäre Re-Konfigurationen und Veränderungen in der disziplinären Dynamik im Grenzbereich zwischen Physik und Chemie (Nye, 1992). Dies betrifft vor allem die Betrachtungsebene des Molekularen, die die Chemie erschaffen, mit Bedeutung angereichert und auf andere Wissenschaftsbereiche ausgeweitet hat. Mit der Quantenphysik erwiesen sich Atome und Moleküle nicht mehr als kleinste Einheiten der Materie, sondern Elementarteilchen, Ladungen und Symmetrien wurden der molekularen Ebene als deren Grundlage vorangestellt.

In the second half of the twentieth century, chemistry underwent a profound transformation. Its object of examination, the chemical substance, was transmuted into abstract structure; its most important method, the chemical reaction, was supplemented by physical methods; and its practitioner, the chemist, was partially displaced by technical instruments. At the center of this transformation were physical methods. As much as shifts in data in nuclear magnetic resonance spectroscopy and molecular rearrangements in mass

spectrometry were used to interpret the results obtained by these techniques, so their adoption from chemistry was bound to shifts and fundamental rearrangements of the discipline (Reinhardt, 2006, S. vii).

Nach dem Zweiten Weltkrieg trat im chemischen Laboratorium ein fundamentaler Wandel ein, der mit einer ebenso fundamentalen Re-Konfiguration der naturwissenschaftlichen Systemwissenschaften Physik, Biologie und Chemie und deren Subdisziplinen einherging (Klein und Reinhardt, 2014). Die Instrumentelle Revolution der Chemie steht in engem Zusammenhang mit der Begründung der Quantenmechanik und den theoretisch-experimentellen Wechselwirkungen zwischen den genannten Feldern. Mit dem Wandel der chemischen Instrumentalpraxis veränderte sich auch das Weltbild der Chemie und das Verständnis von der molekularen Welt, nicht nur in der Chemie selbst, sondern auch in die zahlreichen Disziplinen der Biochemie und Materialforschung, in die chemische Methodik und Theorie bereits expandiert waren (Bensaude-Vincent, 2001). Mit Quantentheorie und Teilchenphysik wurde das chemische Weltbild um eine abstrakte, submolekulare Betrachtungs- und Experimentalebene erweitert (Bensaude-Vincent und Stengers, 1996, S. 263). Mit Fragen nach den universellen Symmetrien spielte auch die Chiralität an dieser Schnittstelle eine tragende Rolle, denn es bildete sich parallel zum chemischen (strukturbasierten) Konzept der Chiralität ein physikalisches Konzept materieller und energetischer Asymmetrien heraus. Darüber hinaus wird dargelegt, wie die Chiralität das Feld der organischen Stereo- und der Biochemie zunehmend verließ und sich auf Wanderschaft in eine Vielzahl außer-chemischer Disziplinen und Bereiche begab.²¹

Die chemische Struktur hatte sich im Zeitraum von 1820 und 1880 zur *lingua franca* der Chemie entwickelt und war als ästhetisch-epistemische Repräsentation der molekularen Welt in der Fachidentität der Chemie des 19. Jahrhunderts sedimentiert (Laszlo, 2007, S. 341). Die organische Chemie hatte sich zur chemischen Leitdisziplin etabliert und die standardisierten Praktiken und Methoden der sog. Nass-Chemie zur Herbeiführung chemischer Reaktionen dienten der analytischen Strukturaufklärung mit dem Ziel diese Kenntnisse für Synthesen nutzbar zu machen (Steinhauser, 2014, S. 40). Die organische Strukturchemie geriet trotz ihres wissenschaftlichen Erfolges bezüglich chemischer Analyse, Synthese und Katalyse mit der Zeit an die Grenzen ihrer theoretischen Erklärungskraft, denn sie lieferte nur wenig zufriedenstellende theoretische Erklärungen für die Dynamiken chemischer Bindung und Reaktion (Nye, 1993, S. 110ff.). An dieser Stelle gewannen die sich in den 1890er Jahren allmählich etablierenden Vertreter/innen der

21 Zur Popularisierung der Chiralität ist anzumerken, dass es letztendlich keine Chemiker/innen waren, die die Chiralität in die Welt getragen haben, sondern Physiker/innen, Mathematiker/innen, Philosoph/innen und Künstler/innen (Cintas, 2007, S. 4016).

physikalischen Chemie an Bedeutung, die häufig aus den akademischen Zentren der organischen Chemie hervorgegangen waren (ebd., S. 105). Die Erforschung von Energien und Kräften (und wie diese sich ineinander übersetzen lassen) war nicht abschließend disziplinär organisiert und es bildete sich ein Grenzbereich zwischen Chemie und Physik²² heraus, der von chemischen wie physikalischen Fragestellungen geprägt war (Nye, 1992, S. 209).

Diese knüpften an den elektrodynamischen Theorien und organischen Bindungslehren an und erweiterten diese in Auseinandersetzung mit physikalischen Konzeptionen, die insbesondere Bereich der Gas-, Thermo-, Photo- und Elektrochemie zu einer nachhaltigen Wirkung beitrugen. Erweiterungen dieser Ansätze lagen etwa mit Michael Faradays' Theorie des elektromagnetischen Feldes vor und Konzeptionen von Magnetismus und Elektrizität zogen in die Lehrbücher der Chemie ein (ebd.). Damit wurden auch nach und nach physikalische Größen, Weltbilder und Methoden in der Chemie präsent und etablierten sich sukzessive als theoretisches Fundament der Chemie, obwohl die Annahme einer Reduzierbarkeit auf physikalische Gesetze bereits im 19. Jahrhundert bei zahlreichen Chemiker/innen Befürchtungen hervorgerufen hatte (Nye, 1993, S. 54f.). Damit, dass physikalischen Größen wie Licht, Temperatur und Elektromagnetismus auch in der Chemie zunehmend Raum gewährt wurde, trat ein Wandel in der Wahrnehmung dessen ein, was den primären Erkenntnisgegenstand der Chemie ausmache. Die Annahme, die Chemie sei die Lehre der Moleküle und deren Verhalten, brach mit dem Einzug physikalischer Konzeptionen²³ allmählich auf (Nye, 1992, S. 206). Die Annäherungen²⁴ zwischen Physik und Chemie wurden schließlich

