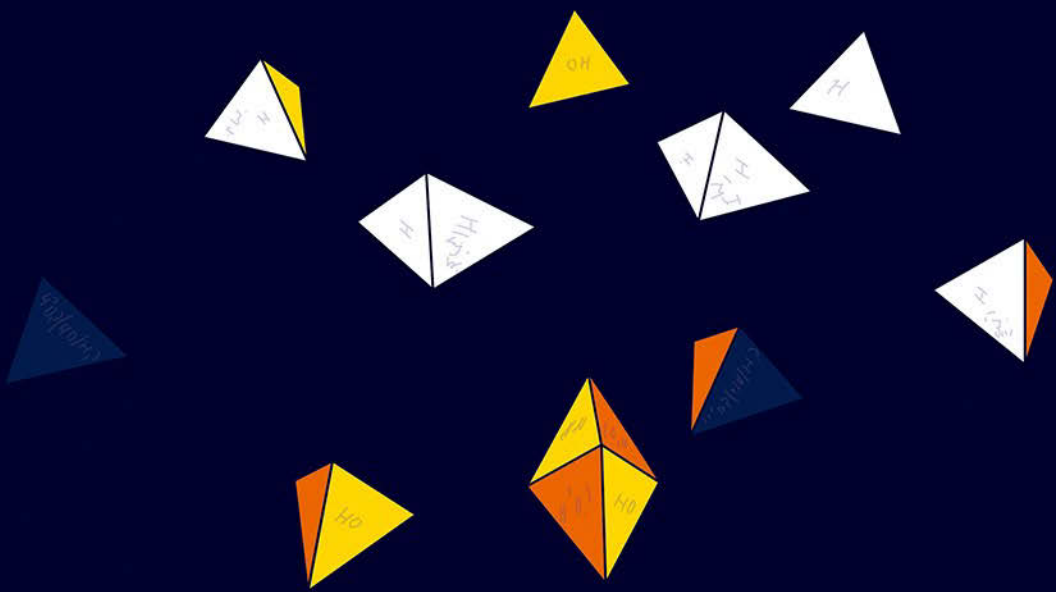
SANDRA LANG

CHIRALE WELTEN

ZUR WISSENSCHAFTSSOZIOLOGIE DES DISZIPLINÄREN WANDELS DER CHEMIE



[transcript] ScienceStudies

Sandra Lang
Chirale Welten

Science Studies

Sandra Lang

Chirale Welten

Zur Wissenschaftssoziologie des disziplinären Wandels der Chemie

[transcript]

Sandra Lang, geb. 1988, ist wissenschaftliche Mitarbeiterin am Lehrstuhl für Didaktik der Naturwissenschaften und der Nachhaltigkeit an der Universität Zürich. Die Wissenschaftssoziologin promovierte am Munich Center for Technology in Society (MCTS) der Technischen Universität München und war am Collegium Helveticum der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich als wissenschaftliche Mitarbeiterin beschäftigt. Ihre Forschungsinteressen liegen im Grenzbereich von Soziologie und Geschichte der Naturwissenschaften und der Medizin sowie Gender Studies und Environmental Humanities.

Vollständiger Abdruck der Dissertationsschrift »Chirale Welten. STS Perspektiven auf den Wandel der Felder der Chemie.« Die Dissertation wurde am 27.07.2020 durch die promotionsführende Einrichtung Munich Center for Technology in Society (MCTS) der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Sozialwissenschaften (Dr. rer. soc.) angenommen. Gutachter: Prof. Dr. Sabine Maasen und Prof. Dr. Alfred Nordmann

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über http://dnb.d-nb.de abrufbar.



Dieses Werk ist lizenziert unter der Creative Commons Attribution-NoDerivatives 4.0 Lizenz (BY-ND). Diese Lizenz erlaubt unter Voraussetzung der Namensnennung des Urhebers die Vervielfältigung und Verbreitung des Materials in jedem Format oder Medium für beliebige Zwecke, auch kommerziell, gestattet aber keine Bearbeitung. (Lizenztext: https://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/deed.de)
Um Genehmigungen für Adaptionen, Übersetzungen oder Derivate einzuholen, wenden Sie sich bitte an rights@transcript-publishing.com
Die Bedingungen der Creative-Commons-Lizenz gelten nur für Originalmaterial. Die Wiederverwendung von Material aus anderen Quellen (gekennzeichnet mit Quellenangabe) wie z.B. Schaubilder, Abbildungen, Fotos und Textauszüge erfordert ggf. weitere Nutzungsgenehmigungen durch den jeweiligen Rechteinhaber.

© 2021 transcript Verlag, Bielefeld

Umschlaggestaltung: Maria Arndt, Bielefeld
Umschlagcredit: Sandra Lang
Druck: Majuskel Medienproduktion GmbH, Wetzlar
Print-ISBN 978-3-8376-5794-4
PDF-ISBN 978-3-8394-5794-8
https://doi.org/10.14361/9783839457948
Buchreihen-ISSN: 2703-1543
Buchreihen-eISSN: 2703-1551

Gedruckt auf alterungsbeständigem Papier mit chlorfrei gebleichtem Zellstoff.
Besuchen Sie uns im Internet: *https://www.transcript-verlag.de*
Unsere aktuelle Vorschau finden Sie unter *www.transcript-verlag.de/vorschau-download*

Inhalt

1 Einleitung 7
1.1 Die Felder der Chemie im Wandel 9
1.2 Die molekulare Welt als soziale Arena 14
1.3 Molekulare Chiralität im Spiegel disziplinärer *Boundary Work* 17
1.4 Vorstellung der Interview-Partner/innen 24

2 Chiralität – zur Entstehung und Entwicklung einer chemischen Tatsache 29
2.1 Der lange Weg zum dreidimensionalen molekularen Weltbild 30
2.2 Moleküle vom Reißbrett: die Anfänge chemischer Synthetik und Industrie 46
2.3 Die Kulturen der Chemie im Kontext von Quantenmechanik und NMR-Revolution 61
2.4 Zwischenfazit: Die Rolle der Chiralität in der Konstitution der molekularen Welt 74

3 *„A materials way of thinking"*: Chiralität in Nano-, Material- und Oberflächenforschung 77
3.1 Physik oder Chemie? Eine kleine Geschichte des Materials 80
3.2 Helizität, planare Chiralität und andere physikalische Zugriffe 90
3.3 Chiralität im *„strengen Sinne"* 99

4 Vom kleinen zum großen Molekül: Zugänge zur Chiralität in der pharmazeutischen Industrie 109
4.1 Die Transformation der chemisch-pharmazeutischen Industrie 113
4.2 *„Magic bullet drugs"*: Zur Chiralität des kleinen Moleküls 125
4.3 Die Unsichtbarkeit der Chiralität im Paradigma des großen Biomoleküls 134

5 *„Die machen uns die Moleküle“* – Zur Grenzarbeit zwischen Biomedizin und Chemie 147
5.1 Die Präidee der Arbeitsteilung zwischen Chemie und Biomedizin 149
5.2 Das Versagen der Arbeitsteilung im Contergan-Fall 163
5.3 Reflexionen zum Konzept der translationalen Medizin 173

6 *„Wir gehen so tief wie man nur gehen kann“*: Chiralität in Quantenchemie und Wissenschaftsphilosophie 185
6.1 Ist Chemie auf (Quanten-)Physik reduzierbar? 187
6.2 *„Chirality as a unifying concept“* 201
6.3 Chiralität als irreduzible Eigenschaft in der Philosophie der Chemie 217

7 Schluss und Ausblick 229

Abbildungsverzeichnis 239

Literatur 241

1 Einleitung

Seit den 1990er Jahren befinden sich die wissenschaftlichen Felder der Chemie in einer transformativen Phase, die insbesondere von Philosoph/innen und Historiker/innen der Chemie beobachtet und diskutiert wurde (Bensaude-Vincent, 2018). So stellten Beobachter/innen der Chemie fest, dass die etablierten, monolithischen Naturwissenschaften Physik, Chemie und Biologie im Zuge sich wandelnder Innovationsdispositive in Industrie und Forschungsförderung an den Feldgrenzen zunehmend miteinander verschmelzen und hybride Grenzbereiche ausbilden (Palló, 2008). Insbesondere Nano- und Materialwissenschaften sowie biotechnologische Spezialdisziplinen wie *Omics Sciences* und die wachsende Bedeutung computergestützter Datensimulation kamen den forschungspolitischen Forderungen nach Interdisziplinarität, Anwendungsorientierung und gesellschaftlich relevanten Problembezügen nach, denen eine einzelne Disziplin alleine nicht mehr gerecht zu werden scheint (Morris, 2001b, S. 200). Die Chemie hat demnach in der wachsenden Zusammenarbeit mit den Lebenswissenschaften und physikalischen Wissenschaften ihre angestammten Betrachtungsebenen, Theorien und Gegenstände auf diese Felder ausgeweitet und wurde simultan durch diese absorbiert. Mit dem Ergebnis, dass die Chemie nun omnipräsent erscheint und zugleich bezüglich eines spezifisch chemischen Zugriffs auf die Natur unsichtbar wird (ebd.).

Ausgehend von chemiephilosophischen Auseinandersetzungen mit der Konstitution von Grenzen, Territorien und Identitäten der Chemie sowie Fragen nach ihrer Auflösung bzw. Transformation (Bertomeu-Sánchez et al., 2008a), widmet sich dieses Buch Fragen nach den sozialen Konstitutionsprozessen und Grenzziehungen der Chemie. Das Ziel besteht dabei allerdings nicht darin, zu überprüfen, ob sich die Chemie tatsächlich auflöst oder erhalten bleibt. Statt einer historiografischen Erzählung von Niedergang und Erhalt der Chemie als eigenständige Wissenschaft, wird ein soziologischer Zugang gewählt, die sich auf die handelnden Akteur/innen und die sozialen Felddynamiken ausrichtet. In diesem Sinne wird an den hybriden Randbereichen der chemischen Felder empirisch überprüft, wie Akteur/innen in ihren Handlungen, Semantiken und in Auseinandersetzung mir der materiellen Welt die Feldgrenzen fortlaufend aushandeln, reproduzieren und verschieben. Zu diesem Zweck wurden vier exemplarische Grenzfelder

der chemischen Wissenschaften ausgewählt: Materialwissenschaften, Biomedizin, pharmazeutische Industrie und Quantenchemie. Darin zeigt sich deutlich, dass die Wissensproduktion über die molekulare Welt nicht mehr alleinig bei der Chemie liegt, sondern zunehmend physikalische und biowissenschaftliche Weltbilder, Konzepte und Methoden dominant werden. Der zunehmende Verlust der chemischen Deutungsmacht über die molekulare Welt zeigt sich exemplarisch in den Narrativen zur molekularen Eigenschaft der Chiralität, ein paradigmatischer Fall, anhand dessen sich die Grenzarbeit der Chemie besonders deutlich zeigt.

Die Erkenntnisse basieren methodisch auf Expert/innen-Interviews und teilnehmenden ethnografischen Beobachtungen in verschiedenen Arbeitsgruppen und Laboratorien der anorganischen bzw. physikalischen Chemie. Darüber hinaus sind die vorliegenden Positionen in den Diskursen der Philosophie und Geschichte der Chemie und der Medizin verwurzelt. Die Beobachtung und Analyse der gegenwärtigen chemischen Felder und ihrer hybriden Grenzbereiche mit Konzepten der *Science and Technology Studies* wie *Boundary Work* und *Boundary Object* und der wissenschaftssoziologischen Theorie Ludwik Flecks erfolgt stets vor dem Hintergrund einer historisch-genealogischen Entstehung und Entwicklung wissenschaftlicher Objekte, Orte, Fakten und Theorien in sozio-technischen Kontexten. Die zahlreichen Beiträge der jüngeren Diskurse in Philosophie und Geschichte der Chemie wurden als Sekundärquellen zugrunde gelegt. Allerdings stellen sie aus heutiger Sicht selbst zeithistorische Dokumente dar, zumal Chemiehistoriker/innen und Philosoph/innen selbst erheblich in die Grenzarbeit der chemischen Felder involviert sind. Die fortlaufende Re-Konfiguration, kollektiven Grenzziehungen und Transformation der chemischen Felder, Gegenstände und Weltbilder wird dabei nicht als bloße Fortschrittsgeschichte erzählt, sondern als Kultur- und Sozialgeschichte chemischen Wissens mit weitreichenden Auswirkungen in die Gegenwart.

1.1 Die Felder der Chemie im Wandel

> Chemistry has, historically, been in constant flux, both in its self-image and in relation to other disciplines that sought to co-opt or absorb it. It has its sects, its rivalries, and many dead-ends. But from antiquity to the present, there have been men and women […] engaged in seeking to understand the way in which different substances are formed, how they react, and how they may be used. Chemistry is and has always been both science and craft or technique, depending on its material subject matter and in the tools and instruments developed for the manipulation and transformation of that matter (Levere, 2001a, S. ix).

Die Chemie als Wissenschaft von Aufbau, Eigenschaften und Transformation von Stoffen kann aus historischer und sozialwissenschaftlicher Perspektive als soziales Feld beschrieben werden, das selbst wiederholt Phasen tiefgreifender Transformationen durchlaufen hat (McEvoy, 2016). Nicht nur Lokalitäten, Technologien, theoretische Weltbilder und wirtschaftliche Produktionsverhältnisse der Chemie unterliefen dabei radikale Paradigmenwechsel, sondern auch die Grenzen der chemischen Disziplinen, Fachidentitäten und epistemischen Zuständigkeitsbereiche (Bensaude-Vincent und Stengers, 1996, S. 4). In der Chemiehistoriografie bestehen in diesem Zusammenhang verschiedene Kanonisierungen chemischer Revolutionen, Paradigmenwechsel und Durchbrüche (Chamizo, 2019), wie etwa der Übergang vom Handwerk in eine empirische Naturwissenschaft (Bensaude-Vincent, 1998), die Entstehung einer chemiebasierten Großindustrie (Reinhardt, 2000c) und die theoretische wie materielle Konstitution der molekularen Welt durch die chemische Praxis, Formelsprache und Symbolik (Meinel, 2004). Auch in den letzten zwanzig Jahren durchlief die Chemie einen erheblichen Transformationsprozess, der sich insbesondere durch eine Hybridisierung ihrer Feldgrenzen und dem Verblenden mit verschiedenen physikalischen wie lebenswissenschaftlichen Gegenstandsbereichen auszeichnet. Die Wahrnehmung dieser jüngsten Disruption der chemischen Felder – und vor allem deren Bewertung – fällt bei den Beobachter/innen des Feldes jeweils unterschiedlich aus. Zur Hinführung zum Gegenstand dieses Buches – der Analyse dieser neueren Re-Konfigurationen der chemischen Felder – sei allerdings zunächst die Kontinuität der Transformation als zentrales Narrativ der Chemiegeschichte vorausgeschickt:

Menschen bemühen sich seit frühesten Zeiten diverser Praktiken der Materialverarbeitung, die als proto-chemisch gelten können (Dresselhaus, 1992): Tradiertes Wissen über das Gerben oder Brauen; die Umwandlung von Rohstoffen wie Kautschuksaft in Kunstprodukte wie Gummi (Soentgen, 2018) oder die Herstellung von Glas (Cohen, 1998) impliziert die technische Zusammenführung von Materialien und Stoffen, sodass ein Produkt entsteht, das sich von beiden Aus-

gangsprodukten unterscheidet und mehr ist als die Summe seiner Ausgangsstoffe (Cobb und Goldwhite, 1995). Die Wissenssysteme, die Menschen an verschiedenen Orten zu verschiedenen Zeiten zur Stofftransformation generiert haben, wurden im Laufe der Zeit auch wirtschaftlich immer relevanter (Homburg, 2018). Alchemiker/innen produzierten über Jahrhunderte als im Nachhinein geringgeschätzte Vorläufer/innen der naturwissenschaftlichen Chemie begehrte Produkte wie Alkohole und Sprengstoffe, machten Tierkörper haltbar und scheiterten immer wieder an vermessenen Vorhaben wie der Erschaffung von Gold aus allerlei Unrat (Weyer, 2018a, S. 9f.).

Die Konstitutionsprozesse der Chemie als akademisch institutionalisierte Naturwissenschaft erfolgten neben der Etablierung einer Experimentalpraxis auch auf der Grundlage von theoretischem Wissen über die Materie (Bensaude-Vincent und Simon, 2012f, S. 78). Chemiker/innen gelang es im 18. und 19. Jahrhundert für die unsichtbare, mikroskopische Zusammensetzung der Materie eine Sprache zu finden und diese durch die Erschaffung von Modellen, Symbolen und Systematiken erfahrbar, empirisch überprüfbar und die Stoffumwandlung rational planbar zu machen (Nesper, 2001). Chemische Erkenntnis und Praxis sind seit jeher eng verwoben mit ihrem jeweiligen gesellschaftlichen Kontext, dennoch bleibt die Chemie in der Kulturgeschichte bis heute weitestgehend unsichtbar (Schummer, 2017a, S. 20). So spielte die Chemie eine erhebliche Rolle in der Industrialisierung und ermöglichte im 19. und 20. Jahrhundert mithilfe der organischen Synthese enorme Märkte in den Bereichen Farben, Lebensmittel, Treib- und Baustoffen zu erschließen (Homburg und Travis, 1998). Noch heute sind Schätzungen zufolge 96 Prozent der alltäglichen Gebrauchsgegenstände mit Erzeugnissen der chemischen Industrie zumindest in Berührung gekommen (Atkins, 2015, S. 11).

Die Transformationen der chemischen Felder hatte zudem stets Auswirkungen auf benachbarte Disziplinen, bzw. auf die Felder, aus denen sich die Chemie speist und ihre Anwendungsgegenstände bezieht. So erfolgten auch die Diagnose- und Behandlungsmethoden der Medizin im 19. Jahrhundert zunhemend durch die chemische Brille: das chemische Fertigarzneimittel setzte sich sukzessive gegen weniger wissenschaftlich-evidente kurative Praxen durch und etablierte sich fest im pharmazeutischen Kanon (Henkel, 2010). Gesellschaftliche Verhältnisse spiegeln sich damals wie heute entsprechend in der öffentlichen wie privaten Forschungsförderung der Chemie wieder, wenn etwa im Deutsch-Französischen Krieg die Chemie als jeweils nationale Identifikationsinstanz angeeignet wurde (Vaupel, 2007) oder im Nationalsozialismus die Chemie mit der Erfindung von Ersatzstoffen die staatliche Autarkie des Regimes realisieren sollte (Leslie, 2005). Dass sich die Chemie vom Handwerk zur Wissenschaft und später zur ersten *science based industry* entwickeln konnte, verdankte sie seit dem 18. Jahrhundert einer geschickten Wissenschaftskommunikation vonseiten prominenter Fürsprecher/innen (Lundgren und Bensaude-Vincent, 2000) sowie einer zuverlässigen

chemischen Analytik, die im ausgehenden 19. Jahrhundert Bereiche wie Kriminalistik, Metallurgie und medizinische Diagnostik von Grund auf veränderte (Weyer, 2018b, S. 354ff.).

Als in den 1920er Jahren die Quantenmechanik die Theorien der klassischen Mechanik abzulösen begann, erfuhr die Chemie einen weiteren dramatischen Wandel: Indem eine physikalische Theorie der Materie jeglichen chemischen Denkens, Forschens und Schaffens zugrunde gelegt wurde, verlor sie in der Folge ihr philosophisches Fundament (Scerri und McIntyre, 1997) und eine fachspezifische Geschichtsschreibung (Meinel, 2017). Indem sich die Annahme durchsetzte, sämtliche Naturphänomene seien auf die Gesetzte der Physik rückführbar und die Physik somit die reinste Form der Erkenntnis, etablierte sich die Präidee einer Hierarchie der Wissenschaften. Dementsprechend dominierte die physikalische Perspektive die Wissenschaftsphilosophie und -Geschichte des 20. Jahrhunderts, die Chemie degenerierte in philosophischer Sicht zu einem angewandten Appendix der Physik ohne eigene erkenntnistheoretisch relevante Probleme und Fragestellungen (Janich, 2004, S. 52). Auf diesem Wege rückten Chemie und Geisteswissenschaften immer weiter auseinander – mit dramatischen Folgen: Das Abbrechen der chemiedidaktischen Diskurse ließ die Chemie zum unbeliebtesten Schulfach werden und die jahrzehntelange Abwesenheit der Chemie in Populärwissenschaft und Journalismus sorgte dafür, dass die Chemie in der Öffentlichkeit mehr oder weniger unsichtbar wurde, da sie ihre Perspektive kaum noch in gesellschaftliche Debatten einbrachte (Winter et al., 2017).

Ab den 1970er Jahren wuchs darüber hinaus das öffentliche Bewusstsein für Chemikalienbelastungen, nachdem die chemische Industrie über viele Jahrzehnte als Fortschrittsgarantin gewertet wurde und in einer völlig chemikalisierten Gesellschaft der Alltag ohne chemische Erzeugnisse unvorstellbar geworden war (Romero et al., 2017). Die Chemie geriet aufgrund von toxischen Schadstoffbelastungen und gar Explosionen in chemischen Industrieanlagen wie in Soveso (1976) Bhopal (1984) oder Schweizerhalle (1986) zunehmend in die Kritik (Böschen, 2004). Die Chemie avancierte zum Synonym für Unnatürlichkeit, Umweltschädlichkeit und Toxizität schlechthin (Hampel, 2017). Die erhebliche soziale Ungleichheit bezüglich Risikoexposition und ökonomischem Nutzen von chemischen Erzeugnissen unter verschiedenen sozialen Gruppen schuf politische Räume des Aktivismus und kollektive Identitäten unter sozial benachteiligten und vulnerablen Kollektiven (Shapiro, 2015). Chemiker/innen hatten der weltweit wachsenden „Chemophobie“ entsprechend wenig entgegenzusetzen, waren sie in der Wissenschaftskommunikation ungeübt und sahen sich zudem als Instanz außerhalb der Gesellschaft, die vorgeblich als rationale Naturwissenschaft nicht durch Ideologien, Politik und Aktivismus verunreinigt werden darf (Schummer et al., 2007). In den 1990er Jahren befand sich die sog. Vertrauenskrise der Chemie entsprechend auf

dem Höhepunkt, die zudem noch mit einer – nicht weniger tiefgreifenden – Identitätskrise zusammenlief (Meinel, 2017).

In den 1990er Jahren durchliefen schließlich die internationalen Innovationsdispositive der Forschungspolitik einen disziplinenübergreifenden Wandel: Die Wissenschaften sollte sich verstärkt den dringlichen Probleme der Menschheit widmen, namentlich der Bekämpfung von komplexen Krankheitsbildern wie Krebs und Morbus Alzheimer, aber auch Klima- und Umweltproblemen angehen und eine zuverlässige Energie- und Rohstoffversorgung sicherstellen (Roco und Bainbridge, 2003). Darüber hinaus sollten technowissenschaftliche Innovationen wirtschaftiches Wachstum und nationale Wettbewerbsfähigkeit garantieren. Als Lösung wurden Großprojektforschung in Verbünden, Interdisziplinarität, eine unternehmerische Ausrichtung der Forschung sowie verstärkte translatorische Bestrebungen im Sinne einer Übersetzung von Grundlagenforschung und Anwendung gefördert (Kurath und Kaiser, 2010). Im Zuge dessen entstanden neue technoscientifische Felder im Bereich Nano-, Bio- und Informationstechnologie sowie Neurowissenschaften (NBIC), die sich mit großangelegten *mapping*-Projekten und ihrem Streben nach Innovationen im Grenzbereich der Natur- und Ingenieurswissenschaften ansiedelten (Bensaude-Vincent, 2016). Die Hybridisierung der Wissenschaften und die Auseinandersetzung mit den sozialen, theoretischen, ökonomischen und politischen Implikationen dieser Felder hat eine ganze Generation von Wissenschaftsforscher/innen in Innovations- und Hochschulforschung geprägt (Schaper-Rinkel, 2007). Eine Frage, die dabei allerdings eher am Rande verhandelt wurde, lautet: Was ist eigentlich aus den etablierten Großdisziplinen geworden im Zuge dieser Re-Konfiguration der wissenschaftlichen Felder?

Während im Zuge des NBIC-Paradigmas zahlreiche Akteur/innen der Chemie in Hochschulverwaltung, Forschung und Wissenschaftsmanagement sowie -politik den Forderungen nach Interdisziplinarität, Anwendungsorientierung und Großprojektforschung bereitwillig nachkamen und in die neu entstandenen Felder der Nanowissenschaften und Biotechnologie strömten, sahen Vertreter/innen des kurz zuvor wiederbelebten Feldes der Chemiephilosophie und -geschichte ein baldiges Ende der Chemie als eigenständige Wissenschaft gekommen (Morris, 2008). Während Fachwissenschaftler/innen in der Chemie wenig über die philosophischen und sozialen Implikationen ihrer Entscheidungen reflektierten und die entstandenen *bandwagon*-Effekte nutzten um Ressourcen zu akquirieren (Palermo, 2018), fürchteten die Beobachter/innen der Chemie insbesondere vor dem Hintergrund negativer öffentlicher Kritik und einer gewissen „Philosophieferne der Chemie" (Mittelstraß, 1992, S. 10) eine nahende Auflösung in hybride Bindestrichdisziplinen wie *-sciences* und *-omics*:

> Chemistry works at its boundaries that are attacked from various directions such as physics, environmentalist movements, agricultural interests, traditio-

> nal medicine, and many others. Inside its boundaries, chemistry claims to have cognitive authority defined by the population of chemists. So, who are the chemists? (Palló, 2008, S. 322).

Die befürchtete Auflösung und sog. Identitätskrise der Chemie wurden insbesondere in der Chemiegeschichte der 1990er und 2000er[1] Jahre zu den Leitfragen des Diskurses erhoben (Meinel, 2017). So waren etwa die größeren Konferenzen den Fragen nach Identitäten, Territorien und Grenzen der Chemie gewidmet, die erstmals in einen historischen und gesellschaftlichen Kontext gesetzt wurden (Bertomeu-Sánchez et al., 2008b). Die Wiederentdeckung der Chemie als Gegenstand der Wissenschaftsgeschichte (nachdem zwischen 1920 und 1985 kaum ein Werk zur Chemiegeschichte veröffentlicht worden war) stand dabei im Zentrum einer epistemischen Emanzipationsbewegung und Identitätssuche, die explizit um die Restitution der Chemie als autonome Wissenschaft bemüht war (Thomas, 2012). Chemiker/innen sowie Chemiehistoriker/innen verhandelten die Entstehung einer eigenständigen Fachhistoriografie der Chemie (unabhängig von Medizin-, Industrie-, Pharmazie- oder Institutionengeschichte) stets vor dem Hintergrund der angesprochenen gesellschaftlichen Kritik an den Auswirkungen der chemischen Industrie (Gribble, 2013). Die Chemie in der Geschichte sichtbar zu machen, einen genuinen Kern der Chemie herauszuarbeiten und gegenüber der Physik- und Biologiegeschichte gesondert hervorzuheben, standen im Zentrum dieser Bestrebungen (Meinel, 2017).

Daran, eine Autonomie der Chemie zu postulieren, zeigte sich auch die zeitgleich mit der Chemiegeschichte entstandenen Philosophie der Chemie interessiert (Janich, 1998). Lange spielten chemische Perspektiven in der Wissenschaftsphilosophie keine Rolle, waren diese seit dem Bedeutungszuwachs der Quantenmechanik fast ausschließlich durch physikalische (und später auch biowissenschaftliche) Perspektiven dominiert (Schummer, 2004b). Die Beispiele zu Erkenntnisgewinn, Experimentalsettings, Epistemologie, Ästhetik, Logik und Ontologie der Materie stammten in der Wissenschaftsphilosophie mehrheitlich aus der Physik. Die Chemie wurde entsprechend der hierarchisierenden Idee der Einheitswissenschaft des Wiener Kreises eher implizit der Welt der Physik untergeordnet (Janich, 1998, S. 3). Erst zögerlich[2] entstand seit den späten 1980er Jahren eine kleines wissenschaftsphilosophisches Feld, das sich bis heute primär mit den Fragen der Reduzierbarkeit der Chemie auf die Physik beschäftigt, zumal die Chemie einige interessante Fallbeispiele liefert, die den bestehenden Diskurs um

1 (Bensaude-Vincent und Stengers, 1996; Breslow, 1997; Brock, 1992; Brock, 2000; Brock, 2002; Brock, 2011; Brock, 2013; Brock, 2016; Hirota, 2016; Levere, 2001b; Morris, 2015).

2 Noch in den 1980er Jahren wurde eine Magisterarbeit in Auftrag gegeben, die der Beweisführung gewidmet war, dass die Chemie über keine eigenen wissenschaftsphilosophisch relevanten Fragestellungen verfügt (Janich, 2015).

Emergenz, Reduktion und Physikalismus um eine neuartige Perspektive erweitern (Hendry, 2012). Auch dieses Feld entwickelte sich maßgeblich als Reaktion auf die befürchtete Auflösung der Chemie, die auf einen mangelnden Kontakt mit den Geisteswissenschaften zurückgeführt wurde (Winter et al., 2017) und spielte in der Grenzarbeit der chemischen Felder eine tragende Rolle.

1.2 Die molekulare Welt als soziale Arena

Dieses Buch knüpft zwar an diese Diskurse der Chemiegeschichte und -philosophie an, allerdings wird nicht versucht, eine Antwort auf die Frage zu finden, ob und inwiefern sich die Feldgrenzen, Territorien und Identitäten der Chemie tatsächlich auflösen oder erhalten bleiben. Es handelt sich weder um einen Versuch, die positive Bedeutung der Chemie für die Menschheitsgeschichte herauszustellen, noch um eine Erzählung von der Chemie als sterbenden Riesen. Vielmehr wird analysiert, wie die Grenzen der Chemie in heterogenen Netzwerken verschiedener menschlicher und nicht-menschlicher Akteur/innen in diskursiven, soziotechnischen Settings in Auseinandersetzung mit der materiellen Welt hervorgebracht, ausgehandelt, aufrechterhalten und verschoben werden (Clarke und Leigh Star, 2008, S. 118). Meinem Befund nach steht im Zentrum dieser Aushandlungsprozesse die molekulare Welt als soziale Arena der Aushandlung von Feldgrenzen und Ressourcen (Charmaz, 2006, S. 64f.). In diesem Kontext wird bewusst die Formulierung der Felder der Chemie gewählt, der sich von einem essentialistischen und monolithischen Verständnis der wissenschaftlichen Disziplin abgrenzt. Die Chemie wird dabei als plurales, heterogenes, soziotechnisches Gebilde verstanden, das über eine Historizität verfügt, d.h. in ihren Wechselwirkung mit gesellschaftlichen, ökonomischen und politischen Prozessen einem steten Wandel unterworfen ist (Bourdieu, 1998).

Die Betrachtungs- und Beschreibungsebenen des Molekularen galten lange als Monopol der chemischen (Sub-)Disziplinen, zumal die Chemie die erste Wissenschaft war, die sich einer Molekularisierung unterzogen hatte. Dies bedeutet, dass makroskopische Stoffe auf der Grundlage molekularer Modelle auf einer mikroskopischen Ebene zugänglich gemacht wurden (vgl. Kapitel 2). Moleküle und die Betrachtung der Stoffe als molekulare Modelleinheiten waren demnach ein essentieller Bestandteil der chemischen Theorie, ihrer Selbstrepräsentation, Ikonografie und Weltbilder (Nesper, 2001). Als die Chemie die molekularen Weltbilder, Methoden und Wissensbestände zunehmend in die außer-chemischen Felder transportierte, wurden diese in den jeweiligen Feldern allerdings nicht passiv übernommen, sondern erfuhren in diesen außer-chemischen Umgebungen ihrerseits Transformationen und Bedeutungsverschiebungen. Insbesondere im Zuge der Molekularisierung der Biologie und der Medizin in der zweiten Hälfte

des 20. Jahrhunderts bildeten die aufstrebenden Disziplinen der Biochemie nicht bloße Anwendungsgebiete der Chemie. Vielmehr entstand in der Auseinandersetzung mit den molekularen Grundbestandteilen und Gesetzen des Lebens eine biowissenschaftliche molekulare Betrachtung, die sich epistemisch wie methodisch immer weiter von dem organisch-chemischen Zugriff auf die molekulare Welt entfernte (Bensaude-Vincent, 2009).

Im Laufe der Zeit hat sich eine gewisse Pluralität molekularer Welten herausgebildet, wobei das erwähnte NBIC-Paradigma diesen Prozess erheblich beschleunigte und zusätzlich diversifizierte. Physikalische, informationswissenschaftliche und biotechnologische Akteur/innen haben sich im Zuge dessen die molekulare Welt angeeignet, die zunehmend entlang verschiedener Komplexitätsgrade in makro- und supramolekulare oder nanostrukturelle Betrachtungsebenen klassifiziert wird. Statt einer einheitlichen, mikroskopischen Perspektive auf die Materie und ihren strukturellen Aufbau, bestehen mittlerweile verschiedene molekulare Zugriffe parallel zueinander. Diese komplexen Wissenssysteme können nicht im Sinne von Seinsschichten ein und derselben molekularen Realität reduziert werden. Die molekularen Welten präsentieren sich als komplexes Netzwerk von Akteursbeziehungen, in denen sie fortlaufend hervorgebracht, aufrechterhalten und verändert werden. Wie in den folgenden Kapiteln aufzeigt wird, sind die unterschiedlichen Zugriffe auf die molekulare Welt nicht nur in vielen Bereichen inkommensurabel (wie etwa die Auseinandersetzungen mit dem Translationsparadigma in Kapitel 5.3 zeigt). Sie präsentieren sich vielmehr als soziale Arenen, in denen wissenschaftliche Kollektive Ressourcen und Deutungsmacht aushandeln, in dem Konzepte des Molekularen entweder angeeignet, unsichtbar gemacht oder umgedeutet werden, so etwa die Chiralität, wie in der Folge argumentiert wird.

Die Analysen vierer exemplarischer Grenzbereiche der chemischen Wissenschaften bilden dabei die empirische Grundlage bezüglich der Aushandlungsprozesse divergierender molekularer Auffassungen: Materialwissenschaften, pharmazeutische Industrie, Biomedizin und Quantenchemie. An diesen Schnittstellen chemischer mit außer-chemischen Feldern wurde auf qualitativ-empirischen Wege untersucht, wie die Konzeptionen des Molekularen und Chemischen sich verschieben und welche Folgen die Hybridisierung dieser Felder für die chemische Fachidentität mit sich führte. Exemplarisch werden hierbei die Narrative zur molekularen Eigenschaft der Chiralität untersucht, ein paradigmatischer Fall, anhand dessen sich die epistemische Diffusion der Chemie besonders deutlich zeigt:

In den Materialwissenschaften, insbesondere in neueren Bereichen wie Oberflächen- und Nano-Forschung, besteht seit den 1960er Jahren mit dem Aufkommen der Halbleiterforschung und insbesondere seit der Implementierung des NBIC-Paradigmas in den 1990er Jahren eine verstärkte Arbeitsteilung mit Physik und Ingenieurswissenschaften. Während die Chemie sich in ihrer Entstehungsgeschichte als Wissenschaft von den Materialien *per se* etablierte, drängen

seit Mitte des 20. Jahrhundert vermehrt physikalisch-experimentelle Zugriffe in diese Felder und machen eine spezifisch physikalische Expertise geltend, die von Chemiker/innen zunehmend als Konkurrenz wahrgenommen wird (Bensaude-Vincent, 2001). Wie in Kapitel 3 gezeigt wird, werden physikalische Termini und Weltbilder auf die Verarbeitungs- und Optimierungsweisen von Materialien zunehmend dominant und ersetzen die etablierten chemischen Konzeptionen, Methoden und Theorien der materiellen Welt. In diesem Sinne werden chemische Konzepte und Semantiken der Materie tendenziell umbenannt oder in ihren Bedeutungsbezügen ausgeweitet. Das Fallbeispiel der molekularen Chiralität weist in diesem Bereich eine besonders hohe Plastizität auf, denn Physiker/innen neigen dazu, diese Eigenschaft verschiedenen Phänomenen zuzuschreiben, die im strengen Sinne (d.h. analog zu den Definitionen der Chemie) eigentlich nicht chiral sind.

Nicht unbedingt eine Bedeutungsverschiebung, sondern eher ein Verschwinden des etablierten, organisch-chemischen Wortschatzes zeigt sich in den gegenwärtigen Kontexten der Arzneimittelentwicklung. Im ausgehenden 19. Jahrhundert fand die organische Synthesechemie in der industrialisierten Produktion von Fertigpharmazeutika einen ergiebigen Anwendungsbereich, in dem chemisches Wissen zum Leitparadigma empirisch gesicherten Heilwissens etablierte (Boyer, 2011). Die Tablette als Trägerin einer einzigen niedermolekularen Verbindung, einem sog. kleinen Molekül, dominierte das Verständnis des medizinischen Pharmakons des 20. Jahrhundert (Henkel, 2010). Wie Kapitel 4 aufzeigt, scheint allerdings mittlerweile in der Arzneimittelentwicklung das kleine Molekül der organischen Synthesechemie als *magic bullet drug* zunehmend ausgedient zu haben. Aufgrund eines attestierten Innovationsmangels schreitet der epistemische Wandel zum großen Biomolekül (insbesondere in Form von Antikörpern) voran. *Life scientists* ersetzen zuzunehmend Chemiker/innen in pharmazeutischen Entwicklungsprozessen. Etablierte chemische Termini wie die Chiralität verschwinden zunehmend aus dem allgemein geteilten Wortschatz der pharmazeutischen Produktentwicklung, da sie als veraltet gelten und nicht anschlussfähig sind für Lebenswissenschaftler/innen.

Die fortschreitende Aneignung der molekularen Welt durch die Lebenswissenschaften zeigt sich über die Pharmakotherapie hinaus zudem in den Feldern der biomedizinischen Forschung und Praxis, wozu insbesondere neuere, auf biotechnologische Innovationen ausgerichtete Paradigmata wie die translationale Medizin beitragen. Kapitel 5 kommuniziert in diesem Zusammenhang zentrale Befunde zu den Grenzziehungsdynamiken zwischen Medizin und Naturwissenschaften: So wird zunächst rekonstruiert, wie sich in der Geschichte zwischen Chemie und Medizin ein Verhältnis der Arbeitsteilung etablieren konnte, das die Interaktionen zwischen diesen Felder bin heute prägt. So gelang es der (organischen) Chemie im 19. Jahrhundert, sich institutionell von ihrem Status

als Hilfswissenschaft von der Medizin zu emanzipieren, dennoch bezog sie (neben Arzneimitteln) insbesondere im analytischen Bereich eine bedeutenden Anteil ihrer Anwendungsmöglichkeiten aus der Medizin. So wurde die Chemie zur primären Instanz, die Mediziner/innen im Rahmen des Studiums in die molekulare Welt einführt. Die Präidee der Arbeitsteilung, die das Verhältnis der beiden Disziplinen beeinflusst, ist allerdings seit der Molekularisierung der Lebenswissenschaften in Bewegung geraten. So prägen zunehmend biowissenschaftliche und -technologische Zugriffe auf die molekulare Welt die Vorstellungen von Mediziner/innen, während chemische als veraltet und im Zweifelsfall gar als gefährlich gelten: Das Beispiel des Arzneimittels Contergan steht wie kein anderes für das Versagen der Arbeitsteilung zwischen Chemie und Medizin.

Im Grenzbereich von theoretischer Chemie und Physik, in dem die beiden Felder als besonders amalgamiert erscheinen und die Gesetze der Quantenmechanik fast alle chemischen Prozesse und Phänomene mit den Theorien und Gesetzen der Physik erklärt werden, lassen sich besonders interessante Rückschlüsse auf die Grenzarbeit zwischen den beiden Bereichen ziehen. In Anbetracht der Diskurse der Chemiephilosophie, die in den späten 1980er Jahren als kritische Reaktion auf die Präidee des Reduktionismus auf die Physik begründet wurden (Scerri und McIntyre, 1997), ließe sich annehmen, dass Chemiker/innen in den Bereichen der Quantenchemie und theoretischen Chemie ein eher konfliktreiches Verhältnis zur Physik und besonders heftige Abgrenzungsbemühungen pflegen würden. Es zeigt sich in Kapitel 6 allerdings, dass die Präidee einer Reduzierbarkeit der Chemie auf die Physik von theoretischen Chemiker/innen im Feld eher positiv aufgefasst und auch aktiv hergestellt wird, da die Chemie durch die Nähe zur Physik ein starkes wissenschaftliches Fundament erhält. Darüber hinaus sind einige Vertreter/innen dieser Fachbereiche selbst aktiv darum bemüht, molekulare Phänomene wie die Chiralität mit quantenphysikalischen Gesetzmäßigkeiten zu erklären. Die wissenschaftsphilosophischen Debatten darüber, ob es sich bei der molekularen Chiralität auf eine auf die Physik reduzierbare oder irreduzible Eigenschaft handelt, dienen darüber hinaus als interessantes Fallbeispiel, das die Rolle der Geisteswissenschaften in der Grenzarbeit naturwissenschaftlicher Disziplinen sichtbar macht.

1.3 Molekulare Chiralität im Spiegel disziplinärer *Boundary Work*

Als zentrales Fallbeispiel, anhand dessen sich die Transformationsprozesse der chemischen Felder in ihrer Geschichte wie Gegenwart nachvollziehen lassen, soll nun die molekulare Eigenschaft der Chiralität ins Feld geführt werden. Die Chiralität dient im übertragenen Sinne als Probierstein, anhand dessen sich aus den Semantiken der Felder analytisch zugrundeliegenden Inkommensurabilitä-

ten[3] und divergierende Weltbilder des Molekularen sichtbar machen lassen. Die eher unscheinbare und alltäglich anmutende Eigenschaft der molekularen Spiegelasymmetrie zeugt davon, dass mit den jüngeren Hybridisierungen der Lebens- und Materialwissenschaften multiple molekulare Welten entstanden sind, die sich nicht ohne weiteres sinnhaft in Deckung bringen lassen. Wie die Anwendung des Probiersteins der Chiralität zeigt, lassen sich Beobachtungen und Phänomene der zahlreichen supra- und makromolekularen Welten, die nanoskopische Betrachtung von Oberflächen oder die mathematisch-abstrahierten, quantenmechanischen Zugriffe auf die submolekulare Welt nicht so nahtlos zusammenführen, wie es das gegenwärtige Interdisziplinaritätsdispositiv der Wissenschaftspolitik annimmt und einfordert. Vielmehr zeigt sich, dass selbst basale Konzeptionen und Unterscheidungen wie diejenige zwischen Rechts und Links je nach disziplinärem oder kollektivspezifischem Kontext völlig unterschiedliche Prämissen transportieren können.

Beim Begriff der Chiralität handelt es sich um ein vom altgriechischen Äquivalent *cheír* (Hand) abgeleitete Kunstwort für Händigkeit. Chirale Objekte zeichnen sich der allgemeinen Definition nach dadurch aus, dass sie eine Spiegelbild-Asymmetrie aufweisen, sodass sie sich wie Bild und Spiegelbild verhalten, die durch Drehung nicht miteinander in Deckung gebracht werden können (Heilbronner und Dunitz, 1993). 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. Es bezeichnet somit all jene Gegenstände, die sich nicht vollständig beschreiben lassen, ohne auf deren Eigenschaft einer inhärenten Rechts-Links-Asymmetrie zu verweisen (Brunner, 1999, S. 2). Dazu gehören etwa alle mikroskopischen, makroskopischen und hypothetischen Objekte mit einem dreidimensionalen Drehsinn (Schrauben, Schlingpflanzen, Schneckenhäuser oder die DNA-Doppelhelix) aber auch die Hände als prominentestes Beispiel dieser Form der Symmetriebrechung (ebd.). Die Konzeption der Chiralität wurde im 19. Jahrhundert an der Schnittstelle zwischen organischer Chemie und

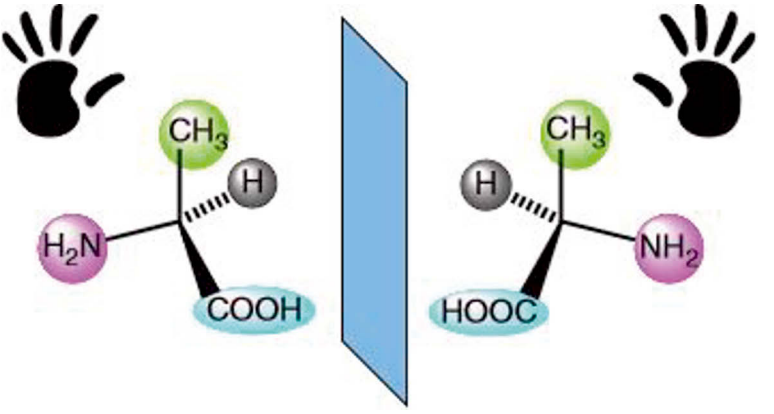
3 Der Begriff der Inkommensurabilität lässt sich am ehesten mit Verständigungsschwierigkeiten aufgrund fehlender geteilter Prämissen umschreiben (Kuhn, 2014, S. 116). Ludwik Fleck geht davon aus, dass die wissenschaftliche Wissensproduktion ein kollektives Unterfangen ist und Wissen in konkreten, lokalen Gruppen in Abgrenzung zu anderen erzeugt und ausgehandelt wird. Häufig zeigt sich, dass selbst wenn zwei Forschungsteams genau dasselbe Thema mit den gleichen Methoden zu bearbeiten scheinen, ihrem Denken und Handeln dennoch unterschiedliche Prämissen, Weltbilder und normative Vorstellungen von Wissenschaftlichkeit – sog. Präideen – zugrunde liegen können (Fleck, 2014b, S. 187). Als kommensurabel gelten diejenigen Denkstile, wenn sie bezüglich der gemeinsam geteilten Prämissen und Weltbilder übereinstimmen, als inkommensurabel werden sie bezeichnet, wenn sie nicht miteinander in Deckung zu bringen sind und insbesondere im interkollektiven Denkverkehr ein gegenseitiges Verstehen verhindern (Peine, 2011).

Kristallografie als Befund molekularer Symmetriebrechung in organischen Verbindungen angelegt (Gal, 2017), denn wie Abb. 1.1 zeigt, können sich auch Moleküle bezüglich ihrer Struktur wie Bild und Spiegelbild verhalten. Ein und dieselbe Verbindung in diesem Fall das Alanin kann dabei in rechts- bzw. linkshändiger Form vorkommen.[4]

Wie die Rekonstruktion der Historiografie der Chiralität in Kapitel 2 zeigt, blieb das Konzept der Chiralität nicht auf die organische Strukturchemie beschränkt, sondern wanderte im 20. Jahrhundert durch verschiedene naturwissenschaftliche Disziplinen hindurch und diente auch der Wissenschaftsphilosophie als Gegenstand erkenntnistheoretischer Betrachtungen (vgl. 6.2). Wie darüber hinaus die vertiefenden Analysen in den Kapiteln drei bis sechs aufzeigen, war die molekulare Spiegelasymmetrie stets in die kollektiven Erschließungsprozesse molekularer und anderer mikroskopischer Betrachtungszusammenhänge der Materie involviert und prägte die entsprechenden Weltbilder entscheidend mit. Die Auseinandersetzungen mit der Chiralität spiegelt zudem die innovationspolitische Dispositive vor dem Hintergrund des jeweiligen soziohistorischen Hintergrundes wieder: Am Fallbeispiel der Chiralität lässt sich ebenso der Aufstieg der organischen Synthesechemie als Leitdisziplin des Industriekapitalismus nachvollziehen wie die Unterschiedungspraxen zwischen Grundlagenforschung und Anwendung (sowie deren wechselnde Priorisierungen) im Laufe des 20. Jahrhunderts bis hin zu jüngeren Forderungen nach Transdisziplinarität, unternehmerischer Forschungspraxis und gesellschaftlicher Relevanz von Forschung im Rahmen der „*commercialized postmodern university*". Für die Rekonstruktion der Transformationen und Hybridisierungsdynamiken der chemischen und außer-chemischen Felder dient die molekulare Chiralität als Probierstein, anhand dessen sich die divergierenden Zugriffe auf die molekulare Welt herausarbeiten und vergleichen lassen.