-
- 22 Beide Disziplinen betrieben demnach einen erheblichen Aufwand, die jeweilige Autonomie aufrechtzuerhalten, denn bereits während der Wende zum 20. Jahrhundert waren Lehrstühle, Laborflächen, Zeitschriften, Fördersummen und wissenschaftlicher Nachwuchs begehrte Ressourcen. Dies wird besonders deutlich im Entstehen und Vergehen einer Vielzahl an hybriden physiko-chemischen Grenzdisziplinen wie der physikalischen Chemie zu beobachten (Barkan, 1992; Nye, 1992). Eine besonders gründliche Untersuchung dieser Prozesse unter einer wissenschaftssoziologischen wie -historischen Perspektive liegt mit (Nye, 1993) vor.
- 23 Die physikalische Chemie etablierte sich zunehmend an den chemischen Instituten und gewann durch gewichtige Vertreter/innen an Einfluss. Dazu zählen insbesondere die beiden Nobelpreisträger und ihrerzeit äußerst populären Vertreter der physikalischen Chemie Wilhelm Ostwald und Jacobus Van 't Hoff. Im ausklingenden 19. Jahrhundert näherten sich Physik und Chemie einander an und es trat eine zunehmende Verwobenheit der disziplinären Themen und Zuständigkeitsbereichen ein, nachdem sie lange bezüglich ihrer Fragen und Gegenstände ein eher getrenntes Dasein geführt hatten (Bensaude-Vincent und Stengers, 1996, S. 225).
- 24 Wie deutlich wird, sind einige Vertreter/innen der Chemiegeschichte darum bemüht, eine heterogene und wechselseitige Genese von Physik und Chemie in Disziplinengeschichte nachzuweisen (Reinhardt, 2004; Reinhardt, 2001b; Nye, 1993; Bensaude-Vincent und Simon, 2012b; Simões und Gavroglou, 2001; Gavroglou und Simões, 2012). Dies ist mit der Kritik ver-

durch die Entdeckung der Radioaktivität beschleunigt, die zugleich eine bedeutenden Gegenstand chemisch-physikalischer Grenzarbeit darstellt (Roqué, 2001). Waren die von Marie und Pierre Curie sowie Henri Becquerel entdeckten radioaktiven Strahlen als Eigenschaft von chemischen Elementen zu verstehen wie etwa das anschließende chemie-übergreifende Projekt der gezielten Suche nach radioaktiven Elementen zum Ausdruck kam? Oder war die radioaktive Strahlung eher als fundamentales Prinzip zu verstehen, wie es dem physikalischen Erkenntnisinteresse entsprach? War die Radioaktivität als chemische oder physikalische Eigenschaft zu verstehen? (Van Tiggelen, 2001, S. 131f.)

In der Chemie führte die Entdeckung der Radioaktivität dazu, dass man sich neben dem Gesamtkomplex des Moleküls zunehmend auch auf dessen Bestandteile fokussierte, die man bis dato eher als vage Heuristik angenommen hatte: die Atome. Hierzu trugen insbesondere Ernest Rutherfords²⁵ Experimente zur radioaktiven Alpha-, Beta- und Gammastrahlung bei, die er als nukleare Teilchen mit einer spezifischen Ladung auffasste. Das Element büßte in diesem Prozess zunehmend seine Identität als eigenständige chemische Entität ein und wurde durch den *zoom* auf den Atomkern von Physiker/innen angeeignet und gewissermaßen auf die Atomkerne reduziert.²⁶ Die Teilchenphysik überschritt mit der Erschließung der supramolekularen bzw. atomaren Welt eine weitere epistemische Grenze, indem sie die Existenz von Atomen schließlich im Laufe der 1910er Jahren als bestätigt anerkannte und im Laufe der Zeit nachwies, dass das Atom nicht die kleinste Einheit der Materie darstellt, sondern sich selbst wiederum aus Partikeln wie Elektronen, Neutronen und Protonen zusammesetzt (Bleck-Neuhaus, 2013, S. 16). Isabelle Stengers spricht in diesem Zusammenhang von einem kosmopolitischen Raum, in dem die verschiedene disziplinäre, ästhetische

bunden, dass in der *allgemeinen* Wissenschaftsgeschichte die Chemie weitestgehend ignoriert wird oder auf einseitigem Weg die Effekte physikalischer Entwicklung auf die chemischen Wissenschaften erzählt werden, umgekehrt jedoch nicht.

- 25 Rutherfords bekanntes Atommodell aus dem Jahre 1913, einem dreidimensionalen geometrischen Modell, das an die Umlaufbahn von Planeten erinnert, vereinte die Identität des chemischen Element (aufgrund dessen Ladungsverteilung) mit der (klassischen) mechanischen Theorie seiner Zeit. Das resultierende Atommodell bestand aus einem positiv geladenen Nukleus (der beinahe die gesamte Masse eines Atoms ausmacht), der von einer elementenspezifischen Anzahl negativ geladener Elektronen umgeben ist.
- 26 Bensaude-Vincent und Stengers kritisieren darüber hinaus, dass die sich als allgemein verstehende Wissenschaftsgeschichte den historischen Beiträgen der Chemie zur Entstehung der Atommodelle und -theorien im Rahmen der Quantenmechanik einen zu geringen Raum zuspricht. Dass Radioaktivität und die atomare Betrachtungsebene in späteren Zeiten der Physik zugesprochen wurden, trug dazu bei, dass Chemiker/innen und ihre Werke in diesem Zusammenhang in Vergessenheit gerieten und die Entstehung der supramolekularen Welt vor allem in chemischen Fragestellungen zu finden ist, unsichtbar bleibt (Bensaude-Vincent und Stengers, 1996, S. 225-231).

und epistemische Zugänge aufeinander treffen und trotz der Pluralität an konkurrierenden Realitäten eine gewisse Handlungsfähigkeit bestehen bleibt (Stengers, 2010c, S. 222ff.). Das Erschließen des Submolekularen sowie eines gemeinsamen Erkenntnisinteresses führte zunächst zu einer Annäherung zwischen theoretischer Chemie, organischer Strukturchemie und Physik.

Während Rutherfords Atommodell auf der klassischen Mechanik beruhte, griff Nils Bohr in seinen Überlegungen auf die Erkenntnisse der Quantenmechanik zurück. Auch Bohr ging davon aus, dass die negativ geladenen Elektronen um einen positiv geladenen Atomkern in festgelegten Bahnen, sog. Orbitalen, angeordnet sind, die wiederum diskreten gequantelten Energiezuständen entsprechen. Er stellte fest, dass Atome bei der Reflektion bzw. Absorption einer bestimmten Menge von Strahlung von einer in eine andere Orbitale überwechselt, wobei es zu sog. Quantensprüngen kommt (Bohr, 1913). In der Chemie erfuhr dieses Modell regen Zuspruch, denn es wurde im Verlauf festgestellt, dass die Anzahl von Orbitalen (bzw. Atomshalen) eines Atoms mit der Rangfolge und der Klassifikation unter einer Periode in Mendeleejvs Periodensystem der Elemente korrespondierte (Nye, 1993, S. 230). Die Quantentheorie wurde in diesem Kontext zunehmend auf die molekulare Welt angewandt und mit dem Jahre 1927 war letzten Endes auch das Feld der Quantenchemie geboren (Gavroglou und Simões, 2012). Doch Bohrs Atommodell ließ sich auch mit den rätselhaften schwarzen Spektrallinien des Sonnenlichts (sog. Fraunhofer Linien) in Einklang bringen, die Robert Bunsen und Gustav Kirchhoff damit erklärt hatten, dass die Atome verschiedener Elemente Lichtstrahlen in Abhängigkeit von verschiedenen Frequenzen unterschiedlich absorbieren und emittieren (Quack, 2014, S. 67). Dies trug wiederum zum Fortschritt in der Quantentheorie bei, die u.a. aus der Suche nach mathematischen Modellen für die beobachtbaren Spektren des Lichts gespeist wurde.

Basierend auf den Erkenntnissen der Quantentheorie zu Energiezuständen, Eigenzustand, Strahlung und Elektronenspin, wurde im Kontext der Teilchenphysik die Spektroskopie als Methode zur Analyse von molekularen und atomaren Systemen entwickelt. Die Art und Weise wie ein bestimmter Stoff verschiedene Arten von Strahlung – sei es Sonnenlicht, Gammastrahlung, Mikro- oder Radiowellen – absorbiert, streut oder emittiert, ist kein Zufall, sondern folgt charakteristischen Mustern, die sich technisch abbilden, messen und durch eine mathematische Funktion beschreiben lassen (Steinhauser, 2014, S. 19). Im Laufe der Zeit wurden somit zahlreiche technische Hilfsmittel entwickelt, die auch nicht-visuell wahrnehmbare Frequenzbereiche jenseits des Sonnenlichtspektrums zugänglich machten. Verschiedene Messmethoden unterscheiden sich entsprechend der Wellenlänge und des Frequenzbereichs, den sie jeweils abdecken und mathe-

matisch beschreiben können.²⁷ Im Laufe seiner Entwicklungsgeschichte erlaubte die NMR-Technologie zunächst die Bestimmung einzelner Elemente aufgrund ihrer spektralen Eigenschaften, später die Voraussage bislang unbekannter Elemente bis hin zur Aufklärung ganzer molekularer Gebilde aufgrund ihrer Struktur, angefangen bei kleinen Molekülen bis hin zu komplexeren Biomolekülen.

Die NMR-Spektroskopie basiert auf dem Prinzip, dass in einem starken Magnetfeld eine Stoffprobe mit elektromagnetischen Strahlen bestrahlt wird. Ein Detektor im Gerät registriert die emittierten Frequenzen der Atomkerne, die von der Geometrie ihrer Umgebung abhängig sind, weswegen nicht alle Frequenzen (beispielsweise für eine Methylgruppe) nicht aufeinander, sondern in ein Spektrum fallen. Der NMR-Spektrometer verrechnet diese Signale softwaregestützt und produziert ein sog. Spektrum, das Aufschluss über die molekulare Identität eines Stoffes gibt. Die Entwicklung der NMR Spektroskopie fällt historisch mit dem Zeitraum zusammen, in dem die Quantenmechanik sich in der Beschreibung der fundamentalsten materiellen Welt gegen die Annahmen der klassischen Mechanik durchsetzte und beide Prozesse bedingten sich reziprok (ebd., S. 82f.). So lieferte die Quantenmechanik nicht nur ein theoretisches Fundament der Spektroskopie, sondern profitierte gleichermaßen von den zahlreichen spektroskopischen Experimenten, die letztenendes zur Bestätigung der Quantentheorie beitrugen. Die Quantenmechanik beruht ihrem epistemischen Prinzip nach auf statistischen Verteilungen und die in zahlreichen Anwendungsgebieten erzielten Daten dienten deren Nachweis (Bell, 1992).

Welche Rolle spielt die NMR-Spektroskopie im weiteren Kontext der Instrumentellen Revolution und welche Konsequenzen ergaben sich daraus für die Felder der Chemie? Die Entwicklung des Prinzips der NMR-Spektroskopie, sowie entsprechender Apparate wird in den 1930er Jahren datiert; deren Standardisierung sowie massenhafte Produktion und Etablierung als Teil der Standardausrüstung des modernen chemischen Labors fällt in den Zeitraum nach dem Zweiten Weltkrieg und hielt bis in die späten 1980er Jahre an (Laszlo, 2007, S. 333f.). In der Chemiehistoriografie nimmt diese Technologie einen bedeutenden Platz ein und Historiker/innen sind sich einig darüber, dass mit der Einführung der NMR-Spektroskopie zur molekularen Strukturaufklärung ein fundamentaler Wandel in der chemischen Praxis und Re-Konfiguration der chemischen Disziplinen eintrat (Nye, 2018; Rosenfeld und Bhushan, 2000). Die Einführung der NMR-Spektroskopie wird demnach als vierte der fünf kanonisierten Revolutionen

27 Dazu zählen etwa Röntgenspektroskopie für den Bereich der (inneren) Elektronen, die Massenspektrometrie für den Bereich der Ionen oder die kernmagnetische Resonanzspektroskopie bzw. *nuclear magnetic resonance spectroscopy* (NMR) neben Infrarot und Ramanspektroskopie für den molekularen Bereich (ebd.).

der Chemiegeschichte behandelt (Baird, 1993; Chamizo, 2019; Chamizo, 2017).²⁸ Eingebettet wird die NMR-Revolution in den weitergefassten Kontext der Instrumentellen Revolution im Zeitraum von 1930 bis 1960 (Steinhauser, 2014, S. 16). Im Zuge dessen änderte sich die standardisierte Ausstattung des Chemielabors sowie der organisch-chemischen Experimentalkultur von Grund auf.