Auch wenn die Chiralität vor allem Chemiker/innen zu Nobelpreisen verholfen hat und heutzutage primär durch chemische Lehrbücher vermittelt wird, ist sie doch im Laufe der Zeit durch verschiedene Disziplinen hindurchgewandert und hat dort ihre Spuren hinterlassen. So hat die Chiralität auch in Physik, Pharmazie, Medizin und Lebenswissenschaften wissenschaftliche Fragen aufgeworfen,

4 Die beiden händigen Versionen des chiralen Moleküls werden dabei als Enantiomere bezeichnet und in zwei verschiedenen Nomenklaturen beschrieben: Wobei sich R (*rectus* für rechts) und S (*sinister* für links) aus der Cahn-Ingold-Prelog Konvention (Cahn et al., 1956) ergeben und L (*levo*) bzw. D (*dextro*) aus der Fischer-Projektion zur Bestimmung der Polarisationsrichtung von Licht.Die S/R-Nomenklatur ist gegenwärtig neben der (-) und (+)-Version deutlich gebräuchlicher, L/D wird in der Breite nur noch überwiegend in Bezug auf Zuckermoleküle und Aminosäuren verwendet, insbesondere in den *Life Sciences*. Die aufgereinigten S- bzw. R-Isomere werden jeweils als Enantiomere bezeichnet, das äquimolare Mischverhältnis von 50/50 als Racemat.



Schematische Darstellung und Demonstration der molekularen Händigkeit anhand der spiegelbildlichen Isomere des Alanins. Übernommen aus (Blackmond, 2010, S. 2).

methodische und experimentelle Herausforderungen gestellt und zu gewichtigen Entdeckungen geführt. An dieser Stelle sei als populäres Beispiel für die Problematik der Chiralität in der Arzneimittelentwicklung das Thalidomid angeführt, der Ausgangsstoff für das Arzneimittel *Contergan*, das in den 1960er Jahren in 46 Ländern für Fehlbildungen an Gliedmaßen und inneren Organen bei über 10.000 Neugeborenen verantwortlich war und einen der größten Pharmaskandale des letzten Jahrhunderts auslöste (Kirk, 1999; Bützer, 2009). Das bioaktive Wirkungsspektrum des Schlafmittels steht in starken Zusammenhang mit der Stereoselektivität, sodass lange Zeit davon ausgegangen wurde, das reine S-Enantiomer sei verantwortlich für die fruchtschädigende Wirkung des Thalidomids, während die R-Form lediglich die erwünschten Müdigkeitserscheinungen mit sich führe. Auch wenn diese Ergebnisse heutzutage nicht mehr haltbar sind (Meierhofer et al., 2001), nahm die stereoselektive Wirkung von Arzneimitteln in Anschluss an die Contergan-Katastrophe Einzug in das Arzneimittelrecht und jeder Stoff ist vor der Zulassung auf sein enantioselektives Wirkungsspektrum zu untersuchen (Agranat und Caner, 1999; Zeid, 2011).

Die darauffolgenden Bestrebungen, einzelne Enantiomere aufzuspalten sowie racemische Verbindungen auf ihre Wirkungsmechanismen zu untersuchen, hatten in der analytischen und synthetischen Stereochemie der 1980er und 1990er Jahre in der Folge einen erheblichen Forschungsboom ausgelöst (Francotte, 2006; Francotte und Lindner, 2006). Dieser Trend ist mittlerweile wieder abgeebbt, die entsprechenden Verfahren gehören zur Laborroutine, die von Europa aus gerne *outgesourced* wird und die drängenden chiralitätsbezogenen Forschungsfragen haben sich in die theoretische Chemie, Katalyseforschung und Agrochemie ver-

schoben. Der Begriff der Chiralität wird dabei auf ambivalente Weise behandelt. Während in den *Life Sciences* der Begriff in Publikationen tendenziell eher vermieden wird, da ihm zu sehr der Hauch des Althergebrachten und des Chemischen anhaftet, werden etwa in den Materialwissenschaften neue Begriffe wie die Helizität eingeführt, um eine ähnlich motivierte Distinktion vorzunehmen. Und manche/r Chemiker/in verteidigt im Interview *seine* Chiralität gegen unbefugte Außenstehende:

> *Chemieingenieur Prof. Borodin[5] Jetzt in den Materialwissenschaften bei den Physikern, bei Magnet(.)leuten oder so die benutzen das auch (.). Aber es gibt eine strikte Definition, wenn man so will. von den Chemikern sag ich jetzt mal und die anderen Leute, die das benutzen, die scheren sich einen Dreck drum. Und benützen des einfach für allerlei Sachen (1) die SCHEINBAR spiegelsymmetrisch sind oder die Spiegelsymmetrie brechen.*

Wie deutlich wird, liegt bei der molekularen Eigenschaft der Chiralität eine gewisse interpretative Flexibilität vor. Demnach bestehen verschiedene fachspezifische Zugänge, Konzepte und Praktiken nebeneinander, die nicht nur in einem harmonischen Verhältnis zueinander stehen. Im Sinne eines *Boundary Objects* (Leigh Star, 2010; Leigh Star und Griesemer, 1989; Leigh Star, 2004) ermöglicht die Chiralität aber in einem gewissen Maße die interdisziplinäre Kooperation ohne dass zwingend ein Konsens über geteilte Ziele oder Konzepte vorliegen muss. Als *Boundary Object* verfügt die Chiralität derweil einersets über ausreichend Plastizität (sodass eine Mehrzahl verschiedener Konzeptionen und Interpretationen koexistieren und kooperieren können) und andererseits über genügend Geschlossenheit, sodass ein gemeinsamer Kern des Begriffs bestehen bleibt. Am Fallbeispiel der Chiralität zeigt sich darüber hinaus auf paradigmatische Art und Weise, wie wissenschaftliche Akteur/innen in kollektiver Auseinandersetzung und Abgrenzung von einander *das Chemische* hervorbringen. Auf diesem Wege werden die Identitätskonstruktionen der chemischen (und außer-chemischen Felder) empirisch *in the making* nachvollziehbar, was einen Zugewinn zu dem bestehenden historiografischen Rekonstruktionen und philosophischen Beiträgen darstellt. Insbesondere die Grenzarbeit der Chemie, die *Boundary work*, die sich um das *Boundary Object* der Chiralität spinnt, stellt ein konzeptuelles Werkzeug aus den *Science and Technology Studies* dar, das sich insbesondere für die Analyse heterogener Felder mit umkämpften Feldgrenzen eignet. In diesem Sinne fokussiert dieser Beitrag programmatisch auf die sozial hervorgebrachten Feldgrenzen der Chemie und

5 Die Namen der Interview-Partner/innen sind vollständig anonymisiert. Die Pseudonyme wurden derer von Komponist/innen entlehnt (siehe Übersicht in Abschnitt 1.4).

wie die Wissensarbeit bei den entsprechenden heterogenen Zugängen organisiert ist. Anknüpfend an den zahlreichen historischen Arbeiten zu den komplexen historischen Umständen ihrer Konstitutionsprozesse (Powers, 2012), werden die Re-Konfigurationen, Aufrechterhaltung und Verschiebungen von Feldgrenzen untersucht.

Thomas Gieryns Konzept der *Boundary Work* bzw. der Grenzarbeit (Gieryn, 1983) basiert auf der Beobachtung von Grenzziehung zwischen wissenschaftlicher und nicht-wissen-schaftlicher intellektueller Tätigkeiten und sagt aus, dass es bei diesen kollektiven Bestrebungen um semantische Strategien handelt, die in der Werbung um Ressourcen bei der außerwissenschaftlichen Öffentlichkeit zum Einsatz kommen. Ähnlich Pierre Bourdieus Konzept der *illusio des Feldes* (Bourdieu, 1998, S. 16) gebärdet sich die Wissenschaft als objektiv, indem seine Akteur/innen auf eine rationalistische Epistemologie und die universelle, überhistorisch gültige, von gesellschaftlichen Einflüssen scheinbar nicht kontaminierte Gültigkeit ihrer Wissensproduktion verweisen (ebd.). Diese rhetorischen Strategien dienen nicht nur der Sicherung von Ressourcen, sondern verfolgen auch kollektive Ziele, so etwa die Expansion oder der Ausbau einer Monopolstellung über bestimmte Wissensgebiete, Gegenstände, Ressourcen, Professionen und über diese möglichst autonom zu walten und gegen nicht-wissenschaftliche Einflussnahme zu verteidigen (Gieryn, 1983, S. 791f.).

Gieryns Konzeption lässt sich dabei analytisch auf wissenschaftliche Disziplinen oder auch theoretische Paradigmata erweitern (ebd., S. 792), was insbesondere in Bezug auf die Untersuchungen zur Chemie interessant ist. So lässt sich auch in den kollektiv-praktischen Unterscheidungen zwischen dem Chemischen und Nicht-Chemischen ein ideologischer Stil herausarbeiten, der auf die Erschaffung und Aufrechterhaltung eines bestimmten öffentliches Bildes orientiert ist und auf die Spannungen reagiert, denen sich die Felder der Chemie ausgesetzt sehen. So ist etwa in der chemischen Grundlagenforschung ein erhöhter Rechtfertigungsbedarf zu beobachten, denn die gesellschaftliche und ökonomische *Nützlichkeit* (Klein, 2016), welche der Chemie im Industriekapitalismus des 19. und 20. Jahrhunderts ihren sagenhaften Aufschwung ermöglichte, gerät zunehmend unter Druck und hohe Forschungsinvestitionen werden rechtfertigungsbedürftiger (Romero et al., 2017, S. 165). Hinzu kommen gesetzliche Richtlinien bezüglich Umwelt- und Gesundheitsschutz, denen sich nach der pharmazeutischen nun vermehrt auch die chemische Industrie beugen muss.[6]

---

6 In diesem Kontext sind auch die neueren chemischen Felder der *Green* bzw. *Sustainable Chemistry* zu nennen. Bei der Entwicklung nachhaltiger Verfahren bei Gewässermanagement, Agrikultur (insbesondere Bodenfertilisation) und Energieproduktion können Chemiker/innen auf ihre bestehenden Kompetenzbereiche zurückgreifen und über die Adaption umweltpolitischer Dispositive an bislang eher schwer erreichbare Ressourcen gelangen (Logar, 2011).

Mit der globalen Gefährdung durch chemische Kampfstoffe, toxische Pestizide oder Umweltverschmutzung durch Produkte der chemischen Industrie gerät die Chemie zunehmend unter Druck durch Gesetzgebung und öffentliche Kritik (Schummer, 2017c). Des Weiteren lässt sich beobachten, dass an den hybriden Grenzfeldern der Chemie (Materialwissenschaften, Nanowissenschaften, Quantentheorie und pharmazeutische Produktentwicklung) zunehmend außerchemische Deutungsmuster und Konzepte die Wissensproduktion überhandnehmen und klassisch chemische Gegenstände absorbieren. Die Chiralität stellt in diesem Zusammenhang einen paradigmatischen Fall dar, anhand dessen sich Re-Konfigurationen der chemischen Felder, Identitäten und Feldgrenzen nachvollziehen lassen. Damit steht dieser partikuläre, unscheinbare Fall für Fragen, die die strukturellen Veränderungen der klassischen Großdisziplin im allgemeinen berühren, sprich: die Hybridisierung der etablierten Organisationsform des Wissens, die sich zunehmend in problembezogenere, postdisziplinären Felder wie der *-omics*, *-sciences* oder *-studies* verschiebt.

Die Chemie und ihre heterogenen und hybridisierten wissenschaftlichen Felder liefern für die Wissenschaftsforschung zahlreiche neue Perspektiven. Insbesondere für die Studien zur Molekularisierung und zur Konstitution der Ebene des Molekularen liefert ein Fokus auf die Felder der Chemie erhebliche Zugewinne, da die Chemie als erste wissenschaftliche Disziplin gelten kann, bei der sich der *shift* vom makroskopischen Stoff zur molekularen Beschreibungsebene erstmals vollzogen hatte. Dennoch wurden in Bezug auf die Molekularisierung innerhalb der Wissenschaftsforschung primär die Lebenswissenschaften in den Blick genommen und dabei kaum ins Verhältnis zur Molekularisierung der Chemie gesetzt. Mithilfe des Vergleichs verschiedener Konzeptionen des Molekularen, wie sie in den verschiedenen Fachkulturen sichtbar werden, wird nachgewiesen, dass es sich bei Welt des Molekularen nicht etwa um eine statische, universelle Einheit handelt, sondern stetige Übersetzungsleistungen zwischen Feldern und Akteur/innen erfordert.

In diesem Zusammenhang wird somit der Annahme widersprochen, das Molekulare trete entsprechend der positivistischen Naturvorstellung als Einheit auf, als universell gleichbleibende Entität, unabhängig von einer Beobachterin/ einem Beobachter. Es wird davon ausgegangen, dass das Molekulare selbst von verschiedensten Akteur/innen, menschlichen wie nicht-menschlichen, wissenschaftlichen wie außerwissenschaftlichen netzwerkförmigen Beziehungsgeflechten hervorgebracht, ausgehandelt und aufrecht erhalten wird. Es besteht kein singulärer universeller Zugang zur Welt des Molekularen, das Wissen kann als situiert gelten, die Wirklichkeit präsentiert sich in einer Partialität (Haraway, 1988), einer Multiperspektivität und Multiplizität, die mit Machtverhältnissen, Ressourcenkonflikten und Mikropolitiken verbunden sind, die sich in den performativen Handlungsakten an den Orten der Wissensproduktion sowie den Narrativen und

Tropen von Akteur/innen widerspiegeln (Law, 2017). Es entspricht der Dynamik des Netzwerkes, die internen Machtverhältnisse zu depolitisieren sowie unsichtbar und durchsichtig werden zu lassen (Jasanoff und Kim, 2015, S. 17). Die Felder der Chemie bieten sich in diesem Sinne als paradigmatischer Fall für die Erforschung dieser Prozesse an, da sie in diesen Übersetzungsnetzwerken im Zentrum stehen und als Knotenpunkte gelten.

Ziel des vorliegenden Buches besteht darin, die Felder der Chemie für die Wissenschaftsforschung systematisch zu erschließen und als Betrachtunsgegenstand aus der Marginalität stärker ins Zentrum der allgemeinen Wissenschaftsforschung zu heben. Dieses Werk knüpft dabei an die bestehenden Erkenntnisse und Fragestellungen aus Philosophie und Historiografie der Chemie an, die seit den 1980er Jahren dieses noch relativ kleine Feld der chemiefokussierten Wissenschaftsforschung prägen. Insbesondere empirische sozialwissenschaftliche Beiträge und Perspektiven auf die chemischen Wissenschaften sind noch rar gestreut, auch wenn sich jüngstens um eine stärkere interdisziplinäre Einheit und Zusammenarbeit der chemiebezogenen Wissenschaftsforschung bemüht wird (Seeman, 2017; Fortin et al., 2018) und insbesondere der Ruf nach empirischen Interviewstudien und der Beobachtung von Praktiken der Chemie laut wird (Klein und Reinhardt, 2014).

1.4 Vorstellung der Interview-Partner/innen

Die empirische Grundlage der Befunde zur Grenzarbeit der Chemie besteht aus einer enthografischen Laborbeobachtung und einer qualitativen Interviewstudie mit Expert/innen verschiedener Grenzbereiche der chemischen Felder und angrenzenden Wissenschaften wie Physik und Biomedizin. In den folgenden Kapiteln finden sich immer wieder Zitate oder Beobachtungsvignetten aus der Feldforschung, zu deren Lesart in der Folge noch einige Hinweise vorausgeschickt seien. Insgesamt besteht die Interviewstudie aus 23 leitfadengestützten Interviews mit Vertreter/innen diverser chemischer, physikalischer, lebenswissenschaftlicher (Sub-)Disziplinen sowie Vertreter/innen der biomedizinischen Praxis. Sie alle gruppieren sich an den verschiedenen Feldgrenzen der Chemie und positionieren sich in heterogener Art und Weise zum chemischen Feld zugehörig bzw. nichtzugehörig, was wertvolle Einblicke in die Grenzarbeit der Chemie von *innen* wie *außen* her erzeugt. Zu diesem Zweck galt es, je nach Feld verschiedene Vertreter/innen verschiedener akademischer Qualifikationsstufen zu befragen und auch hinsichtlich akademischen und industriellem Arbeitsumfeld zu kontrastieren.

Sämtliche Interviews wurden in schriftdeutscher Sprache mit Personen, die in Deutschland, der Schweiz und Österreich tätig sind, im Zeitraum zwischen Juli 2015 und August 2016 geführt. Die laborethnografische Beobachtung in einem La-

bor der anorganischen Chemie mit Anbindungen an die Materialforschung fand zwischen Juni und Dezember 2016 statt. Die gewonnenen Interviewdaten wurden in der Transkription nach Möglichkeit anonymisiert und sollen keine Rückschlüsse auf einzelne reale Personen zulassen. Zur Anonymisierung erhielten diejenigen Interview-Partner/innen und Gesprächspartner/innen der teilnehmenden Beobachtung, die im Text wörtlich zitiert werden, jeweils ein Pseudonym. Sie wurden nach weniger gespielten Komponist/innen aus verschiedenen Epochen der Musikgeschichte benannt. Die in die Argumentation eingewobenen Interviewzitate basieren auf entsprechenden Transkripten, wie sie in der qualitativen Sozialforschung durch Audiotranskription angefertigt werden, wenn auch in einer speziell für Publikationen bereinigter Form (Kruse, 2015, S. 354f.). Die im Zitat vorkommenden Großsetzungen einzelner Ausdrücke stehen für Betonungen seitens der Sprecher/innen und Kürzel wie (.), (1), (4) für Sprechpausen. Die Ziffer innerhalb der Klammern weist die jeweilige Dauer der Pause in Sekunden aus, wobei (.) für eine kurze Pause mit einer Länge von unter einer Sekunde steht.

Dr. Albrechtsberger ist zum Zeitpunkt des Interviews bereits seit mehreren Jahren in der pharmazeutischen Produktentwicklung einer internationalen Pharmafirma beschäftigt. Er wendet insbesondere großdatenbankgestützte Hochdurchsatzverfahren zum Bestimmen potentieller Wirkstoffe an. Er vertritt mit seiner hybriden Ausbildung in Chemie, Biotechnologie und Nanowissenschaften ein postdisziplinäres Wissenschaftsbild, rechnet sich selbst den Lebenswissenschaften zu und entzieht sich in seiner Selbstpositionierung bewusst einer monodisziplinären Verortung. Die Semantiken, die Herr Albrechtsberger wählt, zeugen insbesondere vom Paradigmenwechsel, die mit dem Übergang vom kleinen zum großen Molekül in der Arzneimittelentwicklung einhergingen (Kapitel 4) und den Re-Konfigurationen der chemischen Felder.

Frau Ali-Zadeh befindet sich zum Zeitpunkt des Interviews im 8. Fachsemester des Studiums der Humanmedizin und absolviert im Rahmen ihrer medizinischen Promotion ein klinischen Forschungssemester im Bereich der toxikologischen Forschung. In diesem Bereich forscht sie mit einer Reihe chiraler Arzneistoffe und ihr Fallbeispiel zeugt eindrücklich von der epistemischen wie ästhetischen Sozialisation angehender Mediziner/innen in die molekulare Welt, die erheblich durch die organischen Synthesechemie geprägt ist.

Prof. Borodins Expertise ist primär in den Material- und Nanowissenschaften angesiedelt. Als Chemieingenieur und Materialwissenschaftler beschäftigt er sich überwiegend mit Katalyseprozessen. Die Chiralität versteht er als essentielle Eigenschaft von Nanopartikeln, organischen Molekülen und Oberflächenstrukturen. Seine Abgrenzungsbemühungen gegen die als invasiv wahrgenommenen physikalischen Expertisen und Zugriffe auf die supramolekulare Welt stellen ein paradigmatisches Beispiel für die chemische Grenzarbeit in einem hybridisierten, wissenschaftlichen Feld dar (Kapitel 3).

Dr. Eller wurde in der theoretischen Physik ausgebildet, was sich in seinem Chiralitätskonzept deutlich niederschlägt. Dieses wird vor allem auf der Ebene von Elementarteilchendynamiken und fundamentalen Wechselwirkungen verortet (vgl. Kapitel 6).

Prof. Farrenc ist Professorin der Pharmazie und bewegt sich in der biochemischen klinischen Forschung. Sie rechnet sich selbst dem Bereich der Medizinalchemie zu, in diesem Bereich entwickelt sie molekulare Modelle für verschiedene Gefäßerkrankungen. In diesem Bereich komplexer Biomoleküle zeigt sich, wie die Konzepte der klassischen organischen Synthesechemie allmählich aus dem Wortschatz verschwinden – und Akteur/innen dies zu verhindern versuchen: Frau Farrenc beschäftigt sich schwerpunktmäßig mit der chiralen Eigenschaft von Biomolekülen und ihr Interview zeugt eindrucksvoll von den Paradigmenwechseln, die sich in der Fachterminologie niederschlagen.

Frau Hensel ist Pharmazeutin mit einem Werdegang in pharmazeutischer Industrie (Schwerpunkt Produktsicherheit), Offizinapotheke und Koordination von Weiterbildungsmaßnahmen für pharmazeutisches Fachpersonal. Ihr Interview liefert Einsichten in den Problembereich der Arzneimittelsicherheit und Zulassungsstrategien bei chiralen Wirkstoffen (vgl. Abschnitt 4.2) und wie der Contergan-Fall (vgl. Abschnitt 5.2) die Grenzarbeit zwischen Biomedizin und Naturwissenschaften nach wie vor prägt.

Dr. Hoffmann ist zum Zeitpunkt des Gesprächs überwiegend in der Wissenschaftsphilosophie tätig, nachdem der eine interdisziplinäre, wissenschaftliche Ausbildung im Bereich der Quantenphysik und -Chemie absolviert hatte. Das Interview lieferte insbesondere zu den wissenschaftsphilosophischen Auseinandersetzungen mit der Chiralität in Emergenz- und Reduktionstheorien wichtige Erkenntnisse.

Prof. Paderewski ist emeritierter Professor der Toxikologie und blickt auf ein Berufsleben in der pharmazeutischen Industrie mit zahlreichen Anbindungen an den akademischen Forschungs- und Lehrbetrieb zurück. Als ausgebildeter Arzt war er in leitender Position für die vorklinische Prüfung von Arzneimittelkandidaten in einer internationalen Pharmafirma tätig. Seine Auseinandersetzungen mit der molekularen Eigenschaft der Chiralität zeugen insbesondere vom Paradigmenwechsel vom kleinen zum großen Molekül und dem Bedeutungsverlust, den die Weltbilder der organischen Chemie zugunsten der molekularen Lebenswissenschaften erleben.

Prof. Pejačević ist Professorin für anorganische Chemie, die sich insbesondere der Nano- und Materialforschung verschrieben hat. In Ihrer Forschungsgruppe fanden auch die teilnehmenden laborethnografischen Beobachtungen statt. Das Interview mit Frau Pejačević informiert über eine große Bandbreite von Bezügen zur molekularen Chiralität, die die verschiedenen chemischen Subdisziplinen überspannen und zeugt insbesondere vom Forschungsboom zur enantioselektiven

Synthese und Enantiomertrennung der 1990er Jahre infolge des Contergan-Falls (vgl. 2.3).

Prof. Rameau ist emeritierter Professor für Quantenchemie und physikalische Chemie. Er wirkt in einem Feld, in dem physikalische und chemische Zugriffe auf die fundamentalen Eigenschaften der Materie kaum zu unterscheiden sind und offenbar auch nicht Gegenstand der Grenzarbeit der chemischen Felder.

Herr Rolla ist Chemiker mit Berufserfahrung in der chemischen Industrie und absolviert zum Zeitpunkt des Interviews ein Doktorat bei Prof. Pejačević. Sein Projekt ist interdisziplinär angelegt und umfasst mehrere Teilprojekte im Bereich der organischen und anorganischen Chemie sowie Nanoforschung. Laborexperimente bestimmen seinen Alltag, er war meine primäre Ansprechperson während meines Aufenthalts in der Forschungsgruppe

Dr. Schoeck bewegte sich mit seiner Qualifikation als Physiker im Bereich der Oberflächenforschung ehe er dem Forschungsbetrieb den Rücken zukehrte und sich Primär mit der Universitätslehre widmete. Er positioniert sich als Experimentalphysiker und war im Bereich der Oberflächenforschung mit der Absorption chiraler Moleküle an Oberflächen beschäftigt. Das Gespräch zeugt in besonderem Maße von den Unterschieden zwischen chemischen und physikalischen Zugriffen auf die molekulare Welt.

Dr. Silcher wirkt als Chefarzt in der klinischen Psychiatrie und beschäftigt sich mit hochschul- und forschungspolitischen Themen. Seine kritischen Positionen zum Verhältnis zwischen Medizin und Naturwissenschaften warfen ein besonderes Licht auf die Grenzarbeit der chemischen Felder und wie die Präidee der Arbeitsteilung zwischen chemischen und biomedizinischen Wissenschaften zunehmend an Einfluss verliert (vgl. Abschnitt 5.1).

Herr Tartini ist Radiologe und in einem städtischen Versorgungskrankenhaus als behandelnder Arzt beschäftigt. Das Gespräch birgt ebenfalls Einsichten zur Grenzarbeit zwischen Chemie und Biomedizin zumal er vor seinem Medizinstudium einige Semester Physik studiert hatte.

Prof. Wolf-Ferrari ist emeritierter Professor für theoretische Chemie und war im Bereich der Risikomodellierung von Umweltereignissen tätig. Er unterscheidet in seinen Narrativen zwischen harten und weichen Wissenschaften und positioniert sich in einem Grenzbereich zwischen Physik und Chemie, der sich wie bei Prof. Rameau mit den fundamentalen Dynamiken der Materie beschäftigt. Er grenzt sich von alltagsnäheren und angewandten Feldern der organischen Chemie ab.

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 Fallbeispieles 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 entwickelt 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, Aneigungen 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; Noorduin et al., 2009; Le Poidevin, 2000; Ramberg, 2000; Ramberg, 2003; Ramberg, 2014; Van der Spek, 2006; Weisberg, 2012).

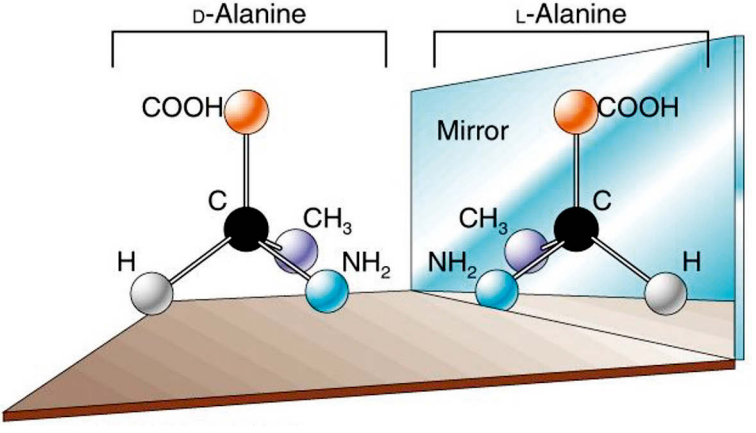
mit der Kristallografie ein molekulares chemisches Weltbild herausbilden und etablieren konnte (Mauskopf, 2006, S. 4). Insbesondere der Übergang von der zwei- zur dreidimensionalen Vorstellung von der Struktur chemischer Stoffe wird in der Chemiegeschichte mit der Feststellung einer strukturellen Spiegelasymmetrie und Unterschieden bezüglich der Polarisation 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 Kelvin[2] 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 Spiegelasymmetrie[3] 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 Isomerere 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 Bezeichungen wie der Dissymmetrie durchsetze 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 Gießen[4], dessen Leiter Justus Liebig neue Standards in der Ausstattung von Chemielaboren setze, die europaweit Schule machte (Morris, 2015, S. 86ff.). Insbesondere in Deutschland[5] und Frankreich[6] 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. Jahrunderts siehe (Knight, 1998; Homburg et al., 1998).

5 Zu den einflussreichsten Zentren der organischen Chemie gehörten zur Mitte des 19. Jahrhunderts folgende Hochshulstandorte 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).

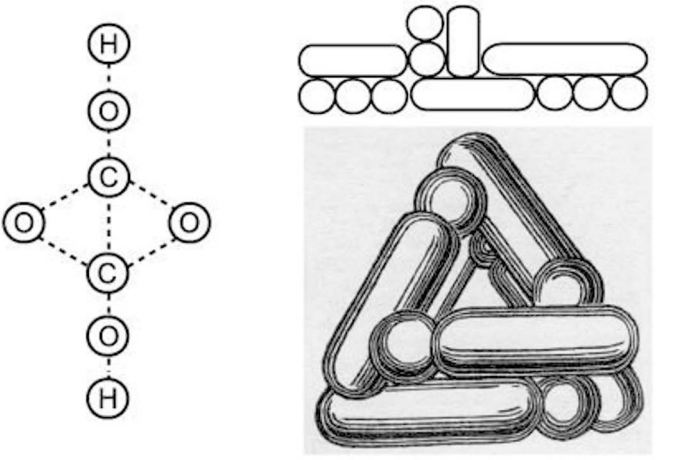
Auch wenn Daltons Theorie längst nicht auf Konsens stieß und noch viele Variablen und Parameter im Dunkeln blieben, bot der Atomismus Chemiker/innen ein pragmatisches mentales Modell, das der Beschäftigung mit der Suche nach neuen Elementen dienlich war (Steinhauser, 2014, S. 39ff.). Mit der wachsenden Zahl bekannter Elemente und Erkenntnissen darüber, wie diese sich zueinander verhalten, wurden zu diesem Zweck immer ausgefeiltere Experimentalsysteme und Messapparaturen entwickelt, etwa Justig Liebigs „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 Fomelkonvetion ein, die auf Abkürzungen von Elementnamen[8] 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, ersetzten 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).



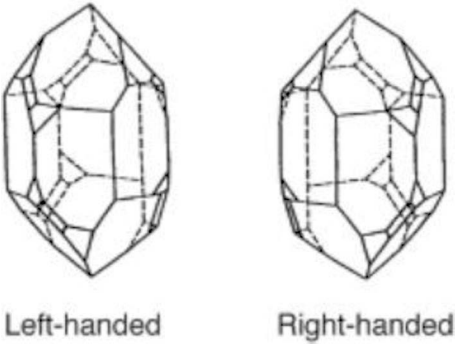
Vergleich zweier Molekülmodell-Konventionen, links nach Crum Brown (Oxalsäure), der die Elementensymbole als kreisförmige Atombällchen dargestellt und rechts Kekulé (Benzen-Ring mit Isopropylalkohol) in dessen typischer „Würstchen"-Darstellung.

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 Elektrizität[9] 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 denen der Kristallografie zusammen. An dieser Schnittstelle wird in der Chemiehistoriografie die Entdeckung der Chiralität durch Louis Pasteur im Jahre 1848 verortet. Die optische Aktivität[10] 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,



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

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 bin binden kann. Auf diese Weisen setzen sich Moleküle aus regelmäßigen Bausteinen zusammen und Bindungen im Molekül entstehen durch die Gesetze der Elektrizität. Diese frühe Bindungstheorie bildete den Ausgangspunkt für Kekulés 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*-Moment[11] 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-kristallo-grafischen *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 Zusammanhang 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 Ingenieurswissenschaften 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 rechtshändig 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 Kreativität[12], 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 Konbinationsmöglichkeiten 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 Hericus 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 lautete: „Voorstel tot uitbreiding der tegenwoordig in de scheikunde gebruikte structuur-formules in de ruimte: benevents een daarmeê 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 Kekulés Befunden zur Strukturchemie ansetzte, statt bei Pasteur und der optischen Aktivität von Kristallen. Van 't Hoffs 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 Hoffs 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 Hoffs *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 Hoffs 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' Hoffs 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 Hoffs 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 Hoffs 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 Hoffs 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 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 Hoffs 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 Pateurs 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 und 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 oganischen Chemie, wie sie europaweit im späten 19. Jahrhunderts 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 Automonie des Faches begünstigt worden, sondern auch durch die direkten Anwendungsmöglichkeiten in der chemischen Industrie, die sich Mitte des 19. Jahrhunderts herausbildete (Böschen, 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 Führungspersönlichkeiten 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 Vorraussetzung für die organische Synthesechemie bildete. Insbesondere die sog. Kohleteerindustrie 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 Systese kohlenstoffbasierter Moleküle zusammenfiel (Bensaude-Vincent und Stengers, 1996, S. 181). Die Verarbeitung von Kohleteer 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 (Böschen, 2004). Die organische Chemie[15] fungierte im 19. Jahrhundert als

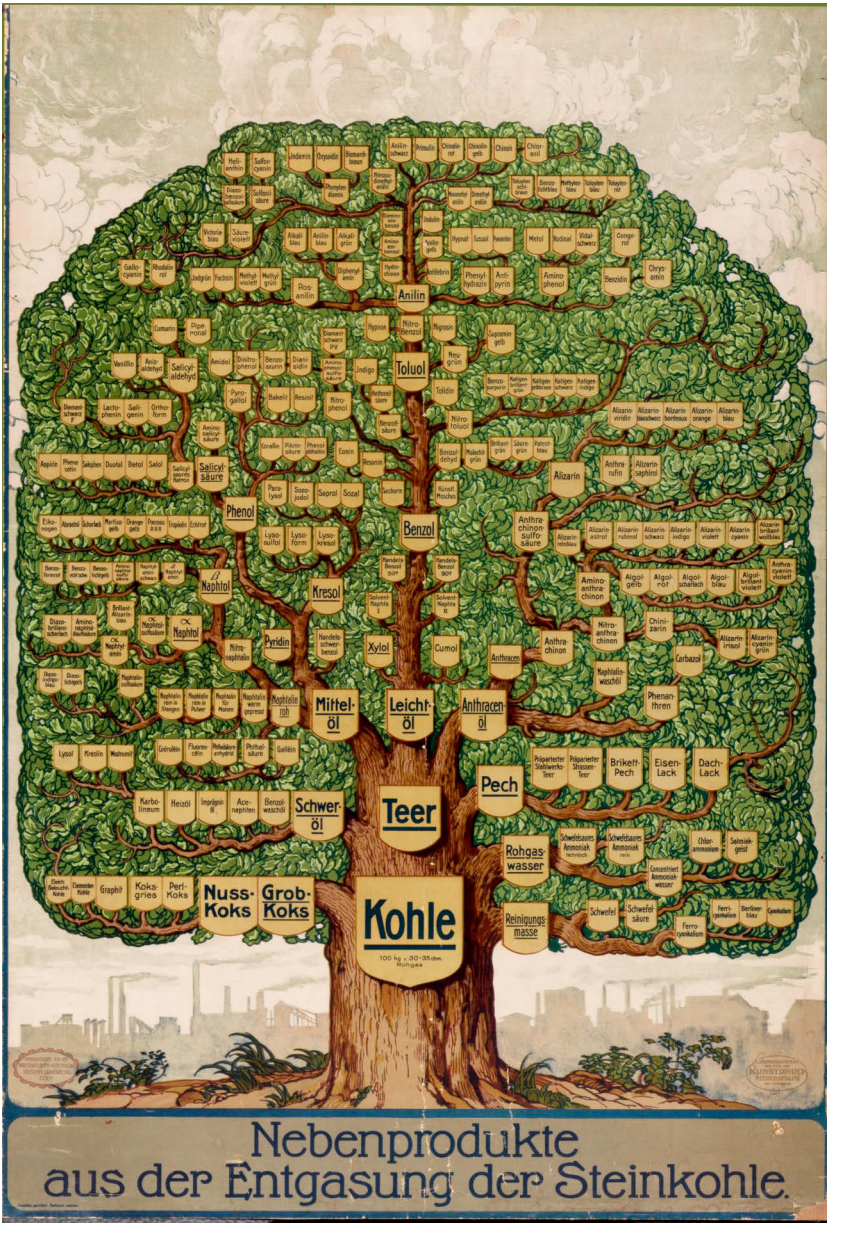
1996, S. 208f.) des Faches gedeutet, was vor allem auf deren epistemische Unabhängigkeit und erfolgreiche „*conquest of an own territory*" (ebd.) zurückgeführt wird, was jedoch nicht unumstritten ist (Bensaude-Vincent, 2018). Es wird insbesonders deutlich, wie sehr die Chemiegeschichte mit diesen Lesarten 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 Legosteinen[16] 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).



Schulwandbild: „Nebenprodukte der Entgasung von Steinkohle“ (um 1950/60). Verwendung der Grafik mit freundlicher Genehmigung des Pharmaziemuseums der Universität Basel.

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 (CH_4N_2O) 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 molarer 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 Steinkohleöl (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 Kekulés 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 Exportschlagern 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).

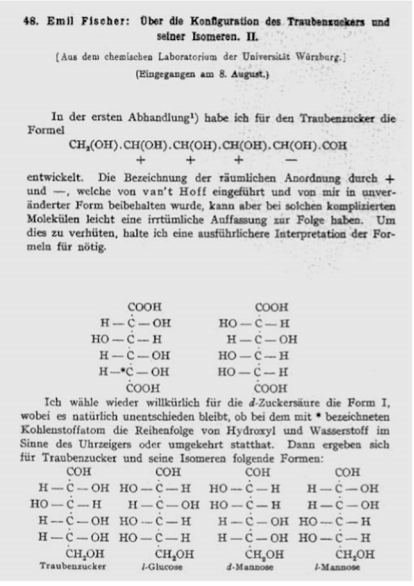
Anilin-Farben stellen die idealtypischen Produkte des neuen Paradigmas dar, im Sinne dessen Moleküle basierend auf ihrer Struktur am Reißbrett geplant, synthetisiert, patentiert, massenhaft hergestellt und vertrieben wurden. Darüber hinaus kennt die Chemiegeschichte noch weitere Produkte, die nach diesem 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 Katastrophen[18] 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 Hoffs und Le Bels 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 Kohlstoffatoms 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.



48. Emil Fischer: Über die Konfiguration des Traubenzuckers und seiner Isomeren. II.

[Aus dem chemischen Laboratorium der Universität Würzburg.]

(Eingegangen am 8. August.)

In der ersten Abhandlung[1]) habe ich für den Traubenzucker die Formel

$$CH_2(OH).CH(OH).CH(OH).CH(OH).CH(OH).COH$$
$$\quad +\quad\quad +\quad\quad +\quad\quad -$$

entwickelt. Die Bezeichnung der räumlichen Anordnung durch + und —, welche von van't Hoff eingeführt und von mir in unveränderter Form beibehalten wurde, kann aber bei solchen komplizierten Molekülen leicht eine irrtümliche Auffassung zur Folge haben. Um dies zu verhüten, halte ich eine ausführlichere Interpretation der Formeln für nötig.

Ich wähle wieder willkürlich für die *d*-Zuckersäure die Form I, wobei es natürlich unentschieden bleibt, ob bei dem mit * bezeichneten Kohlenstoffatom die Reihenfolge von Hydroxyl und Wasserstoff im Sinne des Uhrzeigers oder umgekehrt statthat. Dann ergeben sich für Traubenzucker und seine Isomeren folgende Formen:

Traubenzucker | *l*-Glucose | *d*-Mannose | *l*-Mannose

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.

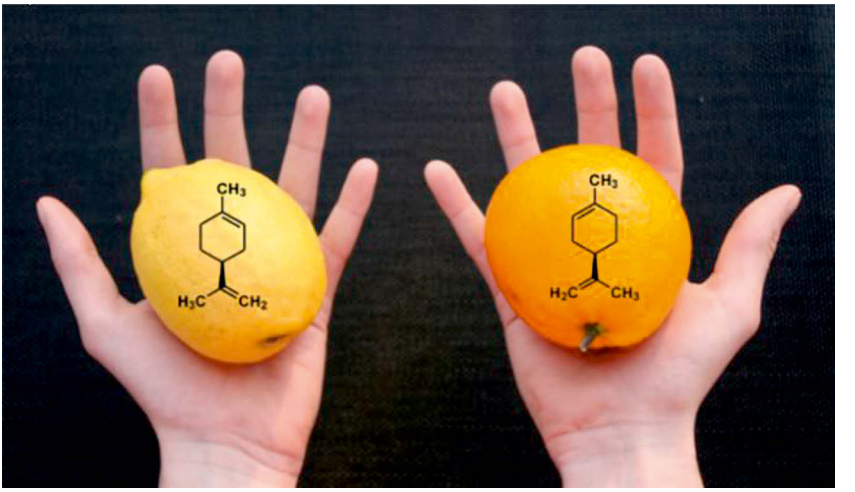
die Dreidimensionalität des tetraedrisches Kohlenstoff-Atoms gar nicht zu berücksichtigen scheint, sondern in der Modelldarstellung in die zweidimensionale Papierebene konvertiert (ebd.).

Zwischen Emil Fischers Konfiguration von Zuckermolekülen und Louis Pasteurs Ferment-Forschung liegt kein weiter Weg, sind doch Zucker ein essentieller Bestandteil der Verstoffwechselung 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 *disymmétrie* 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 $C_{10}H_{16}$. 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 linksgenähten 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 Präidee insbesondere bei der Vorstellung von Arzneistoffwirkung in Pharmakologie und Biomedizin funktioniert (Lichtenthaler, 1995; Parascandola und Jasensky 2012)

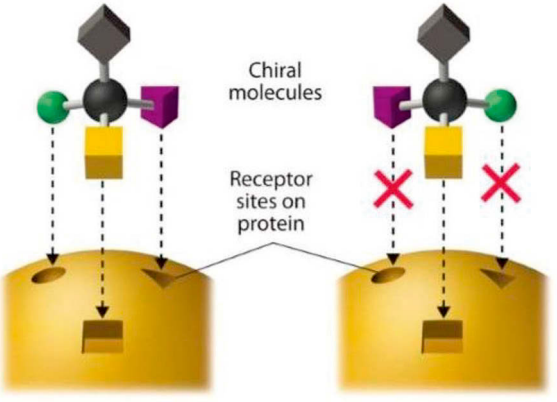
Vorbild waren bei Emil Fischers experimentellen Befunden ebenfalls die Hefepilzkulturen, die im Rahmen der Fermentation auf verschiedene Isomere der Glukose und anderer Zuckerverbindungen enantioselektiv reagierten. Die rasch anwachsende Disziplin der Biochemie erforschte die Prozesse der Biokatalyse 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 Chiraltät 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 Antibiotioka, 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 Ingenieurswissenschaften 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 *autopoeisis* 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 Katalyseforschung sowie Barry Sharpless für die Entwicklung der sog. Sharpless-Epoxidierung, einer heute weit verbreiteten asymmetrieschen 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 Gesetzte (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 anderseits 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 auftat, 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 Physik[22] 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 Elektromagenismus 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 Konzeptionen[23] allmählich auf (Nye, 1992, S. 206). Die Annäherungen[24] 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 Jabocus 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 Becquarel 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 Rutherfords[25] 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 chemische 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 gemeinsames 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. Absorbtion 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. Atomschalen) eines Atoms mit der Rangfolge und der Klassifikation unter einer Periode in Mendelejevs 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 Spektra 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 nichtvisuell 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 gehandelt (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 Fachidentität[29], 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 maerkierte 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. objekthistorschischen 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.

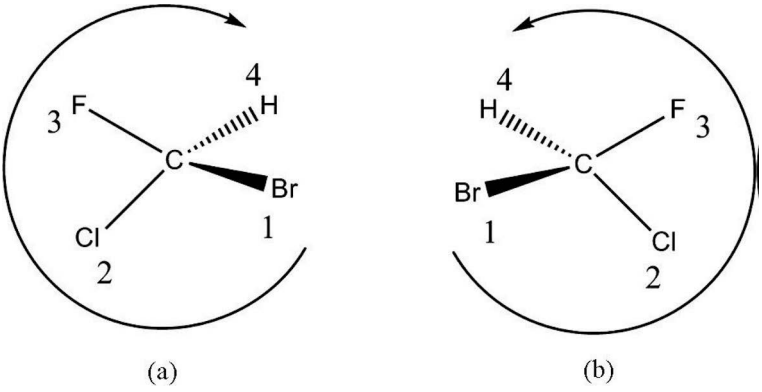
im Rahmen derer neue Bereiche großindustrieller Produktion[31] und Entwicklung erschlossen wurden, die die Kapitalvolumina der bereits erwähnte Kohleteerindustrie bei weitem überstiegen. Als 1952 die ersten kommerziell produzierten NMR Spektrometer der Firma Varian in den USA auf den Markt kamen, setzte 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 Folgemodelle 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 „mentalen 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 Spektra 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 aboluten 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), Kapillarenelektrophorese (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 ecxess* 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 Glundlagenforschung 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.

3 *„A materials way of thinking"*: Chiralität in Nano-, Material- und Oberflächenforschung

Als erste Fallstudie zu den Re-Konfigurationen der chemischen Felder werden in diesem Kapitel die Materialwissenschaften und ihre gegenwärtigen Beiträge zur Chiralitätsforschung diskutiert. In diesem multidisziplinären und hybridisierten Forschungsbereich zeigt sich wohl am deutlichsten, wie die Aneignung und Umdeutung tradierter, chemischer Gegenstände wie der molekularen Chiralität durch die physikalischen Wissenschaften vonstatten geht. Mit der Erschließung besonders kleiner und spezifischer Sonderformen der Materie, beispielsweise Nanopartikeln und -strukturen sowie der supramolekularen Ebene, werden sukzessive physikalische Weltbilder auf etablierte, chemische Gegenstände und Fragestellungen dominant. Dies zeigt sich etwa darin, dass der Begriff der Chiralität auf *„im strengen Sinne"*[1] nicht-chirale Gegenstände wie Elektrospin und zweidimensionale Oberflächenstrukturen angewandt wird und zudem mit physikalischen Konzeptionen wie der Helizität amalgamiert. Die Materialwissenschaften, die über mehrere Jahrhunderte hinweg primär ein chemisches Betätigungsfeld darstellten, werden seit den 1960er Jahren zunehmend von Physiker/innen adaptiert, was sich heute in einem ambivalenten Verhältnis zwischen den Fachkulturen ausdrückt und Gegenstand der Grenzarbeit der chemischen Felder ist. Einerseits verspricht die Nähe zur Physik einen Zugewinn an Übereinstimmung mit impliziten Präideen der Einheit und Hierarchie der Wissenschaften, gemäß deren Vorstellungen ein physikalischer Zugriff auf die Natur als überlegen gilt. Auf der anderen Seite reagieren Chemiker/innen in diesem Feld allerdings auch im Sinne einer *„conquest of [their] own territory"* (Bensaude-Vincent und Stengers, 1996, S. 208f.), wenn chemische Ansätze unsichtbar und chemische Gegenstände von außen angeeignet werden:

1 Diese Formulierung geht auf das Interview mit dem Materialwissenschaftler Prof. Borodin zurück, der mit der entsprechenden Semantik der Unterscheidung echter und falscher, bzw. chemischer und nicht-chemischer Chiralität ein Leitmotiv für die Grenzarbeit zwischen Chemie und Physik im hybriden Feld der Nano- und Materialwissenschaften liefert.

> *Chemieingenieur Prof. Borodin: Ein berühmter Chemiker, der die Katalyse mitbegründet hat, Wilhelm Ostwald, hat immer gesagt: „ein Chemiker der nicht auch Physiker ist, ist GAR nix". Das heißt, Chemiker müssen Physik LERNEN. Die machen's nicht so gut wie die Physiker aber sie KÖNNEN'S. Also das heißt, sie können ein bisschen Physik und CHEMIE. Ein PHYSIKER ist völlig ignorant der Chemie gegenüber. Also das [ist] verallgemeinernd jetzt aber das heißt, die haben GAR keine Ahnung von Chemie und sie lernen's auch nicht und sie halten's auch nicht mal für nötig. Aber sie GEHEN dann in das Gebiet der Chemie, sie benutzen Moleküle, Materialien und haben keine Ahnung und fangen dann an da rumzustochern. Als Chemiker hat man dann bestimme Sachen schon gelernt, erkannt, definiert, BENANNT und die erfinden das Rad neu weil sie zu arrogant sind, mal in andere Disziplinen zu schauen. Also ich find des erschreckend.*

Zu Beginn der 2000er Jahre galten unter Historiker/innen und Philosoph/innen der Chemie die Material- und Nanowissenschaften als paradigmatische Bereiche, in denen sich die Re-Konfigurationen der chemischen Felder – und vor allem deren Auflösung in hybride Disziplinen – beobachten ließen (Bensaude-Vincent, 2008). Es entspann sich eine Kontroverse darum, ob es sich bei den Feldern um eigenständige „Superdisziplinen" mit einer geteilten Fachidentität, theoretischen Konzepten, Methoden und Fragestellungen handle (Hentschel, 2011) oder um einen losen, desintegrierten Flickenteppich vorwiegend regional organisierter Wissensproduktion (Bensaude-Vincent, 2001). Auch die *Science and Technology Studies* zogen die Nano- und Materialforschung für zahlreiche Fallstudien zum Studium disziplinärer Dynamiken heran. Sie spielten in dieser Forschungstradition eine bedeutende Rolle in der Theoriebildung zur disziplinären Identität (Kurath und Kaiser, 2010), fachspezifischen Denkstilen (Schaper-Rinkel, 2007), Inter- und Transdisziplinarität (Schummer, 2004a) sowie zu den sozialen Bedingungen der Wissensproduktion vor dem Hintergrund zeitgenössischer Innovationsdispositive.[2]

Der zentrale Befund dieses Kapitels trägt zur Debatte um die Grenzziehung wissenschaftlicher Disziplinen angesichts ihrer Hybridisierung im Zuge sich wandelnder Innovationsdispositive bei: Die Erforschung, Entwicklung, Produktion,

2 Im Rahmen der Programmatik sog. konvergierender Technologien wurden seit der Jahrtausendwende anwendungsorientierte, gegenstandsbezogene und interdisziplinäre Disziplinen der Nano-, Bio- und Informationstechnologie neben den Neurowissenschaften (NBIC) im Rahmen nationaler Innovationsstrategien mit enormen Summen gefördert (Bensaude-Vincent, 2016, S. 51). Die entsprechenden politischen Initiativen der USA und der EU entsprechen einer Wissenschaftspolitik der *„commercialized postmodern university"* (Mody und Choi, 2013, S. 125), die sich vor allem durch einen unternehmerischen Innovationsgedanken auszeichnet (Kooperation mit Privatwirtschaft, erhöhte Konkurrenz und Wettbewerb, Forderung nach gesellschaftlich und wirtschaftlich relevanter Forschung, Großprojekte) (ebd., S. 130ff.).