Demnach ermöglichte die Einführung physikalischer Messmethoden und technischer Apparate wie NMR, Chromatografie und Röntgendiffraktometrie in das chemische Labor die bestehenden technischen Grenzen chemischer Analytik und Synthetik zu überschreiten. Zudem veränderte sich der epistemisch-praktische Zugang zum Stoff, einem der Kernelemente chemischer Fachidentität²⁹, denn das NMR-Probenröhrchen und die *black box* des NMR-Gerätes ersetzten sukzessive das klassische Reagenzglas und die arbeitsintensiven Analysemethoden der sog. *wet chemistry*, bei denen Stoffe in komplexen mehrstufigen Verfahren erst präpariert werden mussten, bevor ein Stoff identifiziert werden konnte (Steinhauser, 2014, S. 17f.). Es bildeten sich im Zuge dessen neue Ausbildungsinhalte, Berufsgruppen und Qualifikationsprofile sowie Formen des *tacit knowledge*³⁰ in der Chemie heraus, denn um ein Spektroskopiediagramm lesen zu können, benötigt es eine spezifische „*visual literacy*“, die erst durch entsprechende Praxis erworben werden muss (Laszlo, 2007, S. 337).

Entsprechend weiterer historiografischer Interpretationen avancierte die Chemie aufgrund der sog. Apparaterevolution zu einer förderintensiven *Big Science*,

28 Das Konzept der Revolution spielt in der Geschichte und Philosophie der Chemie in starker Anlehnung an Thomas Kuhn (Kuhn, 2014) eine bedeutende Rolle und die chronologische Aufteilung der Chemiegeschichte in durch Revolutionen markierte und segmentierte Abschnitte ist eine Präidee, die die gesamte Chemiehistoriografie durchzieht und von verschiedenen paradigmatischen Prämissen durchdrungen ist, die wiederum zu Kontroversen um eine korrekte Einteilung der Phasen führen (McEvoy, 2016). Der revolutionären Charakter der NMR-Technologie wird primär durch Vertreter/innen eines technik- bzw. objekthistorischen Zugriffs auf die Chemiegeschichte betont (Morris, 1992; Morris, 2015; Morris et al., 2001; Laszlo, 2007; Reinhardt, 2000c; Reinhardt, 2004; Reinhardt, 2006; Steinhauser, 2014).

29 Diese Zuschreibung geht auf (Soentgen, 2008) zurück.

30 *Tacit knowledge* (implizites Wissen) bezeichnet in der Wissenssoziologie eine Form impliziten, nicht-verbalisierbaren, inkorporierten Handlungswissens (Polanyi, 1966). Als anschauliches Beispiel dient dabei das Binden von Schnürsenkeln: Beherrscht man es, handelt es sich um eine banale, alltägliche Handlung. Die einzelnen Schritte des Bindens zu verbalisieren gestaltet sich allerdings als Herausforderung. *Tacit Knowledge* zeichnet sich dadurch aus, dass insbesondere praktisches und handwerkliches Wissen in einem Sozialisationsprozess erworben wird. Dazu zählen im Kontext der Chemie vor allem basale Laborpraktiken wie einen Bunsenbrenner auf die *richtige* Flamme einzustellen, Geschicklichkeitsübungen wie Glaskapillare zu ziehen oder auf den ersten Blick zu erkennen, wenn ein Destillat die richtige Temperatur erreicht hat.

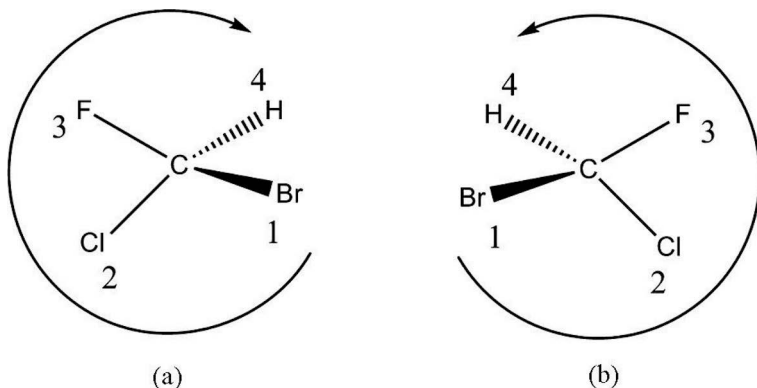
im Rahmen derer neue Bereiche großindustrieller Produktion³¹ und Entwicklung erschlossen wurden, die die Kapitalvolumina der bereits erwähnte Kohleteerindustrie bei weitem überstiegen. Als 1952 die ersten kommerziell produzierten NMR Spektrometer der Firma Varian in den USA auf den Markt kamen, setzte alsbald ein weltweites Wettrennen um die leistungsfähigeren, hochauflösenderen und in der Messung empfindlicheren Geräte ein (Feeney, 1992, S. 204ff.). Da bald jedes Chemielabor, das Stoffanalysen auf dem neusten Stand durchführen wollte, gezwungen war, sich ein solches Gerät anzuschaffen (und entsprechend des raschen Fortschrittes immer wieder durch die neueste Version zu ersetzen), entstand in den 1960er bis in die 1980er Jahre hinein ein Wachstumsmarkt (ebd., S. 212). Schließlich wurden NMR-Geräte mit computergestützten Auswertungsverfahren und Softwarelösungen verknüpft, was zu einer frühen Digitalisierung der Chemie betrug und deren Status als *high tech science* manifestierte (Laszlo, 2007, S. 345). Die Schnittstelle zwischen privatwirtschaftlich vermarkteten technischen Instrumenten und akademischer Forschung stellte die Chemie vor eine neue Herausforderung: große Summen öffentlicher Gelder mussten akquiriert werden, was rechtfertigungsbedürftig war (Steinhauser, 2014, S. 12). Da ein einziges Gerät hunderttausende US-Dollar kosten konnte und Folgeamodelle mit wachsender Magnetfeldstärke im Preis zusätzlich stiegen, ging die Schere zwischen finanziell gut ausgestatteten Institutionen und solchen, die mit diesen nicht mehr konkurrieren konnten, auseinander (ebd.). Dies betraf insbesondere die wissenschaftliche Peripherie des Globalen Südens während wohlhabende Universitäten und Wissenschaftler/innen in der Schweiz, Frankreich und den USA an den Innovationen in Form von akademischen Ausgründungen mitverdienten (Feeney, 1992; Ernst, 2016). Der Erfolg beim Einwerben von Geldern für die Anschaffung kostspieliger Geräte stellt bis heute einen gewichtigen Faktor in der Berufskarriere von Chemiker/innen in der Akademie dar.

Auch die Strukturchemie sollte in erheblichem Maße von der Instrumentellen Revolution und insbesondere durch die NMR-Spektroskopie-Methoden profitieren, wobei die Stereochemie eine zentrale Rolle einnahm. Da sich chirale Moleküle in ihren physikalischen Eigenschaften nicht unterscheiden, müssen bei einer enantiospezifischen Strukturaufklärung bestimmte Reagenzien verwendet werden, um einen Unterschied zwischen rechts- und linkshändigen Formen eines Stoffes nachzuweisen (Subramanian, 2007). Denn im Gegensatz zu den etablierten nassen Methoden, die durch elektronisch-physikalische Apparaturen und Instrumente abgelöst wurde das Erkenntnisinteresse dieses Forschungsfeldes keinesfalls

31 Die Transition von *low-tech* Praktiken der Nass-Chemie zur flächendeckenden Verbreitung von *high-tech* Methoden ist als gradueller Prozess zu verstehen und lange Zeit bestanden beide epistemische Welten parallel zueinander bis die eine die andere sukzessive ablöste, insbesondere im internationalen Vergleich und in der Ausbildung (Laszlo, 2007, S. 345).

obsolet, sondern wuchs durch die enorme Erweiterung technischer Möglichkeiten seit den 1960er Jahren stark an (Gal, 2013a). Auch sollte ihre Position als chemische Leitdisziplin bestehen bleiben, denn die Reduzierbarkeit auf quantenmechanische Gesetzmäßigkeiten schmälerten nicht die Bedeutung des dominanten „mental-Modelles“ der organischen Chemie, der Struktur (Steinhauser, 2014, S. 39ff.). Die Identitätsbestimmung von Stoffen erfolgte nach wie vor auf der Grundlage der dreidimensionalen Strukturmodelle, die sich als modellhafte Repräsentation der molekularen Welt und der chemischen Reaktion festgeschrieben hatten (ebd., S. 45) und stand nicht in Konflikt mit der Theorie kernmagnetischer Resonanz. Letzterer gelang es trotz ihrer Grundlage in der fundamentaltheoretischen Quantenmechanik bis heute nicht, die visuelle und sprachliche Repräsentation der molekularen Welt durch die Strukturformeln zu ersetzen (Reinhardt, 2006, S. 355f.). Und auch wenn durch Computer berechnete und visualisierten Spektren als wissenschaftliche Bilder über eine bedeutende epistemische Macht verfügten, blieben die chemischen Strukturformen in der Abbildung der molekularen Welt hegemonial. Wie deutlich wird, steht der Umgang mit dieser Technologie für das Erfolgsmodell mithilfe dessen sich die chemischen Felder trotz verschwimmenden Grenzen zu ihren Nachbarfeldern ihre Stabilität bewahrt hat: durch ein pragmatisches Verhältnis in der Aneignung neuer Experimentalkulturen sowie deren Einbettung in bestehende chemische Denkmuster (Reinhardt, 2004).

Als weiterer Aspekt der dreidimensionalen Struktur kam bei zunehmender Anwendung der gängigen Spektroskopiemethoden die Frage nach der Händigkeit von Molekülen auf und wie diese sich analysieren, berechnen und darstellen lassen. Die Chiralität war zur Mitte des 20. Jahrhunderts in den Lehrbüchern der organischen Chemie bereits flächendeckend etabliert und wurde als bedeutende Eigenschaft der molekularen Struktur wahrgenommen zumal vermehrt ihre Bedeutung für biologische Zusammenhänge erschlossen wurde (Gal und Cintas, 2013). Die Analyse chiraler Verbindungen mithilfe der NMR-Spektroskopie verbreitete sich rasant, als chirale Moleküle 1955 durch die Cahn-Ingold-Prelog-Konvention (siehe Abb. 2.9) die in 3.1 angeführte R (*rectus* für rechts) und S (*sinister* für links) Nomenklatur erhielten (Cahn et al., 1956). Diese Nomenklatur basierte nicht mehr länger auf Emil Fischers Polarisationsrichtung von Licht in der Ebene, sondern auf den absoluten Konfigurationen von Isomeren, einer molekularen Strukturtheorie und Darstellungsform für die Ernest Barton 1969 mit dem Nobelpreis geehrt wurde. Neben den Methoden der chiralen Strukturanalyse entwickelten sich in den 1970er bis 1990er Jahren auch die technischen Methoden der Enantiomertrennung und der stereoselektiven Katalyse heraus (Schurig, 2005). Da in der industriellen Praxis und Forschung häufig nur einer der beiden Enantiomere gewünscht ist bzw. ein bestimmtes molares Mischverhältnis, hat sich ein weites chemisches Feld der Analytik und Synthetik herausgebildet, das sich diesem Problem annimmt (Subramanian, 2007). Hierbei sind vor allem Verfahren