Prüfung, Optimierung, Wiederverwertung und Vernichtung von Materialien war über mehrere Jahrhunderte durch einen primär chemischen Zugriff auf die mikroskopischen Dimensionen von Materie und Materialien geprägt (Hentschel und Reinhardt, 2011, S. 2). Diese Dominanz ist allerdings seit dem Aufkommen der Nanowissenschaften und *surface sciences* im Schwinden begriffen, zumal physikalische und informationstechnologische Zugriffe auf das Material an epistemischer Deutungsmacht zunehmen (Küchler, 2015, S. 273). Obgleich diese Modi des Erkenntnisgewinns im Kontext der entstehenden Bergakademien des ausgehenden 18. und der Materialprüfanstalten des 19. Jahrhunderts interdisziplinär angelegt waren, rekrutierte sich die leitende Expertise überwiegend aus den chemischen Feldern (Klein, 2016, S. 188). Die zentrale Heuristik dieses chemischen Zugriffs auf die Struktur von Metallen, Keramiken, Mineralen und später auch Kunststoffen unterschied sich allerdings deutlich von den aus Kapitel 2 bekannten molekularen Modellen der organischen Synthesechemie (Glazer, 2016, S. 7f.). Die atomare Gitterstruktur des Kristalls bzw. des Festkörpers unter Berücksichtigung entsprechender physikalischer Eigenschaften wie elektrische Leitfähigkeit, Formbarkeit oder Magnetismus stellten das erkenntnisleitende Modell der überwiegend anorganischen Festkörperchemie dar, die die Wissensproduktion in der Materialforschung anführte (Urban, 2015, S. 8, 50).

Dass die etablierte Grenzlinie zwischen chemischer Struktur und physikalischen Eigenschaften und Feldern allmählich erodiert, zeigt sich am Fallbeispiel der Chiralität. Die Spiegelasymmetrie zeigt sich in den Materialwissenschaften auf der Ebene von asymmetrischen kristallinen Gebilden und Kristallisationsprozessen sowie Absorptionsprozessen von Molekülen an Oberflächen. Während Chemiker/innen dazu neigen, die Definition der Chiralität auf diese Themenbereiche (neben den Strukturmerkmalen organischer Moleküle) zu beschränken, zeigt sich, dass Physiker/innen den Begriff der Chiralität auf verschiedene Phänomenbereiche ausweiten, die der etablierten chemischen Konzeption nicht entsprechen. Zunächst folgt in Abschnitt 3.1 eine historische Hinführung zum Thema, in der erörtert wird, wie sich physikalische und chemische Zugriffe auf Materialien und Werkstoffe unterscheiden und wie sich ihr Verhältnis im Zuge der wechselvollen Geschichte der Materialwissenschaften als interdisziplinäres Forschungsfeld darstellt. In den Abschnitten 3.2 und 3.3 werden in diesem Zusammenhang erstens das physikalische Konzept zweidimensionaler Chiralität und zweitens die Chiralitätskonzepte in Bezug auf magnetische Oberflächen angeführt: In beiden Fällen handelt es sich um physikalische Aneignungen chemischer Prozesse, denen Chemiker/innen in ihren Abgrenzungsstrategien entschiedenen widersprechen.

3.1 Physik oder Chemie? Eine kleine Geschichte des Materials

Im Alltagsverständis von technoscientifischen Innovationen finden Materialien eher wenig Beachtung. In ihrer Unscheinbarkeit fallen sie in der Wahrnehmung hinter denjenigen Produkten zurück, die sich aus ihnen zusammensetzen, allen voran Batterien, Textilien, Motoren, künstliche Gelenke, Speicherchips oder Kunststoffverpackungen (Urban, 2015, S. 1). Auch die Materialwissenschaften als Feld der Erforschung, Entwicklung, Optimierung und Entsorgung von Werkstoffen erfahren erst zögerlich Aufmerksamkeit vonseiten einer interessierten Öffentlichkeit, zumal Materialien im weitesten Sinne heute zu den größten globalen Märkten zählen, die zudem ein enormes Marktwachstum versprechen und enormen Zuspruch vonseiten der Forschungspolitik und Investor/innen genießen (Küchler, 2015, S. 271). Auch wenn nicht jedes materialwissenschaftliche Entwicklungsprojekt zu einer Innovation führt, die sich mittel- bis langfristig am Markt etablieren wird, bringt sie dennoch am Markt verwertbare Nebeneffekte hervor: Ständig in der Optimierung begriffene Technologien im Bereich der Herstellung, Analyse und Verarbeitung von Materialien werden in steter Auseinandersetzung mit den Materialien weiterentwickelt und dienen selbst als Quelle der Innovation (ebd.). Auch die Fähigkeit, bestehende Materialien umzuwandeln, wiederzuverwerten, zu entsorgen, zu vernichten oder für diese erweiterte Anwendungsbereiche zu erschließen, erhöht das Innovationspotential des Feldes (ebd.). Spezialmaterialien in der industriellen Anwendung verfügen zudem über immer längere und komplexere Wertschöpfungsketten, sie werden *smarter*, nachhaltiger, liefern Daten für komplexe Algorithmen und entsprechen den zeitgenössischen Innovationsdispositiven des neoliberalen Industriekapitalismus in höchstem Maße (Segal, 2017, S. 10).

Darüber hinaus hat sich in den Materialwissenschaften seit den 1980er Jahren ein neuer Wissenschaftsstil herausgebildet, aus dem sich u.a. auch die Nanowissenschaften speisen. Den Denkstil des „*materials way of thinking*“, der in einem charakteristischen *Triple Helix*-Innovationsmodell an der Schnittstelle von Akademie, Privatwirtschaft und Politik verankert ist, impliziert, dass der Innovationsprozess in diesem Feld nicht linear abläuft, sondern kreislauf- bzw. netzwerkförmig (Bensaude-Vincent, 2011, S. 107). Dies bedeutet, dass nicht nur das Zielprodukt Teil des Entwicklungsprozesses ist, sondern auch das Werkzeug selbst, mit dem es hergestellt wird. Der Innovationsprozess ist zudem interdisziplinär, unternehmerisch und auf drängende gesellschaftliche Herausforderungen ausgerichtet (ebd.). Es herrscht allerdings kein Konsens darüber, ob dieser Forschungsstil tatsächliche ontologisch einzigartige, neue Gegenstände hervorgebracht hat, oder ob es sich bei den Nanowissenschaften nicht um alten Wein in neuen Schläuchen handelt (Schummer, 2004a). Auch die tatsächliche Interdisziplinarität wurde angezweifelt

und ob dieses Feld tatsächlich die versprochenen Innovationen geniert (Marcovich und Shinn, 2011).

Bei den Materialwissenschaften handelt es sich um ein interdisziplinäres Feld, das sich an den Schnittstellen von Physik, Chemie, Elektrotechnik, Maschinenbau, Kristallografie, Geologie und Metallurgie angesiedelt hat (ebd.). Die Materialwissenschaften unterscheiden sich dabei in ihrer disziplinären Ausrichtung und thematischen Schwerpunktsetzung bezüglich lokaler Fachkulturen und Spezifika (Bensaude-Vincent, 2016, S. 51): Je nachdem an welchen Hochschulen, Fakultäten, Forschungsverbünden oder Lehrstühlen die Materialwissenschaften infrastrukturell angegliedert sind, haben sie tendenziell eher einen eher physikalischen bzw. chemischen Zugriff auf die Erforschung und Entwicklung von Materialien (ebd.). Dies rührt daher, dass zwischen dem chemischen Aufbau von Materialien, deren physikalischen Eigenschaften und ingenieurswissenschaftlichen Anwendungsbezügen unterschiedliche Schwerpunkte gesetzt werden (Bensaude-Vincent, 2007, S. 222). Was das Feld eint, ist die hohe industrienahe Anwendungsorientierung (Urban, 2015, S. 3). Innovationen der Materialwissenschaften sowie die Schwierigkeiten ihrer Skalierbarkeit von Prototypen, die unter artifiziellen Laborbedingungen entwickelt werden und auf Industriemaßstab extrapoliert werden sollen, dienen der Technikforschung als paradigmatisches Feld zur Erforschung von Innovationsprozessen (Mody, 2001, S. 10). Bei den Materialwissenschaften handelt es sich um eine vielschichtige *Technoscience*, bei der der empirische Forschungsgegenstand zugleich durch Verfahren ingenieurstechnischen Entwickelns hervorgebracht und optimiert wird (Mody und Lynch, 2010, S. 16).

> ‚Materials science‘ is an umbrella term for an extraordinary diverse set of practices and occupational and disciplinary affiliations. It includes, but is certainly not limited to, the study of metals, polymers, ceramics, glasses and composites, with respect to their electrical, mechanical, thermal, optical, and other properties […]. Many who receive the appelation ‚materials scientist‘ might alternatively refer to themselves as ‚scientists‘, ‚engineers‘, or as practitioners of more academically traditional disciplines (chemists, physicists, applied physicists, geologists). Alternatively, they may present themselves in terms of the material or application with which they work (ceramists, metallurgists, ‚device people‘, ‚plastics people‘ (Mody, 2001, S. 9; 10).

Die Materialwissenschaften haben sich in ihrer Geschichte überwiegend aus den Mutterdisziplinen Chemie und Physik heraus entwickelt bzw. haben sich im Grenzbereich zwischen den überwiegend experimentell orientierten Bereichen der Festkörperphysik und anorganischen Chemie angesiedelt (Schummer, 2004a, S. 15). Es bestehen, wie bereits erwähnt, zahlreiche weitere Überschneidungen mit verschiedenen Ingenieurswissenschaften und in jüngerer Zeit auch den Lebenswissenschaften (Segal, 2017, S. 43ff.). Dabei wurde jedoch von Wissenschafts-

historiker/innen festgestellt, dass sich eine US-amerikanische und eine europäische Entwicklungslinie des Faches voneinander unterscheiden lassen (Bensaude-Vincent, 2016). Erstens fand die Entwicklung der beiden Forschungstrends stark zeitversetzt statt, zweitens fiel sie in jeweils unterschiedliche forschungspolitische Kontexte und drittens bildeten jeweils verschiedene Anwendungsfelder, Methoden und Prämissen der Wissensproduktion den Hintergrund. In der Folge seien die beiden Entwicklungslinien der Materialforschung vorgestellt.

Auf dem europäischen Kontinent verfügen die Materialwissenschaften insgesamt über eine längere Tradition, die bis in die Zeit der Frühindustrialisierung zurückreicht. Im ausgehenden 18. Jahrhundert unterliefen zahlreiche Gewerbe- und Handwerkszweige einem grundlegenden Wandel: Nicht nur wurde der Maßstab ihrer Produktion angehoben, sondern diese auch in ihrer Herstellung rationalisiert und vereinheitlicht (Urban, 2015, S. 40f.). Die Gewinnung und Verarbeitung von Rohstoffen aus Minen wie Erze, Minerale und fossile Energieträger unterlief einer Verwissenschaftlichung[3] im Zuge der Entstehung und akademischen Etablierung der chemischen, physikalischen und ingenieurswissenschaftlichen Disziplinen (Vogel, 2013). Von der Begründung sog. Bergakademien als gesonderte Hochschulform erhofften sich die absolutistischen Monarchien Russlands, Österreich-Ungarns, Frankreichs, Preußens und Sachsens nicht nur rationale Kenntnisse über die Zusammensetzung verschiedener Bodenformationen, sondern auch über die Entwicklung von Technologien in der Gewinnung von Bodenschätzen und deren Verarbeitung (Schleiff und Konečný, 2013). Im militärischen, kolonialen wie wirtschaftlichen Wettstreit zwischen den Feudalmächten bildete sich ein Narrativ der Nützlichkeit in Bezug auf die entstehenden Technikwissenschaften heraus, mithilfe dessen sich die Bergakademien von den weniger praktisch orientierten Universitäten und anderen Hochschulformen abgrenzen konnten (Klein, 2016, S. 188). Als weitere Institutionen der Materialforschung etablierten sich im Laufe des 19. Jahrhunderts an verschiedenen europäischen Standorten Materialprüfanstalten, die insbesondere um die Festlegung einheitlicher Qualitätskriterien von Werkstoffen und deren staatlicher Kontrolle bemüht waren (Hentschel, 2011, S. 11f.).

3 Insbesondere die Produktion von gehärtetem Stahl für den Bau von Eisenbahnen, Brücken sowie dessen Verwendung zu militärischen Zwecken wirkten sich als Treiber der Verwissenschaftlichung der Materialforschung aus. Stahl wurde gewissermaßen zum Leitmaterial der Festkörperchemie (Urban, 2015, S. 41), während die fossile Kohle zum Leitmaterial der organischen Strukturchemie (vgl. Abschnitt 2.2) avancierte: „Die Initialzündung für die wissenschaftliche Untersuchung von Werkstoffen, der Beginn der Werkstoffforschung, wurde jedoch erst durch die industrielle Massenproduktion von Stahl ausgelöst. Handwerker, die bis dahin die Eisen- und Stahlherstellung dominierten und mit ihren Erfahrungen als unersetzbar galten, wurden zunehmend verdrängt von studierten Chemikern, wissenschaftlich orientierten Metallurgen und professionellen Ingenieuren." (Ebd., S. 41).

Von den Bergakademien ausgehend entwickelten sich im 19. Jahrhundert verschiedene Forschungszweige zur mechanischen und chemischen Gewinnung von Metallen (Metallurgie), der Verhüttung von Eisen-, Silber- oder Uranerzen, sowie deren industriellen Weiterverarbeitung und Qualitätsprüfung (Klein, 2016, S. 70ff.). In Auseinandersetzung mit den Abkühlungsprozessen geschmolzener Metalle entwickelte sich zudem die Kristallografie als Wissenschaft heraus (Glazer, 2016, S. 10ff.). Die Erforschung kristalliner Strukturen und Entwicklung von kristallografischen Technologien fand an mineralischen Stoffen (wie etwa Quarzkristallen) in enger Auseinandersetzung mit der Kristallgitterbildung von verhütteten Metallen statt (Urban, 2015, S. 21). Die Struktur von metallischen und mineralischen Kristallen wurde zudem mit entsprechenden physikalischen Eigenschaften verknüpft, etwa der elektrischen Leitfähigkeit, thermodynamischen Eigenschaften oder auch der optischen Aktivität. Wie in Abschnitt 2.1 deutlich wird, begründet sich auch die Erschließung der chiralen Eigenschaft von Festkörpern in diesen Forschungstraditionen, die ein Bindeglied zu den im Entstehen begriffenen organisch-chemischen Wissenschaften darstellte. Aufgrund dieser Eigenschaften ließen sich kristalline Verbindungen kristallografisch klassifizeren: Raum- und Symmetriegruppen bildeten dabei die primären Klassifikationssysteme der Kristallografie (Glazer, 2016, S. 9). Symmetrieverhältnisse im Allgemeinen und die Chiralität im Speziellen stellen im strukturellen Aufbau des Kristalls zentrale Klassifikationsmerkmale dar (Flack, 2003). Dies wird daher nicht nur in der Geschichte dieser Wissenschaftsbereiche deutlich, sondern auch in der Beobachtung, dass chirale Phänomene ein wachsendes Forschungsfeld in der gegenwärtigen Landschaft der Materialforschung und den *Nano Sciences* darstellen (Barron, 2009, S. 24).

Die europäische Tradition der Materialwissenschaften sedimentierte sich in der Folge als Disziplinengeflecht mit Wurzeln in verschiedenen Feldern. Die Werkstoffkunde bildet dabei bis heute eine interdisziplinäre Hochschullandschaft mit spezifischen lokalen Fachkulturen, Fachbezeichnungen, Studienprofilen, Industriebeziehungen, Forschungsschwerpunkten und disziplinären Hierarchien (Urban, 2015, S. 2). Insbesondere bezüglich der disziplinären Hierarchien unterscheidet sich die europäische von der US-amerikanischen Tradition: Während sich an den europäischen Hochschulen im Laufe der Zeit ein eher chemisches Verständnis des Festkörpers durchgesetzt hat, dominiert in den USA ein physikalisches (Bensaude-Vincent, 2016, S. 48). Indem physikalische Eigenschaften von Mineralen und Metallen der chemischen Struktur zugeschrieben wurden und physikalische Eigenschaften von Stoffen dem chemischem Aufbau implizit nachgeordnet werden, diente in der europäischen Fachentwicklung tendenziell die Physik als Hilfswissenschaft der chemisch-analytischen Expertise, während in den USA Institute, die den *materials sciences & engineering* (MSE) verschrieben waren, deutlich von Experimental- und Festkörperphysiker/innen und deren

spezifischen Zugriffen auf de Mikrostruktur von Materialien dominiert waren (ebd.). In diesem Fall diente tendenziell die Chemie als Hilfswissenschaft:

> Although research on materials developed in many different institutions (including universities, polytechnics and private companies) long before the 1960s, materials science only emerged as an academic entity in the USA, in the context of the Cold War. The scientists who promoted MSE described this research field as the "natural" outcome of physics in the first half of the twentieth century. Their story goes roughly like this: Following the use of electron microscopes to explore the structure of solids, a relation was established between the solids' macroscopic properties [...]. Thus, solid-state physics provided the theoretical foundations not only for metallurgy but also for the semiconductor and glass industries. This narrative emphasizes the coherent body of knowledge focused on structure-sensitive properties, which inspired a common approach to all classes of materials. It prompted the creation of MSE departments and a new structure of teaching undergraduate courses: to start from the first principles that connect structure and properties in all materials textbooks and then proceed to more specialized chapters on metals, ceramics, semiconductors, polymers, etc. (Ebd., S. 47).

Wenn auch die USA im Zuge der Industrialisierung weder auf Kohle noch auf Stahl verzichteten, war die wissenschaftliche Erforschung, Analyse, Optimierung und Verarbeitung entsprechender Materialien nicht an sog. Bergakademien bzw. in akademischen Forschungsprogrammen der Werkstoff- und Materialkunde organisiert (Bensaude-Vincent, 2001). Das Forschungsfeld der MSE etablierte sich in den Vereinigten Staaten als akademisches Feld erst in den 1960er Jahre als Konsequenz der Wissenschaftspolitik des Kalten Krieges (ebd.). Der Sputnik-Schock im Jahre 1957 lenkte die Aufmerksamkeit des US-amerikanischen Verteidigungsministeriums und diverser Privatfirmen auf eine verteidigungstechnische Forschungslücke: Es mangelte an Grundlagenwissen über das Verhalten von Materialien (die etwa in der Feinelektronik im Einsatz sind) unter speziellen Bedingungen wie im Weltraum oder unter radioaktiver Strahlung (Choi und Shields, 2015, S. 22). Im Rahmen des *Project Pontus*, einer nationalen Initiative zur Begründung der materialwissenschaftlichen Forschung in den USA, wurden mehrere Institute gegründet und an verschiedenen Hochschulen angesiedelt (ebd., S. 25). Auch wenn die Angliederung an die lokale Hochschulstruktur angepasst wurde und die Programmatiken der Institute als betont interdisziplinär kommuniziert wurden, zeichnete sich institutionenübergreifend in den USA eine gemeinsam geteilte Hierarchie im Disziplinengefüge zugunsten der physikalischen Wissenschaften ab (Mody und Choi, 2013, S. 135):

Das Feld der MSE war in den USA deutlich durch die Festkörper- bzw. Experimentalphysik dominiert, während im Gegensatz zum europäischen Trend

die Chemie als Hilfswissenschaft der physikalischen Grundlagenforschung verhandelt wurde. Weitere beteiligte Disziplinen wie Elektrotechnik, Maschinenbau, Keramikforschung und Metallurgie galten wiederum als Anwendungsgebiete, in die sich die Kenntnisse der Grundlagenforschung transferieren lassen (Bensaude-Vincent, 2016, S. 48). Aus diesem Grund unterschieden sich auch die thematischen Schwerpunkte der Forschung der beiden Kontinente: In Europa dominierten in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts Forschungsprojekte, die sich primär aus chemischen Fragestellungen und Zugriffen speisten: Polymere, Keramiken, Beta-Alumina, Batterieforschung und vor allem die Katalyseforschung im Bereich der Energiegewinnung, landwirtschaftlicher Anwendungen und im Dienste des Motorenbaus (Segal, 2017, S. 2ff.). In den USA hingegen zeigte sich neben dem industrienahen auch der militärische Einfluss auf die physikalisch geprägte Forschung. Neben nuklearen Technologien war das Feld lange fast synonym mit der rasant anwachsenden Halbleiterforschung in den 1960er und 1970er Jahren gesetzt worden. Siliziumprodukte wie das Si(111)-7x7, eine spezielle Oberflächenkonfiguration von Atomen in einem Siliziumkristall, revolutionierten die Schaltungen auf Computerchips und fungierten als *Boundary Objects*, die heterogenen Akteur/innen eine Kooperation ohne Konsens ermöglichten (Mody und Lynch, 2010, S. 4).

In diesem Zusammenspiel zwischen Experimental- und Festkörperphysik, Elektrotechnik und den aufstrebenden Informationstechnologien entstand eine vielschichtige *Technoscience*, die ihren Gegenstand nicht nur deskriptiv erforscht, sondern auch simultan aktiv hervorzubringen – und industriell zu vermarkten – vermag (ebd.). Als paradigmatisches Beispiel hierfür sei das Rastertunnelmikroskop (RTM) erwähnt, das als Schlüsseltechnologie in der Etablierung des US-amerikanischen MSE-Paradigmas gilt (Marcovich und Shinn, 2011, S. 230). In einer Kooperation zwischen dem multinationalen IT-Konzern IBM und verschiedenen Hochschulen in der Schweiz und den USA gelang es Gerd Binnig und Heinrich Rohrer 1981, dieses technische Gerät erstmals vorzustellen, wofür sie 1986 den Physik-Nobelpreis erhielten (Binnig und Rohrer, 1986). Mit diesem Gerät lassen sich die Oberflächen von Materialien auf der innermolekularen Ebene elektronisch abtasten und durch eine Softwaresimulation visualisieren.[4] Mit einem verwandten Gerät, dem Rasterkraftmikroskop, lassen sich zudem Oberflä-

4 Es handelt sich dabei um kein optisches Mikroskop, das mit Linsen und Licht arbeitet, sondern um ein elektronisches Verfahren, bei dem eine elektrisch leitende Sondenspitze mit einer rasterförmigen Bewegung über eine Oberfläche gefahren wird. Der Abstand zwischen Sonde und Oberflächenatomen beträgt nur wenige Nanometer und es herrscht eine elektrische Spannung zwischen der Sonde und der Oberfläche. Das Atomgitter an der Oberfläche wird erkennbar, indem kleinste Abstandsunterschiede gemessen werden. Über eine Software wird ein zweidimensionales Bild generiert, das Aufschluss über die Oberflächenstruktur gibt (Binnig und Rohrer, 1986; Schaper-Rinkel, 2007).

chen durch gezieltes Anbringen und Anordnen von Atomen an einer Oberfläche manipulieren (Schaper-Rinkel, 2007, S. 351).

Mit dem Rastertunnelmikroskop begann darüber hinaus eine gezielte Auseinandersetzung mit der chiralen Eigenschaft von Oberflächen, Nanopartikeln und Absorptionsprozessen von Molekülen an Oberflächen. Mit der Sichtbarmachung von „Mustern" an Oberflächen, die sich durch die Anordnung von Atomen an einer Oberfläche bilden, entstand ein neuartiger ästhetischer Zugang zur Chiralität, der sich aus den Softwaresimulationen des Rastertunnelmikroskop speiste. In den Materialwissenschaften wurde die Chiralität bis in die späten 1990er Jahre nur sehr marginal behandelt und der zitierte Professor und Chemieingenieur versteht sich selbst als einen der Pioniere dieses Feldes, das nach wie vor nicht sehr viele Mitglieder umfasst:

> *Lang: Was bedeutet Chiralität speziell in Ihrer Disziplin?*
> *Prof. Borodin: Also [Chiralität] bei den Oberflächen das war eigentlich immer ein Außenseiterthema. Als ich des angefangen habe, hab ich gedacht, ich bin der einzige auf der Welt aber das war nicht so. Aber ich hab das geglaubt und kurze Zeit später festgestellt, dass andere des auch machen aber es war da noch nicht bekannt. Und des war dann schon also 'n ganz schönes EREIGNIS wenn man dann sieht, man ist jetzt nicht mal allein. Und das ist jetzt ein größeres GEBIET geworden wohl wo Leute aus verschiedenen Disziplinen das adressieren auf der NANO-Skala, nicht nur an Oberflächen, aber auch in Materialien oder in Poren oder so. […] Und wir benutzen ein Tunnelmikroskop, das in der Schweiz erfunden wurde und das hat die Nanowissenschaften revolutioniert. Und mit dem kann man einzelne Moleküle abbilden. Submolekulare Auflösung, also ich kann keine Atome damit sehen aber ich SEHE innere Strukturen von Molekülen und wenn wir jetzt von chiralen reden, wir nehmen immer so HELIKALE Moleküle und da sehen wir dann sogar die HÄNDIGKEIT. Ich kann linke und rechte unterscheiden wenn ich das Experiment gut beherrsche was jetzt nix BESONDERES ist aber es ist schon spannend, wenn man dann bestimmte Phänomene, die mit der Händigkeit zu tun haben, untersucht. Also WIR konzentrieren uns eher auf die zweidimensionale Kristallisation, eigentlich will ich Kristallisation verstehen – das ist so kompliziert zu verstehen, dass es kaum jemand versteht.*

Die Visualisierung und Manipulation von Oberflächen und ihrer atomaren Zusammensetzung ermöglichte neue epistemische wie technische Zugriffe auf die mikroskopische bzw. submolekulare Welt besonders kleiner Partikel und Oberflächenstrukturen. Sie spielte in der Erschließung der Nanoebene eine erhebliche Rolle, die seit den späten 1980er Jahren konstitutiv für die Nanowissenschaften

war (ebd.).[5] Das Feld der Nanowissenschaften überschneidet sich mit den Materialwissenschaften auf mehreren Ebenen und fungiert zugleich als soziale Arena, in der sich physikalische und chemische Konzeptionen der mikroskopischen Beschaffenheit von Festkörpern – etwa der Chiralität – in ihrer Grenzarbeit gegenüberstehen (Bensaude-Vincent, 2001). In den Materialwissenschaften ist die Oberfläche eines Materials von besonderem Interesse, da die meisten chemischen und physikalischen Prozesse an dieser ablaufen und nicht im gesamten Gefüge (der Gesamtmasse eines Werkstoffs) (Segal, 2017, S. 2). Oberflächen lassen sich dabei unter Berücksichtigung verschiedener Auflösungsebenen betrachten, wobei die Größe von Partikeln Einfluss auf deren funktionale Eigenschaften nimmt. Dies betrifft insbesondere elektrische Leitfähigkeit, optische Aktivität, katalytische Eigenschaften oder mechanische Beschaffenheit von Materialien. Nanopartikel sind über eine Größe von 1 bis 100 Nanometer definiert und die Nanowissenschaften als interdisziplinäres Feld darüber, Partikel in diesem Bereich zu erforschen und Anwendungen daraus zu entwickeln (Urban, 2015, S. 207).

Chemische und physikalische Prozesse an Oberflächen laufen je nach Größenordnung der beteiligten Strukturen unterschiedlich ab. Nanopartikel (bei Molekülen) bzw. Nanokristalle (bei Festkörpern) gehorchen beispielsweise nicht mehr den Gesetzen der klassischen Mechanik, sondern der Quantenmechanik, obwohl sie streng genommen noch immer groß genug sind, um als makroskopische Körper vorzukommen (ebd., S. 225). Es handelt sich somit um einen Grenz- bzw. Übergangsbereich zwischen der abstrakten molekularen Ebene und der makroskopischen, die sich physisch wahrnehmen lässt (ebd., S. 207). Dies zeugt davon, dass die Konzeption der Nanowelt primär durch die physikalischen Wissenschaften geprägt ist und chemische dieser als zusätzliche Perspektiven nachgeordnet sind, bzw. sich gegensätzlich zu den physikalischen verhalten. Das dem physikalischen Zugriff implizit zugrundeliegende Konzept des Materials entspricht einer ontologischen Verlängerung der Materie, unterscheidet sich maßgeblich von einem chemischen Verständnis und ist in Abgrenzung zu diesem konstituiert (Bensaude-Vincent, 2011, S. 114). Während die Chemie primär Nomenklaturen und Klassifikationssysteme für Materialien im Sinne einer „*zoology of materials*“ liefert, fügte die Physik später Kenntnisse zu Struktur, Eigenschaften und Funktionen hinzu (ebd.). Beides wird in einer berühmten Rede des Physikers Richard Feynman deutlich, in der er 1959 prophezeite, dass sich Materialien eines Tages Atom für Atom zusammensetzen lassen werden:

> The principles of physics, as far as I can see, do not speak against the possibility of maneuvering things atom by atom. It is not an attempt to violate any

5 Mit der technischen Erschließung der Nanowelt mithilfe entsprechender Mikroskopiemethoden wurde erstmals auch die Chiralität von Nanopartikeln und auch als Eigenschaft des innermolekularen Aufbaus sichtbar (Gautier und Bürgi, 2009).

> laws; it is something, in principle, that can be done; but in practice, it has not been done because we are too big. Ultimately, we can do chemical synthesis. A chemist comes to us and says, "Look, I want a molecule that has the atoms arranged thus and so; make me that molecule." The chemist does a mysterious thing when he wants to make a molecule. He sees that it has got that ring, so he mixes this and that, and he shakes it, and he fiddles around. And, at the end of a difficult process, he usually does succeed in synthesizing what he wants. By the time I get my devices working, so that we can do it by physics, he will have figured out how to synthesize absolutely anything, so that this will really be useless (Feynman, 1959).

Mit diesem physikalisch geprägten *Top-Down*-Ansatz lassen sich Oberflächen analog zur Legobausteinmetaphorik Atom für Atom designen, aufbauen und manipulieren. Nicht zuletzt durch Technologien wie Rastertunnel- und Rasterkraftmikroskop wird es möglich, die komplexe molekulare bzw. supramolekulare Struktur auf den atomaren Aufbau zu reduzieren (Bensaude-Vincent, 2008, S. 57). Das rationale Design von Festkörpern und ihren funktionalen Eigenschaften im Sinne einer *molecular manufacture* wird häufig in Anlehnung an Richard Feynman gegenüber den Synthesemethoden der organischen Chemie als überlegen kommuniziert. Während klassische organische Synthesen mit Proben aus mehreren Milliarden Molekülen arbeiten und daher auf der Nanoebene chaotisch und unübersichtlich sind, kommen nanophysikalische Methoden (etwa das Rasterkraftmikroskop) i.d.R. mit einem einzigen Molekül aus, was es umweltfreundlicher und kontrollierbarer macht (Drexler, 1986, S. 13). Demgegenüber steht der chemische *Bottom-Up*-Ansatz, der weniger am aktiven systematischen Aufbau molekularer Maschinen ansetzt, sondern an dem Prinzip der Selbstorganisation von Molekülen und Kristallstrukturen (Urban, 2015, S. 59f.). Dementsprechend stehen sich zwei Ansätze gegenüber, wobei ersterer durch einen strengen Rationalismus des Maschineningenieurswesens und den inhärenten Drang geprägt ist, die Prozesse möglichst zu kontrollieren, überträgt letzterer die gestalterische Rolle auf die Materie selbst (Marcovich und Shinn, 2011, S 234). In diesem Sinne vertraut das Selbstorganisations-Paradigma auf den kreativen Moment der Natur und folgt der Annahme, dass sich die Einheiten in der Natur zu immer komplexer werdenden emergenten Einheiten zusammenfügen. Diese Prozesse werden auch für die Synthese und Katalyse aufgegriffen und für die Produktentwicklung genutzt, anstatt sie *ex ante* grundlegend aufbauen und rational steuern zu wollen (Schummer, 2004a, S. 17).

In der chemischen Theorie der mikroskopischen Welt verbinden sich Atome entweder zu den bereits bekannten Molekülen oder zu Kristallstrukturen. Es wird dabei zwischen Molekülen und Festkörpern unterschieden, wobei die Faustregel gilt, dass Metalle nicht-molekular, sondern kristallin sind und alle Nichtmetalle

molekulare Strukturen bilden (Ball, 2003, S. 10f.). Da die Materialwissenschaften in ihrer Theorie- und Gegenstandsbildung erheblich durch die Auseinandersetzung mit Metallen geprägt wurden (Cahn, 2010, S. 26ff.), dient weniger der molekulare Blick der mikroskopischen Welt als erkenntnisleitend, sondern die kristalline Struktur von sog. Festkörpern. Dieser Blick unterscheidet zwischen Festkörpern und Molekülen und ist in Auseinandersetzung mit Metallen entstanden, die bei der Schmelze auf verschiedene Art und Weise auskristallisieren (Urban, 2015, S. 59). Bei der Auskühlung kristalliner Strukturen wie Metallen und Keramiken ordnen sich die Atome bzw. Partikel zu Kristallgittern in bestimmten räumlichen Konfigurationen an. Dies erfolgt durch Prozesse von Keimbildung und Kristallwachstum: Beim Abkühlen der geschmolzenen Masse setzt zu einem bestimmten Zeitpunkt der Moment ein, an dem sich spontan mehrere Atome zu einem Gitter zusammenfügen (Glazer, 2016, S. 6f.). Von diesen Kristallkeimen ausgehend fügen sich mit fallender Temperatur der Schmelze weitere Atome an, die das Muster in einer gewissen Regelmäßigkeit fortsetzen, bis eine vollständige Erstarrung eingetreten ist (ebd.). Es liegt in der Natur des Kristalls, dass die Struktur niemals vollkommen ist. Verunreinigungen bei der Keimbildung sind unvermeidbar, sodass Unregelmäßigkeiten in der Struktur auftreten, die Materialwissenschaftler/innen vor gewisse Herausforderung im Planen, Entwickeln und Skalieren von Werkstoffen stellen (Mody, 2001).

Der chemische *Bottom-Up*-Ansatz der molekularen Selbstorganisation wie auch der physikalische *Top-Down*-Ansatz des rationalen Designs unterscheiden sich dabei grundsätzlich entsprechend zugrundeliegender Prämissen und Konzeption der Materie (Schummer, 2004a, S. 9f). Der physikalische Denkstil unterscheidet sich semantisch wie epistemisch insofern vom chemischen, dass er von einer molekularen Architektur statt einer Struktur ausgeht, die sich zudem zunehmend in der Semantik der Nano- und Materialwissenschaften sedimentiert (Sierra, 2009). Moleküle werden dabei nicht als aus der Natur hervorgehende Strukturgebilde gedacht, sondern als molekulare Maschinen (Bensaude-Vincent, 2007, S. 224). Im Sinne einer mechanistischen Vorstellung von der molekularen Welt werden die Funktionsweisen makroskopischer mechanischer Systeme auf kleinstmögliche Systeme extrapoliert. Dieser Denkstil wurde zum einen von der Miniaturisierung[6] der Informationstechnologie seit den 1960er Jahren geprägt und schöpft

6 Der Begriff der Miniaturisierung der Informationstechnologie bezieht sich auf die Tendenz, dass in der Geschichte der Computersystementwicklung Prozessoren, Schaltungen und Speichermedien physisch immer kleiner und gleichzeitig immer leistungsfähiger, integrierter und vernetzter wurden und an Speicherkapazität gewannen. Als Schlagwort in diesem Zusammenhang ist „*Moore's Law*“ zu nennen, entsprechend dessen sich die Anzahl der Transistoren auf einem Mikrochip im Zweijahrestakt verdoppeln, während sich die Produktionskosten parallel dazu halbieren (Moore, 1965).

sich zum anderen aus einem wachsenden Interesse von Physiker/innen an biologischen Gegenständen wie Gehirn und DNA als Informationsträger (ebd., S. 222).

Neben ihrer Rolle als Eigenschaft von Kristallbildung und -struktur ist die Chiralität in den Materialwissenschaften in zahlreiche Prozesse involviert, etwa der Katalyse, Synthese von Nanopartikeln oder Polyoxometallaten (Amabilino, 2009). Abgesehen von den kristallografischen Erkenntnissen des 19. Jahrhunderts, die zur Entdeckung der optischen Aktivität sowie zur Begründung der modernen Stereochemie beigetragen hatten und deren tragenden Rolle bei der Festlegung von Symmetrie- und Raumgruppen (Glazer, 2016, S. 7), fristete die Chiralität allerdings bis ins späte 20. Jahrhundert innerhalb der Felder der Materialforschung ein Nischendasein. Erst in den 1990er Jahren wandte sich die *scientific community* den räumlichen Aspekten von Materialien und Oberflächen zu (Scarso und Borsato, 2009). Dies war primär den technischen Limitationen geschuldet, denn erst durch die Rastertunnelmikroskopie wurden chirale Strukturen an Oberflächen wahrnehmbar und intelligibel. In den folgenden beiden Abschnitten wird diskutiert, welche Rolle die Chiralität als Eigenschaft von Festkörperpartikeln, Molekülstrukturen sowie fundamentalen Wechselwirkungen als Gegenstand der *Boundary Work* zwischen chemischen und physikalischen Kollektiven der Nanowissenschaften spielt. Die semantische Aneignung, Umdeutung, Bedeutungserweiterung und Verteidigung der konkurrierenden (und nicht immer kommensurablen) Chiralitätskonzeptionen stehen dabei im Fokus.

3.2 Helizität, planare Chiralität und andere physikalische Zugriffe

Die Rolle von Physiker/innen in der Materialforschung war im US-amerikanischen Kontext bis in die 1960er und in Europa bis zur Nano-Revolution der 1990er Jahre tendenziell eine randständige, wie im letzten Abschnitt hergeleitet wurde. Als Hilfswissenschaft der Chemie, die vor allem im europäischen Kontext die mentalen Modelle und Zugriffe auf das Material dominierten, waren physikalische Eigenschaften der Materie und entsprechende Methoden zwar weit verbreitet und untrennbar mit den chemischen Erkenntnisprozessen verbunden (Urban, 2015, S. 40ff.). Allerdings dauerte es einige Zeit, bis Physiker/innen dezidiert erkenntnisleitende Fragestellungen und einen genuin physikalischen Zugriff auf Design, Produktion, Optimierung und Entsorgung von Werkstoffen einsetzte – und zu den Konzepten der Chemie in ein Konkurrenzverhältnis trat (Bensaude-Vincent, 2011, S. 114). Insbesondere der Ruf nach interdisziplinärer Zusammenarbeit, die Anbindungen an Elektrotechnik und Maschinenbau sowie die fortschreitende informationstechnologische Automatisierung der Forschungs- und Entwicklungsprozesse führten seit den 1960er Jahren zu einer Aufwertung physikalischer Epis-

temiken und Methoden in hybriden und anwendungsorientierten Bereichen wie den Nano- und Materialwissenschaften (Mody und Choi, 2013).

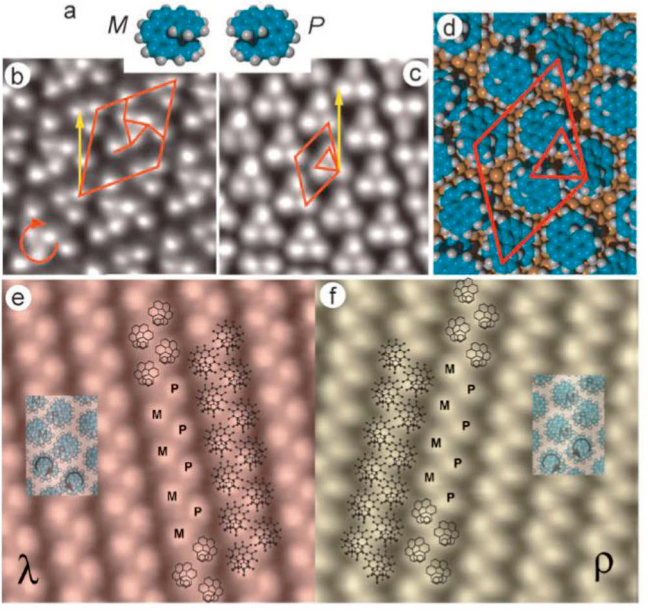
Dass die Denkstile der Festkörperphysik in den Material- und Nanowissenschaften zunehmend dominant werden und diejenigen der Chemie allmählich verdrängen, zeigt sich in den entsprechenden feldspezifischen Narrativen zur (supra)molekularen Welt: etablierte chemische Konzeptionen des Molekularen – wie etwa die Konzeption der molekularen Chiralität – erfahren eine sukzessive Bedeutungsverschiebung. Im Gegensatz zu den in Kapitel 4 und 5 behandelten *Life Sciences*, in denen ein biowissenschaftlicher Zugriff auf das Molekulare chemische Konzepte aus der Terminologie und Forschungspraxis verdrängt und unsichtbar werden lässt, zeigt sich für das Feld der Materialwissenschaften, dass der Chiralitätsbegriff dort vielmehr angeeignet und erweitert wird. Als Chemiker/innen sozialisierte Personen im Feld zeigen sich angesichts der Beobachtung besorgt, dass auch solche Phänomene neuerdings als chiral bezeichnet werden, die im „*strengen Sinne*“ nicht chiral sind. Als Gegenstand der Grenzarbeit gegen den wachsenden physikalischen Einfluss in ihrem Feld wird die Chiralität als genuin chemischer Gegenstand verteidigt. Die folgenden Beobachtungen aus dem Feld zeigen, wie ambivalent sich das Verhältnis zwischen Chemie und Physik auf der experimentellen Ebene gestaltet: Estyleinerseits wirken ungeschriebene Präideen einer disziplinären Hierarchie auf die Narrativbildung ein und andererseits zeigen sich erhebliche Inkommensurabilitäten bei den grundlegenden geteilten Konzeptionen des Molekularen.

In diesem Abschnitt werden zunächst die physikalischen Perspektiven auf den Gegenstand des Materials am Fallbeispiel der Chiralität bzw. der Helizität referiert. Es zeigt sich, dass in Bezug auf etablierte chemische Konzepte der mikroskopischen Welt eher der Modus einer Aneignung stattfindet, sodass diese in ihren epistemischen Bezügen, Reichweiten und Bedeutungen eine Verschiebung erfahren. In Abschnitt 3.3 wird anschließend aufgezeigt, wie Chemiker/innen im Feld auf die Aneignung von Begriffen, Methoden und Forschungsgegenständen vonseiten der Physik reagieren, indem der physikalischen Begriffserweiterung durch definitorische Einschränkungsversuche entgegengewirkt wird.

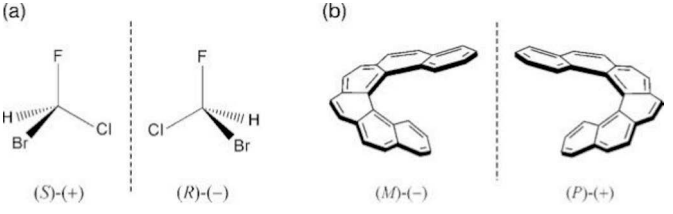
Lang: Was verstehen Sie unter Chiralität? Dr. Eller: (1) Chiralität, ja das ist (4) also erstmal ein Konzept, das ich (1) eben jetzt (2) aufgrund meiner (2) spezialisierten Ausbildung einfach aus der Elementarteilchenphysik vorwiegend kenne. Da spricht man auch von Linkshändigkeit und Rechtshändigkeit oder auch von Helizität (.) und CHIRALITÄT, das sind glaub ich einfach Synonyme. (5) Und man sagt eben dann (7) also es gibt in der Teilchenphysik dieses Konzept der (.) Links- und Rechtshändigkeit, das besagt ähm (1) eben einfach ein Elementarteilchen hat 'nen SPIN (2) also üblicherweise 'nen halbzahligen Spin. […]

Werden Physiker/innen verschiedener Fachrichtungen nach ihrem Chiralitätsverständnis befragt, verwenden diese das Konzept häufig synonym mit bzw. setzen es in ein Abhängigkeitsverhältnis von der Helizität, einer originär quantenmechanischen Konzeption. Physikalische und chemische Definitionen der Chiralität unterscheiden sich grundlegend in Bezug auf den jeweiligen Phänomenbereich. Während sich die chemische Chiralität weitestgehend auf die inhärente Spiegelasymmetrie molekularer bzw. supramolekularer Strukturen bezieht, bewegt sich das physikalische Konzept auf der Ebene von Elementarteilchen und fundamentalen Wechselwirkungen der Materie (siehe hierzu auch Kapitel 6). In der weiteren Betrachtung wird deutlich, dass diese quantenphysikalischen Konzeptionen mittlerweile in den interdisziplinären Feldern der Material- und Nanowissenschaften omnipräsent sind und sich mit den chemischen vermengt haben. Insbesondere der Begriff der Helizität, die ursprünglich als reine Erhaltungsgröße der Quantenfeldtheorie konzipiert war, erfährt in diesem Kontext eine erweiterte Rezeption in Bezug auf Gegenstände supramolekularer Strukturen. Dabei verdrängt der physikalisch besetzte Begriff der Helizität allmählich den chemischen der Chiralität und die Distinktion zwischen den beiden Konzeptionen wird kontinuierlich aufgeweicht.

Der Begriff der Helizität im Sinne der Quantenfeldtheorie bezeichnet diejenige Eigenschaft eines Teilchens, die dem Spin des Teilchens den entsprechenden Impuls gibt und darüber entscheidet, in welche Richtung es entsprechend rotiert (Philipsen, 2018, S. 57f.). Makroskopisch gesprochen muss man sich die Bewegung des Teilchens so vorstellen, dass es eine rechts- bzw. linksgängige Schraubenlinie nach vorne (rechts) bzw. hinten (links) beschreibt. Es handelt sich allerdings bei den quantenmechanischen Konzeptionen von Helizität und Chiralität nicht um molekulare oder andere makroskopische Strukturen der Materie, sondern um mathematische Abstraktionen der Teilchendynamik (vgl. Kapitel 6). Der Begriff der Helizität wird allerdings nicht nur in der Teilchenphysik verwendet, sondern seit den 1980er Jahren auch in den Nano- und Materialwissenschaften (Scarso und Borsato, 2009). In diesem Bereich setzt er sich seither sukzessive gegen das organisch-chemische Konzept der axialen Chiralität durch und die beiden Definitionsbereiche verschwimmen zunehmends ineinander (Ernst, 2012, S. 261). Bei helikalen bzw. axial-chiralen Molekülen handelt es sich i.d.R. um längere, kettenförmige Moleküle wie etwa Polymere, die in ihrem regelmäßigen Aufbau eine dreidimensionale Schraubenform aufweisen (vgl. Abb. 3.1). Das wohl prägnanteste Beispiel für eine axiale molekulare Chiralität bietet in diesem Zusammenhang die DNA-Doppelhelix mit ihrer charakteristischen Schraubenform (Sierra, 2009). Die Stereochemie verwendet für diese Art der Chiralität eine eigene Nomenklatur, um sie von der planaren Chiralität kleiner, optisch aktiver Substanzen abzugrenzen. Angaben zur Windungsrichtung werden mit (P)-(+) (plus) für im Uhrzeigersinn und mit (M)-(-) (minus) für gegen den Uhrzeigersinn angegeben (vgl. Abb. 3.2).