Anwendung der Prioritätenregel nach der Cahn-Ingold-Prelog-Konvention (CIP) im Falle von (R)-Bromochlorofluoromethan und (b) (S)-Bromochlorofluoromethan. Die CIP-Konvention ermöglicht das Bestimmen des chiralen Drehsinns einer Substanz auf der Grundlage standardisierten „Abzählens“ priorisierter Liganden. Je nach Ordnungszahl der jeweiligen Substituenten (die aus dem Periodensystem übertragen werden kann) wird ihnen dabei eine Priorität zugewiesen. Im Falle des Bromochlorofluoromethans handelt es sich dabei um Brom (Ordnungszahl 35), Chlor (17), Fluor (9) und Wasserstoff (1) (ebd.). Je höher die Ordnungszahl, desto höher die Priorität, weswegen Brom an erster Stelle liegt und das Wasserstoffatom an letzter (vierter). Werden die Prioritäten in die Strukturgrafik eingetragen wird, ergibt sich für das Exempel des Bromochlorofluoromethans jeweils ein Drehsinn: beim (S)-Enantiomer rotiert das Molekül gegen den Uhrzeigersinn, während die (R)-Form dem Uhrzeigersinn folgt (Cahn et al., 1956). Übernommen aus (Riehl, 2010, S. 15).

zur Trennung von Enantiomeren (Racematspaltung) wie Gas- oder Flüssigkeitschromatografie (Francotte, 2006), Kapillarelektrophorese (Mangelings und Van der Heyden, 2011), Kristallisation (Saigo, 2006) sowie kinetische Racematspaltung entwickelt worden. Mithilfe verschiedener Chromatografiemethoden in der Flüssig- und Gasphase ließen sich Mischverhältnisse chiraler Stoffe in ihre Enantiomere aufspalten. In den 1970er Jahren bildete sich zudem eine eigene Maßzahl heraus, die den Grad der Reinheit derart aufgetrennter Enantiomere beschreibt, den sog. *enantiomeric excess* oder *ee*-Wert (Morrison und Mosher, 1971).

Auch an den Schnittstellen der wachsenden biochemischen und biomedizinischen Forschungsbereiche fanden technische Innovationen statt, so etwa im Bereich bildgebender Verfahren der Magnetresonanztomografie, die aus der NMR hervorgingen (Morris, 1992). In diesen Entwicklungen zeigt sich die zunehmende Hybridisierung von Chemie und Biowissenschaften, Biochemie, biosynthetischer und biotechnologischer Forschungsbereiche. Die Frage nach der Komplexi-

tät molekularer Strukturen (bzw. die Unterscheidung zwischen *kleinen* und *großen* Strukturen) stellt eine wichtige Größe in der Grenzarbeit zwischen Chemie und Biologie dar, die sich in aktuellen Problemen und Fragestellungen dieser Felder widerspiegelt (siehe Kapitel 4). Große Makromoleküle, wie sie in den Lebenswissenschaften omnipräsent sind, bestehen demnach häufig aus dutzenden, wenn nicht hunderten Stereozentren und können daher in einer völlig unübersichtlichen Anzahl von Isomeren auftreten (Ahuja, 2011). Diese ausufernde Komplexität beraubt die Forschenden ihrer Handlungsfähigkeit und wie in Abschnitt 4.3 näher auseinandergesetzt wird, wird die chirale Eigenschaft von Makromolekülen nicht selten bewusst ausgeblendet oder technisch entfernt. Diese Auseinandersetzungen (bzw. Nicht-Auseinandersetzungen) mit der Chiralität in den 1990er bis 2000er Jahren stellen quantitativ einen Höhepunkt in der Chiralitätsgeschichte dar. Sämtliche Bereiche der Biochemie, die sich mit der Chiralität in der organischen Chemie und deren Anwendungsfeldern beschäftigen, wuchsen deutlich an, ebenfalls die Publikationszahlen, Forschungsetats und einschlägigen Konferenzen. Neben Ehrungen und Auszeichnungen wie der *Chirality Medal* wurden auch mehrere Journale wie *Chirality* (seit 1989) oder *Enantiomer* (2002 – 2003) gegründet, die sich überwiegend der Chiralität in organischer Chemie und Medizinalchemie widmeten.

Historisch fällt dieser Trend mit dem in der Chemiegeschichte kanonisierten dramatischen Wendepunkt um das Jahr 2000 zusammen, als gar die Auflösung der Chemie besiegelt schien (Morris, 2008). Während die chemischen Wissenschaften in den 1980er und 1990er Jahren ihre Fragestellungen, Betrachtungsweisen, Konzepte (u.a. der Chiralität), Praktiken und epistemische Kulturen in zahlreiche benachbarte Felder exportierte, wurde sie gewissermaßen omnipräsent und die Chemie avancierte weltweit zur größten wissenschaftlichen Disziplin (Schummer, 2006). Die aus der organischen Chemie übernommene molekulare Betrachtungsweise wurde in Biomedizin und *Life Sciences* im Zuge von *Big Science*-Projekten wie dem *Human Genome Project* und hybriden interdisziplinären Grenzfeldern wie den sog. *Omics Sciences* zum Leitparadigma. Gleichzeitig transformierte sich das Molekül, das in seiner strukturbasierten Gestalt seit dem 19. Jahrhundert eine feste Denkgröße der Chemie darstellte (Nye, 1992, S. 206). Infolge dieser Entwicklungen zeichnete sich nach diesem Zenit der chemischen Wissenschaften ein schleichender Rückgang ab. Das sog. *re-branding* bzw. der „Etikettenschwindel“ (Schummer, 2017a), den Chemiehistoriker/innen zur Jahrtausendwende als Begleiterscheinung des sukzessiven Zerfalls der chemischen Hegemonie ausmachten, drückt dies besonders deutlich aus. Die Chemie erwies sich gemäß der Verbreitung ihrer Gegenstände nach wie vor als omnipräsent und wurde zugleich unsichtbar und verzeichnete einen dramatischen Rückgang unter Studierenden sowie Mitgliedern ihrer Fachgesellschaften (Morris, 2001b). Mit der Hybridisierung und Verschmelzung der klassischen Großdisziplinen verloren die

Konzepte der Chemie – wie etwa der Chiralität – an Einfluss und fachfremde Zugriffe auf die molekulare, bzw. sub- oder makromolekulare Welt wurden allmählich dominant, der sich gegenwärtig neben den erwähnten Lebenswissenschaften auch in der Nano-, Material- und Oberflächenforschung zeigt. Die Untersuchung der gegenwärtigen Grenzziehungsprozesse zwischen Biologie, Physik und Chemie, wie sie in den Kapitel 4 bis 6 beschrieben werden, bietet eine Perspektive darauf, welche Konsequenzen sich aus den aktuellen Innovationsdispositiven für diese Felder ergeben.