Bei dieser Abbildung zweier gegensätzlicher helikaler Schraubenmoleküle handelt es sich um eine softwaregestützte Simulation, die auf einer Rastertunnelmikroskopie beruht. Es handelt sich dabei um chirale Kohlenwasserstoffe, die zunächst nach Enantiomeren getrennt und anschließend auf einer Cu(111)-Oberfläche absorbiert wurden. Entsprechend entstand ein axiales Muster. Entnommen aus (Ernst, 2012, S. 2072).



Die Nomenklaturen organischer Verbindungen mit einem Stereozentrum und helikaler Supramoleküle wie dem Hexahelicen werden in der Stereochemie voneinander abgegrenzt. Abbildung übernommen aus (Barron, 2009, S. 3).

Die Helizität als Sonderform der supramolekularen Chiralität gewann in den 1990er Jahren allmählich an Bedeutung, als sie zu einem essentiellen Gegenstand der (chemisch ausgerichteten) Materialwissenschaften avancierte (Rickhaus et al., 2014). Dies liegt darin begründet, dass die molekulare Selbstorganisation an Ober-

flächen häufig chirale oder schraubenförmige molekularen Strukturen hervorbringt.[7] Diese Oberflächenstrukturen können wiederum auf verschiedene Prozesse wie die enantioselektive Katalyseleistung Einfluss nehmen, worauf in diesem Zusammenhang im darauffolgenden Abschnitt 3.3 näher eingegangen wird. Im Gegensatz zur Chiralität wird am Begriff der Helizität deutlich, dass dieses Konzept in den Nano- und Materialwissenschaften als tendenziell eher physikalisches Prinzip wahrgenommen wird und die Grenzen zwischen epistemischen Bezügen auf Elementarteilchendynamiken, Nanopartikel sowie molekulare und supramolekulare Gebilde unscharf werden.

> *Lang: Welche wissenschaftlichen Fragestellungen finden Sie im Zusammenhang mit Chiralität besonders interessant und relevant? Chemieingenieur Prof. Borodin: Einmal schon noch Materialwissenschaften, irgendwelche optischen Schalter in der Richtung. (1) Wenn man also [ein] Material macht, das dann sozusagen als SENSOR oder als Schalter nützlich ist (2) und dann natürlich nach wie vor die Paritätsverletzung und der Einfluss auf das Universum – da spielt's eine Rolle. Und für das LEBEN oder nicht? Das wird ja immer diskutiert.*

Im hybriden disziplinären Grenzbereich der Oberflächen-, Nano- und Materialforschung lässt sich zunehmend beobachten, dass die Chiralität nicht mehr als genuin chemisches Konzept verstanden wird, sondern dass Physiker/innen in ihren Semantiken eine ebenbürtige Expertise für sich beanspruchen. Die Interviewstudie zeigt im Vergleich, dass relativierende Aussagen wie *„Ich bin kein Chemiker, von daher kann ich nicht allzu viel dazu sagen"* deutlich seltener ins Feld geführt werden als etwa von Lebenswissenschaftler/innen und vor allem Ärzt/innen. Physiker/innen positionieren sich selbstbewusst als Wissensproduzent/innen im Bereich chiraler Moleküle und deren experimenteller Manipulation, ein Feld, das bislang Vertreter/innen der organischen Chemie vorbehalten war. Die physikalische Auseinandersetzung beschränkt sich nicht auf die epistemische Aneignung dieses molekularen Phänomens. Vielmehr bedeutet die Entgrenzung physikalischer Zugriffe auf die molekulare Welt eine erhebliche Erweiterung des Chiralitätsbegriffes, denn ein Zugriff auf die molekulare *Architektur* von chiralen Oberflächen kann nicht mehr erfolgen, ohne auf die prozesssteuernden Grundkräfte und die physikalische Konzeption der Nanopartikel einzugehen. Die supramolekulare Welt erweist sich als Konglomerat verschiedener disziplinärer Zugriffe (auch aus den angewandten Ingenieurswissenschaften) mit einer gewissen Diskurshegemonie der Physik[8] als vermittelnde Instanz.

---

7 Die Ursachen und Mechanismen der molekularen Selbstorganisation gelten nach wie vor weitestgehend als rätselhaft, insbesondere da sich achirale Nanopartikel und Moleküle zu chiralen Makromolekülen zusammenschließen können (Ernst, 2012, S. 2061).

8 Zu diesem Schluss kommen auch (Hentschel und Reinhardt, 2011) und (Hentschel, 2011).

Eperimentalphysiker Dr. Schoeck: Also ich hab' [in meiner Doktorarbeit] zumindest mit den Chemikern zusammengearbeitet, die unsere Moleküle gemacht haben. Und [mit den] Leute[n], die des Ganze simuliert haben, das [machen] bei uns die theoretischen Physiker. Da war's für mich auch interdisziplinär weil's halt was anderes war als mich einfach nur hinzusetzen und irgendwelche Sachen zu messen. Und ich bin sogar mal ab und zu zu den Mathematikern rübergelaufen und hab mich mit denen einfach über Symmetrie unterhalten.

In der Wissenschaftsforschung herrscht Uneinigkeit darüber, ob es sich bei den den Nanowissenschaften tatsächlich um neuartige Felder mit eigenständigen Phänomenen und Methoden handelt (Marcovich und Shinn, 2011, S. 221) oder eher um eine Verlängerung der Festkörper- und Halbleiterphysik bzw. der Kolloidchemie unter dem Vorzeichen neuerer wissenschaftspolitischer Dispositive (Schummer, 2004a). Auf der Ebene von impliziten Konzeptionen des Molekularen zeigt sich, dass hier tatsächlich ein neuartiger, dezidiert interdisziplinärer, Zugriff entstanden ist, der sich deutlich von den organisch-chemischen, anorganisch-chemischen und physikalischen abgrenzen lässt. Die Hegemonie der physikalischen Zugriffe, im Rahmen derer etablierte chemische Konzepte aneignet und diese um eigene Perspektiven erweitert werden, wird darüber hinaus durch entsprechende Dispositive der Forschungsförderung mitgetragen (Mody und Choi, 2013). Die implizite Bevorzugung eines physikalischen *style of reasoning* zeigt sich etwa darin, dass physikalische Mikroskopiemethoden der klassischen organischen Synthesechemie gegenüber als überlegen eingeschätzt werden und entsprechend eine gesteigerte Förderung in der Nano- und Materialforschung erfahren (Bensaude-Vincent, 2008, S. 58). In den Innovationsdiskursen der Oberflächen-, Nano- und Materialforschung ließ sich eine besonders prägnante und wirkmächtige Präidee herausarbeiten, die die physikalische Hegemonie stützt: Die Präidee des Reduktionismus wird in der Folge vorgestellt und in Bezug auf die Konzeption der Chiralität und der supramolekularen Welt diskutiert.

Die Grundannahme, dass chemische Gegenstände grundsätzlich mit physikalischen Größen, Kräften und Gesetzen erklärbar bzw. auf diese zurückzuführen seien, wird im Folgenden als Reduktionsthese bezeichnet und in Kapitel 6 vertiefend diskutiert. Die Reduktionsthese, die seit der erfolgreichen Etablierung der Quantentheorie in der wissenschaftsphilosophischen Schule des Wiener Kreises ausformuliert worden war, ist trotz Jahrzehnten der Kritik nach wie vor im allgemeinen Wissenschaftsverständnis vieler Fachwissenschaftler/innen fest verankert (Janich, 1998). Als unhinterfragte Wahrheit lebt die Präidee einer Hierarchie der Wissenschaften, die die physikalischen Grundlagenwissenschaften privilegiert, auch in den Innovationsdispositiven der Forschungsförderung fort (vgl. 5.2). Die Nanowissenschaften sind nicht zuletzt deshalb so erfolgreich in der Generierung von Ressourcen, weil sich diese Präideen der Einheit und Hierarchie von

Wirklichkeitsebenen und wissenschaftlichen Disziplinen in einem der zentralen Gegenstände dieser hybriden Felder wiederfinden: der molekularen Selbstorganisation. Die *„molecular self-assembly"* stellt gewissermaßen den kleinsten gemeinsamen Nenner dar, der das sonst eher heterogene, interdisziplinäre Feld mit eher lokalen Wissenssilos miteinander verbindet (Marcovich und Shinn, 2011, S. 236).

> *Dr. Schoeck: Woran ich [bei Chiralität] auch noch denken muss, ist an meine selbstorganisierten Moleküle und da ist Chiralität eines der Organisationsprinzipien, die dahinter stecken. Das bedeutet (.) eine Form über die sich Moleküle organisieren können, ist zum Beispiel über irgendwelche Form von KRÄFTEN also elektrostatische Kräfte zum Beispiel ähm ordnen sie sich zu Einheiten AN (.) aber auch je nachdem welche Händigkeit sie haben ordnen sie sich-also (1) dass sie manchmal so kleine Einheiten bilden. Diese kleineren Einheiten bilden größere Einheiten die bilden wieder größere Einheiten und diese bilden wieder größere Einheiten. Einer dieser SCHRITTE wird zum Beispiel von Chiralität bestimmt, da muss ich dran denken.*

Die Vorstellung einer Natur als System, das sich in unterschiedliche Komplexitätsgrade der Betrachtung (fundamentale Wechselwirkungen, Elementarteilchen, Atome, Moleküle, Makro- und Supramoleküle, Zellen, Organismen, Populationen) aufteilen lässt, wird in diesem Kontext besonders schlüssig (Bensaude-Vincent, 2016, S. 48). Die Präidee der Hierarchie der Wissenschaften bewegt sich parallel dazu: Entsprechend ihres jeweiligen epistemischen Zuständigkeitsbereiches ordnen sich die Disziplinen in einer vertikalen, scheinbar naturgegebenen Hierarchie an (Folkers, 2011). Das Phänomen der molekularen Selbstorganisation erweist sich in der Formulierung des zitierten Physikers Dr. Schoeck als paradigmatischer Fall für ein emergentes[9] System: Atome und Moleküle lagern sich unter der Einwirkung physikalischer Einflüsse von Zeit-, Ladungs- und Paritätsinvarianzen zu spezifischen Mustern ab bzw. lassen sich gar dahingehend steuern. Die Reduzierbarkeit molekularer Phänomene auf die fundamentalen Wechselwirkungen der Materie erweist sich zudem in kaum einem anderen Bereich als derart evident wie im Falle molekularer Selbstorganisation an Oberflächen: Gerade bei Nanopartikeln wird die Schnittstelle bzw. der Übergangsbereich zwischen klassischen und quantenmechanischen Gesetzen materiell erfahrbar (Urban, 2015, S. 253). Die implizit angenommene Hierarchie von fundamentalen Wechselwirkungen, Elementarteilchen, Atomen, Nanopartikeln, Molekülen und Oberflächen (und den entsprechenden wissenschaftlichen Disziplinen) wird darüber hinaus durch industrielle Innovationen im Bereich der MSE reproduziert und legitimiert (Bensaude-Vincent, 2007, S. 229):

---

9 Zu den Unterschieden und Gemeinsamkeiten von reduktions- und emergenztheoretischen Ansätzen siehe Abschnitt 6.2.

Die Nano- und Materialwissenschaften erwiesen sich als sehr anpassungsfähig gegenüber teilweise dramatisch ausfallenden Paradigmenwechseln in der US-amerikanischen wie europäischen Forschungsförderung des 20. Jahrhunderts. Obwohl das der Grundlagenforschung zugewandte Innovationsmodell des Kalten Krieges, das mit dem anwendungs- und relevanzorientierten Paradigma der 1960er und 1970er Jahre keinen schärferen Kontrast bilden könnte, gingen diese Forschungsbereiche keinesfalls mit dem entsprechenden Paradigmenwechsel unter (Mody und Choi, 2013, S. 125). Auch mit den neueren Innovationsdispositive im Sinne einer „*commercialized postmodern university*“, die sich vor allem durch einen unternehmerischen Innovationsgedanken auszeichnet, geraten die hybriden Forschungsbereiche nicht in Konflikt (ebd.). Der Chemiehistorikerin Bernadette Bensaude-Vincent zufolge fungiert insbesondere der vage und offene Material- bzw. Werkstoffbegriff als „*boundary category, which helps to create a community of practitioners*“, sodass in einem hybriden und heterogenen Forschungsfeld Kooperation ohne Konsens möglich ist (dies. 2011, S. 117). Der Erfolg der beiden hybriden Forschungsbereiche seit den 1990er Jahren ist darüber hinaus darauf zurückzuführen, dass die zugrundeliegenden Präideen mit den Innovationsdispositiven neoliberaler *Big Science*-Förderung übereinstimmen:

> There is a popular view of the sciences, according to which a hierarchy of material objects is mirrored by a hierarchy of the disciplines: the basic science (called physics) deals with the smallest objects, elementary particles or atoms, that are the building blocks of the objects of the next level, namely molecules which define the field of chemistry. Next comes biology that deals with living beings that are made up of molecules, and finally, if you wish, sociology. Not surprisingly, that originally pre-modern view found expression in the 19th century, when the rapid formation and differentiation of scientific disciplines broke up old dreams of the unity of science. No doubt, creating a new unity of the sciences by conceiving a division of labor according to the scale of their objects served as a sedative for those who wished to hold on to such unity (Schummer, 2004a, S. 15).

Die Innovationspolitik der *Converging Technologies*, die in den USA um die Jahrtausendwende ihren Anfang nahm, äußerte bezüglich einer multidisziplinären Zusammenarbeit (Konvergenz) von Nano-, Bio- und Informationstechnologie sowie Kognitionswissenschaften (NBIC) zweierlei positive Erwartungen: Zum einen würden diese ein ganzheitliches wissenschaftliches Verständnis komplexer Gegenstände wie etwa dem menschlichen Gehirn oder dem Klimawandel fördern und zum anderen Innovationen schaffen, die ebenso komplexe gesellschaftliche Bedarfslagen befriedigen würden (Bensaude-Vincent, 2016, S. 51f.). Zu letzterem zählen etwa energieeffiziente Hochleistungsmaterialien oder maßgeschneiderte Arzneistoffe für komplexe Krankheitsbilder wie etwa Morbus Alzheimer oder

Krebs (siehe Kapitel 4). Die Prämissen der NBIC-Programmatik beruhen dabei auf den Prämissen der Wissenschaftsphilosophie des Reduktionismus und der Einheitswissenschaft in der Spielart des Wiener Kreises (ebd.). Die Idee der Einheitswissenschaft basiert auf der Annahme einer Hierarchie der Wissenschaften, die in einem harmonischen, ganzheitlichen Erkenntnisprozess Wissen entlang von naturgegebenen Betrachtungsebenen austauschen. Diese Präideen galten in der Wissenschaftsphilosophie lange als überholt, erfuhren jedoch mit dem Aufkommen des NBIC-Paradigmas eine Renaissance (Schaper-Rinkel, 2007). Das Kernkonzept der verschiedenen Reduktions- bzw. Emergenzansätze – die Betrachtungsebene – erfuhr mit dem Siegeszug der *nano scale research* eine besondere Aufwertung.

Die mikroskopischen Welten der Nano- bzw. der supramolekularen Ebene wurden in einem sozio-technischen Netzwerk verschiedener Technologien, wissenschaftlicher Disziplinen, Institutionen, Publikationen, wissenschaftspolitischen Institutionen, etc. hervorgebracht. Als *boundary categories* ermöglichen diese Betrachtungsebenen nicht nur die Kooperationen unter heterogenen Akteur/innen, die ansonsten wenige Prämissen, epistemische Weltbilder und methodische Herangehensweisen teilen. Vielmehr werden diese neu hervorgebrachten epistemischen Räume dadurch aufrechterhalten, reifiziert und bestätigt. Die fortschreitende Etablierung eigenständiger Forschungsdisziplinen wie *Nano and Materials Sciences*, die aufgrund eigenständiger Methoden, Gegenstände, Theorien und Fragestellungen sich von ihren Mutterdisziplinen abgrenzen, wirkt sich zudem positiv auf die Festigung der Betrachtungsebene als erkenntnisleitende Präidee des NBIC-Paradigmas aus (Marcovich und Shinn, 2011). Die Präideen von Einheitswissenschaft und Hierarchie der Wissenschaften, wie sie mit den *Converging Technologies* wiederaufleben durften, privilegieren seit jeher die physikalischen Wissenschaften als Königsdisziplin, was sich auch in den Nano- und Materialwissenschaften am Fallbeispiel der Chiralität beobachten lässt.

Die Chiralität wird in den jüngeren Diskursen der Wissenschaftsphilosophie verstärkt als Phänomen gerahmt, das als Universalismus der Natur die Übersetzung zwischen ontologisch gefassten Betrachtungsebenen ermöglicht (vgl. Abschnitt 6.2). Die stereoselektive molekulare Selbstorganisation gilt neben anderen chiralen Gegenständen (chirale Nanopartikel) und Prozessen (enantioselektive Biokatalyse), die sich genuin auf der Nano- bzw. supramolekularen Ebene beobachten lassen, als eindrückliches Beispiel. Es lassen sich nämlich die Übergangszustände der Materie nachvollziehen, insbesondere zwischen subatomarer, atomarer und molekularer Betrachtungsebene. Die Möglichkeit einer direkten Rückführbarkeit makroskopischer Vorgänge der Materie auf die fundamentalen Gesetze und Kräfte der Physik entspricht der physikalistischen Ideenwelt der Reduktions- bzw. Emergenzparadigmata, die den Traum der Einheit der Wis-

senschaft und einer sog. Entschlüsselung des Buches der Natur noch nicht aufgegeben haben. Die Chiralität erfährt jedenfalls in diesem Zusammenhang eine erhebliche Verschiebung ihrer Bedeutungszusammenhänge und epistemischen Bezugnahmen. Das ehemals genuin organisch-chemische Konzept wird zunehmend von den physikalischen Wissenschaften vereinnahmt und in seinen epistemischen wie ontischen Bezügen ausgeweitet. Im folgenden Abschnitt werden die Reaktionen aus den Feldern der Chemie auf diese Sachverhalte geschildert.

3.3 Chiralität im *„strengen Sinne“*

Für viele Chemiker/innen, die in den Feldern der Material-, Nano- und Oberflächenforschung beschäftigt sind, gehören ein regelmäßiger Austausch und Projektkooperationen mit Physiker/innen zum Alltag. Die verschiedenen chemischen wie physikalischen Fachbereiche erweisen sich als derart amalgamiert, dass kaum eine klare Distinktion mehr möglich ist, *„wo die Chemie aufhört und die Physik bereits anfängt“*. Diese und andere alltägliche Formulierungen wie *„wir machen hier eigentlich schon Physik“* werden in den beobachteten Feldern der anorganisch-chemischen Materialforschung und den entsprechenden Interviews häufig geäußert. Die Nähe und Überschneidung zwischen chemischen und physikalischen Gegenstandsbereichen sorgt aus diesem Grund für eine ambivalente Semantik. Einerseits, so zeigt sich, neigen Chemiker/innen zu einer Adaption physikalischer Zugriffe auf die supramolekulare Welt. Nicht nur physikalische Gerätschaften wie das Rastertunnelmikroskop und quantenphysikalische Erklärungen der molekularen Prozesse, sondern auch der in Abschnitt 6.2 ausgeführte Schilderungsduktus zur Chiralität wird als Universalismus übernommen. Demnach wird die Chiralität ähnlich wie in den entsprechenden Diskursen des neueren Emergenzparadigmas als rarer Universalismus der Natur kommuniziert, bei dem sich Kräfte- und Teilchendynamiken sowie anorganische wie organische molekulare Strukturen, die molekularen Bausteine des Lebens und komplexe makroskopische Systeme wie Organismen, Gehirne und Sozialverhalten positiv zu einer einheitlichen Wirklichkeit der Natur aufschichten.

Chemiker/innen in diesen hybriden Feldern übernehmen diese Narrative, Epistemiken, Weltbilder, Präideen und richten auch ihr wissenschaftliches Handeln danach aus. Die Reduzierbarkeitsthese chemischer auf physikalische Theorien und Gesetze löst keinesfalls Unbehagen aus, sondern wird vielmehr als Legitimationsquelle für die eigene hochstehende Position im hierarchischen Gefüge der Naturwissenschaften angeführt. Auf der anderen Seite sind Chemiker/innen sich des wachsenden Einflusses physikalischer Zugriffe auf die chemische Fachsprache, Methoden und Gegenstände bewusst, was zu Identitätskonflikten und Abgrenzungsbestrebungen führt. Im Alltag äußern entsprechende

Akteur/innen, dass in den letzten Jahren die Experimentalphysik sich vermehrt den Molekülen annimmt und sich die molekulare Welt – etwa das Konzept der Chiralität – aneignet, mit physikalischen Konzeptionen überformt und von ihrem chemischen Ursprung entfremdet. Die Abwehr *falscher* Konzeptionen der molekularen Welt und der Chiralität im Speziellen zeigt sich etwa in den häufigen Historisierungen dieser Phänomenbereiche. So bemühen sich Chemiker/innen darum, zu betonen, dass bestimmte Gegenstände von Chemiker/innen entdeckt wurden, die damit einen enormen Beitrag zum menschlichen Fortschritt geleistet haben. Dieser Schilderungsduktus verhandelt implizit wie explizit, dass die Errungenschaften der Chemie gegenwärtig von Physiker/innen angeeignet und damit unsichtbar gemacht werden. Diese Narrative der Grenzarbeit seien in der Folge wiedergegeben.

> *Chemieprofessorin Pejačević: Ich bin mehrheitlich fast GRENZgänger, also ich hab in meiner Ausbildung auf dem Papier, in meiner venia legendi die Habilitation in anorganischer Chemie erhalten. Aber es ist dann mehr Materialwissenschaften geworden. Ich war 'ne Zeit lang SEHR STARK ausgerichtet auf NANO als ich so am Anfang meiner eigenen Karriere stand und dann hat sich's mehr und mehr hinentwickelt zu [Katalyseforschung]. Und das ist natürlich ein umbrella, der auch nicht nur klassische Anorganik oder klassische Nano oder Materialforschung, sondern eigentlich ALLE Bereiche molekularer und auch [lacht] der Nanochemie war.*

Wie bereits im ersten Abschnitt dieses Kapitels ausführlich dargelegt wurde, sind die wissenschaftlichen Disziplinen von Chemie und Physik seit den 1980er Jahren im Bereich der Materialwissenschaften sowie der Nano- und Oberflächenforschung verstärkt zusammengewachsen, was sich auch in der Fachidentität der beteiligten Akteur/innen niederschlägt. Während bis dahin physikalische wie chemische Zugriffe auf das Material sich erheblich voneinander unterschieden hatten, bilden sie mittlerweile einen hybriden disziplinären Bereich, in dem Grenzziehungen kaum noch intelligibel und praktikabel sind (Bensaude-Vincent, 2016). Seit dem 18. Jahrhundert etablierte sich die Chemie beinahe exklusiv als *die* rationale Wissenschaft von den Materialien, was sich in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts änderte, als im Zuge des Kalten Krieges die physikalischen Wissenschaften ergiebige Anwendungsgebiete insbesondere mit dem Aufkommen der Computertechnik- und Raumfahrtindustrie erschließen konnten (Hentschel, 2011). Insbesondere in den USA avancierte die Chemie zur Hilfswissenschaft der physikalischen Leitdisziplin, was allerdings in der Wahrnehmung der in der Materialforschung beschäftigten Chemiker/innen keinesfalls negativ bewertet wird. Demnach profitierte die Chemie explizit von der Amalgamierung mit der Physik, insbesondere durch die Adaption dezidiert physikalischer Methoden wie der in Abschnitt 6.1 vorgestellten Rastertunnelmikroskopie. Ohne diese wäre chemisches

Wahrnehmen und Forschen in der nanoskopischen und supramolekularen Welt von Materialien, Oberflächen und Partikeln nicht möglich.

Auch von den Innovationsdispositiven des NBIC-Paradigmas wussten Chemiker/innen zu profitieren, indem sie den Forderungen nach Interdisziplinarität, Großprojektforschung, Industrienähe und gesellschaftlicher Relevanz ihrer Forschung entsprechend die Zusammenarbeit mit Physiker/innen (sowie Biolog/innen und Vertreter/innen der verschiedenen Ingenieurswissenschaften) in diesem Bereich suchten (Urban, 2015, S. 265f.). Im Zuge dessen zeigt sich, dass auch das grundlegende Verständnis des Molekularen und seiner zentralen Konzepte unter Chemiker/innen in diesen Bereichen ein anderes geworden ist. Als besonders eindrückliches Beispiel hierfür dient die Beobachtung, dass insbesondere im Bereich der Nanoforschung das mentale Modell der Chemiker/innen vom dreidimensionalen Modell wieder abrückt und auf ein 2D-Modell zurückkehrt (Atkins, 2015, S. 90). Während in der Historiografie der Chemie die Erschließung der räumlichen molekularen Struktur zu den Sternstunden der Disziplin zählt (vgl. Abschnitt 2.1), scheint diese in den gegenwärtigen Grenzbereichen der Chemie wieder rückgängig gemacht zu werden. „*Chemistry's migration from three to two dimensions*“, die jüngst beobachtet wird, wird in den Zusammenhang mit der Entdeckung des Graphens gesetzt (ebd.).[10] Graphen bildet die Ausgangsstruktur für weitere vielversprechende Materialstrukturen wie Fullerene und Kohlenstoffnanoröhren, die sich wiederum vielfältig in der Produktentwicklung und -optimierung einsetzen lassen (Bensaude-Vincent, 2007).

Die Renaissance der zweidimensionalen Betrachtung materieller Mikrostrukturen steht dabei in Zusammenhang mit dem Fokus auf die Oberfläche von Materialien, die, wie bereits angeführt, in den Materialwissenschaften besondere Aufmerksamkeit genießt. Da die meisten chemischen wie physikalischen Prozesse (wie etwa die Katalyse) an der Oberfläche von Stoffen stattfindet, setzte sich analog zur betrachteten Fläche ein planares mentales Modell dieser Prozesse durch (Segal, 2017, S. 2). Auch die Chiralität – entweder als Eigenschaft von molekularen Gebilden selbst oder im Kontext von enantioselektiven Absorptions- oder Katalyseprozessen an Oberflächen (Barron, 2009) – verliert dabei sukzessive ihren exklusiv dreidimensionalen Charakter, ohne den sie bislang kaum intelligibel erschien. Vielmehr etabliert sich in den Nano- und Oberflächenwissenschaften an

10 Beim Graphen handelt es sich um ein besonders vielversprechendes, da außerordentlich stabiles Material, das über besondere Eigenschaften verfügt und zahlreiche technische Innovationen verspricht. Strukturell gesprochen handelt es sich um eine Modifikation des Kohlenstoffs, bei dem sich C-Atome in zweidimensionalen Bienenwaben- bzw. Hühnerdrahtmustern anordnen (Loeve und Bensaude-Vincent, 2017). Diese zeichnen sich durch eine sechseckige Struktur aus, ähnlich wie der aus Abschnitt 2.1 bekannte Benzolring, allerdings in 2D.

den hybriden Grenzen von chemischen und physikalischen Zugriffen auf die mikroskopische Welt ein Konzept der planaren Chiralität, was durchaus umstritten ist:

> Unfortunately, with chirality becoming part of surface science the term „2D chirality" is often used nowadays. Planar molecules aligned into the plane (i.e., 2D confinement) by a surface or a physical field still suffer a polarization of their electron cloud perpendicular to that plane, giving it an up and a down; so it is a truly three-dimensional (3D) object. It goes without saying that when surface atoms are also taken into account, i.e., when the adsorbate as a whole is considered (as it always should), we deal with a 3D chiral entity. Although scholarly discussions on chirality in different dimensions can be quite useful, 2D chirality remains a purely theoretical construct. For real experimental systems, this term is inappropriate and misleading (Ernst, 2012, S. 261).

Die Auseinandersetzungen mit den konzeptionellen Aneignungen seitens der Physik zeigen darüber hinaus, dass die Grenzarbeit der chemischen Felder nicht nur gegen außen erfolgt, sondern auch unter den chemischen Subdisziplinen selbst. Am Beispiel der Nano- und Oberflächenforschung zeigt sich, dass Chemiker/innen, die in diesen hybriden Bereichen beschäftigt sind, eine deutlich größere Nähe zu den physikalischen Theorien, Methoden und *styles of reasoning*[11] kommunizieren als etwa zu den Feldern der organischen Chemie und Biochemie. Im Bereich Nano- und Materialwissenschaften bewegen sich die Vertreter/innen der Chemie mit ihren Aktivitäten überwiegend in der physikalischen Chemie sowie Elektrochemie, Kristallografie und technischen Werkstoffkunde und stehen inhaltlich wie methodisch in einer deutlich engeren Beziehung zu den physikalischen Feldern als zu denjenigen der klassischen organischen Synthesechemie. Sie sind überwiegend in der anorganischen Chemie sozialisiert und/oder spezialisiert und markieren eine Grenze zur organischen Chemie anhand der strikten Distinktion *„we do solid state chemistry, we don't deal with molecules"*, wie es eine Dokto-

11 Das analytische Konzept der *styles of reasoning* (Hacking, 1992) orientiert sich an Ludwik Flecks Theorie der Denkstile und Denkkollektive (Fleck, 2012) und findet vor allem in wissenschaftshistorischen und -philosophischen Kontexten Anwendung. *Styles of reasoning* beziehen sich auf den intellektuellen Prozess der wissenschaftlichen Generierung von Evidenz, der nicht etwa als rein objektiven, singulären Heureka-Moment verstanden wird, sondern als Ergebnis interferierender kollektiver Auseinandersetzungen mit einen Gegenstand. Demnach treten die Stile aufgrund unterschiedlicher Präideen, soziotechnischen Settings, Modi der wissenschaftlichen Sozialisation und fachkulturellen Bedingungen stets in einer Pluralität auf, was zu einer *disunity of science* und Inkommensurabilitäten zwischen den Träger/innen der wissenschaftlichen Stile führt (Hacking, 1985).

randin in einem ero-epischen Gespräch[12] über ihr Forschungsprojekt im Bereich der Katalyseforschung ausdrückt.

> *Prof. Wolf-Ferrari: Manche Wissenschaften sind wie das SCHACHspiel. Da gibt's kein großes Problem, das Problem ist ja, dass man den König schlägt. Das ist kein großes Problem aber auf dieses Alltagsproblem gibt es im Schachspiel große ANTWORTEN! Und auch in der CHEMIE – also der organischen Chemie oder so – gibt es keine großen Probleme. Aber es gibt große Antworten. Dann gibt es aber Probleme in anderen Disziplinen, in denen gibt es eben auch GROSSE Fragen. (1) Früher hat man in der Physik zum Beispiel gesagt „was sind die elementarsten Einheiten, die es gibt?“*

Die Nähe zur Physik wird darüber hinaus strategisch in der inner-chemischen Grenzarbeit genutzt, um ein hierarchisches Verhältnis zwischen *härteren* und *weicheren* chemischen Fachbereichen zu konstitutieren. Die implizite, normative Vorstellung einer Hierarchie der Naturwissenschaften, die sich bezüglich ihrer Objektivität, Härte und Reinheit der Erkenntnis anordnen lassen (Stengers, 2010c), ist in den laufenden Bemühungen, sich im im Gefüge der Naturwissenschaften zu positionieren, omnipräsent. Dies zeigt sich etwa in Laborsituationen, in denen Vertreter/innen der anorganischen Chemie hervorheben, dass sie dieselben analytischen Geräte und Messmethoden verwenden *„wie die Physiker“*, die zudem in der Anschaffung deutlich kostspieliger sind als die Laborausstattung der organischen Chemie. Wie in Abschnitt 2.3 deutlich wurde, gilt die Mittelakquise für kostenintensive Geräte als wichtige Kapitalie im Feld der Chemie und als Karrieretreiber. Darüber hinaus werden die in ihrer Materialität reduzierten, unscheinbaren, sauberen und geruchlosen Methoden der anorganischen bzw. physikalischen Chemie denjenigen der organischen Chemie gegenüber als überlegen inszeniert. Die Methoden der *wet chemistry* gelten als komplex, zufällig, wenig kontrollierbar und viel zu sehr vom Geschick des/der ausführenden Chemikers/in anhängig. Im Gegensatz dazu erzeugen Geräte wie das Rastertunnelmikroskop oder das Röntgendiffraktometer eindeutigere Ergebnisse, die sich zudem direkt aus den zugrundeliegenden quantenphysikalischen Dynamiken und Gesetzmäßigkeiten der Materie ergeben.

Die Grenzgänge von Chemiker/innen, die sich in den Material- und Nanowissenschaften betätigen und über entsprechende Anbindungen an physikalische wie Lebenswissenschaften verfügen, finden nachhaltigen Niederschlag in den basalen

12 Das ero-epische Gespräch bezeichnet in der ethnografischen Feldforschung eine Erhebungsmethode qualitativer Daten. Diese besonders offen gehaltene Form des Interviews kommt i.d.R. ohne Mitschnitt aus und setzt auf eine ungezwungene, spontane und offene Gesprächsführung. Die Interviewsituation ergibt sich *ad hoc* aus einer Beobachtungssituation und die Fragen entstehen induktiv aus der jeweiligen Situation heraus, sodass auf einen Interviewleitfaden verzichtet werden kann (Girtler, 2001, S. 160).

Konzeptionen der molekularen Welt – und namentlich der Chiralität. So fällt auf, dass entsprechende Chemiker/innen in der Interviewstudie einen deutlich weiter gefassten Chiralitätsbegriff vertreten als vergleichbare Kolleg/innen in anderen chemischen und außer-chemischen Bereichen. Die epistemischen wie ontischen Bezüge gehen weit über die Konzeption der organischen Molekülstruktur hinaus und werden in einen Schilderungsduktus eingereiht, der die Universalität der Rechts-Links-Asymmetrie in der Natur betont (vgl. Abschnitt 6.2). Physikalische, kristallografische, anorganisch-chemische und auch biochemische Bezüge werden gleichwertig behandelt und stehen für die Einheit der Natur, die sich in makroskopischen Objekten wie auch auf allen anderen Ebenen als asymmetrisch erweist und chirale Phänomene hervorbringt. Das Weltbild von einer objektiv gegebenen Realität, die sich in emergente Systeme und Betrachtungsebenen aufschichtet und die Präidee der Einheitswissenschaft sind auch unter Chemiker/innen in den Feldern der Nano-, Material- und Oberflächenforschung omnipräsent. Es wird dabei deutlich, wie sehr Emergenz- und Reduktionstheorien auch den chemischen Erkenntnisprozess leiten, denn sie bieten in einem heterogenen, ausdifferenzierten und hybriden Bereich ein gewisses Maß an Orientierung: So wird in den Schilderungen der Befragten stets danach unterschieden, in welchem Bereich bzw. welcher Größenordnung und Auflösung der Natur man sich gerade bewegt und auch die eigene, alltägliche Auseinandersetzung mit der Chiralität wird innerhalb dieser eingeordnet.

Aus der Nähe zur Physik ergeben sich für die chemischen Bereiche der Materialwissenschaften nicht nur Erfolge im Einwerben von Ressourcen und eine prestigeträchtige Position im hierarchisch imaginierten Gefüge der Naturwissenschaften. Einige Chemiker/innen nehmen im Alltag eine zunehmende Aneignung und Umdeutung etablierter chemischer Gegenstände und Konzeptionen durch die physikalischen Wissenschaften wahr. Die Überschneidungen mit den physikalischen Feldern werden dabei durchaus ambivalent verhandelt: Auf der einen Seite bieten diese erhöhte Chancen auf Teilhabe an ressourcenintensiven *Big Science*-Projekten, andererseits erkennen Chemiker/innen auch, dass sie längst nicht mehr über ein Monopol in der Erforschung der molekularen Welt verfügen. Mit dem Aufkommen verschiedener mikroskopischer Betrachtungsebenen der Natur im Zuge der Physikalierung der MSE verlor die Heuristik der dreidimensionalen molekularen Struktur gegenüber zweidimensionalen Oberflächenmodellen sowie nano- und supramolekularen Zugriffen auf die Materie sukzessive an Bedeutung. Dies drückt sich u.a. in der Ausweitung der Bedeutung basaler molekularer Konzepte wie etwa der Chiralität aus, von der sich Chemiker/innen in einer Distinktion *echter* wie *falscher* Chiralität wie folgt abgrenzen:

> *Prof. Borodin: Die Chiralität hat sich jetzt in den Materialwissenschaften [durchgesetzt], bei den Physikern, bei Magnetleuten oder so, die benutzen das auch. Aber es*

gibt eine strikte Definition, wenn man so will. Von den Chemikern sag ich jetzt mal und die anderen Leute, die das benutzen, die scheren sich einen Dreck drum. Und benützen des einfach für allerlei Sachen, die SCHEINBAR spiegelsymmetrisch sind (2) oder die Spiegelsymmetrie brechen. Als Beispiel seh ich immer Magnetismus: Das sind ja bewegte Teilchen ein Elektron. Es gibt aber 'ne Definition die sagt wenn ich das gleiche erreichen kann durch Zeitumkehr dann ist es also das Spiegelbild dann ist es KEINE Chiralität und das ist genau beim Magnetismus der Fall wenn ich jetzt die die Bewegungsrichtung UMDREHE, also 'n Elektron hat ja 'n Spin das macht ja so [gestikuliert eine Rotationsbewegung]. Und wenn ich sage „jetzt dreh ich das rückwärts um und dann erreiche ich das gleiche Spiegelbild“ dann ist das NICHT Chiralität! Das ist 'ne Definitionsfrage das kann jeder halten wie er will aber (1) aber wenn man die Definition ERNST nimmt, (1) dürfte man magnetische Systeme so nicht bezeichnen aber heutzutage schert sich keiner mehr um Regeln.

In der Rückaneignung und Verteidigung der Chiralität als genuin chemische Eigenschaft bedienen sich Chemiker/innen der Strategie der Historisierung. Mit dem Verweis auf die Geschichte der Chiralität und die zentralen Meilensteine ihrer Entdeckung wird dabei die Bedeutung der (organischen) Chemie hervorgehoben, allen voran im Namen der Pioniere des Feldes wie Louis Pasteur, Joseph Achille Le Bel und Jacobus Henricus Van 't Hoff, die sich insbesondere um die Stereochemie verdient gemacht hatten. Frühe optische wie kristallografische Beiträge zur theoretischen wie empirischen Begründung der Chiralitätsforschung, die eher der Physik zuzurechnen sind, werden dabei allerdings ebenfalls gewürdigt. Die Geschichte der Chiralität wäre zudem auch nicht ohne die Erkenntnisse der Teilchenphysik zu den fundamentalen Asymmetrieverhältnissen der Materie denkbar:

Prof. Borodin: [Der Begriff der Chiralität] wurde in den Naturwissenschaft eingeführt durch Lord Kelvin […] [um] 1890, ein gebildeter Physiker, DER das eingeführt hat eben für die Händigkeit in Materialien oder in Kristallen oder in Molekülen. […] Der Begriff wurde aber nicht benutzt! Die Chemiker hatten damals weiterhin von Pasteur's Dissymmetrie gesprochen. Irgendwann in den sechziger Jahren hatte man in der Kernphysik die Paritätsverletzung entdeckt und DORT (.) wurde wiederholt von jemandem vorgeschlagen, man sollte das auch richtig BENENNEN. Man hat dann Werbung für das Wort Chiralität gemacht, das DANN in den sechziger Jahren wenige berühmte Chemiker aufgegriffen haben und dann hat sich das so langsam durchgesetzt in der Chemie. (3) Dann war's eigentlich nur in der Kernphysik und in der Chemie gebraucht worden (2) und hat sich jetzt in den Materialwissenschaften [durchgesetzt], bei den Physikern, bei Magnetleuten oder so, die benutzen das auch. Aber es gibt eine strikte Definition, wenn man so will. Von den Chemikern sag ich jetzt mal und die anderen Leute, die das benutzen, die scheren sich einen Dreck drum.

Wie diese historisierende Schilderung deutlich macht, besteht im Bewusstsein über die Geschichte des eigenen Faches ein gefestigtes Narrativ zur Geschichte der Chiralität, in dem Physiker/innen sowie Vertreter/innen der organischen Chemie und Kristallografie einen gleichberechtigten Platz einnehmen. (Quanten-)Physikalische wie organisch-chemische Zugänge zur Chiralität werden dabei in der historisierenden Reflexion in einem harmonischen und produktiven Verhältnis geschildert, das allerdings in den 1980er Jahren erodierte, als eine experimentalphysikalische und ingenieurswissenschaftliche Aneigung des Chiralitätskonzepts stattfand und der Bedeutungshorizont der Chiralität eine Entgrenzung erfuhr. In der Aushandlung und Distinktion zwischen Chiralitätsdefinitionen *„im strengen Sinne"* bzw. *„in ihrer ursprünglichen Bedeutung"*, wird versucht, die Chiralität als chemische Eigenschaft (wenn auch mit Anbindungen an physikalische Phänomene) zurückzuerobern. An dieser Stelle wird deutlich, dass diese Auseinandersetzungen mit der Rückaneignung bzw. Verteidigung basaler chemischer Konzeptionen und Begrifflichkeiten nicht nur um ihrer selbst Willen geführt werden. Vielmehr sind mit dem Besetzen von Begriffen wissenschaftliche Ressourcenfragen verbunden, was insbesondere dadurch deutlich wird, dass Chemiker/innen in diesem Zusammenhang die wirtschaftliche Bedeutung ihrer Entdeckungen und Erfindungen für das Wohl der Gesellschaft betonen. Auch dies erfolgt in einem historisierenden Duktus, wie etwa in folgender Beispielerzählung zur Bedeutung der Katalyseforschung:

> *Prof. Borodin: [Ich halte derzeit eine] Oberflächenvorlesung [zur Chiralität], bei der kommt die [chirale] Anordnung der Moleküle vor, wie sich Kristalle bilden, wie an ihren Oberflächen Prozesse ablaufen, Biomoleküle oder KLEINE Moleküle – wichtig ist Katalyse! Die Abgasreinigung vom Automobil zum Beispiel ist eine chemische Reaktion, die an einer Oberfläche – Platin, Eisen oder sowas – abläuft, die man aber nicht VERSTEHT! Das heißt, Forschung ist nach wie vor dringend notwendig, obwohl über zwanzig Prozent unseres Bruttosozialproduktes auf der Welt durch ReakTIONEN an Oberflächen zustandekommt, wissen wir wenig darüber. Die Menschheit wäre heute nicht [da], wo sie ist wenn nicht Haber und Bosch die Ammoniaksynthese erfunden hätten – die Aufspaltung von Stickstoff in DÜNGER wenn man so will. Ja, […] das hat nen RIESIGEN Fortschritt der Menschheit gebracht. Das wird heute immer unterSCHÄTZT.*

Der zitierte Vertreter der Katalyseforschung und Oberflächenchemie betont den kreativen, schöpferischen Aspekt chemischen Schaffens, dessen Entdeckungen in nützliche Anwendungen münden. Er setzt die Bemühungen der gegenwärtigen Katalyseforschung in eine genealogische Linie mit Fritz Haber und Carl Bosch, die mit der Ammoniaksynthese einen besonders gewichtigen Beitrag im Namen dieses Kollektivs leisteten. Die industriell wie wissenschaftlich tätigen Chemieingenieur/innen werden in diesem Duktus in den Dienst ganzer Nationen gestellt,

indem deren Bedeutung für Wirtschaftswachstum, Wohlstand und Fortschritt betont werden. Allerdings bestehe eine erhebliche Diskrepanz zwischen ökonomischer Bedeutung der Chemie und ihrer gesellschaftlichen Wahrnehmung und Würdigung: Auch wenn Physiker/innen und Optiker/innen als Hilfe für die Chemiker/innen bei der Entdeckung der Chiralität und den Erkenntnissen und Anwendungen eine nicht unerhebliche Rolle spielen, werden im öffentlichen Interesse an den Naturwissenschaften die Beiträge der Physik ungleich stärker rezipiert und gewürdigt als diejenigen der Chemie. Sowie das Haber-Bosch-Verfahren als auch die Entdeckung der Chiralität werden dabei gleichermaßen in einem Narrativ der Verkanntheit verhandelt, das sich an der mangelnden Kenntnisnahme und Würdigung chemischer Erkenntnisse durch die Gesellschaft ausdrückt.

Darüber hinaus zeigt die Interviewstudie, dass die Stärkung des öffentlichen Bewusstseins für die Chemie insbesondere solchen Vertreter/innen der Chemie am Herzen liegt, die in hybriden Grenzbereichen mit der Physik beschäftigt sind. Das zeigt sich etwa in einem verstärkten *interessement*, sprich bei der Generierung von wissenschaftlichen Ressourcen wie Forschungsgelder, Räumlichkeiten und Nachwuchs strategisch auf die Aufmerksamkeit einer interessierten Öffentlichkeit zu fokussieren (Callon, 1999, S. 92). Die interviewten Vertreter/innen der entsprechenden Felder zeigen sich im Alltag darum bemüht, die Inhalte der Chemie zu popularisieren. So engagieren sich Interview-Partner/innen wie Prof. Borodin und Prof. Pejačević regelmäßig an Veranstaltungen von Wissenschaftsmuseen, Tagen der offenen Tür, halten populärwissenschaftliche Vorträge oder nutzen Onlineformate zur Popularisierung chemischer Themen und Belange. Die Chiralität ist dabei ein beliebter Anker in der Chemiekommunikation, insbesondere dadurch, dass sie sich als Universalismus der Natur rahmen lässt und Anknüpfungspunkt an andere wissenschaftliche Disziplinen und Alltagsbeispiele bietet. Die Chiralität wird dabei als genuin chemisches Konzept verhandelt, das die Bedeutung chemischen Wissens in der Gesellschaft hervorheben soll.

Im hybriden Bereich der Nano-, Material- und Oberflächenforschung fällt auf, wie stark chemisches und physikalisches Wissen, Handeln und *styles of reasoning* neben ingenieurswissenschaftlichen Wissensformen miteinander verwoben sind und kaum von einander getrennt betrachtet werden können. In diesem hybriden Bereich lassen sich die Grenzziehungsdynamiken von physikalischen wie chemischen Konzeptionen der molekularen Welt untersuchen. Dabei werden physikalische Konzeptionen zunehmend dominant und verdrängen die chemischen. Vor dem Hintergrund der Innovationsdispositive des NBIC-Paradigmas erfahren etablierte chemische Grundbegriffe wie die Chiralität in anwendungsorientierten Kontexten eine Umdeutung bzw. Begriffsverschiebung. Dabei zeigt sich, wie chemische Eigenschaften der mikroskopischen Struktur gegenüber als physikalisch begriffenen Aspekten wie Eigenschaften und Funktionen von Materialien verdrängt werden. Darüber hinaus zeigt sich, dass Vertreter/innen der Physik

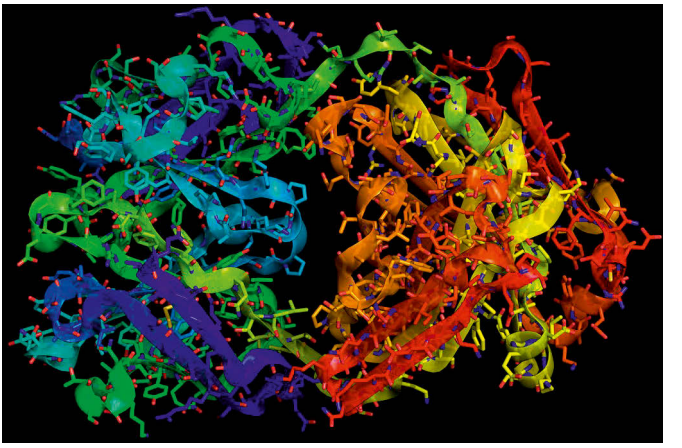
sich den Begriff der Chiralität aneignen und auf Phänomene beziehen, die sich der Definition im *„strengen Sinne"* entziehen. Auf diesem Wege verliert die Chemie epistemische Macht über ein traditionelles Anwendungsgebiet, aus dem sich bislang ein großer Teil der Forschungsinvestitionen und Ressourcen der Disziplin speisten. Ähnliches lässt sich in Feldern wie pharmazeutischen und biomedizinischen Anwendungsgebieten beobachten, in denen biowissenschaftliche Konzepte des Molekularen die klassische organischen Synthesechemie verdrängen und als nicht mehr zeitgemäß erscheinen lassen.