Röntgendiffraktometer, Chromatografen und Massenspektrometer gehörten neben der NMR seit den späten 1960er Jahren zur Standardausstattung des Chemielabors. Sie wurden zu Prestigeobjekten und erwiesen sich als besonders erfolgreich in Anbetracht ihrer zeitgenössischen Forschungsförderungsdispositive des Kalten Krieges und des Sputnik-Schocks (Laszlo, 2007, S. 341f.). Die Physikalisierung und Standardisierung des Chemielabors durch die Einführung elektronischer Gerätschaften brachte der Chemie eine wachsende Wahrnehmung und Anerkennung der US-amerikanischen Forschungsförderung ein. Ein zentraler Aspekt war dabei die zunehmende Mathematisierung und Rationalisierung organisch-chemischer Methoden, denn qualitative Verfahren der handwerklichen *wet chemistry* wurden zunehmend durch quantitativ-statistische sowie apparategestützte Messmethoden ergänzt und ersetzt, wovon man sich ein höheres Maß an Rationalität versprach (ebd.). Ähnlich wie der Physik gelang es auch zunehmend der Chemie auf die eigene Nützlichkeit für die Menschheit zu verweisen und den Denkstil der *Triple-Helix*-Innovationsmodelle (Etzkowitz und Leydesdorff, 2000) durch eine narrative Verortung zwischen Grundlagenforschung und Anwendungen große Fördersummen zu akquirieren. Diese Anwendungen lagen im Laufe der 1970er Jahre immer häufiger in den Bereichen der Lebenswissenschaften, was zum *biological turn* in der Chemie führte (Stengers, 2011b, S. 212). Mit der Molekularisierung der Biologie, die mit der DNA-Doppelhelix und den molekularen Bausteinen des Lebens wurden in diesem Bereich zunehmend auch chemische Methoden adaptiert und Chemiker/innen beschäftigt, was analog zu einer Instrumentellen Revolution des biologischen Labors führte (ebd.). Ein zentraler Aspekt in dieser Entwicklung stellt die Etablierung der synthetischen Biologie dar, bei der Chemiker/innen, ein spezifisch chemischer Zugang zur molekularen Welt und insbesondere die chemische Synthese eine entscheidende Rolle spielen, was das Feld bis heute prägt (Bensaude-Vincent, 2009). So waren es insbesondere die kontinuierlich weiterentwickelten NMR-Spektrometer, die entscheidende Entdeckungen in der Strukturaufklärung von Biopolymeren erzielten, was die hohen Investitionen in die Chemie rechtfertigte, die spätestens in den 1980er Jahren diejenigen der physikalischen Forschung übertroffen hatten (Kragh, 2001). Auch die Biowissenschaften avancierten im Zuge von wissenschaftlichen

Big Science-Projekten wie dem *Human Genome Project* zu Großinvestitionen (Morris et al., 2001).

Der Nachweis des Zusammenhangs zwischen optischer Aktivität und molekularer Händigkeit, der sich als solcher auch in komplexen Biomolekülen und namentlich als essentielle Eigenschaft der molekularen Bausteine des Lebens fortpflanzt, trug maßgeblich für die Etablierung der Chemie als *Central Science* im 20. Jahrhundert bei. Die Molekularisierung der Lebenswissenschaften und der Biomedizin ging mit der Adaption chemischer Methoden und Konzeptionen einher und aus der Biologie, die sich der Klassifikation der molaren Organismen und ihrer Physiologie verschrieben hatte, wurde allmählich eine Biochemie, die ihre Anschaulichkeit sukzessive einbüßte. Mit der Begründung der molekularen Genetik und *Big Science*-Projekten wie der Entschlüsselung des genetischen Codes wandelte sich die epistemische Strategie der Lebenswissenschaften nachhaltig. Chemische Inhalte und Prinzipien wurden zu einem elementaren Bestandteil der biologischen Ausbildung (Powers, 2012). Die Molekularisierung des Lebens wurde von einer Reduzierbarkeit biologischer auf chemische Verfahren, Methoden und Theorien begleitet, was mit einer erheblichen Abgrenzung von der Chemie einherging und in eine sukzessive Abspaltung von der institutionellen und infrastrukturellen Dominanz der Chemie mündete (Morris et al., 2001, S. 29). Gleichzeitig wurden mit der Instrumentellen Revolution und der Quantentheorie ein physikalisches Weltbild in der Chemie relevant. Es muss in dieser Stelle jedoch berücksichtigt werden, dass die *Central Science* eine Konstruktion war, die sich in der Wissenschaftspolitik des Kalten Krieges nach dem Sputnik-Schock herausgebildet hatte und die gesellschaftlichen und politischen normativen Erwartungen an die Wissenschaft widerspiegelt (Reinhardt, 2001b, S. 2-3). Wie deutlich wird, bildete sich in diesem Zeitraum bereits das abgrenzende Narrativ heraus, das bis heute in den Bereichen der theoretischen Chemie und der Quantenchemie zu beobachten ist (Kapitel 6). Dieses Innovationsdispositiv hat sich seither fest als Präidee im Alltagsverständnis vom Verhältnis der drei Naturwissenschaften manifestiert. Die Grenze zwischen Physik und Chemie und Biowissenschaften auszuloten ist vor allem auch eine Machtfrage bezüglich Forschungsförderung, Raumauslastung in Universitäten sowie der Nachwuchs- und Mitgliederrekrutierung.