4 Vom kleinen zum großen Molekül: Zugänge zur Chiralität in der pharmazeutischen Industrie

Erforschung, Entwicklung, Zulassung, Vermarktung, Kommunikation und Regulierung von industriell hergestellten pharmazeutischen Fertigarzneimitteln durchliefen seit den 1990er Jahren einen grundlegenden Wandel (Griesar und Thomas, 2017). Mit der sog. *Biotech Revolution* infolge des *Human Genome Projects* (HGP) und der vollständigen Sequenzierung des menschlichen Genoms versprachen sich weite Interessenskreise einen bahnbrechenden Fortschritt im molekularbiologischen Wissen über den menschlichen Körper sowie dessen Erkrankungen und Heilung (Nightingale und Martin, 2004). Durch die neuen verfügbaren Verfahren des *bio-engineering* hergestellte *biologics* bzw. Biologika wurden auch von der pharmazeutischen Industrie als vielversprechende Innovationen aufgegriffen und in die vielschichtigen Prozesse des *research & development* (R&D) integriert, was mit völlig neuen Modellvorstellungen und Ästhetiken des Molekularen einherging (Mittra, 2016a).

Als Reaktion auf die sog. Innovationskrise der pharmazeutischen Industrie in den frühen 1990er Jahren, folgte mit der Erforschung und Entwicklung neuartiger, komplexer biotechnologischer Therapeutika ein Paradigmenwechsel, der in diesem Kapitel mit der Transition vom kleinen zum großen Molekül umschrieben wird (Griesar, 2004a). Damit wird derjenige Trend beschrieben, nachdem neben klassischen chemischen Wirkstoffen, die i.d.R. auf Wirkstoffmolekülen mit geringer molekularer Masse beruhen, zunehmend komplexe Proteinmoleküle aus über 1000 Aminosäuren den Markt erobern (Mittra, 2016b). Diese werden nicht mehr als Wirkstoffpräparate mit den Methoden der organischen Chemie synthetisiert und industriell (massenhaft) in Tablettenform hergestellt, sondern als Injektionslösungen, die auf spezifische Patient/innen-Gruppen maßgeschneidert hergestellt sind. Sie werden in Mikroorganismen und Zellmodellen erzeugt und die Herstellung dieser großen Biomoleküle ist deutlich teurer als diejenige der kleinen, chemischen Moleküle (Schüler, 2015, S. 15ff.).

Mit der postulierten Transition vom kleinen zum großen Molekül ist allerdings keinesfalls gemeint, dass die Forschung an kleinen Molekülen obsolet geworden wäre. Der Wirkstoffsuche im *small molecule*-Bereich wird nach wie vor



Als Beispiel für ein sog. großes Molekül sei an dieser Stelle der monoklonale Antikörper Trastuzumab, ein biotechnologisches Krebsmedikament mit dem Handelsnamen Herceptin (Firma Roche) angeführt. Bei einer Summenformel von $C_{6470}H_{10012}N_{1726}O_{2013}S_{42}$ und einer molekularen Masse von ca. 146 k. Da ist die schematische Darstellung mit der klassischen Modellsprache der molekularen Struktur nicht mehr möglich. Für große Biomoleküle hat sich eine eigene Ästhetik des Modells etabliert, bei der makroskopische Strukturen als gebündelte, in ihrer Komplexität reduzierte Spiralen und Schlaufen dargestellt werden. Abbildung erstellt durch Andrew Ryzhkov mithilfe der PyMol-Software, creative commons-Lizenz CC-BY-SA-3.0.

viel Raum gewährt, zumal die Verfahren heutzutage durch die computergestützte Automatisierung als deutlich optimiert gelten (Barry, 2015). Gemeint ist mit der Transition vielmehr ein genereller Kulturwandel, der in der pharmazeutischen Produktentwicklung stattgefunden hat. Wie in der Folge ausführlich diskutiert wird, zeigt sich dieser Kulturwandel in mehreren, ineinander verwobenen Bereichen. Zunächst ist auf der Ebene der Organisationsstrukturen die Abspaltung der multinationalen chemischen von der pharmazeutischen Industrie zu nennen (Griesar, 2004a, S. 274). In einer Phase zahlreicher Fusionen, Abspaltungen, Neugründungen und Auslagerungen von Konzernen und ihrer Produktionssparten der 1990er Jahre – auch als *merger mania* bezeichnet – näherte sich die pharmazeutische Großindustrie der Biotechnologie und der Agrarindustrie an, während beinahe alle Großkonzerne ihre Verbindungen zu den Industriebereichen der Petrochemie, Basischemikalien und Polymer-Chemie fast vollständig lösten (ebd., S. 273).

Der narrative Fokus auf globale Versprechen wie Nahrungsmittel- und Gesundheitsversorgungen wurde in der Folge verstärkt an die biotechnologische

Ausrichtung geknüpft, während die chemische Seite aus den kommunikativen Strategien der Pharmaindustrie verschwand (Bieberbach, 2004, S. 240). Darüber hinaus unterliefen die Innovationsdispositive mit der Transition vom kleinen zum großen Molekül einen entscheidenden Wandel: Inter- und Transdisziplinarität, kritisches Denken und Translation wurden zum Gebot der Stunde erhoben und die Unternehmensstruktur implementiert (Mittra, 2016c, S. 90f.). Diese zentralen Aspekte der neuen, in der Folge der biotechnologischen Revolution in der pharmazeutischen Industrie dominant gewordenen Innovationsdispositive, basieren auf einer spezifischen narrativen Abgrenzungsfolie: der klassischen organischen Synthesechemie (Briken und Kurz, 2010, S. 119).

Wie insbesondere die qualitative Interviewstudie mit Akteur/innen den Feldes zeigt, wird der organischen Synthesechemie in diesem Kontext unterstellt, konservativ und innovationsfeindlich zu sein und sie dient dem neuen biotechnologischen Innovationsdispositiv als Abgrenzungsfolie, die auch in den Bemühungen um eine verbesserte Wahrnehmung seitens kritischer Öffentlichkeiten und politischer Agenden ins Feld geführt wird. Die Verheerungen an Mensch und Umwelt seitens der pharmazeutisch-chemischen Industrie können so auf ein externalisiertes Feld verlagert werden, indem die Narrative der gesellschaftlichen Chemophobie bedient werden (Schummer, 2017b). Der pharmazeutischen Industrie gelingt es, durch den Fokus auf die allgemein positive Konnotation der Bio-Vorsilbe und demjenigen auf biologische Wirkstoffe in der Kommunikationsstrategie, ihr Bild in der Öffentlichkeit zu positivieren (ebd.). Die Abgrenzung von der verkrusteten bzw. eingerosteten Forschung und Entwicklung (F&E) und als wenig innovativ gebrandmarkten *small molecule*-Forschung erfolgt darüber hinaus über Arzneimittelzulassung, -regulierung, -vermarktung und -monitoring zumal die Entwicklung von hochmolekularen Biologika sowohl Rechtssprechung als auch die Gesundheitsbehörden vor enorme Herausforderungen stellen, ihre etablierten Prozesse auf diese Stoffe und ihre komplexe Wirkungsweise anzupassen (Mittra, 2016a, S. 44).

Vertreter/innen der *Science and Technology Studies* haben sich in der Vergangenheit intensiv mit der *Biotech Revolution*[1] im pharmazeutischen *R&D* beschäftigt und es wurde ein erheblicher Teil des Forschungsstandes im Bereich Innovationsforschung, Bioökonomie, Biopolitik bzw. Medikalisierung und der Hybridisierung wissenschaftlicher Felder im Zuge der Molekularisierung der Lebenswissenchaften durch diesen Gegenstand informiert (Birch, 2017). Dieses Kapitel knüpft an diese Befunde an und stellt die Frage nach den Folgen, die sich für die Felder

1 Es gilt darauf hinzuweisen, dass die sog. biotechnologische Revolution in der Chemiegeschichte als Mythos gilt, der häufig als positiver Selbstläuferprozess an objektiven Entdeckungen inszeniert wird. Es handelt sich vielmehr um ein politisch, ökonomisch wie medial bewusst erschaffenes „*public image*" (Morris, 2001b, S. 201).

der Chemie aus diesen Hybridisierungen ergeben haben. Welche Folgen hatten diese neuen Innovationsdispositive, die hybride, transdisziplinäre, problemzentrierte Forschung bevorzugten und etablierte Systemwissenschaften wie die organische Synthesechemie gar als Abgrenzungsfolie inszenierten? Der Schwerpunkt liegt auch hier auf der Grenzarbeit der chemischen Felder vor dem Hintergrund lebenswissenschaftlicher Zugriffe auf die molekulare Welt, die zunehmend das Bild der molekularen Welt prägen und chemische Perspektiven als beschränkt erscheinen lassen.

Auch wenn die Chiralität in der biotechnologisch orientierten Wirkstoffforschung omnipräsent ist, verwenden Vertreter/innen der in diesem Zusammenhang neu entstandenen biotechnologischen Disziplinen den Begriff kaum, da diese molekulare Eigenschaft fest der organischen Chemie zugerechnet und mit kleinen molekularen Strukturen assoziiert wird (obwohl auch grosse Moleküle über etliche Asymmetrizentren verfügen können). In diesem Sachverhalt spiegeln sich grundlegende Tendenzen des Verhältnisses von organischer Synthesechemie und neueren hybriden *Life Sciences* wieder, die zwar nach wie vor gleichermaßen an der pharmazeutischen Wirkstoffforschung beteiligt sind, allerdings zunehmend zueinander in ein Konkurrenzverhältnis treten (Simon, 2012). Es zeigt sich, dass gemessen an den gegenwärtigen Innovationsdispositiven der pharmazeutischen Industrie die etablierte Systemwissenschaft der organischen Chemie zunehmend unter Druck gerät und gar als Abgrenzungsfolie für ein altmodisches, überholtes und wenig erfolgreiches Innovationsparadigma inszeniert wird. Damit zeigt sich in diesem Bereich ein Trend, der sich in der weiter gefassten Landschaft hybrider, postdisziplinärer und gegenstandsbezogener *Technosciences* niederschlägt: Scheinbar universelle Größen der Natur werden mit veralteten, monodisziplinären Epistemologien assoziiert und sie werden der allgemeinen Erkenntnisproduktion entzogen. Die Chemie verliert an dieser Stelle ein angestammtes Terrain, in der ein legitimations- und identitätsstiftender Teil chemischer Forschung über lange Zeit dominant war.

Für die Untersuchung disziplinärer Grenzziehungs- und Differenzierungsprozesse bietet das Feld der Pharmaindustrie ein paradigmatisches Beispiel für das Studium von Re-Konfigurationen wissenschaftlicher Felder angesichts gegenwärtiger Hybridisierungsprozesse. Die Pharmazie steht für eine Wissenskultur, die seit ihrer Entstehung interdisziplinär, hybrid und problembezogen ausgerichtet war (Merz und Schumacher, 2004a, S. 151). Die Pharmazie gilt nicht als klassische Disziplin, die sich durch gemeinsam geteilte Theorien, Fragestellungen, Betrachtungsebenen oder Methoden vereinigt sieht, sondern bewegte sich bereits zur Zeit ihrer akademischen Etablierung in einem Spannungsfeld zwischen Chemie und Medizin (ebd., S. 160). Wie in Kapitel 5.1 ausführlich diskutiert wird, befanden sich diese beiden Felder seit den Autonomiebestrebungen der Chemie als wissenschaftliche Disziplin im 18. und 19. Jahrhundert in einem konfliktreichen

Abgrenzungsverhältnis (Folkers, 2011, S. 201). Die Pharmazie bewahrte sich ihre Offenheit gegenüber den beiden Nachbardisziplinen, sodass sie selbst nie eine disziplinäre Autonomie erlangte und stets ein Konglomerat medizinischer, botanischer, chemischer und später auch biotechnologischer Inhalte, Theorien, Methoden, Präideen bezüglich der molekularen Welt sowie Menschen-, Körper- und Krankheitsbilder in sich vereinte (ebd.). Die Pharmazie blieb in dieser Rolle jedoch niemals passiv: Insbesondere durch die Macht ihrer Industriezweige schaffte sie in Form mächtiger Innovationsdispositive Tatsachen, denen sich die Nachbarfelder nicht entziehen konnten und diese nachhaltig beeinflussten. So zeigt sich derzeit, wie hybride, biotechnologische Epistemiken diejenigen der Chemie aus diesem Feld verdrängen.

4.1 Die Transformation der chemisch-pharmazeutischen Industrie

Die pharmazeutische Industrie als primärer Hort der Arzneimittelforschung, -entwicklung und -produktion präsentiert sich gegenwärtig als global vernetzte, vielschichtige Landschaft heterogener Akteur/innen wie multinationalen Großkonzernen, kleineren oder größeren Einzelbetrieben und *Start-ups* mit akademischen, öffentlichen und privaten Kooperationspartner/innen. Forschung, Entwicklung, Zulassung, Produktion, Handel, Vertrieb, Dispension, Beratung, Anwendung und Kontrolle pharmazeutischer Produkte finden somit in räumlich dezentralen und globalen Kontexten statt (Henkel, 2010). Wissenschaft, Technologie und Industrie sind in dieser *science based industry* untrennbar miteinander verwoben und wissenschaftlicher Wissenszuwachs gilt als Grundlage technischer Innovation und damit wirtschaftlichen Erfolgs (Cooper, 2012, S. 110). Insbesondere in frühindustrialisierten Staaten wie den USA, der Schweiz, Deutschland, Kanada, Japan, Frankreich und Großbritannien stellt die pharmazeutische Industrie einen zentralen Wirtschaftsfaktor dar, der neben dem Einsatz im nationalen Gesundheitssystem auf den Exporten untereinander, aber auch zunehmend in die wachsenden Märkte der sog. BRIC-Staaten (Brasilien, Russland, Indien, China) beruht (Interpharma, 2019, S. 42). Mit einem globalen Umsatzvolumen von 1.054,7 Milliarden US-Dollar im Jahre 2018 zählt die pharmazeutische Industrie neben Fahrzeugbau, Informationstechnologie, Elektronik und chemischer Industrie global zu den umsatzstärksten Branchen überhaupt (ebd., S. 39). Die pharmazeutische Industrie passt sich mit ihren Selbstbeschreibungen, Umsatz- und Marktanalysen einem neoliberal-kapitalistischen Duktus an und fügt sich mit ihren Versprechen nach kollektivem Wohlstand, Fortschritt und lokaler Arbeitsplatzsicherheit nahtlos in das hegemoniale wirtschaftspolitische Wachstumsparadigma ein (Schmelzer, 2016):

> Pharmaceutical innovation is behind some of the greatest achievements in modern medicine. Today people live longer and healthier lives than previous generations. Medical advances allow people to enjoy a better quality of life and increase their productivity, contributing to the overall prosperity of society. Pharmaceutical innovation also creates jobs, spurs technology, and represents an important source of income. Unfortunately, not everyone has yet fully benefited from these medical advances. Poverty and great wealth inequality between and within countries mean that many do not have access to even the simplest healthcare interventions. Addressing these issues is a complex challenge that requires long-term commitment from government, civil society, and the private sector (IFPMA, 2017, S. 123).

In öffentlichen Berichten wie diesem, die von den *Public Relations*-Agenturen zahlreicher Branchenvertretungen und Betrieben herausgegeben werden[2], sind dabei insbesondere die seit Jahrzehnten stetig wachsenden Umsätze, Märkte, Wertschöpfungsniveaus, Beitrag zum Bruttosozialprodukt, Anzahl von Arbeitsplätzen, Höhe von Gehältern und Innovationsbilanzen hervorgehoben (Lüönd, 2008, S. 13). In der Selbstrepräsentation der Unternehmen überwiegt in diesem Sinne ein volks- wie betriebswirtschaftsbezogener Duktus. Lokale Standorte multinationaler Pharmakonzerne wie Sanofi, GlaxoSmithKline, Roche, Pfizer, Novartis oder Johnson & Johnson, die jeweils zwischen 38,9 und 51,8 Milliarden US-Dollar jährlichen Umsatzes erzielen (Interpharma, 2019, S. 39), werden auf der lokalen Ebene als großzügige und attraktive Arbeitgeberinnen kommuniziert, die auf der globalen Ebene unverzichtbare Produkte generieren und zum Wissenszuwachs im biomedizinischen Bereich beitragen. Betont werden zudem die hohen Ausgaben im Bereich der langwierigen und risikoreichen F&E. Das Streben nach Innovationen, sprich: patentierbaren und kommerziell erfolgversprechenden Fertigarzneimitteln, stellt den primären Antrieb dar (Cooper, 2012, S. 110). Als chemische und biotechnologische Wissenschaft, die ihre Produkte im Gesundheitsbereich gewinnorientiert vertreibt, eröffnen sich in der Betrachtung des Feldes zahlreiche ökonomische, rechtliche, politische, historische, soziale und kulturelle Perspektiven. Arzneimittelmärkte, Handels- und Vertriebswege, Preisgestaltung und -kontrolle, Patentschutz, klinische Studien der Zulassung, die Rolle verschiedener Personengruppen und Expertisen, Zugang zu Arzneimitteln sowie deren Wirksamkeit und Schädlichkeit sind mit politischen Spannungen aufgeladen wie bei kaum einer anderen *science based industry* (Henkel, 2011, S. 140).

Die pharmazeutische Industrie lebt von patentier- und vermarktbaren Innovationen, weswegen sich die Innovationsdispositive dieser Branche von denen

2 Siehe zur aktuellen globalen Lage sowie exemplarisch zu Deutschland und der Schweiz folgende Auswahl: (Diel, 2019; efpia, 2018; IFPMA, 2017; Interpharma, 2019; vfa, 2018).

anderer Wirtschafts- und Industriezweige deutlich unterscheiden. Darüber hinaus wird das innovationsbezogene Spannungsfeld der *Triple Helix* in der engen Verflochtenheit von öffentlichen, akademischen und industriellen Akteur/innen deutlich (Mittra, 2016a). Bevor allerdings die tiefergehenden Analysen zu den Innovationsdispositiven der pharmazeutischen Industrie und deren Rolle in der Grenzarbeit der chemischen Felder in Abschnitt 4.2 eingegangen wird, folgt ein historischer Überblick zu den dreien in der Pharmaziegeschichte kanonisierten Phasen der Arzneimittelentwicklung, und ihrer Innovationsdispositive, die die *Boundary Work* zwischen chemischen und lebenswissenschaftlichen Feldern in ihrer Genealogie widerspiegeln. Die historische Betrachtung zeigt, dass die Entstehung des modernen Fertigarzneimittels und der pharmazeutischen Industrie eine Geschichte der Abgrenzung war. Die chemische bzw. biochemische stoffliche Seite des medizinischen Heilens wird mit dem Konzept des *Pharmakons* umschrieben, in dem sich die zahlreichen und vielschichtigen Paradigmenwechsel der Pharmazie- und Medizingeschichte von dem jeweiligen historischen und gesellschaftlichen Hintergrund besonders deutlich abzeichnen (Henkel, 2010, S. 131).

Die stoffliche Seite der Medizin ist seit den ersten heilkundlichen Schriften verschiedener Kulturen ausführlich belegt (Weyer, 2018a, S. 149, 161, 184): Pflanzenteilen, Minerale, tierischen (und menschlichen) Produkten wurden und werden in der physischen Anwendung spezifische Wirkungsweisen zugesprochen und seit dem Altertum in sog. Pharmakopöen bzw. Arzneibüchern und medizinischen Rezeptsammlungen katalogisiert (ebd., S.443). In Laboratorien, Küchen und Werkstätten verarbeitete Produkte auf der Grundlage dieser Naturstoffe werden seit der griechischen Antike als *Pharmaka* bezeichnet, sofern diese in erster Linie einem heilkundlichen Zweck dienen[3] und auf einer materiellen Darreichungsform (etwa als Salbe, Tinktur, Aufguss, Pille oder Kompresse) beruhen, was sie von anderen heilkundlichen Praktiken wie Diäthalten, Wunden verbinden oder Massagen abgrenzt (Henkel, 2010, S. 131). Das abstrakte Verhältnis zwischen einem Stoff und seiner Wirkung grenzt das Pharmakon analytisch von alltäglichen Gegenständen, wie etwa Lebensmitteln ab, denn der Verwendungszweck erschließt sich nicht direkt aus dem Objekt selbst (ebd., S. 129). Anfang des 16. Jahrhunderts erfolgte in den frühen Apotheken ein weiterer Abstraktionsschritt des Pharmakons in der semantischen Unterscheidung zwischen Material und Wirkstoff (Hen-

3 Der aus dem Altgriechischen stammende Begriff des Pharmakons bezieht sich in seiner ursprünglichen Bedeutung auf magische, giftige und heilkräftige Stoffe gleichermaßen (Henkel, 2010, S. 130). Die Zuspitzung des Begriffs auf den medizinischen Kontext lässt sich mit den frühen Pharmakopöen der Antike nachweisen. Damit wurden Heilmittel zunehmend aus einem theurgisch-spirituellen Wirkungsbereich von Priester/innen und Zauberer/innen gelöst und die soziale Rolle der Ärztin bzw. des Arztes bildete sich heraus (ebd., S. 132).

kel, 2011, S. 104). So wurde zunehmend davon ausgegangen, dass nicht etwa ein Stück Weidenrinde selbst, sondern ein darin enthaltener Stoff die Heilwirkung verursachen müsse. Im Sinne der *extractive heuristics* wurden in den Werkstätten der Apotheken aus Rohprodukten bestimmte Wirkstoffe herausgelöst und in konzentrierter Form über die Apothekenoffizin vertrieben (Mittra, 2016a, S. 31ff.). In diesem Zusammenhang bildeten sich Apothekerberuf und Apotheke als Orte der Arzneimittelproduktion in Abgrenzung zu Arzt- und anderen Gesundheitsberufen (wie Bader, Drogist und Chirurg sowie der Krankenpflege heraus), die im feudalen Gildewesen als Privileg der Apotheken verankert und reguliert wurden (Henkel, 2011, S. 118).

Mit dieser Abstraktion und Ausdifferenzierung setzte sich im 18. und 19. Jahrhundert ein chemisch-naturwissenschaftliches Verständnis der pharmakonbasierten Krankheitsintervention durch, das von Zusammenhängen zwischen chemischer Wirkung eines Stoffs und einem biologischen Organismus ausging (Merz und Schumacher, 2004a, S. 161). Wie in Abschnitt 2.1 deutlich wurde, entwickelte sich die akademische Chemie u.a. aus der Naturstoff-Heilkunde der Medizin heraus. Die Heuristik der organischen Synthesechemie löste historisch die *extractive heuristics* des Apotheken-Zeitalters ab und beschäftigte sich mit dem abstrahierten, unsichtbaren *Innenleben* von Stoffen, die es ihnen im Laboratorium unter dem Einsatz von Kristallisation, Destillation und Aufreinigung zu entlocken galt (Mittra, 2016a, S. 29ff.). Auf diese Weise ließen sich Wirkstoffe zuverlässiger dosieren und stellten geringere Risiken für Patient/innen dar als Naturprodukte, die Wirkstoffe in abweichender Konzentration enthalten können. Darüber hinaus ließ sich zunehmend auch die Wirksamkeit mit naturwissenschaftlichen Methoden belegen, was eine optimierte Qualitätssicherung und -Kontrolle ermöglichte (ebd.).

Die Vermarktung der Wirkstoff-Extrakte erfolgte nach wie vor über Apotheken, allerdings wuchs der Produktionsmaßstab im 19. Jahrhundert deutlich an (Henkel, 2010, S. 134). Die ebenfalls im Aufkommen begriffene chemische Industrie, die in der Produktion wenig Unterschiede machte zwischen Farben, Düngemitteln, Treibstoffen oder Basischemikalien für die Schwerindustrie, griff aufgrund ihrer akademischen Vernetzung und bereits vorhandenen Laboranlagen diese neue Produktionssparte auf. Damit kam das originalverpackte Fertigarzneimittel im Sinne des chemisch-wissenschaftlich erzeugten Chemiatrikums auf, das als Markenprodukt vertrieben wurde (ebd.). Die Synthesemethoden der Chemie avancierten in diesem Zusammenhang zum hegemonialen Forschungsmodell der Arzneimittelentwicklung und ihrer Innovationsmodelle (Briken und Kurz, 2010, S. 118). Synthetische Alkaloide wie das Chinin zählen zu den ersten Fertigarzneimitteln, die einen Massenmarkt bedienten. Als Darreichungsform ersetzte die (in der technischen Produktion deutlich anspruchsvollere) Tablette die vornehmlich flüssigen Präparate früherer Zeiten (Henkel, 2011, S. 222). Dieses

Tabletten-Pharmakon basierte i.d.R. auf einem einzigen Wirkstoff, der pharmakologisch geprüft und patentiert wurde (ebd., S. 123). 1880 wurde erstmals im deutschen Arzneibuch zwischen apothekengefertigten und industriell erzeugten Pharmazeutika, den sog. Industrie-Spezialitäten, unterschieden (ebd., S. 112).

Bis in die 1940er Jahre setzte sich aufgrund der deutlich geringeren Produktionskosten die industriell gefertigte Tablette gegen das Apotheken-Präparat[4] durch. Die Produktionswerke der Chemieindustrie integrierten darüber hinaus zunehmend die pharmazeutische und pharmakologische Wirkstoffforschung und Produktentwicklung in firmeneigene Laboratorien, sodass die sog. pharmazeutisch-chemische Industrie entstand (Griesar, 2004a, S. 271). Organische Chemiker/innen hatten sich, wie in Abschnitt 2.1 deutlich wird, bereits im Bereich der Teerfarben als erfolgreich erwiesen, indem sie für einen konstanten, in finanziellen Erfolg übersetzbaren, Innovationsfluss an neuartigen, patentierbaren Molekülen im Betrieb sorgten (ebd., S. 235). Als Vorbild dienten dabei die Erfahrungen mit der organischen Synthesechemie und ihrer strukturchemischen Reißbrettmethode in der rationalen Planung und Synthese von Stoffen, bei der stereochemische Aspekte wie Chiralität eine enorme Rolle spielten (vgl. Abschnitt 2.2). Die Heuristik der organischen Synthesechemie löste in der Folge das Paradigma der extrahierten Naturstoffe ab, die Wirkstoff-Chemie lieferte deutlich potentere und in der industriellen Herstellung weniger aufwendige Produkte (Bieberbach, 2004, S. 236). Auf kleinen molekularen Strukturverbindungen beruhende, synthetische Wirkstoffe ließen sich über ihren Syntheseweg deutlich leichter patentieren (und über die Geheimhaltung der Synthesetechnik leichter vor illegaler Nachahmung schützen), als etwa in Pflanzenteilen universell vorhandene Naturstoffe, die sich in jeder beliebigen Apotheke herauslösen lassen (ebd., S. 238).[5]

Bis in die 1960er Jahre etablierte sich die pharmazeutische als Teilgebiet der chemischen Industrie und wuchs auch dank umfangreicher privater wie öffentlicher Investitionen zu einer globalen Milliardenbranche an. Die 1960er Jahre gelten in der Pharmaziegeschichte als *„golden age of drug discovery"* (Mittra, 2016a, S. 32). Die pharmazeutisch-chemische Industrie verzeichnete mit sog. *Blockbuster*-Medikamenten, die über ihre jährliche Gewinnspanne von über einer Milliarde

4 Es gilt zu bedenken, dass manche geschäftstüchtigen Apothekenbetriebe auf Industriemaßstab anwuchsen und in diesem produzierten. Die Konzerne Merck KGaA und Merck & Co., Inc. gehen etwa beide auf eine Apotheke in Darmstadt zurück (Burhop et al., 2018).

5 In diesem Kontext wandelte sich auch die Rolle des Apotheker/innen-Berufs im Gesundheitswesen radikal: Vom Status privilegierter Produzent/innen von Pharmazeutika wurden sie zur Schnittstelle zwischen dem um 1880 entstandenen pharmazeutischen Großhandel und den Endverbraucher/innen. Der Unterschied im Produktionsmodus bestand darin, dass Arzneimittel nicht mehr auf einzelne Patient/innen(-gruppen) zugeschnitten entwickelt wurden, sondern auf Märkte (in der Absicht, deren Wachstum anzuregen) (Mittra, 2016a, S. 33).

US-Dollar definiert sind, immense kommerzielle Erfolge und die gesamte Industrie verzeichnete hohe jährliche Wachstumsraten (Bieberbach, 2004, S. 241). Die systematische Suche und das synthetische Design kleiner Moleküle mit erträglichen Nebenwirkungen, die sich in den verschiedensten Krankheitsbildern anwenden und massenhaft vermarkten ließen, dominierten die pharmazeutische F&E (Barry, 2015, S. 53). In diesem Kontext etablierte sich in Wechselwirkung mit nationalen Gesundheitsbehörden ein hoch-standardisiertes Modell der Arzneimittelzulassung, -regulierung sowie eine bestimmte Unternehmens- und Managementkultur (Mittra, 2016d, S. 121ff.). Die Medizinalchemie bzw. akademische Pharmazie etablierten sich innerhalb der chemischen Subdisziplinen und es bildeten sich spezialisierte Berufsqualifikationen und Expertisen heraus (wie auch etwa auf klinische Versuche spezialisierte Ärzt/innen), die in die standardisierte F&E-Kette der Pharmaindustrie integriert wurden (Stahl und Baier, 2015, S. 949). In den 1970er und 1980er Jahren verzeichnete die pharmazeutisch-chemische Industrie ein weiteres Marktwachstum, indem etliche, dem pharmazeutischen Bedarf nahestehenden Produktsparten wie Hygieneprodukte, Kosmetika, Diagnostika, analytische Geräte und Lehrmittel den Markt erweiterten (Lüönd, 2008, S. 62). Auch die Agrochemie verzeichnete in dieser Phase mit Patenten im Bereich des Pflanzenschutzes einen entscheidenden Aufschwung und wuchs seither anteilig an den Umsätzen der pharmazeutisch-chemischen Industrie stetig an (ebd.).

Das Organisationsmodell des „breit gefächerte[n] integrierte[n] Chemiekonzern[s]“ setzte sich vor allem in Deutschland bereits in den 1920er Jahren durch und wurde darauf hin weltweit bis in die frühen 1990er Jahre hinein kultiviert (Griesar, 2004a, S. 271). Standorte der chemischen Großindustrie wie Ludwigshafen, Basel, Merseburg oder Leverkusen schufen dabei neuartige, weitläufige Industrielandschaften mit großtechnischen Verbundanlagen, geruchsintensiven Reaktoren, rauchenden Schloten und Werkhallen, wie zeitgenössische Werke der bildenden Kunst eindrücklich belegen (Beneke und Ottomeyer, 2002; Tschira, 2003). In den ersten Jahrzehnten des 20. Jahrhunderts standen diese bizarren Industriekomplexe gleichermaßen für Wohl und Verderben der Moderne und lösten kontroverse gesellschaftliche Debatten aus (Leslie, 2005, S. 118ff.), nicht zuletzt aufgrund der gesundheitlichen Beeinträchtigungen und zahlreichen Umweltkatastrophen, die von diesen Betrieben ausgingen (Lüönd, 2011, S. 30). Das in Deutschland[6] sehr erfolgreiche Wirtschaftsmodell dieser Großkonzerne, das in

6 Deutschland verfügte bis in die 1940er Jahre hinein mit bis zu 43 Prozent (1938) über die größten Marktanteile an der weltweiten (chemisch-)pharmazeutischen Industrie, was zu der geflügelten Bezeichnung als „Apotheke der Welt“ führte (Henkel, 2011, S. 220) und an der sich die Wirtschaftsleistung der Pharmaindustrie selbst noch immer misst (Lenhard-Schramm, 2018; Merten, 2008).

der Folge weltweit Verbreitung finden sollte, zeichnet sich durch eine vielschichtige Organisationsstruktur technischer und betriebswirtschaftlicher Bereiche aus (Griesar, 2004a, S. 270). Dabei handelt es sich um ein komplexes Zusammenspiel aus Energiekreisläufen, sog. Produktstammbäumen, Wertschöpfungs- und Lieferketten sowie Lieferant/innen und Abnehmer/innen. Rationalisierte und optimiert auf einander abgestimmte Verfahren dienen dabei einer möglichst effizienten Ausschöpfung von Ausgangsstoffen (v.a. Kohle, Gas und Öl), Basischemikalien (Naphtha), Neben-, Zwischen-, Kuppel- und Abfallprodukten bis hin zu veredelten Fein- und Spezialchemikalien wie Pharmazeutika und Vitaminen – nichts soll dabei vergeudet werden (ebd., S. 271). Die Verarbeitung all dieser chemischen Produkte „unter einem Dach" ermöglicht in diesem Sinne die Auslastung kostspieliger Betriebsanlagen und ermöglicht so eine möglichst hohe interne Wertschöpfung und die schrittweise Integration neuartiger Verfahren und Produktsparten (ebd., S. 279).

Auch die pharmazeutische Industrie zählte bis in die 1990er Jahre hinein zu den rund 70.000 Produktlinien und hunderten von Segmenten der chemischen Industrie und zählte dort mitunter zu den umsatzstärksten Sparten (Hofmann und Budde, 2006, S. 2). Dies änderte sich allerdings in den 1990er Jahren, als eine kontinuierliche, strukturelle und wirtschaftliche Abspaltung der pharmazeutischen von der chemischen Industrie eintrat. Dies steht in Zusammengang mit vieren in der Pharmaziegeschichte kanonisierten (miteinander verwobenen) Großtrends, die mit *merger mania*, Innovationskrise, Rationalisierung und Biologisierung der pharmazeutischen Industrie umschrieben werden, die in der Folge jeweils genauer geschildert werden. Die Abspaltung der Pharmaindustrie von den Chemiekonzernen erfolgte zunächst auf der betriebsorganisatorischen Ebene, indem zahlreiche Fusionen, Abspaltungen, Neu- und Ausgründungen der führenden pharmazeutischen Konzerne mit Transaktionsvolumen in Milliardenhöhe stattfanden (Griesar, 2004a, S. 274). In sog. Elefantenhochzeiten legten Großkonzerne (seit den 1970er Jahren) bestimmte Produktionssparten zusammen, während andere gänzlich abgestoßen oder in Ausgründungen auf externe Subunternehmen ausgelagert wurden. Auf diese Weise sowie durch die Aufkäufe und Absorptionen zahlreicher kleinerer Unternehmen vergrößerten sich die weltweit führenden Chemiekonzerne. Darüber hinaus spielte auch die seit den 1970er Jahren fortschreitende wirtschaftliche Globalisierung eine wichtige Rolle, denn Produktions- und Entwicklungsorte ließen sich je nach wirtschaftlichem Übereinkommen dezentral und kostengünstiger betreiben (ebd., S. 285).

Die Folgen der „Fusionitis" spiegeln sich in der Zusammenlegung der Basler Unternehmen Ciba-Geigy und Sandoz zu Novartis (1996) in paradigmatischer Art und Weise wider: Während der Fusion wurden beinahe sämtliche Sparten der Spezialitätenchemie abgestoßen und stattdessen wurden dem neu entstandenen Großkonzern Bereiche der Pharmazie und Biotechnologie (v.a. Pflanzenschutz)

einverleibt (ebd., S. 272). Diesem Beispiel folgten auch andere Firmen und so „nahm die Idee eines auf die Gebiete Pharma und Pflanzenschutz konzentrierten *Life Sciences*-Konzerns Gestalt an" (ebd.), während etwa Petro- und Polymerchemie wiederum zu neuen, spezialisierten Chemiekonzernen fusionierten oder neu gegründet wurden. Die betriebsorganisatorischen Umstrukturierungen erfolgten somit rückblickend zwischen Segmenten der Basis-, Spezial- und Feinchemikalien (ebd., S. 294). Während die chemischen Industrien[7] sich fortan (bis auf wenige Ausnahmen) der Gewinnung von Produkten wie Kunststoffen und -Fasern, Elektrochemikalien, Katalysatoren, Lebensmittelzusätzen, Kosmetika, Düngemitteln, Farben, Pigmenten und Lacken, Baustoffen sowie Reinigungsmitteln widmete, wandte sich die pharmazeutische Industrie systematisch von der Chemie ab und den Biowissenschaften zu (ebd., S. 291).

Der zweite Trend, der im Zusammenhang mit der Abspaltung der pharmazeutischen von der chemischen Industrie steht, ist die sog. Innovationskrise der pharmazeutischen Produktentwicklung der 1990er Jahre. In dieser extrem disruptiven Phase sah sich die chemisch-pharmazeutische Industrie mit einer stark rückläufigen Zahl neu zugelassener Arzneimittel sowie auslaufenden Patenten konfrontiert, sodass Generika-Hersteller/innen als ernstzunehmende Konkurrenz auf dem Markt auftraten (Briken und Kurz, 2010, S. 118). Vermarktungsstrategien, Medikamentenpreise sowie die öffentliche Subventionierung der Pharmaindustrie wurden in dieser Phase zu einem umkämpften Politikum (Henkel, 2011, S. 242f.). So bevorzugten Krankenkassen und Klinikbetriebe verschiedener Ländern die kostensparenden Generika gegenüber den Markenprodukten, was wiederum zu Gegenstrategien der Pharmabranche in Form gezielten Lobbyings und dem verstärkten Einsatz sog. Pharmareferent/innen führte (ebd., S. 177ff.). Umstritten waren die Strategien der Pharmaunternehmen, ihr Arzneimittelportfolio mit Rand- und Nebensortimenten (vor allem im kosmetischen Bereich mit *Wellness*- oder *Lifestyle*-Medikamenten) zu erweitern oder gar mit unlauteren Wettbewerbsmethoden wie dem *disease mongering*[8] in Erscheinung traten, um die Umsatzein-

7 An dieser Stelle ist zudem festzuhalten, dass die globalen Zentren der chemischen (Basis-) Industrien sich zunehmend nach China und Südost-Asien sowie Brasilien verlagerten, während die pharmazeutisch-biotechnologischen Konzerne nach wie vor in Europa und den USA verblieben (ebd., S. 282).

8 *Disease mongering* dient als politisches Schlagwort in der Kritik an der pharmazeutischen Industrie und impliziert den Vorwurf, Erkrankungen gewissermaßen zu erfinden um dann entsprechende Pharmazeutika zu vertreiben (Moynihan und Henry, 2006). Entsprechend dem gesamtgesellschaftlichen Trend der Medikalisierung, bei der aus vormals nicht als zwangsläufig in den medizinischen Zuständigkeitsbereich fallende körperliche Phänomene für medizinische Diagnostik, Phänomenologie und Behandlung urbar gemacht werden (Conrad, 2007). Phänomene wie Cellulite, Stimmungen oder Potenzprobleme stellen laut klassischer medizinischer Definition keine behandlungsbedürftige Morbidität dar, allerdings – so die

bußen im Arzneimittelbereich abzufedern (Briken und Kurz, 2010, S. 118). Das angeschlagene Ansehen der Pharmaindustrie in Öffentlichkeit und Politik wurde zudem verstärkt durch die seit den 1970er Jahren nicht abbrechenden Chemie- und Pharmaskandale, etwa im Bereich fragwürdiger Menschen- und Tierversuche, vertuschter Nebenwirkungen, Schadensersatzklagen, illegale und unlautere Preisabsprachen oder die Beeinflussung von Ärzt/innen durch Pharmareferent/innen (ebd.). Die Pharmaindustrie avancierte in zahlreichen kapitalismus- und globalisierungskritischen Bewegungen zum Symbol eines rücksichtslosen und übermächtigen Industrieapparates, der aus purer Profitgier Demokratien aufweicht und die Umwelt zerstört (Werner-Lobo und Weiss, 2014).

Die Innovationskrise der pharmazeutischen Industrie brachte darüber hinaus neben den erwähnten organisationsstrukturellen und politischen Folgen auch einen epistemologischen Wandel im Sinne einer Rationalisierung mit sich. Als eine der ersten Branchen, die sich Methoden des *Machine Learning* bediente, ersetzte in der Folge das Paradigma des *rational drug designs* die aufwendigen, überwiegend manuell ausgeführten Methoden der organischen Synthesechemie in der pharmazeutischen F&E, als diese nicht mehr an ihre früheren Erfolge der 1960er und 1970er Jahre anknüpfen konnte (Bensaude-Vincent, 2008, S. 59). Potentielle Arzneimittelmoleküle zu synthetisieren und deren molekularen Wirkungsmechanismus zwischen chemischer Struktur und biologischen Organismus aufzuklären, änderte sich als Grundprinzip der Medizinalchemie zwar nicht, wurde aber in der Folge zunehmend von Computerprogrammen anstatt von Chemiker/innen geleistet (Stahl und Baier, 2015). Mithilfe der computergestützten Modelle der *combinatorial chemistry* gelang es i.d.R. kleinen Firmen und universitären Ausgründungen wie *Start-ups* Algorithmen zu entwickeln, mithilfe derer sich die Struktur-Wirkung-Mechanismen simulieren und die vielversprechendsten Stoffkandidaten bestimmen ließen (Barry, 2015, S. 59). In diesem Sinne ließen sich die Reaktionen einiger Ausgangsstoffe in allen möglichen Kombinationsmöglichkeiten durchprobieren, ohne eine einzige physische Synthese durchführen zu müssen. Sog. *high throughput technologies* bzw. Hochdurchsatztechnologien erlauben es, tausende von entsprechenden Datensätzen in wachsender Größe und Geschwindigkeit auf vielversprechende *drug candidates* zu durchsuchen. Auf diese Weise entstanden sog. *compound libraries* bzw. Stoffbibliotheken, die tausende von synthetischen Stoffen enthalten und von den kleineren Firmen an die etablierten Großkonzerne der Pharmazie verkauft wurden (ebd.).

Kritik – ziehen verschiedene Branchen finanziellen Nutzen aus einer gezielten, pathologisierenden Rhetorik, die sich diskursiv zu Krankheitsbildern sedimentiert (ebd.). Insbesondere die klinische Psychiatrie steht immer wieder in der Kritik, komplexe psychobiosoziale Phänomene zu medikalisierbaren Krankheitsbildern wie etwa dem ADHS zu reduzieren (Wittwer, 2019).

> Twentieth-century chemists, material scientists and pharmaceutical chemists have developed a variety of computer-assisted methods often referred to as „rational design" by contrast with the empirical, serendipitous processes of synthesis used in the past. Many algorithms are now available for designing molecules with interesting medical, magnetic, optical, or electronic properties, using computation, combination, randomisation (Bensaude-Vincent, 2008, S. 59).

Die Rationalisierung im pharmazeutischen F&E brachte einen erheblichen Wandel im Selbstbild der Medizinalchemiker/innen mit sich, was sich mit zunehmender Digitalisierung auch in anderen Bereichen der Chemie zeigte, vor allem denjenigen mit hohem Anwendungsbezug (ebd.). Mit der Jahrtausendwende ersetzten somit Methoden des *computer assisted molecular designs* die laborpraktischen Synthesemethoden der Chemiker/innen flächendeckend. Das Innovationsdispositiv der Rationalisierung wurde als Lösung für die Innovationskrise in der Forschungsförderung der Pharmazie dominant (Briken und Kurz, 2010). Gleichzeitig strahlen die im Dienste der pharmazeutischen Industrie formulierten Innovationsstrategien auf weitere wissenschaftliche Bereiche aus, denn auch wenn die tatsächliche Erfolgsbilanz der kombinatorischen Chemie bezüglich Neuzulassungen nicht überall positiv bewertet wird, wurde in vielen weiteren Wissenschafts- und Technologiebereichen *Big Data* und algorithmengestützte Innovationssuche gefördert (ebd., S. 122). Auch die Hochschulreformen standen damit in Zusammenhang: Die systematische Förderung universitärer und industrieller Kontakte wurde im Wesentlichen durch die genannten Beispiele aus der Pharmaindustrie inspiriert und tragen zu einer Verstärkung von Trends wie der Ökonomisierung[9] der Hochschule bei (ebd., S. 127).

Bereits angeschnitten wurde der vierte Großtrend, der sich in der disruptiven Phase der 1990er in der pharmazeutischen F&E bemerkbar machte: die Hinwendung zur *New Biology* im Sinne einer Biologisierung der Arzneimittelentwicklung. Mit der Entschlüsselung des menschlichen Genoms im Jahre 2003,

9 Unter dem Begriff der Ökonomisierung der Hochschule werden in der Wissenschaftsforschung verschiedene, mit einander zusammenhängende Prozesse bezeichnet, die sich im Allgemeinen eine stärkere Beziehung zwischen öffentlichen Hochschulen und privatwirtschaftlichen Organisationen und Organisationsformen beziehen. Dazu zählen neben intensiveren Akademie-Industrie-Kontakten in Form von *joint ventures* und *public-private co-development* auch ein Kulturwandel im Universitätsmanagement. Leitbilder wie die sog. Unternehmerische Hochschule oder die Leitprinzipien des *New Public Management* vertreten ein unternehmerisches Wissensschafts- und Wissensbild, während Student/innen zu Kund/innen und Wissen und Qualifikation zu marktförmigen Waren werden, deren Wert sich in *Rankings* und Evaluationen messen lässt (Maasen und Weingart, 2008).

dessen *mapping* und der Ausrufung des *century of biology* um die Jahrtausendwende, schwangen sich die molekularen Lebenswissenschaften aufgrund ihres enormen Gestaltungspotentials zu einer neuen wissenschaftlichen Leitdisziplin auf, die die Physik als finale *Big Science* des 20. Jahrhunderts ablösten (Mittra, 2016b, S. 1). Biotechnologie, synthetische Biologie und Genomik versprachen Biolog/innen eine ähnliche Transformation wie auch die Chemie sie im Laufe des 19. Jahrhunderts erlebt hatte: Von einer empirischen und experimentellen Wissenschaft, die die Realität des Lebens klassifiziert, beschreibt und versteht hin zu einer synthetischen *Technoscience*, die aktiv durch Eingriffe in die Grundsubstanz des lebendigen Stoffs ihren Gegenstand hervorzubringen vermag (Bensaude-Vincent et al., 2017, S. 3). Legitimation für technoscientifische Großprojekte, die aus den Erkenntnissen und Potentialen der *New Biology* resultierten, stellte insbesondere das Versprechen dar, das globale Gesundheitswesen zu revolutionieren und komplexe Erkrankungen wie Krebs, Alzheimer-Demenz oder Multiple Sklerose mit maßgeschneiderten Therapien beherrschen zu können. Auf diese Weise entstand ein heterogenes und multidisziplinäres Feld der *Life Sciences* mit ebenso heterogenen Förderquellen, Forschungsmethoden und epistemologischen Prämissen (ebd., S. 6).

Auch die Pharmaindustrie entdeckte in den 1990er Jahren die Versprechen der Biotechnologie für sich – insbesondere als Lösung für die Innovationskrise im Sinne ausbleibender Innovationen und Fehlschlägen bei der Produktzulassung. Neben den etablierten Forschungsabteilungen für die F&E kleiner Moleküle wurde die pharmazeutische Wirkstoffforschung mit der Suche nach großen *biologics* erheblich erweitert, was für diesen Industriezweig einen dramatischen Wandel mit sich führte. In diesem Sinne entstand ein völlig neues *innovation ecosystem*[10] von miteinander verschränkten Akteur/innen, Organisationen und Technologien, die in unterschiedlichen sozialen, wirtschaftlichen, finanziellen und politischen Kontexte einer wachsenden Bioökonomie[11] eingebettet sind (ebd.). Die F&E im Bereich neuer Biopharmazeutika knüpfte zunächst an die *Big Data*-Methoden der Hochdurchsatztechnologien und dem computergestützten molekularen Design

10 Das Konzept des *innovation ecosystems* ist in der Wissenschaftsforschung weit verbreitet und bezieht sich auf die räumlichen, epistemischen, sozialen, materiellen und technischen Bedingungen, unter denen technoscientifische Innovationen erzielt werden. Das Konzept nimmt insbesondere die Heterogenität beteiligter Akteur/innen und die materiellen Realitäten in den Blick (Adner und Kapoor, 2010).

11 Der Begriff der Bioökonomie wurde in der Wissenschaftsforschung zur Beschreibung einer „Neuausrichtung der Wirtschaft auf Biowissenschaften und -technologien, wobei sich eine `nachhaltige Nutzung von biologischen Ressourcen' mit dem Ziel der Wachstumssteigerung verbinden soll" eingeführt (Lettow, 2012, S. 1). Biologische Materialien, Informationen, Technologien und medizinische Anwendungen erfahren in diesem ökonomischen wie forschungspolitischen Zusammenhang eine erhebliche Aufwertung (ebd., S.11).

an und es entstanden analog zu den chemischen Stoffbibliotheken bald auch Datenbanken für große Biomoleküle (ebd., S. 28). Diese Forschungsarbeit wurde i.d.R. von universitären *Spin-offs* und *Start-ups* geleistet, die auf öffentliche Fördermittel zurückgreifen konnten. Diese Entwicklung wurde im Rahmen der Hochschulreform und ihrer neuen Prämissen gefördert. Erfolgreiche Innovationen, Unternehmen und Produkte im Bereich biotechnologischer Diagnostika und Therapeutika wurden im Anschluss von etablierten Konzernen absorbiert, was in die Zeit der *merger mania* und der Kartellbildung multinationaler Großkonzerne fiel und diese Entwicklung entsprechend beschleunigte. Mit diesem Innovationsmodell gelang es den privatwirtschaftlichen Organisationen, einen großen Teil der Entwicklungskosten und den diesbezüglichen Investitionsrisiken auszulagern (Briken und Kurz, 2010, S. 122).

Die Entwicklung komplexer biotechnologischer Heilmittel ersetzte in der Folge zwar nicht die etablierte *small molecule research* der organischen Chemie, allerdings wurde der biotechnologische Denkstil in der pharmazeutischen F&E seit der Jahrtausendwende zunehmend dominant. Dies zeigt sich in der Umstrukturierung der pharmazeutischen Großkonzerne, die sich in der Folge von der chemischen Industrie trennten und mit systematisch aufgekauften bzw. ausgebauten Agro- und Biotech-Sparten zu integrierten *Life Sciences*-Konzernen formierten und eine völlig neue wirtschaftliche Ausrichtung und Struktur erhielten (Griesar, 2004a, S. 291). Daraus folgte zudem ein tiefgreifender Wandel in den etablierten Entwicklungs- und Zulassungsverfahren, denn bio- und gentechnologische Arzneistoffe erfordern ein deutlich breiteres Innovationssystem mit mehr Gliedern in der F&E-Kette und es entstanden neue Beziehungsgeflechte zwischen Wissenschaft, Industrie, Medizin, Management und Öffentlichkeit. Für die Felder der Chemie bedeutete diese Entwicklung eine dramatische Wende, die bislang in der Forschungsliteratur der Chemiegeschichte bzw. Chemiephilosophie oder den STS wenig berücksichtigt wird und im folgenden Abschnitt 4.2 durch das empirische Material belegt ist:

Mit der biotechnologischen Wende in der Pharmaindustrie trat eine Abwertung der Medizinalchemiker/innen ein, die diesen Industrie- und Forschungszweig über Jahrzehnte mit ihren epistemischen, ästhetischen, praktischen und stilgebundenden Zugriffen auf das Molekulare geprägt hatten. Für die Grenzarbeit der chemischen Felder bedeutet dies den Verlust einer exklusiven Deutungsmacht über ein Feld, das sie mit ihren mentalen Modellen des Molekularen über Jahrzehnte hinweg geprägt und angeführt hatte. In den gegenwärtigen Innovationsdispositiven der Translation, Komplexität, Interdisziplinarität und kritischem Denken werden sie als Vertreter/innen der klassischen organischen Synthesechemie zur Abgrenzungsfolie stilisiert. Die Grenzarbeit zwischen biotechnologischen und chemischen Zugriffen auf das Molekül sowie die wachsende Dominanz spie-

gelt sich im Fallbeispiel der Chiralität und dem Umgang mit dieser molekularen Eigenschaft besonders deutlich wieder.

4.2 *„Magic bullet drugs"*: Zur Chiralität des kleinen Moleküls

Die Erforschung und Entwicklung pharmazeutischer Wirkstoffe hat sich im Zuge der geschilderten disruptiven Zusammenhänge seit der Jahrtausendwende hybridisiert. So wurden Teilprozesse der F&E, etwa die Erstellung von Stoffbibliotheken und klinische Studien zunehmend aus der Konzernstruktur ausgegliedert und finden tendenziell dezentral in universitären bzw. privatwirtschaftlichen Kontexten statt, sodass eine Vielzahl neuer Akteur/innen in den Prozess involviert ist (Mittra, 2016a). Mit der Digitalisierung und Automatisierung der pharmazeutischen Produktentwicklung gewannen insbesondere Informatiker/innen mit biotechnologischem bzw. biochemischem Bezug an Bedeutung, aber auch Forscher/innen mit hybriden Ausbildungsprofilen im Bereich der Biophysik, molekularen Medizin und Spezialstudiengängen wie *Molecular Life Sciences*, deren Curricula häufig direkt in Auseinandersetzung mit den Bedürfnissen der Pharmabranche entwickelt wurden (Schüler, 2015, S. v). Ähnliches lässt sich im Bereich universitärer Lehr- und Forschungseinrichtungen und deren institutionellen Struktur beobachten: Pharmazeutische Institute werden zunehmend aus den etablierten chemischen Fakultäten ausgegliedert und verschmelzen räumlich wie institutionell mit anderen hybriden, system-orientierten Naturwissenschaften zu sog. *life sciences campus* (Merz und Schumacher, 2004b, S. 87). Es ist nicht mehr die Medizinalchemie alleine, die an der Erschließung neuer Wirkstoffe beteiligt ist, sondern ein hybrides Feld zahlreicher, vornehmlich biowissenschaftlicher Disziplinen. In diesem Sinne etablierte sich in der F&E der Pharmaindustrie eine Unterscheidung zwischen kleinen und großen Molekülen, die in unterschiedliche *ecologies of innovation* eingebettet sind und in verschiedenen Entwicklungsabteilungen eines Unternehmens geleistet werden. Eine Atommasse von 1000 Dalton gilt im Allgemeinen als Grenzstein, besitzt ein Molekül weniger als 1000 Dalton, spricht man von einem kleinen Molekül und liegt der Wert darüber, von einem großen. Die gezielte Entwicklung und Herstellung dieser Moleküle zählt beiderseits zur Grundlagenforschung im industriellen Innovationsprozess und ist in erster Linie disziplinär organisiert:

> *Dr. Albrechtsberger: Die Erzeugung von Antikörpern (3) ähm gehört klassisch in den Bereich der biologischen Wissenschaften und nicht den Bereich der chemischen Wissenschaften. Also auch bei [Firma] unterscheiden wir sehr klar, ob wir ein sogenanntes KLEINES Molekül machen: KLEIN bedeutet, seine Molekülmasse ist (.) ähm naja (.) unter tausend Dalton. Dalton ist auch 'ne alte Einheit, heute sagt man wahrscheinlich*

> *eher äh molecular mass unit. Unter tausend Dalton ist ein sogenanntes kleines Molekül und GROSSE Moleküle sind Antikörper und die haben ja hundertfünfzigzausend Dalton. Also bestehen aus sehr, sehr vielen Einzelatomen (.) und diese Mole-diese Antikörper, die erzeugen NICHT die Chemiker. Die macht man vollsynthetisch [nicht] über den Weg der chemischen Synthese, sondern eben biotechnologisch.*

Die Entwicklung und Herstellung kleiner Moleküle erfolgte lange Zeit mit den seit Mitte des 19. Jahrhunderts entwickelten Reißbrettmethoden der organischen Synthesechemie (vgl. Abschnitt 2.1) und gilt trotz gegenwärtiger Digitalisierung und Automatisierung der Entwicklung kleiner molekularer Strukturen noch immer als das prägende mentale Modell. Die chemische Innovation, ein strukturbasiert geplantes und synthetisiertes Molekül mit einer Anwendungsfunktion – sei es im Medizin-, Bau-, Elektronik-, Treibstoff, Textil- oder Nahrungsmittelbereich – gilt als erprobtes Erfolgskonzept, das in Vergangenheit und Gegenwart erfolgreich vermarktbare Produkte hervorgebracht hat (Leker und Rühmer, 2004, S. 253). Trotz Innovationskrise der pharmazeutischen Industrie und deren Aufspringen auf den *biotech bandwagon* wurde dieses chemische Innovationsmodell nicht obsolet (Mittra, 2016a, S. 46), denn sog. Chemikatrika bzw. *SMOLs* (*small, chemically manufactured molecules*) machen derzeit noch immer 90 Prozent des weltweiten Pharmamarktes aus (Bayer AG, 2019). Zu den etablierten F&E-Methoden zählen mehrstufige Syntheseverfahren mit organischen und organometallischen Katalysatoren. Als Darreichungsform überwiegt die Tablette, denn die Stoffe sind i.d.R. nicht im Magen verdaubar und durchdringen aufgrund ihrer geringen Größe die Zellmembran mühelos. Darüber hinaus lässt sich die Tablette des kleinen Moleküls problemlos auf Industriemaßstab in großer Masse herstellen (ebd.). In der Entwicklung bedient man sich den präzisen analytischen Messmethoden zur Identitätsaufklärung von Stoffen, wie sie im Zuge der NMR-Revolution zur Standardausstattung des organischen Forschungslabors zählen (Rosenfeld und Bhushan, 2000). Die Chemieinformatik spielt eine erhebliche Rolle in diesen zeitgenössischen Forschungsbereichen und hat die klassischen Methoden der *wet chemistry* ergänzt: Hochdurchsatzverfahren und Stoffbibliotheken haben sich als essentielle Werkzeuge der Wirkstofffindung etabliert, mithilfe derer theoretische Modellierungen erarbeitet werden können, die dabei helfen, chemische Synthesen so zu steuern, dass sie einen erwarteten medizinischen Effekt zeigen (ebd.). Es zeigt sich, dass trotz dieser veränderten technischen Bedingungen die molekulare Struktur nach wie vor das prägende mentale Modell in diesem Paradigma der Wirkstoffforschung darstellt, was sich auch in der Semantik der beteiligten Akteur/innen niederschlägt:

> *Prof. Ullmann: Ja also wie man KONKRET Molekülentwürfe erstellt? Da gibt's verschiedenste Möglichkeiten –- wir lassen es den Computer machen. Man muss dem*

Computer das auch beibringen. Die klassische Vorgehensweise ist strukturbasiert, also man hat ein MODELL, eine Zielstruktur, ein Enzym das man beispielsweise hemmen möchte oder zwei Proteine, deren Interaktion man unterbrechen möchte. Davon hat man ein dreidimensionales Modell und dieses Modell, das sind irgendwelche Kügelchen und Stäbchen (.) sehr vereinfachte Darstellung von diesen Objekten, die wir als Molekül beschreiben. (...) Letztendlich ist das ein Modell, das sind alles nur WahrscheinlichkeitsDICHTEN. Und dann fängt man traditionell an in einer BINDETASCHE ein kleines Molekül aufzubauen, das mal ein Arzneistoff werden soll. Typischerweise mit einem kleinen Fragment, das man dort hineinbringt und dann anfängt, es wachsen zu lassen. Und bei diesem Wachsenlassen wird Atom für Atom angefügt (1). Und dann kommt man plötzlich an eine Stelle und sagt „okay hier könnt ich nun das eine oder das andere Enantiomer (1) hineinbringen, welches nehm ich denn?" Man entscheidet sich dann durchaus für das EINE von den beiden Möglichkeiten. Lang: welches wählt man da? Gibt's da irgendwelche generellen Präferenzen? Prof. Ullmann: für DAS für das bestimmte physikalische Berechnungen PLAUSIBLER erscheinen: es passt besser in die Tasche oder es könnte stärker binden an dieses Targetprotein. Dies sind MODELLrechnungen: welches passt vor allem STERISCH besser weil zunächst mal muss ein Arzneistoff an sein Zielprotein räumlich PASSEN und da macht das einen gewaltigen Unterschied, welches Enantiomer ich verwende. Das ist die KLASSische Vorgehensweise und dieses Vorgehen des Chemikers versuchen WIR in der Arbeitsgruppe dem RECHner beizubringen und wir benutzen Methoden der künstlichen Intelligenz. (...) Und dann müssen wir REGELN festlegen „welches Enantiomer nehmen wir denn?" und typischerweise geben wir dem Computerprogramm ALLE Möglichkeiten zur Auswahl und daraus werden bestimmte herausgefiltert.

Das Prinzip des *rational drug designs* in seiner computergestützten Form setzt, wie in dieser Schilderung deutlich wird, an den Prinzipien der organischen Synthesechemie an und versucht, das als Reißbrettmethode klassifizierte Verfahren in ein Computermodell zu überführen (Barry, 2015, S. 59). In diesem Beispiel wird besonders deutlich, dass Chemiker/innen beim strategischen Zusammensetzen von Molekülen sich ständig zwischen verschiedenen Möglichkeiten entscheiden müssen, welche Bausteine sie wo in welcher räumlichen Anordnung anbringen und welche Konsequenzen dies für das finale Produkt und seine Bioaktivität haben könnte.[12] Dadurch entsteht einerseits ein erhebliches Maß an Komplexität,

12 Siehe zu den komplexen Entscheidungsprozessen im molekularen *drug design* (Stahl und Baier, 2015). Die Autor/innen kommen zu dem Schluss, dass diese zentrale Praxis der Medizinalchemie durch die Einführung computergestützter Verfahren nicht unbedingt verbessert wurde, denn es handelt sich bei der Wirkstoffentwicklung nicht um einen linearen oder ausschließlich rationalen Prozess. Medizinalchemiker/innen bedienen sich bei den Entscheidungen im Aufbau einer molekularen Struktur auch ihrer Intuition und einer bestimmten Art des *story tellings*, das in Publikationen und sog. Entscheidungsbäumchen, die den Entschei-

denn es bestehen hypothetisch sehr viele Möglichkeiten nebeneinander und andererseits wächst die Unsicherheit, denn die Entscheidung für einen Liganden ist immer eine Entscheidung gegen eine andere mögliche Kombination bei vielen unbekannten Variablen und unsicherem Ausgang. Jede scheinbar geringfügige Änderung in der molekularen Struktur kann zu einem veränderten Wirkungsspektrum führen. Wie Herr Prof. Ullmann im Interview betont, erleichtert das *computer assisted drug design* diesen Vorgang, denn basierend auf Erfahrungsdaten bezüglich der *structure-activity relationship* (SAR) ermöglicht es, das chemische Verhalten eines potentiellen Stoffes zu bestimmen, ohne dabei hunderte von Proben zu synthetisieren. Wie Bernadette Bensaude-Vincent feststellt, haben Digitalisierung und Automatisierung der chemischen Erkenntnisgenerierung das Selbstbild von Chemiker/innen verschiedener Bereiche nachhaltig verändert, zumal informationstechnologische Rationalität in den neueren Innovationsdispositiven als erfolgsversprechender gilt als die Kreativität der „Synthesekünstler/innen" des 20. Jahrhunderts (Bensaude-Vincent, 2008, S. 59).

Die Rationalisierung, die mathematische Modelle basierend auf den physikalischen Theorien der Quantenmechanik versprechen, dient dabei als epistemische Stütze und verleiht dem Entwicklungsprozess feste Rahmenbedingungen. Auf ein molekulares Modell und seinen schrittweisen Aufbau werden dabei drei Perspektiven angewandt: thermodynamische und elektrochemische Eigenschaften sowie die Berücksichtigung der räumlichen Anordnung eines Moleküls (ebd.). Dabei ist die molekulare Chiralität einer Verbindung und die daraus resultierende Anzahl von asymmetrischen Stereozentren und Enantiomeren neben anderen stereochemischen Spezifikationen von essentieller Bedeutung (Wang und Hu, 2011). Wie Prof. Ullmanns Verweis auf die molekulare Eigenschaft der Chiralität deutlich macht, lassen sich die Aktivitäten der Medizinalchemie beim Design kleiner Wirkstoffmoleküle ohne diese Eigenschaft nicht denken. Verbleibt man in der Metaphorik weitverzweigter, hierarchisierender „Entscheidungsbäumchen" (Stahl and Baier, 2015), entstehen durch die chirale Eigenschaft einer Verbindung eine entsprechende Vielzahl von Stereoisomeren, die jeweils ein erwiesenermaßen unterschiedliches Wirkungsspektrum entfalten können.

Bei einer optisch aktiven Substanz mit nur einem einzigen stereogenen Zentrum, etwa einem asymmetrischen Kohlenstoffatom, können die R(+) bzw. S(-)-

---

dungsprozess dokumentieren sollen, nicht adäquat wiedergegeben werden können (ebd., S. 949f.). Die Autor/innen stellen einen *data overload* als Folge der eingeführten *Big Data*-Methoden fest und plädieren für die Stärkung qualitativer Aspekte und einer gewissen chemischen Intuition in der Arzneimittelentwicklung, die in Anbetracht des starken Rationalitätsdispositivs in den letzten Jahren an Bedeutung verloren haben (ebd., S. 951). Die Kommunikation der chemischen Struktur erweist sich in dieser Analyse als grundsätzlich schwer kommunizierbar, da sie auf abstrakten Modellen beruht und als Wissenstypus eher auf *tacit knowledge* beruht als auf rational verbalisierbarem Informationswissen (ebd.).

Isomere in unterschiedlichen Organismen unterschiedliche Wirkungen entfalten. Dabei kommt es u.a. auf das jeweilige Mischverhältnis der Enantiomere[13] an und ob deren Wirkung sich im Gemisch von der des *single enantiomers* unterscheidet (Morris, 2001a, S. 27ff.). Darüber hinaus kann es vorkommen, dass ein Enantiomer unter bestimmten Bedingungen im biologischen Umfeld von Zelle, Gewebe oder Organismus sich in das andere racemisiert (umwandelt) oder durch seine spiegelbildliche Form antagonisiert oder beide Enantiomere sich in ihrer Wirkung potentieren (wenn etwa der Abbau gehemmt wird) (Ahuja, 2011, S. 446). Bei pluralen Stereozentren vervielfachen sich diese Möglichkeiten nochmals entsprechend (Krastel et al., 2006, S. 87f.).

Einerseits stellt diese Komplexität ein erhebliches Potential für die Optimierung eines Wirkstoffs dar, allerdings wird die Eigenschaft der Chiralität in der Praxis häufig ignoriert oder ausgeklammert um die Handlungsfähigkeit angesichts ausufernder Entscheidungsmöglichkeiten zu bewahren. Obwohl der Einfluss kleinster Unterschiede in der molekularen Struktur auf den Organismus spätestens seit 1933 bekannt ist und diese Aspekte der Stereochemie in der Pharmazie rezipiert wurden (Easson und Stedman, 1933; Zeid, 2011), schreckte die systematische Erforschung chiraler Moleküle die Forschungsabteilungen der Pharmaindustrie lange ab und man verzichtete weitestgehend auf das Experimentieren mit chiralen Raffinessen in der Arzneistoffentwicklung (vgl. Abschnitt 2.3). Bis in die 1980er Jahre stellten enantiospezifische Analysen, Synthesen und Katalysen Chemiker/innen in der Stoffentwicklung vor besondere Herausforderungen und der Chiralität wurde in der Arzneimittelentwicklung keine zentrale Bedeutung zugesprochen (Ariëns, 1984). Erst der labortechnologische Fortschritt, der mit der Einführung verschiedener Chromatografiemethoden zu Stofftrennung eintrat, erbrachte die Möglichkeit, sich den Stereoisomeren von Stoffen analytisch zu nähern, da diese sich zwar in der Struktur unterschieden, auf die älteren physikalischen Messmethoden allerdings gleichermaßen ansprachen. Es trat in den 1990er und frühen 2000er Jahren ein Forschungsboom in der organischen Chemie ein, asymmetrische Synthese- und Katalyseprozesse gleichermaßen theoretisch nachzuvollziehen und mit der Hoffnung auf Innovationen in den verschiedensten chemischen und pharmazeutischen Industriebereichen fruchtbar zu machen:

> *Prof. Pejačević: Ich hab eine Zeit lang sehr intensiv organische SynTHESE betrieben als undergrad und das war natürlich DIE ZEIT gerade Ende der Neunziger, da war stereoselektive Synthese DAS DING. Ich hatte damals einschneidende Erlebnisse auf*

13 Es kann durchaus einen Unterschied ausmachen, ob es sich bei einem Enantiomerengemisch um ein Racemat, d.h. ein äquimolares Mischverhältnis von 50 : 50 handelt oder eines von 60 : 40 oder 10 : 90 (Hellwich, 2002, S. 66f.). Komplexität und Unsicherheit bezüglich des Wirkungsspektrums steigen entsprechend an (De Camp, 1989, S. 2).

> *[einem Event zur Nachwuchsförderung], [die Chiralität] hatte ENORME[n Einfluss auf] fortgeschrittene Studierende und Mentoren gehabt, die waren geradezu besessen von der stereoselektiven Synthese. Und ich hab jetzt die Organik nicht mehr so genau verFOLGT aber mir scheint, dass das Gebiet jetzt gut implementiert ist, also [dass] man nicht mehr so diese unGLAUBliche Attraktion hat wie damals. […] Damals hat unser Lehrstuhlinhaber ganze BÜCHER drüber geschrieben und das war natürlich (.) von so fundamentaler Bedeutung, dass es ja irgendwie jeden Menschen fasziniert. Thalido-Thalidomid war nicht SO lange her muss ich sagen.*

Im Dienste der Wissensproduktion im Bereich stereoselektiver bzw. asymmetrischer Synthesen wurden in den 1990er Jahren entsprechende Wissenschaftspreise wie die *Chirality Medal* oder Fachzeitschriften wie *Chirality* oder *Enantiomer* gegründet, die sich ausschließlich chiralitätsbezogenen Inhalten überwiegend im Bereich der organischen Chemie (mit Anknüpfungen an Biochemie und Pharmazie) verschrieben hatten. Die optimierten Technologien der Aufreinigung chiraler Stoffe etwa durch die Säulen- oder Gaschromatografie erlaubte es, die reinen Enantiomere einer Substanz zu gewinnen und diese unter Angabe eines Reinheitswertes (EE-Wert, *enantiomeric access*) qualitativ zu bestimmen (Schurig, 2005). Wie die zitierte Professorin der anorganischen Chemie andeutet, spielte auch die chemische Aufarbeitung der Thalidomid- bzw. Contergan-Katastrophe eine Rolle (vgl. Abschnitt 5.2). Fast zwanzig Jahre nach dem Bekanntwerden der fruchtschädigenden Wirkung des Arzneistoffs, wurde diese erstmals mit der chiralen Eigenschaft des verbotenen Medikaments in Verbindung gebracht (Blaschke et al., 1979), was die bislang eher unbeachtete und technisch schwer greifbare Chiralität in der pharmazeutischen Produktentwicklung in den Fokus rückte und wiederum auf die Entwicklung innovativer Analyse- und Separationstechnologie rückwirkte. Das Credo, künftige Katastrophen dieser Art durch eine gezieltere Untersuchung der enantioselektiven Wirkung zu verhindern, trug des Weiteren zum Forschungsboom der enantioselektiven Analyse und Synthese bei. Der Chemie-Nobelpreis aus dem Jahre 2001 an Barry Sharpless, William S. Knowles und Ryōji Noyori „für ihre Arbeiten über chiral katalysierende Hydrierungsreaktionen" markiert den Höhepunkt dieser Phase der organisch-chemischen Chiralitätsforschung (Anonymus, 2001).

Dass die Analyse und Synthese kleiner händiger Moleküle sich so nahtlos in die Innovationsstrategien der pharmazeutischen Unternehmen fügte, lässt sich allerdings nur zum Teil auf die Sicherheitsbedenken im Zusammenhang mit der retroskeptiven Ursachenaufklärung der Contergan-Katastrophe zurückführen. Im Zuge der Innovationskrise der 1990er Jahre bot die Chiralität von Arzneistoffen eine Gelegenheit, durch sog. *repositioning* bzw. *chiral switches* der finanziellen Bedrohung durch auslaufende Arzneistoffpatente entgegenzuwirken (Agranat und Caner, 1999; Agranat et al., 2002; Folkers, 2016). Infolge der Contergan-Katastrophe

wurde zudem die Arzneimittelgesetzgebung vieler Staaten verschärft und die Zulassungskriterien von Innovationen auf dem Arzneimittelmarkt wurden strenger bezüglich der Pharmakovigilanz (Mittra, 2016b, S. 6). Da in den 1990er Jahren etliche vielversprechende Arzneimittelkandidaten in den klinischen bzw. vorklinischen Wirksamkeits- und Unschädlichkeitsstudien durchfielen (oder aufgrund von Auffälligkeiten in der Arzneitmittelüberwachung wieder vom Markt genommen wurden), beschwerten sich Pharmaverbände zunehmend über die sog. *attrition*. Dieser Begriff beschreibt die Problematik, dass kommerziell erfolgreiche Innovationen von Forschungs- und Entwicklungskosten aufgrund von zu vielen kostspieligen *dead ends* im Zulassungsprozess übertroffen werden, keine Marktreife erlangen und die Investitionen nicht amortisieren können (ebd.). Gleichzeitig liefen wichtige Patente für bewährte *Blockbuster*-Medikamente aus, die nach Ablauf von Konkurrenzunternehmen als Generika hergestellt und vertrieben werden konnten (ebd.). Eine Strategie, sich die Rechte an einer molekularen Verbindung über das Auslaufen eines Patentes hinaus zu sichern, setzt an der molekularen Händigkeit von Verbindungen an:

> *Lang: Wie geht man denn heute in der pharmazeutischen Industrie mit der Chiralität um?* Pharmazeutin Hensel: *Man nutzt das aus, wenn ein Patent für ein Arzneimittel ausläuft um dann schnell ein neues zu generieren und zu versuchen, ob das eine Enantiomer unter Umständen Vorteile gegenüber dem anderen bringt, weil so sichert man sich wieder seine Marktanteile. Also man STÜRZT sich SCHNELL auf die Synthese oder eben auch auf die Entwicklung oder ein Screening von Stoffen, schaut „aha wie wirken die so? und was haben die vor allem auch für Nebenwirkungen?" Dann versucht man eben vor allem die Vorteile für sich zu ziehen weil man hat wahnsinnig viel Konkurrenz durch die Generikahersteller. Also wenn das Patent abläuft, stehen die eigentlich schon in den Startlöchern mit 'nem fertigen DOSSIER und können dann gleich mal den Markt mit neuen Generika überfluten, daher versucht man sich natürlich abzugrenzen.*

Da in früheren Jahrzehnten die Chiralität einer Verbindung nicht wesentlich berücksichtigt[14] worden war, bestand in den 1990er Jahren die überwältigende Mehrheit von 88 Prozent des Arzneimittelschatzes[15] aus Racematen und anderen

14 Insbesondere Zuckerverbindungen mit multiplen Stereozentren wurden im Moleküldesign zur Reduktion der Komplexität häufig entfernt. Eine Professorin der Pharmazie drückt es im Interview folgendermaßen aus: *„Und man entfernt [die Zuckerketten an Molekülen mit besonders vielen stereogenen Zentren] einfach durch chemische Prozesse (1) man hat sie einfach „wegrasiert" [lacht]"*.

15 In einem ausführlichen Review wurde festgestellt, dass 56 Prozent der um die Jahrtausendwende zugelassenen Pharmazeutika auf händigen Wirkstoffen beruhen, davon 88 Prozent als Racemat (Rentsch, 2002).

Gemischen aus Enantiomeren, die sich als wirksam und unschädlich erwiesen hatten (Leffingwell, 2003, S. 11ff.). Da vor dem reformierten Arzneimittelgesetz allerdings enantiomerenreine Verbindungen als eigenständige Wirkstoffe gelten, sofern sie gegenüber dem spiegelbildlichen Enantiomer bzw. dem Racemat eine abweichende Wirksamkeit aufweisen (FDA, 1992), lassen sich diese Verbindungen nach Ablaufen des Patentschutzes für das Racemat als *single enantiomer* vermarkten. Es finden sich zahlreiche Beispiele[16] für Arzneimittel, bei denen diese Strategie sich als erfolgreich erwies: Im Jahr 2000 kam das Esomeprazol auf den Markt, ein S(–)-Enantiomer des 1988 erstmals als Racemat zugelassenen Protonenpumpenhemmers Omeprazol (Syha et al., 2005). Der Mehrwert der Neuzulassung wurde dadurch begründet, dass ein signifikanter Behandlungserfolg bei einer auf 20 mg reduzierten Einzeldosierung möglich ist (Olbe et al., 2003). Die anschließende Kritik an dieser Innovationsstrategie der *small molecule drug discovery* seitens Gesundheitsbehörden, Krankenkassen und der Ärzt/innenschaft fügte sich in die in 5.1 angesprochene Kritik an der pharmazeutischen Industrie sowie deren Geschäftspraktiken. Fragen nach dem Verhältnis von Gemeinwohl und privatwirtschaftlichen Interessen sowie Debatten um die Bedeutung von Industriestandorten und Wirtschaftswachstum stellen eine Grundkonstante im Verhältnis von Öffentlichkeit und pharmazeutischer Industrie dar (Böschen, 2004, S. 180ff.), die sich in diesem Sinne auch in der Behandlung der Chiralität widerspiegelt.

> *Prof. Ullmann: Und dann hat man halt einen Kandidaten, der wird synthetisiert und dann stellt man HÄUFIG fest, dass es eben eins der Enantiomere ist, das nen beobachteten Effekt hat und das andere weniger oder gar keinen. (2) Und damit hat sich das in aller Regel. (2) Dann wird noch ein Strukturmodell mit dem einen Enantiomer gebaut (.) und auf geht's weiter zum nächsten Projekt. Dieses Thema Chiralität hat keine (.) DomiNANZ, es ist aber alltäglich, es gehört dazu, es ist essentiell, es ist BEHERRSCHBAR. Solange man ein Molekül HAT, das chiral ist oder ein, zwei Chiralitätszentren HAT, dann stellt man das auch enantiomerenrein dar, wenn es denn den gewünschten Effekt hat, dann findet sich schon eine Lösung. (4) Also ich erkenne das Thema Chiralität nicht als PROBLEM. Es ist ein Problem aber es ist kein unLÖSbares Problem (1) zumindest in DEM Bereich in dem WIR uns befinden. Es gehört dazu es ist nicht sehr beliebt und es wäre wie gesagt SO SCHÖN wenn's das nicht GÄBE.*

Mitte der 2000er Jahre wies der Wissenszuwachs im Bereich enantioselektiver Synthese und Wirkstoffforschung eine gewisse Sättigung auf und die Forschungsaktivitäten nahmen allmählich ab. Mittlerweile beschäftigt sich nur noch

16 Weitere bekannte Beispiele für erfolgreiche Neuzulassungen in der Folge von *chiral switches* sind etwa Ceterizin/ Levoceterizin, Citalopram/ Escitalopram, Ibuprofen/ S(–)-Ibuprofen oder Ketoprofen/ Dexketoprofen (Leffingwell, 2003).

ein verhältnismäßig eher überschaubarer, international vernetzter Kreis von Forscher/innen explizit mit diesbezüglichen Fragen. In der organischen Chemie und ihren Anwendungsbereichen gilt die Chiralität derzeit als alltäglich, unscheinbar, wenn nicht gar als wenig spektakuläre Kuriosität, die im Übrigen weder in der technischen Handhabe noch in der Ausbildung beliebt ist. Wie die Interviewstudie zeigt, gelten Analyse, Aufreinigung und Synthese chiraler Stoffe als unspektakuläre Routinetätigkeiten, von denen sich derzeit nur wenig innovative Erkenntnis versprochen wird. In der pharmazeutischen Entwicklung kleiner Wirkstoffmoleküle stellt es die Forscher/innen jenseits der in die Routine integrierten Strukturkomplexität nicht mehr vor nennenswerte Herausforderungen, wie Pharmazie-Professor Ullmann es ausdrückt. Die Phase des Forschungsbooms der 1990er Jahre hatte allerdings dazu geführt, dass im allgemeinen Bewusstsein des Wissenschaftsbetriebes die Chiralität überwiegend zu einer organischchemischen Eigenschaft stilisiert worden war, was sich im allgemeinen Wissenschaftsbetrieb nachhaltig sedimentierte.

Durch den paradigmatischen Zugriff der organischen Synthesechemie auf die Chiralität manifestierten sich die Symbolsprache des chemischen Strukturmodells und die eindrücklichen neu entwickelten Praktiken als dominanter Zugriff auf diese Eigenschaft der Natur, die insbesondere lebenswissenschaftliche, anorganisch-chemische und physikalische Zugriffe sekundär setzte. Es gelang der organischen Synthesechemie in ihrer Grenzarbeit, Naturphänomen gänzlich mithilfe ihrer mentalen Modelle für sich zu vereinnahmen und sich als *gatekeeper* bis heute zu behaupten, etwa in der Lehre.[17] Dies war wichtig in einer Phase der Disruption, als die bewährten Erkenntnismodi der organischen Synthesechemie insbesondere im Kontext der pharmazeutischen Innovationskrise infrage gestellt wurden. Insbesondere die anorganische Chemie, deren abstrakte Konzeption der Chiralität gegenüber derjenigen der organischen Chemie sekundärgesetzt wird, bekommt das zu spüren: in der Entwicklung anorganischer bzw. metallorganischer Arzneistoffe stellt die Berücksichtigung anorganischer Spiegelasymmetrie noch ein weitestgehend offenes Desiderat dar. Dieses Beispiel zeigt, wie sich Disziplinen scheinbar universelle Eigenschaften und Phänomene in ihrer Grenzarbeit aneignen, verteidigen, Ressourcen daraus generieren und sie mit der Zeit wieder verlieren.

17 Die Vermittlung der Chiralität obliegt fast ausschließlich dem Lehrbetrieb der organischen Chemie, die mit ihrer Subdisziplin der Stereochemie dieses Phänomen als chemische Struktureigenschaft in ihren Wissensschatz inkorporiert hat. Diese Aneignung fügte sich nahtlos in die historisierenden Narrative zum stereochemischen Erbe der organischen Synthesechemie und die Entdeckernarrative um Louis Pasteur und Emil Fischer, die sämtliche nichtorganisch-strukturellen Zugriffe auf die Chiralität (stellvertretend für die gesamte molekulare Welt) sekundärsetzte. Lange war es völlig unmöglich, Arzneimittel als etwas anderes wahrzunehmen als chemische Strukturen und Chemikalien.

Prof. Paderewski: Man hat heute das Gefühl, dass die Ära des sogenannten kleinen Moleküls des Typs Aspirin, dass die langsam zu Ende geht.

Die starke Assoziation der Chiralität mit der Heuristik der organischen Synthesechemie führt, wie im folgenden Abschnitt 4.3. näher dargelegt wird, zu einem Bedeutungsrückgang der Chiralität in der pharmazeutischen Forschung und Entwicklung. Wie argumentiert wird, dienen die etablierten Erkenntnisprozesse der organischen Synthesechemie nicht mehr als zielführende Strategien, die mit den herrschenden Innovationsdispositiven gefördert werden. Vielmehr dient sie einer hybriden, interdisziplinären, integriert-lebenswissenschaftlichen und auf das große Molekül ausgerichteten Innovationsstrategie als veraltete, konservative und innovationsfeindliche Abgrenzungsfolie. Die Grenzarbeit zwischen verschiedenen chemischen bzw. postchemischen Denkstilen in der Arzneimittelentwicklung erfolgt entlang disziplinärer Zugriffe auf die molekulare Welt und es zeigt sich, dass ein multidisziplinärer, biotechnologischer bzw. lebenswissenschaftlicher Zugriff allmählich denjenigen der organischen Synthesechemie verdrängt. Auch wenn nach wie vor *small molecular drug research* betrieben wird und sich auf einer quantitativen Ebene gegen die aufstrebenden Biotechnologien behaupten kann, findet in qualitativer Hinsicht ein Kulturwandel statt, demnach in der Chemie eine Ära der organischen Synthesechemie als primäre Erkenntnisstrategie der Pharmazie zu Ende geht. An deren Stelle eine hybride, digitalisierte, liberalisierte und im Bereich der Biochemie angesiedelte F&E.

4.3 Die Unsichtbarkeit der Chiralität im Paradigma des großen Biomoleküls

Mit der Einführung biotechnologischer Verfahren in der pharmazeutischen Wirkstoffforschung wurde dem auf kleinen Molekülstrukturen basierenden chemischen Paradigma ein biowissenschaftliches des großen Biomoleküls gegenübergestellt. Im Zuge dessen stehen sich zwei unterschiedliche *ecologies of innovation* gegenüber, die mit der *merger mania* der 1990er und 2000er Jahre in die jeweiligen Organisationsstrukturen integriert und festgeschrieben wurden (Griesar, 2004a). Wie im letzten Abschnitt als Definition angeführt wurde, werden große Molekülstrukturen an einer molekularen Masse von über 1000 Dalton von kleinen unterschieden. Es handelt sich bei sog. Biologika bzw. Biopharmaka nicht etwa um organisch-chemische Strukturen mit einer relativ überschaubaren Anzahl an Atomen wie Kohlenstoff, Stickstoff, Sauerstoff oder Wasserstoff, sondern um komplexe Eiweißmoleküle, die aus mehr als tausend einzelnen Aminosäuren bestehen und ein Gewicht von bis zu 200 Kilo-Dalton aufweisen können (vgl. Abb. 4.1). Während etwa der Wirkstoff Acetysalicylsäure (Aspirin) etwa nur 180 g/mol

(was 180 Dalton entspricht) wiegt, bringen monoklonale Antikörper ca. 150.000 Dalton *auf die Waage* (Bayer AG, 2019). *Biologics* basieren auf dem biochemischen Prinzip, dass sie körpereigene Proteine entweder direkt oder in optimierter Form mithilfe biotechnologischer Verfahren nachbilden und dadurch einen therapeutischen Effekt erzielen (ebd). Erste Anzeichen von einem Paradigmenwechsel hin zu einem eher biotechnologischen Ansatz zog bereits in den 1970er Jahren in die pharmazeutische Produktentwicklung ein, als Medizinalchemiker/innen sich entsprechend der Präidee des Schlüssel-Schloss-Prinzips (vgl. Anbschnitt 2.3) biologischen Rezeptoren insbesondere an den Oberflächen von Zellen zuwandten (Schüler, 2015, S. 15ff.).

Mit der gezielten Ausrichtung auf biologische *targets* in der chemischen Pharmazie, sowie auch der Definition von genetische Biomarkern in der medizinischen Diagnostik, etablierte sich allmählich ein lebenswissenschaftliches Verständnis der Struktur-Wirkungs-Beziehung molekularer Strukturen (Barry, 2015, S. 56). Mit der fortschreitenden Molekularisierung der Lebenswissenschaften und wachsendem Erkenntnisgewinn der Molekulargenetik und Biokatalyse wurden zunehmend die biochemischen Mechanismen der Zellen, Gewebe und Organellen bekannt und in die positivistische Entschlüsselungs-Metaphorik des *book of nature*-Narrativs integriert (Kay, 2001, S. 490). Molekulargenetische Verfahren und Methoden führten letzten Endes auch zu einem Zuwachs an biotechnologischem Wissen, mithilfe dessen aktiv in die molekularen Prozesse des Lebens eingegriffen werden kann. Demnach lassen sich genetisch veränderte Organismen und Prozesse im pharmazeutischen wie agrartechnologischen Bereich nutzbar machen, was sich wiederum in den Firmenzusammenschlüssen der 1990er Jahre widerspiegelt: Die etablierten Großkonzerne trennten sich fortan von den Chemiesparten und traten als kombinierte Agrar- und Arzneimittelkonzerne mit zunehmend molekularbiotechnologischem Profil auf (Fischer und Breitenbach, 2017, S. 332f.).

Der weltweite Marktanteil hochmolekularer Biopharmaka liegt derzeit bei 23 Prozent und wächst seit den 1980er Jahren stetig an (Interpharma, 2019, S. 35). Sämtliche in der pharmazeutischen *R&D* involvierten Firmen betonen die Zukunftsträchtigkeit der Biologika – beidermaßen für die Verbesserung des globalen Gesundheitsniveaus sowie auch für ein langfristiges ökonomisches Wachstum lokaler Pharmaindustriestandorte, zumal diese Stoffe aufgrund ihrer Beschaffenheit und Herstellungstechnik eine Generikaherstellung oder Fälschung verunmöglichen (Schüler, 2015, S. 192). Biotechnologische Therapeutika sind insbesondere bei komplexen Krankheitsbildern wie Krebs, Morbus Alzheimer oder multipler Sklerose im Einsatz, etwa als monoklonale Antikörper, die direkt in der genetischen Beschaffenheit von malignen Gewebestrukturen ansetzen und zielgerichtet an bestimmte Rezeptoren und biochemische Prozesse binden [ebd., S. 60ff.]. Im Gegensatz zu den niedermolekularen, chemischen Wirkstoffverbindungen weisen diese Therapeutika weniger Nebenwirkungen auf, sind aber auch erheblich teurer

in der Herstellung als industriell synthetisierte *SMOLs*, denn für erstere benötigt es aufwendige genetische Modifikationen in Bakterien-, Hefe- oder Tierzellen, denen die Antikörper und andere komplexe Biomoleküle entnommen und diese wiederum biotechnologisch optimiert werden (Bayer AG, 2019). Bei Krebspatient/innen werden sie etwa als Immuntherapien injiziert[18], deren Kosten pro Dosis in die hunderttausende US-Dollar gehen können, weswegen die Entwicklung, Herstellung und Vermarktung von Biopharmazeutika ein zentraler Knotenpunkt in der sozialen und politischen Arena zwischen heterogenen Interessensgruppen in Industrie, öffentlichem Gesundheitswesen, Patient/innen, Ärzt/innen und der Gesundheitspolitik darstellt (Ludwig und Schildmann, 2015).

> *Dr. Albrechtsberger: [Die kleinen] und die großen Moleküle das sind auch tatsächlich relativ strikt voneinander getrennte Abteilungen und workflows. Also gerade bei [Firma] – gut sie gehören beide zu einer übergeordneten Organisation – aber sie sind in dem Fall sogar räumlich getrennt, also an zwei verschiedenen Standorten weil sich das eben so entwickelt hat. Lang: und gibt's irgendwie dann auch Interaktion zwischen den Abteilungen? Dr. Albrechtsberger: JA KLAR weil natürlich die (.) die ähm (4) eigentliche Fragestellung „wie können wir molekular in ein Geschehen eingreifen um Krankheit zu verändern?" (.) das ist ja eigentlich die zugrunde liegende Motivation. Das sind zumindest bei [Firma] zumindest nochmal andere Forschende, die sich um diese Mechanismen kümmern und die sich überlegen „wie funktioniert da die Biologie? Welche pathways werden bedient? Oder welches Molekül welches Protein in einer Zelle oder AN einer Zelle KANN moduliert werden um Krankheit zu modulieren?" (.) DANN treten diese Menschen, die sich um das sogenannte TARGET kümmern AN die Personen heran, die Moleküle machen können. Das heißt, sie treten dann entweder an die Kleinmolekülwissenschaftler heran oder an die Großmolekülwissenschaftler oder manchmal auch an BEIDE. Das ist zuweilen einfach eine strategische Entscheidung die irgendwann GEFÄLLT wird.*

In der Organisationsstruktur integrierter pharmazeutischer *Life Sciences*-Konzerne und ihrem Selbstverständnis bestehen i.d.R. beide F&E-Bereiche kleiner wie großer Moleküle gleichberechtigt nebeneinander, beide zählen zur sog. Grundlagenforschung in der Innovationskette und werden etwa bei kombinierten Therapien (etwa Immun- und Chemotherapien bei Krebserkrankungen) an einem späteren Zeitpunkt im Rahmen von klinischen Anwendungen aufeinander abgestimmt, zumal beide Bereiche räumlich und epistemisch getrennt voneinander arbeiten. Wie

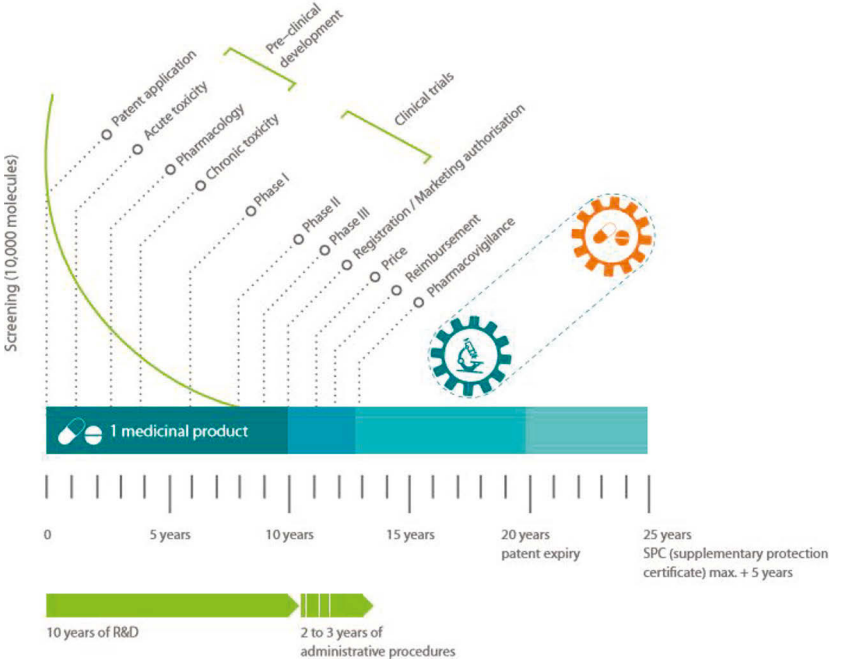
18 Die Galenik (Verarbeitung von Wirkstoffen in therapeutische Darreichungsformen wie Injektionen, Tabletten oder Tinkturen) der Biopharmazeutika ist besonders herausforderungsreich, denn die molekularen Strukturen sind i.d.R. zu groß um eine Tablette herzustellen und bei oraler Einnahme würden sie ohnehin aufgrund ihrer biogenen Struktur verdaut werden (Schüler, 2015, S. 22)

verhalten sich nun die Forschungs- und Entwicklungsbereiche kleiner und großer molekularer Wirkstoffstrukturen bezüglich der disziplinären Grenzarbeit zueinander? Handelt es sich eher um ein Konkurrenzverhältnis, eine Symbiose oder um völlig getrennte Bereiche? Mit Hinblick auf die qualitative Analyse und bestehende Untersuchungen zum Thema zeigt sich in Widerspruch zu Dr. Albrechtsbergers Einschätzung einer epistemischen Gleichberechtigung innerhalb des arbeitsteilig organisierten Disziplinengefüges. Vielmehr überschatten und verdrängen die Innovationsdispositive und Innovationsökologien der hybriden Felder der Biotechnologie diejenigen der klassischen organischen Synthesechemie. Dies zeigt sich auf drei Ebenen, die in der Folge argumentativ verwoben werden:

1. Die pharmazeutische F&E war geprägt von einer historisch gewachsenen und zur Zeit der *golden age of drug discovery* bewährten Arbeitsteilung zwischen verschiedenen chemischen und medizinischen Disziplinen und Berufsgruppen. Mit dem Aufkommen biotechnologischer Verfahren erodierte dieses System und die Kette der Entwicklung und Zulassung veränderte sich.
2. Die Hinwendung zu biotechnologischen Wissenspraktiken und größeren Molekülstrukturen konfrontierte die Industrie mit einem erheblichen Komplexitätszuwachs, mehr epistemischer Ungewissheit, die beidermaßen einen neuartigen spezifischen Zugriff auf die molekulare Welt prägten. Dies wird insbesondere im Umgang mit der molekularen Chiralität in der biotechnologischen *drug research* deutlich.
3. Mit der Hybridisierung wissenschaftlicher Disziplinen im F&E entstanden zudem neue Expertisen und disziplinäre Verhältnisse, die mit unterschiedlichen Fachkulturen verknüpft sind.

In den 1990er Jahren fügte sich die biotechnologische Produktentwicklung zunächst nahtlos in die neueren medizinalchemischen epistemischen Technologien der computergestützten Hochdurchsatzverfahren und Stoffbibliotheken ein, indem diese ebenfalls auf größere molekulare Strukturen angewandt wurden, was diese Verfahren zugleich verfeinerte (Bailey und Brown, 2001). Auch wenn in der Entwicklung kleiner Strukturen durch die Einführung des *computer assisted molecular designs* eine erhebliche Rationalisierung des Prozesses stattgefunden hatte, wurde das neuartige biotechnologische Entwicklungsverfahren aufgrund der größeren Nähe zum biologischen Einsatzort als der „chemischen Schrotschussmethode" überlegen wahrgenommen und entsprechend mit Ressourcen ausgestattet (Briken und Kurz, 2010, S. 119). Dies steht in engem Zusammenhang mit dem Wandel im Körper-, Krankheits- und Pharmakonverständnis der Lebenswissenschaften seit den 1970er Jahren, demnach die Ursache von Erkrankungen zunehmend in der Genetik des Organismus vermutet wurde und entsprechend die

Heilung ebenfalls dort ansetzte (ebd.). Arzneimittel galten lange als kleinmolekulare Chemikalien und die Vorstellung von biologischen Proteinkomplexen, die therapeutisch mit der molekularen Grundausstattung des Organismus interagieren, wurde erst im Laufe der Zeit intelligibel (Henkel, 2011, S. 222). Dies ist darauf zurückzuführen, dass biologische Wissensproduktion im pharmazeutischen Bereich bis in die 1970er Jahre in der Pharmazie kaum präsent war und erst später als erkenntnisstiftend bewertet und berücksichtigt wurde: „*In the first few decades of the twentieth century, drug discovery driven by synthetic chemistry became the established pharmaceutical model, with biology struggling to keep pace with the rapid technological advances*“ (Mittra, 2016a, S. 31).