Die Chiralität bewegte sich im Zuge der zunehmenden Ausdifferenzierung der Chemie in ihre Subdisziplinen und der Expansion chemischer Gegenstände und Betrachtungsweisen nicht nur in die Lebenswissenschaften, sondern regte auch in der Physik völlig neue Debatten und Erkenntnisprozesse an. Die Chiralität der Quantenphysik ist ein abstraktes Konzept, das auf Energiezuständen von Systemen, Elementarteilchen und Energiezuständen beruht. Ein wichtiger Meilenstein in der physikalischen Auseinandersetzung mit der Chiralität stellt in diesem Zusammenhang die Entdeckung der Paritätsverletzung dar (Janoschek, 1991). Dem-

nach stellten Tsung-Dao Lee und Chen-Ning Yang im Jahre 1956 fest, dass zwei Teilchen sich in allen Eigenschaften glichen, bis auf unterschiedliche Paritäten (Lee und Yang, 1956b). Bis dahin war man davon ausgegangen, dass sich die Parität der Materie ebenso wie Ladungseigenschaften und Zeit energetisch erhalten, erstmals die Verletzung der Parität bei händigen Teilchen festgestellt wurde. Diese wurde bei ursächlich auf die schwache Wechselwirkung zurückgeführt (Wu, 1957). Friedrich Hund etwa setzte bereits in den späten 1920er Jahren mit chiralen Molekülen im Sinne der Stereochemie auseinander und beschrieb aus diesen heraus den Tunneleffekt, eine der frühen Adaptionen von Schrödingers Wellenmechanik auf molekulare Systeme (Quack, 2002, S. 4621). In den 1950er Jahren bildete sich ein spezifischer quantenphysikalischer Zugang zur Chiralität heraus, der sich vor allem einer Frage widmete: Wie hängen die chiralen Eigenschaften von molekularen Strukturen mit denen von Quantensystemen zusammen? Ist die Chiralität von Molekülen in den fundamentalen Wechselwirkungen der Materie angelegt? Oder handelt es sich um völlig verschiedene Phänomen? (Ebd.)

Bis in die Gegenwart beschäftigen sich Vertreter/innen der Quantenchemie und der Wissenschaftsphilosophie mit dieser Problematik und versuchen in emergenztheoretischen wie experimentellen Verfahren einen Brückenschlag zu wagen, um der die Asymmetrie von Teilchen, Atomen und Molekülen in einem emergenztheoretischen Erklärungsmodell beizukommen (Helbig, 2018, S. 231f.). Andere Vertreter/innen der Philosophie der Chemie ziehen die Chiralität als willkommenes Beispiel heran, um aufzuzeigen, wo Reduktionismus und Physikalismus in der Chemie an ihre Grenzen stoßen und klassisch beobachtbare chemische Phänomene nicht zwangsläufig quantenphysikalischen Gesetzmäßigkeiten folgen (Labarca und Lombardi, 2008). In Kapitel 6 werden diese zeitgenössischen Diskurse unter Berücksichtigung der chemischen Grenzarbeit genauer beleuchtet. Grundsätzlich zeugen diese Diskurse der Quantenmechanik historisch von einer Verschiebung in der Betrachtung der molekularen Welt, die sich von Vorstellungen von Atomen und Molekülen zugunsten abstrakter Symmetriebeziehungen entfernt und an Anschaulichkeit eingebüßt hat. In dieser Feststellung zeigt sich, als wie heterogen und plural sich die molekularen Welten im Spiegel disziplinärer Grenzaushandlungen in der Auseinandersetzung mit der Chiralität erweisen.

2.4 Zwischenfazit: Die Rolle der Chiralität in der Konstitution der molekularen Welt

In diesem Kapitel wurde dargestellt, wie es den Chemiker/innen des 19. Jahrhunderts gelang, eine völlig neue Welt zu erschaffen, wie diese sich weiterentwickelte und welche Konsequenzen sich daraus bis heute für die chemischen wie außer-chemischen Wissenschaften ergeben. Die molekulare Welt wurde als

epistemischer Raum inmitten einem komplexen Wechselspiel sich standardisierender Forschungsräumen und -Instrumente, einer volkswirtschaftlich bedeutsamen chemischen Industrie und einem wachsenden chemischen Theoriegebäude mit vielseitigen symbolischen wie heuristischen Repräsentationen geformt und laufend variiert. Es war der Chemie mithilfe einem „eigenen“ Zugriff auf die Natur gelungen, sich vom Status einer Hilfswissenschaft zu emanzipieren und sich als Systemwissenschaft mit genuin chemischen Gegenständen, Fragestellungen, Theorien, Forschungsmethoden, Lokalitäten und Persönlichkeiten zu etablieren. Die Entdeckung, Erforschung, Theoretisierung, Abbildung und Beschreibung der molekularen Chiralität spielten dabei eine zentrale Rolle, denn diese Prozesse stehen in engem Wechselspiel mit der Erschließung der chemischen Struktur und dem damit in Zusammenhang stehenden Begründung der Stereochemie und organischen Chemie. Mithilfe der dreidimensionalen molekularen Struktur und den zahlreichen Modellierungsversuchen gelang es der Chemie nicht nur, die molekulare Welt anschaulich und intelligibel zu machen, sondern auch technoscientifische Praktiken der organischen Synthese zu einem industriellen Erfolgsmodell zu führen. Die Chiralität wurde in der Folge als genuin organisch-chemischer Gegenstand konstituiert und mit der Erkenntnisproduktion des Faches verschränkt und transportiert noch heute das Erbe früher inner- wie außer-chemischer Konflikte und Grenzziehungen. Unabhängig der disziplinären Zugehörigkeit assoziierten Wissenschaftler/innen diesen Begriff als Eigenschaft organischer Molekülstrukturen, alle anderen Erscheinungen von Händigkeit – sei es auf der Ebene von Teilchen, Organismen, Makromoleküle oder geometrischen Körpern – werden dieser Assoziation nachgeordnet und an dieser gemessen.