Die Entwicklung von pharmazeutischen Innovationen wird häufig als risikoreiches, multidisziplinäres, langwieriges und kostenintensives Unterfangen kommuniziert. Aus 10.000 potentiellen Wirkstoffkandidaten erlangen maximal eines oder zwei Marktreife und die Entwicklungskosten eines Arzneistoffes lagen 2013 durchschnittlich bei 2.56 Milliarden US-Dollar (efpia, 2018, S. 6). Entnommen aus ebd.

Die Entwicklung und Zulassung von Innovationen auf dem Arzneimittelmarkt wird i.d.R. in der Metaphorik einer linear und chronologisch organisierten Kette gefasst (vgl. Abb. 4.2), die sich entlang einer funktional differenzierten Arbeitsteilung von Disziplinen und Expertisen bewegt. Die Langwierigkeit dieser

Prozesse und die relativ kurze Zeit, in der aus den Entwicklungen finanzieller Gewinn gezogen werden kann, sind feste Bestandteile der betriebswirtschaftlichen Kalkulation in der Pharmabranche (efpia, 2018, S. 6). Die Wissensproduktion der pharmazeutischen Industrie ist aus diesem Grund in erheblichem Maße auf ökonomische und finanzielle Aspekte hin orientiert, was dementsprechend kommerziell erfolgreiche Strategien, Produkte, Technologien und Perspektiven fördert und weniger erfolgreiche aussortiert. Die Pharma- und Biotechnologieindustrie gelten als Vorreiterinnen in der Durchsetzung von *Triple Helix*-Beziehungen zwischen Akademie, Industrie und Öffentlicher Hand, und das pharmazeutische Innovationsmodell, das primär auf *public-private partnerships* setzt, wurde in verschiedene andere Technologiebereiche exportiert (Mittra, 2016c, S. 87). Wie die Narrationen der Interview-Partner/innen offenlegen, findet die pharmazeutische Produktentwicklung (kleiner wie großer Moleküle gleichermaßen) in einem komplexen Gebilde statt, in dem jede/r seinen/ihren Platz einnehmen muss, damit ein kollektives Ziel erreicht werden kann. Entsprechend einer Wertschöpfungskette stehen sämtliche Aktivitäten, Positionen, Wissensbestände und Kommunikationsprozesse zueinander in einem Beziehungsnetzwerk und bauen rational-logisch, hierarchisch-linear und sukzessive aufeinander auf. Die Selbstverortung von Individuen erfolgt stark über eine zeitliche Dimension von frühen und späten Phasen bzw. höheren und tieferen Stufen der F&E entlang einer der Achse einer funktional differenzierten Arbeitsteilung:

> *Prof. Albrechtsberger: Es geht am Ende darum, dass man ein Medikament hat, was man verkaufen kann. Da muss man schon drauf hin arbeiten aber in der gesamten Wertschöpfungskette der Pharmaentwicklung bin ich natürlich sehr sehr FRÜH. Manche Kollegen würden wahrscheinlich sagen, dass wir so die Grundlagenforscher sind. Wir sind sehr FRÜH – also FRÜH im Sinne einer (.) äh Zeitskala oder eines Fortlaufens (.) des Prozesses (.) dieser Entwicklung. Dass wir da sehr früh eingreifen eben ja auch so die ersten Moleküle definieren und schauen was machen die eigentlich oder dass wir versuchen auch sowas wie modes of action aufzuklären um zu verstehen, ob das Modell, was wir da von Krankheit in vitro oder in einem Zellmodell haben, auch gut prädiktiv ist.*

Diese arbeitsteilig strukturierte Kette pharmazeutischer F&E hatte sich über Jahrzehnte hinweg in der synthesechemischen Produktentwicklung bewährt, wurde allerdings zunehmend mit der Innovationskrise infrage gestellt und erfuhr mit dem parallelen Aufkommen biotechnologischer *large molecule R&D* einen erheblichen Wandel. Die Entwicklung von *mabs* und anderen hochmolekularen Proteinstrukturen stellte die etablierte chronologische Abfolge von Identifizierung von Wirkstoffkandidaten, vorklinischen toxikologischen Studien sowie randomisierten klinischen Studien im Zuge der Zulassung vor neue Herausforderungen (Mittra, 2016b, S. 7). Dadurch, dass komplexe Biomoleküle genomspezifisch entwickelt

werden, weisen etwa erprobte Tierversuche bei einigen Stoffen eine geringere Extrapolierbarkeit (Übertragbarkeit von Daten auf den menschlichen Organismus) auf (ebd., S. 2). Die Übertragbarkeit zwischen verschiedenen Arten von Daten, eine klare Nachweisbarkeit von Ursache-Wirkung-Zusammenhängen und eindeutigen Behandlungserfolgen zählen zu den größten Herausforderungen der gegenwärtigen pharmazeutischen Wirkstoffforschung (ebd.). Die wachsende Komplexität erforderte eine Vielzahl neuer Expertisen, Ausbildungsqualifikationen und Vermittlungsinstanzen und hybride, interdisziplinäre Disziplinen und Felder wie Bioinformatik, *Molecular Medicine*, *Nanobiophysics* und insbesondere biotechnologische *Omics Sciences* erlebten einen Zuwachs an Personal und Ressourcen (Mittra, 2016c). Hinzu kommt, dass in der *R&D* hochmolekularer Biologika insbesondere in späten klinischen Phasen zunehmend Patient/innen, Arzt/innen und anderes medizinisches Fachpersonal involviert sind, was in diesem Bereich wiederum zu einem Wandel von vielerlei Berufsbildern führte (Mittra, 2016a).

> *Dr. Albrechtsberger: Ein Biologe hält mich manchmal für einen Physiker, ein Physiker hält mich für einen Chemiker [und] ein Chemiker für einen Biologen – was auch ein bisschen meine Intention war als ich studiert hab. Ich hab in [Stadt, D] angefangen Chemie zu studieren und hab dann auch in Stadt zunächst PROmoviert in Biophysik, bin damit dann auch in die USA gegangen an die [Universität] und hab da eben noch ein postdoc gemacht in Nanobiotechnologie. Dann mit der Erzeugung KLEINER Strukturen befasst, mit denen man biologische Vorgänge beobachten kann. Bin seit fünfzehn Jahren bei [Firma] und wende was ich da in meinem Rucksack zusammengepackt hab für die Pharmaforschung an. [Johann Wolfgang v. Goethe] war so'n Rollenmodell für mich, dass ich dachte, eigentlich hätte ich Lust jemand zu sein, der alles mögliche kann und jetzt nicht nur synthetische organische Chemie oder so.*

Die Disruption der etablierten, disziplinär organisierten Arbeitsteilung im Zuge von Biologisierung und Innovationskrise führte mit dem Aufkommen hybrider, interdisziplinärer und problem- bzw. anwendungsbezogener Innovationsdispositive zu einer allgemeinen Abwertung der klassischen Systemwissenschaften und des monodisziplinären Forschens. Dies drückt sich etwa in den veränderten Qualifikationsprofilen und Spezialisierungen aus, die seit der Jahrtausendwende die pharmazeutische F&E prägen. Organische Medizinalchemie oder auf toxikologische Tierversuche geschulte Ärzt/innen gelten als veraltete Auslaufmodelle der allmählich niedergehenden *SMOLs*-Forschung, die den Anforderungen des hybridisierten, digitalisierten und biotechnologischen Paradigmas nicht mehr gewachsen sind. Die sog. Betrachtungsebenen[19] der Arzneimittelentwicklung von Molekül, Makromolekül, Biomolekül, Organelle, Zelle, Gewebe, Organ, Organismus,

19 Siehe zur Präidee der Betrachtungsebene und ihre Funktion in der disziplinären Grenzarbeit Kapitel 6.

Population werden mit der Hybridisierung nicht mehr jeweils von einer Disziplin (analog Physik, Chemie, Biologie, Ärzt/innen, *Public Health*) bespielt, sondern von vielen simultan. Insbesondere die Welt des Molekularen erfährt mit dem wachsenden Zugriff verschiedener molekularer Lebenswissenschaften und der Abwertung der organischen Chemie eine Bedeutungsverschiebung. Die Ausbildungs- und Qualifikationsprofile werden als disziplinenübergreifend, grenzüberschreitend und in Abgrenzung zu einer in der Vergangenheit der Pharmaentwicklung vorherrschenden Monodisziplinarität kommuniziert. Die Abgrenzung von der klassischen organischen Synthesechemie erfüllt die Funktion, ein desintegriertes und undurchsichtiges Feld zugespitzter Expertisen mit disziplinär unklarem Profil und erheblichen Kommunikations- und Übersetzungsproblemen zu vereinigen.

> *Prof. Ullmann: Solche methodischen Vorgehensweisen müssen wir nicht für den Bereich pharmazeutische Forschung NEU erfinden, wir müssen sie nur anpassen und nutzbringend einsetzen. Das führt zu einer konkreten Kritik am Vorgehen der vergangenen Jahre. Ich denke, wir sind VIEL zu (.) traditionell (.) VERKRUSTET im Bereich der pharmazeutischen Wirkungsforschung. Man setzt auf altbewährtes und ADAPtive Zyklen-was an sich nicht schlecht ist, überhaupt kein Problem damit, nur die notwendige ADAPTION dieser Prozesse hinsichtlich neuer ErKENNTnisse im Bereich Polypharmakologie, Toxizität, SySTEMbiologie, die ist EXTREM schwerfällig und langsam und hier sehe ich 'ne ganz spezielle Aufgabe auch meiner Forschungsgruppe an der [Universität], junge, begeisterte Studierende mit einem solchen OFFENEN Blick auszubilden.*

Dennoch haben sich die steten Forderungen nach einem postdisziplinären Forschungsklima auf Kosten der als veraltet geltenden Systemwissenschaften in den disziplinären Kulturen der beteiligten Felder – und ihrer Grenzarbeit – sedimentiert. Die epistemische Kultur innerhalb der *ecology of innovation* der biotechnologischen Pharma-F&E zeichnet sich durch einen epistemischen Anti-Konservatismus aus und spricht sich für eine fortlaufende Selbstreflektion bezüglich potentiell festgefahrener Denkmuster und Ideen aus. Die epistemische Kultur steht für einen fortschreitendem Wandel sowie ein flexibles, gegenstandsorientiertes und kritisches Denken, das um eine permanente Prozessoptimierung bemüht ist. Bewährte Erfolgsmodelle sind in diesem Sinne stets nur eine Zeit lang gültig, dann müssen sie aus dem Sachzwang heraus reformiert und ersetzt werden. Als innovationsfeindlich, verkrustet und als veraltet gelten Interview-übergreifend insbesondere die Vorgehensweisen der klassischen organischen Chemie, die noch immer an adaptiven Zyklen festhalten und sich gegen jeden Fortschritt stellen. Als altmodisch, überholt und damit nicht den Innovationsdispositiven entsprechend, gelten mittlerweile auch basale Begriffe des wissenschaftlichen Wortschatzes der molekularen Welt, wie etwa die Chiralität, die stellvertretend für das überholte

Paradigma der klassischen organischen Synthesechemie und deren epistemische Praktiken im Zuge der Abgrenzungsbemühungen verhandelt werden.

> *Prof. Farrenc: Für die Zucker ist [die Chiralität] fundamental! Also die Zucker sind Biomoleküle, denen man einen enorm großen Informationsgehalt zuschreibt. Es sind chirale Moleküle und diese Chiralität bestimmt ihre dreidimensionale Struktur und damit auch die Wechselwirkung mit anderen Molekülen. Also die ganzen biologischen Eigenschaften von Zuckern, die auf direkten Erkennungen basieren, basieren auch auf dieser Chiralität. Ja das beschreibt und bestimmt einfach die Struktur dieser Zucker.*
> *Lang: Und gibt es einen Unterschied zwischen den Zuckermolekülen und anderen chiralen Molekülen?*
> *Prof. Farrenc: (6) Ich meine, es sind sehr komplexe Moleküle mit äh (1) vielen (1) chiralen Zentren (4) Ich denke, sie sind BESONDERS chiral [lacht].*

Obwohl in großen wie kleinen molekularen Strukturen gleichermaßen bedeutsam für die pharmakologische Wirkung eines Moleküls, erfährt die Chiralität im neueren biotechnologischen Paradigma der großen Moleküle längst nicht die Beachtung wie in der organischen Chemie. Zwar gelten biologische Makromoleküle aufgrund einer großen Zahl an Stereozentren als *„besonders chiral"*, wie es die zitierte Professorin im Bereich der *Glycomics* ausdrückt und es ergibt sich ein erhebliches Potential an enantioselektiven Wirkungsspektren, allerdings wird dieser molekularen Eigenschaft im Alltag der biopharmazeutischen F&E kaum Bedeutung zugemessen. Im Allgemeinen zeigt sich, dass die Chiralität aus dem Wortschatz dieser neu entstandenen Forschungsfelder und ihren Publikationen allmählich verschwunden ist und selbst kaum in der molekularen Entwicklungsarbeit berücksichtigt wird. In der Analyse zur Interviewstudie zeigen sich verschiedene Narrative in diesem Zusammenhang, die Rückschlüsse über die Grenzarbeit der beteiligten Felder und Disziplinen erlauben. Insbesondere seit dem Forschungsboom der 1990er Jahre, währenddessen chirale Separation, Synthese und Katalyse in der organischen Chemie viel Aufmerksamkeit erfahren hatten, scheint im Bereich der Pharmazie ein feldübergreifender Konsens zu bestehen, dass die Chiralität dem organisch-chemischen Wissensschatz angehört. Auf diese Weise wird der Begriff alleine schon mit klassischer organischer Chemie assoziiert und im Sinne der oben beschriebenen kettenförmigen Arbeitsteilung in einer zeitlichen Dimension dem eigenen Zuständigkeitsbereich entzogen. Sie wird als exklusiv chemische Eigenschaft verhandelt, die sich primär auf die Struktur kleiner molekularer Substanzen bezieht und große entsprechend sekundärsetzt. Auf die Frage danach, warum in den biologischen Wissenschaften der Begriff so wenig verwendet werde, bieten die Interviewees jeweils unterschiedliche Erklärungen an:

Lang: Wie konnte das kommen, dass die Leute heutzutage den Begriff [der Chiralität] jetzt sagen wir mal WENIGER benutzen?
Prof. Ullmann: Och Gott, der ist aus der Lehre verschwunden, wird nicht wirklich wahrgenommen, [die Forschung zur Chiralität] wird relativ traditionell betrieben und im Moment erfinden wir die Räder ständig NEU.[…] Auch in den aktuellen Arbeitskreisen, werden einfach (.) exisTIERENDE Begriffe nicht verwendet, sondern neue Begriffe stattdessen erFUNden. AUCH um sich einen Namen zu machen in der Wissenschaftswelt, denn wer mit Chiralität arbeitet – mein Gott es sind ja alte Hüte! Du machst hier ja nichts moDERnes, wer mit Glycomics arbeitet – das ist FANCY!

Chiralität als Begriff gilt in diesem Sinne als verstaubt und altmodisch, weswegen er dem innovationsorientierten Denkstil der Lebenswissenschaften entgegenläuft. Es gilt vielmehr, Begriffe neu zu besetzen, sich als aufstrebendes, hybrides Feld neue Konzepte anzueignen und als Wissenschaftler/in eigene Begriffe und Konzepte zu prägen. Zudem wird die Chiralität aufgrund der Kollektiverfahrung im Studium exklusiv der Chemie zugeschrieben und es fühlt sich „falsch an", im Falle von biologischen Komplexen den chemischen Begriff der Chiralität zu verwenden, auch wenn sie sehr viele Asymmetriezentren beinhalten oder wie bei der DNA-Doppelhelix ein Standardbeispiel für chirale Objekte vorliegt. Pharmazie-Professorin Farrenc hingegen sieht die Ursache dafür, dass die Chiralität eine nachgeordnete und unscheinbare molekulare Eigenschaft in den biologischen Wissenschaften darstellt darin, dass die Biotechnologie im Umgang mit ihr an ihre epistemischen und technischen Grenzen stößt. Durch die unzähligen Atome und Asymmetriezentren entsteht eine erhebliche Komplexität, sodass die makromolekulare Chiralität im Bereich großer Biomoleküle nicht so behandelt werden kann wie diejenige kleiner organischer Verbindungen. Zudem impliziert dies die Vorstellung, dass sich biologische Verbindungen zwar auf die Prinzipien der Chemie zurückführen lassen, jedoch forschungspraktisch keine direkte Handlungsfähigkeit schaffen. Die Chiralität präsentiert sich in diesen Feldern deshalb so unscheinbar und wenig beachtet, da sie wie *„Zukunftsmusik"* verhandelt wird: Die hohe Komplexität, der sich die Biologie ausgesetzt sieht, zwingt die Biolog/innen und Pharmazeut/innen kollektiv diese Eigenschaft solange zurückzustellen, bis die wichtigeren, genuin biologischen Mechanismen von Molekülen, verstanden sind. Hierbei werden besondere Hoffnungen auf informationstechnologische *Big Data*-Verfahren projiziert:

Prof. Farrenc: Ja des sind hochchirale Sachen! Ich kann mir einfach vorstellen, dass die Zucker sie SIND bis zu einem gewissen Grad synthetisch zugänglich aber nicht bei diesen GANZ großen [Biomolekülen], auf denen die Zuckermoleküle vorkommen. Ich denke einfach, die AUFlösung der Untersuchungen, die gemacht werden ist-ist noch nicht hoch genug, um das dann noch weiter zu differenzieren in verschiedene Mög-

> *lichkeiten. Der Umgang mit der Komplexität ist ein absolut FUNdamentales Problem in den biologischen Wissenschaften und ich glaube, es gibt keine Patentlösung. Man muss immer irgendWIE wieder auf ein reduziertes System.*

Auch wenn die Chiralität in der biotechnologisch orientierten Wirkstoffforschung omnipräsent ist, verwenden Vertreter/innen in diesem Zusammenhang neu entstandenen biotechnologischen Disziplinen den Begriff kaum, da diese molekulare Eigenschaft fest der organischen Chemie zugerechnet und mit kleinen molekularen Strukturen assoziiert wird. In diesem Sachverhalt spiegeln sich grundlegende Tendenzen im Verhältnis von organischer Synthesechemie und neuen, hybriden *Life Sciences* wieder, die zwar nach wie vor gleichermaßen an der pharmazeutischen Wirkstoffforschung beteiligt sind, allerdings zunehmend zueinander in ein Konkurrenzverhältnis treten. Es zeigt sich, dass gemessen an den gegenwärtigen Innovationsdispositiven der pharmazeutischen Industrie die etablierte Systemwissenschaft der organischen Chemie zunehmend unter Druck gerät und gar als Abgrenzungsfolie für ein altmodisches, überholtes und wenig erfolgreiches Innovationsparadigma inszeniert wird. Damit bestätigt sich in diesem Bereich ein Trend, der sich in der weitergefassten Landschaft hybrider, postdisziplinärer und gegenstandsbezogener *Technosciences* niederschlägt: Scheinbar universelle Größen der Natur werden mit veralteten, monodisziplinären Epistemologien assoziiert und sie werden der allgemeinen Erkenntnisproduktion entzogen. Die Chemie verliert an dieser Stelle ein angestammtes Terrain, in der ein legitimations- und identitätsstiftender Teil chemischer Forschung über lange Zeit dominant war.

Die vergleichenden Analysen zum Umgang mit der molekularen Chiralität in der hoch- und niedermolekularen pharmazeutischen Grundlagenforschung weisen nach, dass insbesondere die molekulare Welt sich nicht als einheitliche, allen Betrachter/innen gleichermaßen zugängliche Wirklichkeit präsentiert. Vielmehr präsentiert sie sich als heterogene, von methodischen, theoretischen und fachkulturellen Prämissen abhängige Konstruktion, die von Vertreter/innen der organischen Synthesechemie hergestellt, modelliert, ausgebaut und angeeignet wurde. Im 20. Jahrhundert leisteten auch Physiker/innen und Biolog/innen ihre Beiträge zum Wissenszuwachs über die molekulare Welt und gestalteten diese aktiv mit. In den Modellen, Bildern, Zeichnungen, Texten und Fragestellungen zum Molekül und seiner Umwelt spiegeln sich seit jeher die unterschiedlichen disziplinären Prämissen wieder, wie sie sich spezifische Gegenstände aneignen, sie verteidigen und wie sie von anderer Seite übernommen werden. Angesichts der aktuellen Hybridisierung wissenschaftlicher Disziplinen lassen sich weitreichende Re-Konfigurationen der wissenschaftlichen Felder beobachten. Insbesondere die Welt des Molekularen erscheint dabei als soziale Arena der disziplinären Grenzarbeit. Die Betrachtung der molekularen Welt zählt nicht mehr exklusiv in den Zuständigkeitsbereich der Chemie, sondern wird von einer wachsende Bioökonomie

einverleibt und mit hybriden biotechnologischen Prämissen, Methoden, Ikonografien, Theorien aufgeladen. Diese lebenswissenschaftlichen Zugriffe erweisen sich als äußerst heterogen und präsentieren sich nicht als einheitliches Feld. Zwischen molekularer Struktur und biologischer Wirkung bzw. zwischen dem „[ ]aseptic space of the laboratory[ ] and the [ ]living labyrinth of the body[ ]“[20] besteht zudem ein ontologisches Problem: eine Blackbox der Ursache-Wirkungs-Mechanismen, einem Problem, mit dem sich das folgende Kapitel intensiv beschäftigt.

20 (Bensaude-Vincent und Stengers, 1996, S. 263, zit. n. Barry, 2015).

5 *„Die machen uns die Moleküle“* – Zur Grenzarbeit zwischen Biomedizin und Chemie

Das Verhältnis von chemischen Wissenschaften und den Feldern der Biomedizin ist seit der Entwicklung der akademischen Chemie im frühen 19. Jahrhundert als medizinische Hilfswissenschaft durch einen Modus der Arbeitsteilung geprägt. In diesem Sinne haben sich die Felder der Medizin und der Chemie in einem ambivalenten Verhältnis gegenseitiger Abgrenzung und Abhängigkeit konstituiert (Powers, 2012, S. 5f.). Obwohl die Medizin sich im Laufe ihrer Geschichte verstärkt den Naturwissenschaften zugewandt und dadurch an Evidenz und Behandlungserfolgen hinzugewonnen hat, wurde dennoch stets eine inhärente Abgrenzung in der disziplinären Organisation des Wissens aufrechterhalten. Die Frage danach, wie viel und welche Art von Wissen Mediziner/innen selbst von naturwissenschaftlichen Inhalten benötigen, wird in diesem Zusammenhang immer wieder neu ausgehandelt (ebd., S. 10f.). Aber auch für die Chemie war die Grenzziehung zu den Feldern der Medizin folgenreich und durch Ambivalenzen gekennzeichnet: Auf der einen Seite erlangte die Chemie durch die zahlreichen Anbindungen an medizinische Anwendungen in Analytik, Pharmakologie und Labortechnik ein erhebliches Maß an fachlicher Legitimation, auf der anderen Seite fiel es der Chemie jedoch schwer, sich als eigenständige Disziplin zu behaupten und vom Status einer Hilfswissenschaft zu emanzipieren (Eckart, 2017, S. 191). Diese Arbeitsteilung wurde in der Folge durch forschungspolitische Dispositive der Unterscheidung zwischen grundlagen- und anwendungsorientierter Forschung verankert und reifiziert. Die Genealogie dieser Präidee der Arbeitsteilung wird in Abschnitt 5.1 nachgezeichnet.

Bei der Medizin handelt es sich um ein fluides interdisziplinäres Gefüge aus gesundheitsbezogenen Fachbereichen in den Sozial- und Naturwissenschaften, mit zahlreichen Anbindungen an ethische, rechtliche, ökonomische, soziale und politische Fragen. Mediziner/innen in Behandlung und Forschung zeigen sich stets darum bemüht, ihren eigenen Platz in interdisziplinären Gefügen zu behaupten und die Grenzen ihrer Zuständigkeit zu ziehen (ebd., S. 241ff.). Die Präidee der Arbeitsteilung, die dieser Epistemik und Praxis zugrunde liegt, ist dabei politisch umkämpft. Während die Präidee der Arbeitsteilung Ärzt/innen

auf der einen Seite ein gewisses Maß an Handlungsfähigkeit ermöglicht, wird sie im Zuge der Innovationsdispositive, die zunehmend auch die Biomedizin in den Blick nehmen, als innovationsfeindlich problematisiert. Dies zeigt sich in den beiden Fallstudien, die in diesem Kapitel diskutiert werden: Erstens in den Diskursen um den Contergan-Fall und der Rolle, die die molekulare Eigenschaft der Chiralität im entsprechenden Thalidomid-Wirkstoff darin einnahm (Abschnitt 5.2), und zweitens dem Programm der translationalen Medizin, das sich in kritischer Abgrenzung zur Präidee der Arbeitsteilung formuliert.

In der Grenzarbeit zwischen Chemie und Medizin stellt der Fall des Arzneimittels Contergan, das in den frühen 1960er Jahren als Massenmedikament vermarktet wurde und aufgrund unzureichender Pharmakovigilanztests körperliche Fehlbildungen bei weltweit 10.000 Neugeborenen verursacht hatte (Kirk, 1999), einen Knotenpunkt dar. Der Contergan-Fall erinnert stets daran, dass die etablierte Arbeitsteilung zwischen Chemie, Pharmazie und Medizin mit dramatischen Folgen versagen kann. So lässt sich in den entsprechenden Narrationen und Rekonstruktionen des Contergan-Falls beobachten, wie es über den Verweis auf Contergan in den Chemiekursen der Mediziner/innen-Ausbildung der Chemie gelingt, die Relevanz ihrer Gegenstände, Konzepte und Modelle in der Medizinausbildung aufrechtzuerhalten. Wie in der Interviewstudie deutlich wird, stellt die Chemie für Mediziner/innen nach wie vor die zentrale Sozialisationsinstanz in die molekulare Welt dar. Die Chemievorlesungen und Praktika im Medizinstudium prägen die Wahrnehmung, Körper- und Krankheitsbilder von angehenden Mediziner/innen noch in der Gegenwart nachhaltig mit. Dennoch erscheinen die chemischen Inhalte im ohnehin völlig überladenen Medizinstudium zunehmend rechtfertigungsbedürftig: Erstens sind insbesondere die Methoden chemischer Analytik fast vollständig aus dem ärztlichen Alltag externalisiert worden und zweitens werden seit der *Bio*-Molekularisierung der Medizin zunehmend molekularbiologische bzw. biotechnologische Zugriffe auf das Molekulare in der Medizin dominant.

Wie in Abschnitt 5.3 ausgeführt wird, haben sich aus der Hybridisierung von Feldern im Zuge der *Bio*-Molekularisierung der Medizin neue Probleme ergeben: Wissensbestände, Betrachtungsebenen, disziplinäre Kulturen sind demnach immer weniger untereinander anschlussfähig, was in einem kettenförmigen, linearen Innovationsmodell nahtlos ineinander übergreifender Instanzen zu inhärenten Widersprüchen führt. Das beobachtete Auseinanderdriften von Disziplinen in der Arzneistoffentwicklung und die sich immer stärker ausdifferenzierenden und zuspitzenden Expertisen brachten in der Folge das Translationsparadigma hervor, das ebenfalls von der Pharmaindustrie aus in viele verschiedene Ingenieurswissenschaften übernommen wurde (Chai und Shih, 2013, S. 3). Das Konzept der translationalen Medizin (TM) etwa bedient sich dessen Grundannahmen, indem die geringe Geschwindigkeit von Innovationsprozessen kritisch auf mangelhafte

Wissensübersetzungen zwischen verschiedenen Disziplinen und Instanzen zurückgeführt wird (Zerhouni, 2005). Dieser zweite Beispieldiskurs zeigt ebenfalls, dass die Chemie zugunsten der hybriden Lebenswissenschaften an Einfluss auf die medizinische Vorstellung von der molekularen Welt einbüßt.

5.1 Die Präidee der Arbeitsteilung zwischen Chemie und Biomedizin

Die Medizin präsentiert sich heute als komplexes, interdisziplinäres Feld verschiedener Lebens- und Gesundheitswissenschaften sowie *Technosciences*, die eine breite Palette von Forschung, Patient/innen-Versorgung und populationsbezogenem Gesundheitsmanagement umfassen und über Anbindungen an die Sozial- und Naturwissenschaften verfügen (Egloff et al., 2011). Vor diesem vielschichtigen Hintergrund erscheint die Medizin wie ein Knotenpunkt im sich kontinuierlich wandelnden, disziplinären Gefüge der Wissenschaften vor dem Hintergrund politischer, sozialer, ökonomischer und technischer Verwobenheiten. In ihrer Rolle als Anwendungsgebiet haben Medizin und Gesundheit durch die Geschichte hinweg unterschiedlichen disziplinären Kollektiven in der Akquirierung von Ressourcen als Legitimation gedient: das Versprechen, dass chemisches, biophysikalisches, psychologisches oder literaturwissenschaftliches[1] Wissen einen Nutzen für kranke Menschen hat, stellt ein intelligibles Narrativ dar. Auf diesem Wege wurden medizinische Menschen-, Körper- und Krankheitsbilder (in der Folge als Präideen bezeichnet) im historischen Verlauf durch zahlreiche feld- und disziplinspezifische Narrative, Projektionen, theoretische Prämissen, Innovationsdispositive und technologische Bedingungen des Sehens geprägt (Fleck, 2014a). Aber auch umgekehrt beeinflusste die Medizin mit ihrem sich kontinuierlich wandelnden ärztlichen Blick, ihren Problemstellungen, Entdeckungen, Moralvorstellungen und Katastrophen die Nachbarwissenschaften. Das Feld der Medizin bietet sich aus diesem Grunde in besonderen Maße für das Studium disziplinärer Dynamiken und insbesondere ihrer Abgrenzungsbestrebungen – sei es gegen außerwissenschaftliche Kreise oder in Form interdisziplinärer Grenzarbeit – an.

Die Analyse der Präideen der gegenwärtigen Biomedizin offenbart eine Genealogie der Grenzarbeit zwischen biologischen und chemischen Disziplinen in ihrem Zugriff auf die molekulare Welt, die sich als umkämpfte Arena präsentiert.

1 Das geisteswissenschaftliche Forschungsfeld der *Medical Humanities* versteht sich als Erweiterung der klassischen Disziplinen der Geschichte, Theorie und Ethik der Medizin. Von der Einbindung weiterer Disziplinen der Sozial- und Geisteswissenschaften sowie der Künste versprechen sich ihre Vertreter/innen Zugewinne für den Medizinbetrieb, da diese Perspektiven soziale und kulturelle Aspekte von Gesundheit und Krankheit in die medizinische Wissensproduktion integrieren, die Krankheitsverläufe und Behandlungserfolge ebenso bedingen wie biologische oder Umweltfaktoren (Biller-Andorno and Roduit, 2016).

Die Menschen-, Körper- und Krankheitsbilder der Medizin sind gegenwärtig im Wesentlichen durch diejenigen der molekularbiologischen und -technologischen *Life Sciences* geprägt, die sich aus der Biologie heraus entwickelt haben (Löwy, 2011, S. 117). Allerdings, so zeigen die Analysen dem empirischen Materials, ist der ärztliche Zugriff auf die molekulare Welt nach wie vor durch einen organisch-chemischen *style of reasoning* geprägt und die neueren, biotechnologischen Zugriffe diesen nachgeordnet. Die Wissensbestände der Chemie, die im 19. Jahrhundert erheblich Einfluss auf medizinische Behandlungsmethoden und Wissensproduktion genommen haben[2], sind in der Selbstwahrnehmung der medizinischen Felder selbst sowie auch in der Medizingeschichte in Vergessenheit geraten. Vielmehr, so zeigt die empirische Untersuchung, gilt ein chemischer Zugriff auf die Medizin und das Molekül als veraltet und dem biotechnologischen gegenüber als unterlegen. Diese These wird zunächst durch die historische Betrachtung dieses Abschnitts gestützt, die sich kritisch mit den kanonisierten Narrativen der Medizingeschichte auseinandersetzt, insbesondere mit dem Konzept der Molekularisierung der Medizin und dem Begriff der Biomedizin (Löwy, 2011). Die Feststellung lautet, dass insbesondere in der Historiografie zur Molekularisierung der Medizin i.d.R. ausschließlich von der *Bio*-Molekularisierung der Medizin nach dem Zweiten Weltkrieg die Rede ist, während die Molekularisierung der Medizin durch die Anbindungen an die organische Chemie im 19. Jahrhundert nur marginal berücksichtigt wird. Auch dies ist ein Symptom dafür, dass die organische Chemie in der sozialen Arena des Molekularen zunehmend angesichts disziplinärer Differenzierungen und Hybridisierungen an Bedeutung einbüßt.

Die Präideen der Medizin werden gegenwärtig in der Wissenschaftsforschung primär in ihrer naturwissenschaftlichen, (molekular-)biologischen und biotechnologischen Prägung[3] wahrgenommen und es fällt schwer, Phänomene von Gesundheit und Krankheit des Körpers jenseits einer (molekular-)biologischen Be-

2 Als Beispiel für eine enge Verbindung zwischen Medizin und chemischer Analytik sei hier die Balneologie bzw. Kurmedizin des 19. und 20. Jahrhunderts erwähnt. Die Aufklärung der chemischen Zusammensetzung von Wässern und eine entsprechende Zuschreibung von kurativen Eigenschaften galt als besonders intelligibel und war für die Etablierung chemischer Lehrstühle von Bedeutung (Weisz, 2001).

3 Ein lebenswissenschaftlicher Zugriff auf den menschlichen Körper war nicht immer dominant: Etwa die Säftelehre der Humoralpathologie, die seit der Antike bis in die Neuzeit das medizinische Denken prägte, vertrat ein mechanistisches Körperbild (Fleck, 2014b, S. 189) und ist heute im medizinischen Denken weitestgehend in Vergessenheit geraten. Auch die mikroskopische Seite des Lebens und damit in Verbindung stehende Erkrankungen waren lange Zeit nicht durch biologische Wissensproduktion und Weltbilder definiert, sondern u.a. durch die Anbindungen an die Chemie (Eckart, 2017, S. 90ff.). So wurde etwa die Welt der Mikroorganismen von (Bio-)Chemiker/innen wie Louis Pasteur erschlossen, die sich als Chemiker/innen an medizinischen Fakultäten bewegten, ehe die mikroskopische Welt der Mikroorganismen als Teil der Biologie verstanden wurde (Latour, 1990).

grifflichkeit zu denken (Clarke und Shim, 2011). Auch kann der „naturwissenschaftliche, molekular-biologische und biotechnologische" Denkstil kaum als einheitlich bezeichnet werden, sondern präsentiert sich angesichts der Hybridisierung der Lebenswissenschaften in zahlreiche Teilbereiche sowie delokalisierte Orte und Modi der Wissensproduktion als vielstimmiges und unscharfes Feld (Egloff et al., 2011, S. 9). Dies zeigt sich etwa in den Assemblagen, die einzelne Krankheitsbilder im klinischen Kontext darstellen, wo sehr viele Perspektiven, Epistemologien und Methoden aufeinander treffen (Mol, 2003). In diesem polyphonen Konglomerat bestehen verschiedene Modellvorstellungen des „molekular charakterisierten Menschen" (wie auch der molekularen Welt) nebeneinander (ebd., S. 13). Der Mensch als „Modell seiner kleinsten Teile" erfährt angesichts der Pluralität und Hybridität disziplinärer Zugriffe eine Auflösung in Betrachtungsebenen und medizinische Phänomene verwachsen sich zu vielschichtigen Assemblagen und translationalen Objekten an den Schnittstellen verschiedener Denkkollektive (Michael, 2011, S. 65). Die Auflösung des Körpers in verschiedene molare und molekulare Grenzobjekte und Perspektiven erfolgte in drei Phasen, die in der Folge geschildert werden: die chemische Molekularisierung, die molekularbiologische Molekularisierung und die biotechnologische Molekularisierung.

Wie in Kapitel 2.1 diskutiert wird, entwickelte sich die Chemie im 18. Jahrhundert zunächst als Hilfswissenschaft der Medizin (neben dem Minen- und Hüttenwesen sowie der Geologie) an europäischen Universitäten und erlangte erst dank der Legitimation durch die großindustriellen Erfolge Mitte des 19. Jahrhunderts volle Autonomie als wissenschaftliche Disziplin, als europaweit erstmals hunderte, in Vollzeit entlohnte, professionell ausgebildete Chemiker[4] beschäftigt waren (Bensaude-Vincent und Stengers, 1996, S. 96). Die Chemie etablierte sich zudem mit eigenen, national organisierten Fachgesellschaften, Publikationsorganen, Lehrbüchern, Lehrstätten und – als erste Disziplin überhaupt – mit internationalen Fachkongressen (ebd.). Dennoch befanden sich die chemischen Felder insbesondere zur Zeit ihrer Herauslösung aus dem Status einer Hilfswissenschaft in einem vielschichtigen Abgrenzungsverhältnis. Einerseits herrschte dabei Konkurrenz unter den lokalen wie nationalen chemischen Institutionen und Ausbildungsplänen. Andererseits entstand ein Schisma zwischen der sog. reinen und angewandten Chemie im Kontext der rasch fortschreitenden Industrialisierung

4 Justus von Liebig, 1824 zum ersten Professor für (organische) Chemie ernannt, war noch in erheblichem Maße auf außeruniversitäre Förderung seiner Forschung und Lehre angewiesen (Brock, 1999, S. 8). Gleiches gilt für die frühen, unabhängigen Institute und Laboratorien, an denen seit den 1840er Jahren chemische Forschung und Ausbildung nicht mehr alleinig im Dienste der Apothekerausbildung sowie geologischer, metallurgischer, botanischer, zoologischer oder pharmazeutischer Wissenschaften stand, sondern eigene Forschungsziele und -Interessen verfolgen konnten (Weyer, 2018b, S. 227f.).

des Faches (ebd., S. 102). Konstant blieb dabei der Bezug auf medizinische Anwendungen und die Ausbildung angehender Mediziner/innen, sodass die Chemie sich von einer sekundär gesetzten Hilfswissenschaft zu einer unentbehrlichen Grundlagenwissenschaft und Sozialisationsinstanz transformierte.

Noch heute stellt die organische Chemie die zentrale Sozialisationsinstanz angehender Mitglieder des Medizinbetriebs dar und dient als *gatekeeper* für die molekulare Welt. Student/innen der Human-, Zahn- und Veterinärmedizin erhalten eine verpflichtende Ausbildung in den grundständigen Methoden, Konzepten und Theorien der Physik, Chemie und Biologie, deren Relevanz sich daraus begründet, dass Mediziner/innen diese Prinzipien verstehen müssen, um medizinischen Nutzen für Patient/innen daraus ziehen zu können. Im Bereich der Chemie besteht der Lehrstoff dabei neben Überblicksvorlesungen zu den chemischen Feldern (mit Schwerpunkten in organischer Stereochemie und Pharmakologie) aus einem ausführlichen Laborpraktikum. I.d.R. werden diese Lehrpraktika so organisiert, dass externe Lehraufträge an chemische Institute derselben Hochschule vergeben werden, an denen spezielle Schullabore eingerichtet und Vorlesungen mit Titeln wie „Allgemeine Chemie für Mediziner" entworfen werden. Die organischen Strukturmodelle dienen dabei wie bei angehenden Chemiker/innen auch als Medien des molekularen *tacit knowledge*, denn die chemische Symbolsprache von Strukturmodellen, Summenformeln und Reaktionsgleichungen zu beherrschen, ist bislang der einzige Weg, einen Zugang zur molekularen Welt zu erlangen (Nesper, 2001). Auf diesem Wege wird auch die Arbeitsteilung zwischen Medizin und Chemie (bzw. den Naturwissenschaften im Allgemeinen) in der Sozialisation ins Feld als Präidee eingeübt und in der Fachidentität verankert.

Die Chemie behielt sich ein ambivalentes Verhältnis zur Medizin bei: Einerseits gelang es ihr, sich aus dem Status einer reinen Hilfswissenschaft zu emanzipieren, da durch die Entwicklung der molekularen Strukturchemie ein eigener epistemischer Raum geschaffen wurde, der eine eigenständige, genuin chemische, Auseinandersetzung mit der mikroskopischen und makroskopischen Natur erlaubte. Andererseits brach die Beziehung zur Medizin nie völlig ab, sondern wurde stets strategisch in der Akquisition von Ressourcen aufrechterhalten. Die Chemie prägte vom 19. bis ca. zur Mitte des 20. Jahrhunderts die Denkstile, Präideen und mentalen Modelle der Medizin nachhaltig mit (Boyer, 2011, S. 188). Chemische Methoden der Destillation, Kristallisation und Analytik gehörten in diesem Zeitraum zur Grundausstattung jeden Krankenhauses, wie Ludwik Flecks zeitgenössische Analysen zur Entstehung wissenschaftlicher Tatsachen eindrücklich belegen (Fleck, 2012, S. 71f.). Die Einübung des ärztlichen Blicks in der Patient/innen-Versorgung erfolgte in Auseinandersetzung mit beiderlei: Einerseits dem kranken molaren Körper und seiner makroskopisch wahrnehmbaren Symptome und andererseits der serologischen Analyse auf der Suche nach krankheitsverursachenden Mikroorganismen, toxischen Stoffen oder körperlichen Ab-

wehrmechanismen (Fleck, 2014b). In diesem Sinne entwickelte sich die Medizin zu einer Laborwissenschaft vorwiegend durch den Kontakt mit den chemischen Wissenschaften (Rosenfeld, 2002). Biochemische Prozesse wie Antikörperbildung, die Entwicklung von Impfstoffen und die ersten standardisierten Testverfahren auf bestimmte Krankheitsbilder wurden als explizit chemische Methoden und Tätigkeiten betrachtet und die Mikrobiologie speiste sich erst mit der Zeit aus der Chemie heraus (ebd.).

Dennoch gelang der Medizin innerhalb dieser komplexen *Boundary Work* eine entscheidende Leistung, die das Verhältnis von Medizin und Naturwissenschaften bis heute dominiert: Der eigentlichen Heilerfolg – sei es nun durch verabreichte Badekuren, Tabletten, Gebet, radioaktive Bestrahlung, Massagen oder Aderlass – wird stets als ärztlicher Erfolg verbucht, während die Disziplinen, aus denen sich die vielfältigen Methoden der Medizingeschichte speisten, in dieser Semantik nicht berücksichtigt werden (Folkers, 2011, S. 202). Diese Asymmetrie ist derart im Alltagsverständnis von Medizin und Naturwissenschaft verankert, dass sich etwa chemophobe Narrative bedienen lassen: Während etwa Ärzt/innen im Rahmen der Verschreibung von Chemopharmazeutika der Heilerfolg zugeschrieben wird, werden den eigentlichen Entwickler/innen und Hersteller/innen eher unlautere Interessen unterstellt (ebd.). Das Verhältnis von Medizin und Chemie wird tendenziell eher in der Chemiegeschichte verhandelt und ist dort heute selbst Teil der Grenzarbeit der chemischen Felder, wie sie von diesem noch jungen historischen Zweig geleistet wird (vgl. Abschnitt 5.3). In der Medizingeschichte hingegen wird die Rolle der Chemie kaum berücksichtigt und es herrscht meinen Studien zufolge nach wie vor das Narrativ der Chemie als *service science* vor. Dies zeigt sich u.a. darin, dass die Molekularisierung der Medizin primär in den Kontext der molekularbiologischen Revolution gesetzt wird:

Die in der Medizingeschichte als eigentliche Molekularisierung der Medizin kanonisierte Entwicklung setzt demnach nicht an den genannten molekularstrukturellen chemischen Einflüssen an, sondern bezeichnenderweise an der Einführung molekular*biologischer* Methoden und Konzepte. Die lange Abwesenheit chemischer Perspektiven in der Wissenschaftsforschung (vgl. 5.3) zeigt sich darin ebenfalls wie die Grenzarbeit zwischen chemischen und biowissenschaftlichen bzw. -technologischen Zugriffen auf medizinische Probleme in der sozialen Arena des Molekularen. Die Biologie lieferte zunächst bis zur Mitte des 20. Jahrhundert kaum Weltbilder, Methoden oder Kenntnisse über die molekulare Welt, sondern beschränkte sich ebenso wie die Medizin auf die *molare* Welt der makro- wie mikroskopischen Organismen (Mittra, 2016a, S. 31). Die Biologie entwickelte sich erst mit ihrer Molekularisierung nach dem Zweiten Weltkrieg flächendeckend von einer Feldwissenschaft (die dem Klassifizieren von Organismen verschrieben war) hin zu einer laborbasierten, experimentellen *hard science*, die sich an den Kriterien der allgemeinen Wissenschaftskultur mit denen der Physik und Chemie messen

lassen konnte (ebd.). So unterscheidet sich der Zugriff der klassischen organischen Chemie auf die molekulare Welt von denjenigen der gegenwärtigen Biomedizin, der sich sukzessive hin zu einem hybriden und vielstimmigen Zugriff auf das Molekül entwickelt hat, der die verschiedenen molekularbiologischen und biotechnologischen Disziplinen widerspiegelt, die das Feld medizinischer Forschung gegenwärtig prägen.

Die Molekularisierung der Biologie und der Begriff der Biomedizin wurden in der Medizin- und *allgemeinen* Wissenschaftshistoriografie als Trends definiert, die zu den zentralen wissenschaftlichen Entwicklungen des 20. Jahrhundert gezählt werden.[5] Die strukturchemischen Wurzeln der Erschließung der molekularen Welt werden in diesen historiografischen Diskursen allerdings wenn überhaupt nur marginal berücksichtigt. Dies wird u.a. darauf zurückgeführt, dass dem intuitiven Verständnis vieler Wissenschaftshistoriker/innen die vitalistische Präidee innewohnt, dass sich chemische Prozesse, die in lebenden Organismen stattfinden, sind grundlegend von denen organischer wie anorganischer Natur unterscheiden müssen, die außerhalb eines solchen ablaufen (Morange, 2012, S. 509f.). Die Verwendung des Begriffs der Molekularisierung fällt in diesen heterogenen Diskursen aber nicht einheitlich aus, sondern ist in seiner Bedeutung diffundiert (Wenkel, 2013, S. 8), was daran liegen mag, da sich unter dem vagen Schirmbegriff der Molekularisierung die verschiedensten historischen Entwicklungen[6] der Molekularbiologie fassen lassen, was eine sehr weite Begriffsdefinition erlaubt. Auch wenn unter Historiker/innen keine Übereinstimmung darüber herrscht, wann genau die Anfänge und Phasenübergänge der Molekularisierung der Lebenswissenschaften festzulegen sind (Rheinberger, 2008, S. 303), haben sich doch in der Geschichtsschreibung zwei kanonisierte Phasenübergänge dieses Prozesses sedimentiert: Erstens die Transition von einer feldforschenden, auf den molaren Organismus orientierten Biologie hin zu einer molekularen Laborwissenschaft (1940er bis 1960er Jahre) und zweitens die molekulartechnologische Revolution, die das Zeitalter der Lebenswissenschaften als *Technosciences* in den 1970er Jahren einläutete (ebd. S. 305):

---

5 Als analytisches Konzept avancierte die Molekularisierung in der Wissenschaftsgeschichte (aber auch -soziologie, -anthropologie und -philosophie) seit den 1980er Jahren zu einer zentralen Ordungskategorie, die seither ein zentrales Narrativ für die Geschichtsschreibung lebenswissenschaftlicher Disziplinen, Objekte oder Theorien darstellt (Löwy, 2011, S. 120). Da in diesem Bereich sich die Verwobenheiten wissenschaftlicher Paradigmenwechsel mit Wissenschaftspolitik, Privatwirtschaft, Instiutionalisierung, disziplinärer Dynamiken erforschen ließen, prägte dieser Phänomenkomplex die neuere Wissenschaftsforschung der *Science und Technology Studies* erheblich mit (Filk, 2010, S. 27).

6 Siehe zur Übersicht der als besonders zentral kanonisierten Entwicklungen (Rheinberger, 1995).

Die sog. molekulare Revolution wird in der Biologie in den 1940er Jahren datiert und fällt den historischen Analysen zufolge in erster Linie mit der Molekularisierung der Genetik und Vererbungslehre zusammen. Die biochemische Forschung hatte hierzu bereits einen Grundstein gelegt und befand sich in Begriff, sich mit der Erforschung von Proteinen, Peptiden und anderen *Bio*-Molekülen in immer kleinere Bereiche des Lebens vorzuwagen (ebd., S. 305). Die grundlegenden Prozesse des Lebens wurden in der Folge zunehmend anhand mikroskopischer Organismen *in vitro* erforscht, etwa an Hefezellen, Bakterien und Viren, was zu einer Abwendung von den etablierten makroskopischen Tiermodellen wie Maus und Fruchtfliege führte (ebd.). Darüber hinaus brachten die Forschungsaktivitäten zur DNA-Doppelhelix in den 1950er und die Sequenzierung des menschlichen Genoms in den 1960er Jahren zu einer neuen Metaphorik und Sprache der molekularen Biologie, die insbesondere durch einen neuartigen Informationsbegriff charakterisiert sind (Kay, 2001). Die aufstrebende Molekularbiologie bediente sich in der Folge zahlreichen Analysemethoden und Apparaturen, die aus Chemie und Physik übernommen wurden und die aus Abschnitt 2.3 bekannt sind, zumal einige davon in Auseinandersetzung mit der chiralen Eigenschaft molekularer Strukturen entwickelt worden waren: Chromatografie, Kapillarenelektrophorese, Ultrazentrifuge, NMR und Röntgenstrukturanalyse.

Die Molekularbiologie erwies sich als offen für interdisziplinäre Kooperationen und expandierte in der Folge in andere wissenschaftliche Bereiche (Rheinberger, 2008, S. 305). Auf diese Weise entstand eine molekulare Welt, die sich bezüglich ihrer Methoden, Sprache, symbolischen Repräsentationen, Affiliationen von Forschenden, Orten und Institutionen der Wissensproduktion immer weiter von den Wurzeln in der Chemie ablöste. In den 1970er Jahren zeichnete sich ein weiterer Höhepunkt der Molekularisierung der Lebenswissenschaften ab: Mit der Möglichkeit, die genetischen Codes nicht nur zu beschreiben, zu klassifizieren und abzubilden, sondern mithilfe gen*technologischer* Verfahren direkt in diese Prozesse manipulierend einzugreifen, zeichnete sich ein dramatischer Wandel ab (Landecker, 2007). Verschiedene Lebenswissenschaften innerhalb der Landschaft molekularbiologischer Forschung und Entwicklung erfuhren eine Transition hin zu sog. *Technosciences* (ebd.). Im Zuge dessen entstand ein weiterer epistemischer Blickwinkel auf das Leben: Neben biochemischen Stoffen und ihren Funktionen *in vivo* wie *in vitro* rückten Zelle[7], Organellen und insbesondere der Zellkern in ihrer molekularbiologischen Verfasstheit ins Zentrum der Aufmerksamkeit (Rose, 2007, S. 65f.). Die Gene werden dabei als molekulare Träger von Information verstanden; sie steuern Vererbung, Reproduktion und die Entwicklung des kollektiven und individuellen Organismus im Sinne der Unterscheidung von Geno-

7 Zur Wissensgeschichte der Zellen und wie diese im Zuge der Molekularisierungsprozesse zu technologischen Objekten wurden siehe (Landecker, 2007).

und Phänotypen. Die Entschlüsselung des menschlichen Genoms und anderer Spezies sowie die kausale Zuschreibung von genotypischen Ausprägungen und phänotypischen Effekten führte Ende der 1980er Jahre zu einem global angesiedelten *mapping project*[8] (Rheinberger, 2006, S. 224).

Die Entwicklung der Molekularbiologie als vage gefasster Großtrend in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts ist in erheblichem Maße mit einer Disruption des bestehenden Disziplinengefüges der Naturwissenschaften verbunden. Mit dem Aufkommen des *Triple Helix*-Innovationsmodells, bei dem akademische Wissenschaft stärker an politische Entscheidungen und industrielle Interessen (insbesondere der pharmazeutischen Industrie) gebunden wurde (Etzkowitz und Leydesdorff, 2000), entstand eine Vielzahl hybrider biowissenschaftlicher und -technologischer Disziplinen, die sich aus den drei etablierten Disziplinen der Chemie, Biologie und Physik speisten. Nanobiophysik, *Neuro Sciences* oder *Omics Sciences* repräsentieren in ihrer interdisziplinären, anwendungs- und marktbezogenen Ausrichtung dieses neue Paradigma und eine generelle Abwertung der etablierten Großdisziplin (Forman, 1997). Ein gefragter Anwendungsbezug dieser neuen, interdisziplinären Kollektive lag dabei von Beginn an in der Medizin, die ebenfalls in der Folge eine Molekularisierung unterlief und seither als Biomedizin bezeichnet wird (Löwy, 2011). Die Transformation hin zur Biomedizin in Auseinandersetzung mit den entstehenden *Life Sciences* veränderte das Feld der Medizin auf mehrere Ebenen tiefgreifend: Erstens bezüglich epistemischen Prämissen und Präideen wie dem Körper- und Krankheitsbegriff, zweitens bezüglich des Verhältnisses von Forschung und Praxis und drittens bezüglich einer Arbeitsteilung mit den Naturwissenschaften in der Aushandlung von Verantwortung.

Mit der Entstehung der Biomedizin als Teil der hybriden Landschaft der Lebenswissenschaften erlebte der Krankheitsbegriff der Medizin eine Transition. Der Biomarker, der bereits zur Phase der Chemomedizin biochemisch verfasst war, entsprach dem sog. Schlüssel-Schloss-Modell der Rezeptor-Wirkstoff-Theorie der organischen Chemie des 19. Jahrhunderts (Egloff et al., 2011, S. 13). Als krankhaft beurteilte Körperprozesse konnten im Körper lokalisiert und mithilfe kleiner chemischer Moleküle behoben werden und auch die Diagnostik setzte verstärkt an dieser Präidee an. Als Biomarker galten zunächst makroskopische Körpersäfte

8 Die Kulturen des Kartografierens entstanden in einem hybriden Feld aus naturwissenschaftlicher Grundlagenforschung (Biophysik, Biochemie, Molekularbiologie), der biomedizinischen Technik und ihren Anknüpfungen an die klinische Praxis und privatwirtschaftlichen Akteur/innen (Gaudillière und Rheinberger, 2004). Das *Human Genome Project* repräsentiert mit seinem Anspruch auf Vollständigkeit bei der Entschlüsselung des menschlichen Genoms im Stile der *Big Science* ein wissenschaftliches Großprojekt, wie er auch im *Human Brain Project* einen vergleichbaren Ausdruck findet (Mittra, 2016b).

(vor allem das Blut) oder Gewebeproben, die sich auf ihre mikroskopische biochemische Zusammensetzung untersuchen ließen (Gisler, 2011, S. 142).[9] Mit der Molekularisierung der *Life Sciences* allerdings verschob sich die Bedeutung des Biomarkers, der in der Folge nicht mehr aus dem Körper extrahiert wurde, sondern mit bestimmten Strukturen der DNA, sog. Genexpressionen, assoziiert wird. Das Verständnis von Krankheit und Gesundheit verschob sich ebenfalls auf eine vielschichtige, makromolekulare Gemengelage und bewegte sich stetig vom akuten Gesundheitsproblem eines Individuums hin zu einem latenten Risikospektrum, das sich statistisch auf gesamte Populationen übertragen lässt (Sharon, 2014, S. 114ff.). Auf diese Art und Weise verdrängte ein biotechnologischer Zugriff auf die molekulare Welt den chemischen, der lange Zeit die dominanten Körper- und Krankheitsbilder lieferte.

Die gegenwärtig verwendeten Biomarker stellen Genexpressionen dar, die auf der Grundlage statistischer Wahrscheinlichkeiten als Risiken für bestimmte Krankheitsausprägungen verstanden werden. Insbesondere komplexe Krankheitsbilder wie Krebs, Alzheimer oder Morbus Crohn, bei denen nicht ein monokausaler Ursache-Wirkungs-Schluss gezogen werden kann, sondern ein vielschichtiges Geflecht als Multifaktorenmodell vorliegt, führten wohl überwiegend zum Aufschwung des molekularbiologischen Denkens in der Biomedizin (ebd.). Gesundheitsrisiken können so populationsbasiert errechnet und Risikopatient/innen durch genetische Testverfahren ausgemacht werden, die anschließend für bestimmte Präventionsmaßnahmen gewonnen werden können (ebd., S. 115). Darüber hinaus sind durch die Biotechnologie und Biopharmaka wie monoklonale Antikörper wirksame Interventionen bei einer Vielzahl an Erkrankungen entstanden. Mithilfe der molekulargenetischen Grundlagenforschung versprach man sich, das Gen zu finden, das eine bestimmte Krankheit auslöst. Der Blick direkt in die DNA versprach höchste Objektivität, Naturwissenschaftlichkeit und Glaubwürdigkeit, die weit über die Fähigkeiten der organischen Chemie hinausgingen.

Mit der Molekularisierung der Biomedizin entwickelte sich somit das Körperbild einer Assemblage, d.h. der Körper erscheint in eine Vielzahl von „Betrachtungsebenen aufgelöst" (Michael, 2011, S. 65). Das molare Körperbild aus Zeiten

9 Als besonders eindrückliches Beispiel hierfür gilt der handelsübliche Schwangerschaftstest, der im Urin das hCG Hormon (humanes Choriongonadotropin) misst. Der sog. Schnelltest, der bestimmte Stoffe in Blut oder Urin nachweist, gilt für dieses Paradigma als besonders repräsentativ. Ein weiteres Beispiel, bei dem das Schlüssel-Schloss-Prinzip besonders deutlich wird, bildet etwa die Forschung nach Wirkstoffen, mithilfe dessen sich Patient/innen das Rauchen abgewöhnen können: Ausgehend von den Nikotinrezeptoren im Gehirn suchte man nach Stoffen, die diese belegen, sodass Nikotin-Moleküle keinen Anschluss finden und ihre Wirkung nicht entfalten können. Dieser war mit dem sog. Cytisin gefunden (Wehling, 2011, S. 1080).

des *clinical gaze* bestand in der Vorstellung eines ganzheitlichen, in sich geschlossenen Systems und wurde durch einen partikulär aufgebauten Körper ersetzt, das sich aus verschiedenen Teilsystemen unterschiedlicher Komplexitätsgrade zusammensetzt (ebd., S. 118). Entsprechend der Präideen von Einheitswissenschaft und Hierarchie der Wissenschaften (vgl. 5.2) lassen sich wissenschaftliche Disziplinen entsprechend ihrer Betrachtungsebene und Probembezug den verschiedenen Auflösungsebenen zuweisen. Interdisziplinäre Zusammenarbeit wird in diesem Sinne als Übersetzung bzw. Extrapolation zwischen den Ebenen verstanden, eine Präidee, die insbesondere in der Arzneimittelentwicklung vorherrscht (vgl. 3.3). Medizinische Forschung, Behandlung und Gesundheitswissenschaften wurden so im Verlauf noch stärker an naturwissenschaftliche Grundlagenkenntnisse gebunden, während naturwissenschaftliche Forschung und klinische Praxis in der Folge immer weiter auseinanderrückten (Egloff et al., 2011). Insbesondere zu den grundlegenden Naturwissenschaften Physik, Biologie und Chemie bestehen in der Praxis kaum noch Anbindungen, obwohl deren Wissensbestände noch immer Teil der Medizinausbildung sind.

Der Graben zwischen diesen epistemischen Welten von Naturwissenschaften und Biomedizin wird in gesundheits- und wissenschaftspolitischen Diskursen verhandelt. Insbesondere die Qualität des Wissenstransfers zwischen *bench* und *bedside* (synonym für Grundlagenforschung und klinische Anwendung) wird dabei problematisiert, was das Paradigma der translationalen Medizin verändern möchte (Coller, 2008). Den empirischen Analysen zufolge, die diesem Buch zugrunde liegen, sind diese Bemühungen allerdings erschwert, denn die Übersetzungsschwierigkeiten ergeben sich nicht etwa aus der Natur der Sache, als die sie häufig im Diskurs reifiziert werden. Die molekulare Welt selbst stellt eine *boundary category* dar, an der sich zahlreiche disziplinäre Kollektive mit unterschiedlichen epistemischen, technischen, sozialen, wirtschaftlichen und politischen Prämissen treffen. Diese befinden sich in Abgrenzung zueinander in der Aushandlung von Ressourcen und eine Übersetzung zwischen den Wissensbeständen ist nicht möglich, sofern diese in Abgrenzung zueinander konstituiert sind. Medizinisches und insbesondere chemisches Wissen sind durch das Verhältnis einer Arbeitsteilung charakterisiert, die nach wie vor im Wissenschaftsverständnis von Ärzt/innen wie Chemiker/innen vorherrscht und sich in dem fast schon instinktiven Verweis molekularer Basiskonzepte wie der Chiralität aus dem Wissensschatz der Medizin zeigt:

> *Lang: welche Rolle spielt Chiralität in Ihrer Disziplin?*
> *Medizin-Doktorandin Ali-Zadeh: Nein, nicht dass ich wüsste (2) obwohl (1) ja gut, wir machen ja ne Kooperation (1) auch wieder mit den Chemikern, die uns ein Medikament herstellen, das es eigentlich nicht mehr gibt. Und da ist es auch so, dass (1) nicht alle Enantiomere davon biologisch WIRKsam sind. Aber da ER des herstellt*

[lacht] hab ich keine Ahnung, welche da jetzt genau-also von demher spielt es glaube ich schon 'ne Rolle. […] Also bei Medikamenten auf jeden Fall (1) aber sonst (1) ehrlich gesagt (1) in der klinischen Chemie hab ich's auch NIEMALS mehr gehört (6) Nein, ich glaube ehrlich gesagt, dass es gar nicht SO 'ne große Rolle SPIELT also (3) es is halt (1) mir fällt jetzt wirklich nichts ein wo Chiralität im Alltag wirklich wichtig wäre.

Diese Präidee einer Arbeitsteilung, die sich hier in der Fokussierungsmetapher eines Chemikers, der den klinischen Forschungsprozess als Zulieferer unterstützt, manifestiert, ist in den Narrativen angehender wie ausgebildeter Ärzt/innen in Forschung wie Praxis omnipräsent. Die Annahme, dass medizinische Forschung sich zur naturwissenschaftlichen im Sinne arbeitsteilig getrennter Sphären verhält, dient der Wissensorganisation im Feld. Das Beispiel der Chiralität zeigt dabei, dass Student/innen der Medizin bereits früh ein arbeitsteiliges Denken einüben und festigen, indem sie zu unterscheiden beginnen, welche Aspekte, Theorien, Konzepte, Praktiken zu den eigenen bzw. fremden Wissensbeständen zählen. Diese ein- und ausgrenzende Strategie im Umgang mit fachfremden Wissensinhalten und Praktiken ermöglicht zum einen ein gewisses Maß an Handlungsfähigkeit, denn das Wissen, das hypothetisch medizinisch relevant sein könnte, ist unbegrenzt. Die Grenzarbeit zwischen Medizin und Naturwissenschaften, im Rahmen deren laufend die Grenzen neu festgelegt werden, was Mediziner/innen an naturwissenschaftlichem Basiswissen wissen müssen, dient dabei dem Erhalt einer medizinischen Handlungsfähigkeit. Die Arbeitsteilung und Grenzen der Zuständigkeit werden von medizinischer Seite aus nach Möglichkeit verteidigt um die Handlungsfähigkeit angesichts eines sonst drohenden indefiniten Regresses gewahrt.

Der Modus der Arbeitsteilung, der konstitutiv für das Selbstverständnis der befragten Ärzt/innen ist, impliziert eine geschlossene Abtrennung von den Naturwissenschaften auf epistemischem, praktischem, ästhetischem und normativem Wege. Die normativen Aussagen kreisen stets um die Frage: Was muss man wissen und was nicht? Mediziner/innen verstehen den Kosmos der Medizin als ein in seiner Gänze nicht unüberschaubares Makrogebilde ohne klaren Anfang und Ende, das jedoch ordnungsschaffende Strukturen aufweist. Klare Strukturen bilden etwa die Fachbereiche und Subdisziplinen der klinischen Praxis sowie spezifische Zuständigkeitsbereiche in der Forschung und es herrscht ein ausgeprägtes Hierarchiebewusstsein (Coller, 2008). Praktische Tätigkeiten und Wissensebenen sind funktional differenziert, die Grenzen des jeweiligen Zuständigkeitsbereiches implizit bekannt und werden nach Möglichkeit nicht übertreten. Der Fokus liegt auf der Anwendung extern generierten Wissens, das Menschen auf individueller sowie kollektiver Ebene helfen soll. Den Narrativen der Ärzt/innen zufolge bauen dabei die Wissensebenen von Naturwissenschaften und Medizin konsekutiv aufeinander auf und wenn ein Forschungsprozess die einzelnen Stufen erfolg-

reich abschreitet, wird der Gesamtprozess erfolgreich sein. Die Chiralität wird ebenfalls ausschließlich im Sinne dieses Prinzips verhandelt. Sie wird als Eigenschaft klar umrissen und einer Disziplin, der generalisierten Chemie, zugeschrieben. Abstraktionen und Übertragungen des Prinzips auf andere wissenschaftliche Fragestellungen als die Arzneimittelentwicklung fallen ihnen erheblich schwerer als den Vertreter/innen anderer Disziplinen, die etwa einen Universalismus der Natur postulieren.

Sämtliche Interview-Partner/innen bewerten die im Medizinstudium vermittelten naturwissenschaftlichen Grundlagen als äußerst rudimentär. Die Vermittlung chemischer Konzepte wie der Chiralität wird als stark vereinfacht und auf unmittelbar medizinbezogene Probleme reduziert wahrgenommen. Daraus speist sich ein hierarchisches Verhältnis, das bei den Medizinstudierenden in Ablehnung und Unwillen gegenüber chemischem Wissen resultiert. Die Qualität chemischer Inhalte im Medizinstudium weicht deutlich von regulären, chemischen Wissens ab, das den Chemiestudent/innen vermittelt wird, sodass niemals eine ebenbürtige Expertise erreicht werden kann und man auf eine spätere Arbeitsteilung bauen muss. Die bereits zitierte Doktorandin drückt es folgendermaßen aus:

> *Seit Februar mache [ich] jetzt meine Doktorarbeit. Ich mache dafür ein Freisemester um halt einfach in den experimentellen Laboralltag reinzukommen, weil als Mediziner hat man da ja nicht SO VIEL Vorerfahrung außer ein bisschen Biochemie und so Praktika wo du dir Acetat auf den Laborkittel kippst und dann sagst: „Oops, der löst sich auf!"*

Diesen Eindruck eines erheblichen Qualitätsgefälles in den fachspezifischen Chemiegrundlagen bestätigen auch meine teilnehmenden Beobachtungen im Chemiepraktikum für Student/innen der Humanmedizin. Die Chiralität als Konzept bzw. Gegenstand gilt dort nur ein weiterer lästiger, chemischer Aspekt, der mit geringer intrinsischer Motivation aufgenommen wird: „[stöhnt] *jetzt gibt es da auch noch eine rechte und linke Version von 'nem Molekül, ich kann nicht mehr!*", wie es ein Student beklagt. „*Es ist ein Graus, das ist so kompliziert, ich weiß*" beschwichtigt ihn der Dozent, ein Doktorand der anorganischen Chemie. Es besteht ein permanenter Aushandlungsprozess um den Stellenwert chemischen Wissens, der auf die molekulare Eigenschaft der Chiralität projiziert wird. Manche Professor/innen und auch einige Studierenden beschweren sich darüber, wie wenig Medizinstudierende tatsächlich über die Naturwissenschaften wissen und dass die gängige Lehrpraxis immer mehr dieser Inhalte herauskürzt (Boeck, 2004). Auf der anderen Seite ist allen Akteur/innen bewusst, wie wenig sich diese Inhalte im späteren Berufsleben als präsent erweisen, mit konstantem Verweis auf besagte Arbeitsteilung.

Hinzu kommt die Feststellung, dass sich sämtliche Akteur/innen darüber bewusst sind, dass die naturwissenschaftlichen Wissensbestände der Mediziner/in-

nen denjenigen der Fachdisziplinen selbst unterlegen sind. Medizinstudent/innen werden von Chemiker/innen, Physiker/innen und Biolog/innen ausgebildet, die ihnen stark vereinfachte, im Umfang erheblich reduzierte Inhalte vermitteln, die sie mehr auswendig lernen als verstehen müssen (Germer et al., 2002). Wie die Analysen des Lehrmaterials- und Betriebes zeigen, präsentiert sich dabei die Chemie als essentiell für die Medizinausbildung und es wird der Eindruck einer künftigen Omnipräsenz chemischen Wissens im späteren Berufsfeld vermittelt. Die Chemie hält darüber eine Hierarchie gegenüber der Medizin aufrecht und legt fest, welche chemischen Inhalte Teil des Medizinstudiums sind. Chemiker/innen portionieren und teilen das Wissen zu, sie haben den Überblick darüber, wie Mediziner/innen denken und wollen deren Einstellung zur Chemie beeinflussen. Dies geschieht etwa über die Inszenierung chemischer Basiskonzepte wie der Chiralität, die als Brücke zwischen Chemie und medizinischem Fachwissen verhandelt wird. Die Lehre (Vorlesung sowie Praktika) werten die Chiralität für die Medizin auf, es wird der Eindruck einer künftigen Omnipräsenz[10] und Relevanz vermittelt. Das zitierte Vorwort eines Chemielehrbuches für Medizinstudent/innen enthält die zentralen Narrative, die sich auch in der Interviewstudie und den Beobachtungen im Feld widerspiegeln:

> Für viele Schulabgänger bzw. Studienanfänger stellt sich die Chemie als Hexerei dar. Chemiker scheinen neue Stoffe nach denselben geheimnisvollen Prinzipien herzustellen, wie Zauberer Hasen aus dem Zylinder hervorholen. Da sich Studierende der Medizin und Zahnmedizin gleich zu Beginn ihres Studiums mit den naturwissenschaftlichen Fächern auseinandersetzen müssen, weil Kenntnisse der Chemie als Basis für das Erlernen anderer vorklinischer und klinischer Fächer, vor allem der Biochemie, aber auch der Toxikologie und Pharmakologie, unabdingbar sind, führt dies nicht selten zu Frustrationen. Viele Studierende überstehen einen Chemie-[…]kurs nur, indem sie Grundlagen wie mathematische Gleichungen auswendig lernen. Meine Absicht ist es, Sie zu überzeugen dies NICHT zu tun! Verlange Sie von sich selbst, von diesem Buch sowie von ihren Studienbetreuern Erklärungen zum „WAS und WARUM" in der Chemie. Mit anderen Worten: Wenn Sie die tieferen Ursachen und Zusammenhänge kritisch hinterfragen und dann auch verstanden haben, anstatt alles einfach auswendig zu lernen, werden Sie schnell bemerken, dass Sie sich das Leben und Lernen wesentlich erleichtern (Margaretha, 2002, S. v.).

Die in diesen Narrativen abgewertete epistemische Praxis des Auswendiglernens hat allerdings einen nachhaltigen Lerneffekt: Wie sich in den Interviews mit den

10 In dem beobachteten Laborpraktikum nimmt die Stereochemie einen großen Raum ein (3 von 10 Terminen im Laborpraktikum der Human- und Zahnmedizin sowie 2 von 5 Terminen in der Veterinärmedizin sind chiralen Strukturen gewidmet).

befragten Ärzt/innen verschiedener Altersstufe offenbart, sind selbst nach vielen Jahren die Lehrbuchdefinitionen zur Chiralität und anderer chemischer Inhalte abrufbar, selbst wenn diese Begriffe im jahrelangen Berufsalltag so gut wie keine Rolle spielen. So wird auch bei dem folgendem Vertreter der Radiologen im Zitat deutlich, dass die Beschäftigung mit den Naturwissenschaften für das Medizinstudium zwar konstitutiv ist, allerdings als extern und außermedizinisches wahrgenommen wird. Die naturwissenschaftlichen Grundlagen machen das Studium schwieriger, dienen aber auch aufgrund von Wartesemesterregelungen als Einstiegshilfe in das Medizinstudium, falls die Studienzulassung nicht direkt möglich ist.

Lang: Was verstehst du denn unter Chiralität?
Tartini: CHIRALITÄT Hände [lacht] da war irgendwas [lacht] vor langer Zeit [lacht] Chemie, oder?
Lang: Ja erzähl mal
Tartini: Na ja, ich mein das ist die Spiegelbildlichkeit, oder? Von Händen, die sind ja spiegelbildlich und sowas gibt's ja auch bei-wir hatten da so'n STECKmodell. Ich hatte ja auch 'nen Chemiegrundkurs also ich mein [viele Leute wissen] gar nicht, dass so n' Medizinstudium ganz viel beinhaltet, also es fängt an mit Physik des is mir ja dann erlassen worden, weil ich ja vorher Physik hatte. Da wurde mir der Schein anerkannt. Dann Chemie, dann war's Biochemie dann war's also Biochemie, Physiologie, dann auch Psychologie, Anatomie, Histologie also Pathologie und dann eben Rechtsmedizin so in den klinischen Semestern gibt's ja dann auch noch ja dann eben innere Chirurgie Radiologie Strahlentherapie so die kleinen Fächer dann. Jetzt Chiralität, wie g'sagt Spiegelbildlichkeit wir hatten-des hat mich eigentlich schon fasziniert auch wobei Chemie hab ich dann relativ schnell wieder abgelegt [lacht].

Im Gegensatz dazu erweisen sich die praktischen Auseinandersetzungen aus den Chemiepraktika jedoch als völlig vergessen. Es wird deutlich, dass die praxisbezogenen Objektbeziehungen zum Molekularen nicht relevant sind, da diese durch die Wissenshierarchien und Fremdzuweisungen im Feld erschwert bzw. gar nicht aufgebaut werden. Angehende Mediziner/innen lernen nicht, sich mit den Geräten und Stoffen zu identifizieren. Sie sind sich stets darüber bewusst: *„wir machen hier Chemie"*. Die Chemie (stellvertretend für die molekulare Welt) wird nicht als Teil der Medizin verstanden, was zu einer Ablehnung führt, denn das eigene Wissen wird aufgrund der Wissenshierarchien und der Arbeitsteilung mit der Chemie ohnehin niemals vollwertig sein. Wie kommt es nun dazu, dass bei ausgebildeten Ärzt/innen und klinischen Forscher/innen die Chiralität in ihrer Definition noch immer derart präsent ist, die Zuständigkeit für den Umgang mit ihr jedoch völlig externalisiert wird? Dies zeigt sich insbesondere in der Auseinandersetzung mit dem historischen Fall des Thalidomids und der Rolle, die die

molekulare Eigenschaft der Chiralität dabei spielte. Dieser Fall stellt ein Knotenpunkt in der Grenzarbeit zwischen Chemie und Medizin dar, denn es dient als Beispiel für einen Fall, bei dem die etablierte Arbeitsteilung grundlegend und mit dramatischen Folgen versagt hat.

5.2 Das Versagen der Arbeitsteilung im Contergan-Fall

Der Contergan-Fall wird zu den tragischsten und schwerwiegendsten Arzneimittel-[11], Justiz-[12] und Politikskandalen[13] des 20. Jahrhunderts gezählt, denn das teratogene (fruchtschädigende) Thalidomid-Präparat schädigte weltweit etwa 10.000 Neugeborene bzw. tötete viele weitere bereits während der Schwangerschaft. Der Contergan-Fall[14] markierte eine Zäsur in der öffentlichen Wahrnehmung der Pharmabranche und ging mit einem erheblichen Vertrauensverlust in wissenschaftliche Expertise (Steinmetz, 2003) und erhöhter Risikowahrnehmung einher (Luhmann, 2001). Eine Reform des Arzneimittelgesetzes regulierte im Zuge der Contergan-Katastrophe die Zulassung von Arzneimitteln und brachte für die pharmazeutische Industrie Einschränkungen in der Produktzulassung mit sich (Roth, 2007). Insbesondere in der Bundesrepublik Deutschland, Großbritannien und Kanada spinnt sich seit dem Bekanntwerden der Schäden und dem fast zehn Jahre andauernden Gerichtsverfahren gegen den Pharmaproduzenten Grünenthal seit den 1960er Jahren ein dichter Diskurs (Kirk, 1999). Die Aktivitäten und Stellungnahmen von Betroffenenverbänden, aus dem Gesundheitswesen, Pharmabranche, Elternvereinigungen, Journalist/innen, Politiker/innen und etlichen weiteren Beteiligten wurden bereits ausführlich diskursanalytisch untersucht (Freitag, 2005). Bis heute steht in diesen Diskursen die Schuldfrage im Mittelpunkt; ob und wie die Katastrophe hätte verhindert werden können und wie die Firma Grünenthal sich zu dem Fall verhalten sollte (Roth, 2007).

Auch an den Schnittstellen zwischen chemischen Wissenschaften und Biomedizin hat sich ebenfalls ein Diskurs um den Contergan-Fall etabliert, der allerdings von diesen öffentlichen und juristischen Debatten eher unabhängig geführt wird. Während die Chiralität neben anderen molekularen Eigenschaften des Thalidomids in letzteren kaum Beachtung findet, stellt die Chiralität des Thalidomids einen markanten Grenzstein in der Grenzarbeit zwischen Biomedizin

11 (Lenhard-Schramm und Großbölting, 2017)

12 (Dierichs, 1990)

13 (Daemmrich, 2002)

14 Im Diskurs wird der Contergan-Fall auch als „Contergan-Skandal" (Gemballa, 1993), „Contergan-Affäre" (Steinmetz, 2003), „Contergan-Tragödie" (Jungmayr, 2012), „Contergan-Katastrophe" (Zichner, 2005) oder „Contergan-Bombe" (Schwerin, 2009) bezeichnet.

und Chemie dar. Die Spiegelisomerie des Thalidomid-Moleküls schlägt sich in erheblichem Maße auf das bioaktive Wirkungsspektrum des Stoffes nieder und entscheidet u.a. auch über die fruchtschädigende Eigenschaft des Stoffes (Knoche und Blaschke, 1994). In den Diskursen zwischen Chemie und Medizin steht dabei die Aushandlung von Grenzen der Zuständigkeit im Zentrum und welche Rolle verschiedene Disziplinen im Zusammenhang mit Arzneimittelsicherheit spielen. Es entsteht dabei auf der Seite der Medizin eine Spannung, denn einerseits sind Mediziner/innen, wie im vergangenen Abschnitt angeführt, auf eine gewisse Arbeitsteilung mit Naturwissenschaftler/innen angewiesen, um überhaupt angesichts der sonst ausufernden Wissensbestände handlungsfähig zu bleiben. Andererseits steht der Contergan-Fall für ein Beispiel, bei dem die Arbeitsteilung mit schwerwiegenden Konsequenzen versagt hat, weswegen das Fallbeispiel im Rahmen der Grenzarbeit zwischen Chemie und Medizin immer wieder Gegenstand ist.

Darüber hinaus war auch die Geschichte des Thalidomids als Arzneistoffs mit der Marktrücknahme von Contergan 1961 nicht zu Ende, denn Thalidomid-Präparate sind bis heute im Einsatz – allerdings nicht als Schlafmittel für Schwangere, sondern als Lepra-Medikament oder als Chemotherapie bei Leukämie und es werden laufend neue Anwendungsbereiche erschlossen (Kim und Scialli, 2011). Das Wirkungsspektrum des Thalidomids und seiner Derivate sind von der stereochemischen Struktur abhängig und verschiedene Enantiomere können völlig unterschiedlich im Körper metabolisieren und wirken (Bützer, 2009). Mediziner/innen kennen die Chiralität aus diesem Grund vor allem im Zusammenhang mit Contergan, denn in der medizinischen Ausbildung dient das Molekül als paradigmatisches Beispiel für diese sonst eher unscheinbare chemische Eigenschaft und dient zugleich als Legitimation dafür, warum auch angehende Ärzt/innen der Human-, Zahn- und Veterinärmedizin zumindest über chemische Grundkenntnisse verfügen sollten. Die naturwissenschaftlichen Grundlagen genießen im Medizinstudium erstens keine sonderliche Beliebtheit (Barr et al., 2010) und zweitens wird ihre eigentliche Notwendigkeit in bildungspolitischen Diskursen zur Gestaltung und Schwerpunktsetzung des Medizin-Curriculums immer wieder infrage gestellt bzw. verteidigt (Feuerstein, 2011). Es folgt ein historischer Überblick über die beiden Diskursstränge zum Contergan-Fall und welche Rolle sie jeweils bis heute für die Grenzarbeit zwischen Chemie und Biomedizin spielen.

Der Thalidomid-Wirkstoff kam 1957 mit den Arzneimitteln Contergan und Contergan forte[15] nach aus heutiger Sicht mangelhaften, da nicht rechtlich

15 Andere Handelsnamen lauteten etwa Softenon und Doriden; eine übersichtliche Aufzählung der Produktnamen und Vertriebsländer findet sich bei (Bützer, 2009, S. 5) und (Kirk, 1999, S. 55).

vorgeschriebenen, toxikologischen Studien in Deutschland, der Schweiz und 44 anderen Ländern als Einschlafhilfe und Medikament gegen Morgenübelkeit für Schwangere auf den Markt (Ridings, 2013, S. 36). Das Medikament wurde von der Herstellerfirma Grünenthal mit viel Werbeaufwand als „völlig harmlos" vermarktet (Kessel, 2013), insbesondere da bis heute keine letale Dosis nachgewiesen wurde und Suizide selbst bei gleichzeitiger Einnahme von 144 Tabletten nicht möglich sind (Neuhaus und Ibe, 1960). Dass Thalidomid im Gegensatz zu den damals umstrittenen Barbiturat-Präparaten weder süchtig macht noch Überdosierungen direkt lebensgefährlich sind, wirkte sich ebenfalls positiv auf die Verkaufszahlen aus (Wilsmann und Zwingenberger, 1996, S.66). Entsprechend wurde das Medikament in vielen Ländern zum Bestseller, da die „Ungiftigkeit" von Arzneimitteln angesichts der besorgniserregenden, tabletteninduzierten Suizidrate positiv bewertet wurde (Kirk, 1999, S. 53). Die Entwicklung von Thalidomid-Präparaten gilt in der Pharmaziegeschichte als paradigmatisches Beispiel für eine *magic bullet drug* zur Zeit der *golden age of drug discovery*, einer niedermolekularen, chemischen Verbindung, die in der Entwicklung aufgrund eines spektakulären *serendipity moments* (vgl. 3.2) nur geringe Kosten verursacht und dank der schnellen Marktreife (aufgrund einer scheinbar günstigen Pharmakovigilanz) zu enormen Umsätzen geführt hat (Ruthenberg, 2016).

1954 soll der Mediziner und Chemiker Heinrich Mückter in seiner Funktion als Laborchef bei der Firma Grünenthal (Standort Stollberg bei Aachen) zusammen mit seinen Kollegen Herbert Keller und Wilhelm Kunz das Molekül Thalidomid erstmalig als Produkt eines glücklichen Zufalls synthetisiert haben (Kunz et al., 1956). Als sie das Molekül an Versuchstieren testeten, stellten sie bei diesen eine sedierende Wirkung fest (Kirk, 1999, S. 52). Klinische Studien, die auf die Tierversuche an Hamstern, Ratten und Mäusen folgten, erbrachten die unterschiedlichsten Ergebnisse in Bezug auf Verträglichkeit und Nebenwirkungen (Ruthenberg, 2016, S. 59). So wurde in der klinischen Pilotstudie an 20 Patienten, denen eine sehr hohe Dosis verabreicht wurde, Verdauungsprobleme, Ohrensausen und Gliederzittern festgestellt (Ridings, 2013, S. 36f.). Andere Ärzt/innen[16] in Deutschland und der Schweiz (die Grünenthal mit gratis Produktmustern ausgestattet hatte) stellten abweichende Symptome fest bzw. bestätigten die gute Verträglichkeit, da kein *hang over*-Effekt zu beobachten war, die Leberwerte im normalen Bereich blieben und das Suchtrisiko als äußerst gering bewertet wurde (ebd.). Insgesamt wurde der Thalidomidwirkstoff (vorgeblich) an 20.000 Versuchspersonen getestet, bevor es auf den Markt kam. Aus dieser Population gingen später zehn Kinder mit thalidomidinduzierten Fehlbildungen hervor (Luhmann, 2001, S. 68).

16 Siehe zur Übersicht der klinischen Studien zu Contergan in den 1950er Jahren (Knightley et al., 1979, S. 257ff.).

Als Contergan in Deutschland 1957 bundesweit in sämtlichen Apotheken und medizinischen Einrichtungen rezeptfrei erhältlich war, geizte Chemie Grünenthal nicht mit Werbemaßnahmen, die sich gezielt an Ärzt/innen und Apotheker/innen richteten, um das neuartige Schlafmittel speziell im gynäkologischen und pädiatrischen Kontext als marktführendes Arzneimittel zu etablieren (Ruthenberg, 2016, S. 57). Aufgrund der propagierten „völligen Ungiftigkeit" avancierte das Medikament schon bald zu *„West-Gemany's baby-sitter"* (Taussig, 1962, S. 1109), da viele Eltern es den ärztlichen Empfehlungen entsprechend ihren Kindern und Säuglingen verabreichten (ebd.). Als Contergan gezielt bei Morgenübelkeit in der Schwangerschaft Linderung versprach, wurde es zudem speziell an Schwangere vermarktet und dispensiert. Im Jahr 1961 wurden die höchsten Verkaufszahlen erzielt, als Contergan und Contergan forte monatlich etwa eine Million D-Mark umsetzten.[17] Der Pharmakonzern Grünenthal verfügte mit den thalidomidhaltigen Präparaten über große Marktanteile und war zugleich in hohem Maße von dessen Erfolg abhängig, da Contergan etwa die Hälfte des jährlichen Gesamtumsatzes des Unternehmens einbrachte (ebd.: 56).

Zugleich kamen bereits um 1960 die ersten medizinischen Auffälligkeiten ans Licht, die mit Contergan in Zusammenhang gebracht wurden. Zu Beginn des Jahres 1960 wurde insbesondere bei älteren Patient/innen, die die Einschlafhilfe konsumiert hatten, eine neuartige Form der Polyneuritis bemerkt (Frenkel, 1961). Es handelte sich um eine Nervenschädigung der Extremitäten, bei den sich in Händen, Füßen und Beinen Kribbeln sowie motorische Schwierigkeiten bis zum Gefühlsverlust bemerkbar machten (Taussig, 1962, S. 1109). Bis Ende des Jahres 1960 sollen bei der Firma 1.600 Berichte über diese Nebenwirkungen eingegangen sein, bei denen es sich teilweise um ernste Fälle handelte (Sjöström und Nilsson, 1972). Als vermehrt Anfragen besorgter Ärzt/innen bei Grünenthal eingingen, wurden diese zunächst teilweise zu widerlegen versucht oder ignoriert (Dierichs, 1990, S. 64f.). Darüber hinaus wurden gar Fälle beobachtet, in denen Vetreter/innen der Firma Grünenthal gezielt Patient/innen in Kliniken aufsuchten um mit Geld und kostenlosen Behandlungen deren Schweigen zu erkaufen (ebd., S. 65). Die Firma Grünenthal bemühte sich zudem, Positivberichte über Behandlungserfolge zu verbreiten (Kirk, 1999, S. 63).

In der Folge wurden ab 1958 in der Bundesrepublik und etlichen weiteren Ländern bei Neugeborenen immer häufiger Fälle sog. Phokomelie (Robbengliedrigkeit) beobachtet, bei denen es sich ansonsten um eine äußerst seltene Form von Fehlbildungen der Gliedmaßen (Dysmeliesyndrom) handelt. Diese Fehlbildungen an Gliedmaßen und inneren Organen wurden zudem früh mit Grünenthals Thalidomid-Präparaten in Verbindung gebracht (Taussig, 1962). Dieses Dysmelie-Syndrom trat erst ab 1958 überhaupt in nennenswerter Zahl auf (genau

17 Eine ausführliche Tabelle zu den Verkaufszahlen siehe bei (Kirk, 1999, S. 57).

9 Monate nach Markteinführung) und binnen der vierjährigen Verkaufszeit kamen weltweit etwa 10.000 Kinder mit thalidomidinduzierten, körperlichen Schwerstbehinderungen zur Welt (Enns et al., 2009). Bis zum Sommer 1957 häuften sich die Anfragen aus dem In- und Ausland von Ärzt/innen, Apotheker/innen und Forscher/innen derart, dass Grünenthal die vermeidende Taktik, die es bis dato an den Tag gelegt hatte, änderte. Wie im späteren Gerichtsverfahren deutlich wurde, lagen Grünenthal bis zum Jahre 1960 etwa 1000 solcher Anfragen vor, die jedoch bewusst geheim gehalten wurden (Freitag, 2005, S. 34).

Widukind Lenz, ein Hamburger Kinderarzt, wurde aufgrund seiner eigenen Beobachtungen in der Praxis sowie einem Gespräch mit den Kollegen Wilhelm Kosenow und Rudolf Pfeiffer der Zusammenhang zwischen den Phokomelie-Fällen und Contergan-Einnahmen von werdenden Müttern bewusst (Lenz, 1988). Zunächst zögerlich brachte er diesen Verdacht, der sich in Gesprächen mit Müttern und weitere Kolleg/innen verdichtete, an die Öffentlichkeit, zunächst jedoch ohne den Produktnamen zu nennen (Daemmrich, 2002, S. 144). Fast zeitgleich veröffentlichte der australische Mediziner William McBride einen Artikel, der dieselbe Hypothese äußerte, jedoch war er in der Produktnennung deutlicher (McBride, 1961). Am 26. November 1961 wurde schließlich der Verdacht, dass die gehäuften Phokomeliefälle mit dem Arzneimittel Contergan in Verbindung stünden, in der *Welt am Sonntag* unter dem Titel *„Mißgeburten durch Tabletten? Alarmierender Verdacht eines Arztes gegen ein weitverbreitetes Medikament“* publik gemacht (Welt am Sonntag, 1961). Auch wenn hier Contergan nicht namentlich genannt wurde, schien doch allen klar zu sein, von welchem Medikament die Rede war, denn noch am selben Tage erfolgte die Marktrücknahme (Kirk, 1999, S. 83ff.).

Der anschließende, fast zehn Jahre währende Gerichtsprozess gegen die Herstellerfirma Grünenthal stellt ein eigenes Feld dar (Schütze, 1997), das hier nicht in Gänze rekapituliert werden soll. Als wichtiges Fazit lässt sich jedoch in wissenssoziologischer Perspektive feststellen, wie unerbittlich in diesem Prozess und der medialen Repräsentation und Inszenierung über die Bedeutung wissenschaftlicher Beweise gestritten wurde (Steinmetz, 2003). Der Begriff des wissenschaftlichen Beweises und die Aussagekraft wissenschaftlicher Studien wurden in der öffentlichen Wahrnehmung nachhaltig erschüttert. Fakten und Tatsachen, Behauptungen, Hypothesen und Vermutungen zum teratogenen Mechanismus des Thalidomid-Moleküls wurden darüber hinaus je nach Interessenslage umgedeutet, interpretiert, abgelehnt oder angenommen (Knightley et al., 1979). In den Diskussionen und Gerichtsakten schlugen sich Deutungskämpfe vor dem Hintergrund der Wahrung finanzieller Interessen vonseiten Grünenthals und Opfervertreter/innen nieder (Gemballa, 1993, S. 161ff.). Darüber hinaus waren Ansehen und Glaubwürdigkeit der pharmazeutischen Industrie ebenso bedroht (Sjöström und Nilsson, 1972) wie das der politischen Vertreter/innen (insbesondere das Gesundheitsministerium Elisabeth Schwarzhaupts) (Steinmetz, 2003, S. 210).

Zudem ist an dieser Stelle anzumerken, dass von Anfang an versucht wurde, den Kreis der offiziell Geschädigten möglichst klein zu halten, indem die Behinderungen vor allem an Fehlbildungen der Gliedmaßen festgemacht wurden und andere, wie etwa bestimmte Fehlbildungen der inneren Organe, aus der Definition der „Contergan-Geschädigten" ausgeklammert wurden (Freitag, 2005, S. 54ff.). Der Prozess wurde im Dezember 1970 mit einem Freispruch wegen geringer Schuld abgeschlossen. Auch wenn die Firma Grünenthal den Prozess fast bist zur Verjährung herausgezögert hatte, sich wenig kooperativ gezeigt hatte, Akten vernichtet und wissenschaftliche Ergebnisse zu relativieren versucht hatte, wurde ihr dennoch zugute gehalten, nicht wesentlich anders gehandelt zu haben als es zur damaligen Zeit in der pharmazeutischen Industrie Standard gewesen war und nicht gegen geltendes Recht verstoßen zu haben (Kirk, 1999, S. 96). Mit der Einrichtung einer Stiftung für die Contergan-Geschädigten mit einem Stiftungsvolumen von 100 Millionen D-Mark schien Grünenthal ein großes Opfer zu bringen. Doch bis heute wird kontrovers über Entschädigungsmaßahmen diskutiert und weitere Forderungen reißen angesichts der immensen Langzeitpflege- und Therapiekosten der heute ca. 2400 teils schwerstbehinderten contergangeschädigten Menschen nicht ab (Enns et al., 2009).

Der Cotergan-Fall ging als erster gravierender Arzneimittelskandal in die Geschichte ein und prägte die junge Bundesrepublik Deutschland nachhaltig (Schwerin, 2009). Das Vertrauen der Menschen in die Wissenschaft und deren Fortschritt schwand und das Verhältnis von Wissenschaft, Politik und Gesellschaft erlebte einen Wandel (Luhmann, 2001, S. 76ff.). Die Ausmaße der Contergan-Katastrophe spielen im kollektiven Gedächtnis eine erhebliche Rolle, etwa in Gestalt der charakteristischen körperlichen Merkmale der sog. Contergan-Kinder (Freitag, 2005). Darüber hinaus hat der Contergan-Fall das Gefühl der Ohnmacht in der Öffentlichkeit angesichts einer Verquickung zwischen profitgierigen Pharmariesen, einer unfähigen Justiz und politischer Vertreter/innen, die viel zu spät eingreifen, um die Bevölkerung zu schützen (Steinmetz, 2003). Die Schuldfrage ist in den öffentlichen und politischen Debatten bis heute präsent. Ärzt/innen wie Widukind Lenz oder Frances Kelsey, die als Verantwortliche der US-amerikanischen *Food and Drug Administration* (FDA) die Marktzulassung von thalidomidhaltigen Präparaten in den USA trotz allen Widerstandes verzögern konnte, gelten als Held/innen im Diskurs (Daemmrich, 2002).

Während die Aufarbeitung des Contergan-Falls in der Öffentlichkeit sich überwiegend mit dieser Schuldfrage beschäftigte und mit der Frage, wie mit den Tausenden, teils schwerbehinderten Kindern umzugehen sei, beschäftigten sich Chemiker/innen, Pharmakolog/innen und klinische Forscher/innen mit den molekularen Mechanismen der Teratogenität und wie solche Fälle in Zukunft zu vermeiden seien. Als direkte Folge des Contergan-Falles wurde das Arzneimittel-Gesetz von 1961 (das ursprünglich nur die Registrierung neuer Arzneimittel vor-

sah und Pharmaka wie Contergan, die bereits zuvor auf dem Markt waren, gar nicht berührte) 1976 vollständig neu formuliert (Stapel, 1988). Neue Vorschriften zur Pharmakovigilanz erforderten zudem flächendeckend neue labortechnische und experimentelle Methoden, sodass diese in Auseinandersetzung mit dem Contergan-Fall einen Innovationsschub erlebten. Zunächst erfolgte zwischen 1961 und 1968 eine Reihe toxikologischer Studien[18] an verschiedenen Tiergattungen, die die teratogene Wirkung in verschiedenen Spezies nachzuweisen sowie besonders sensible Schwangerschaftstage und Dosierungen zu ermitteln versuchten (Fabro und Smith, 1966; Helm, 1966; Schumacher et al., 1968).

Zur selben Zeit wurde in diesen Werken auch zunehmend ein Bezug zur Stereochemie und den Spezifika der beiden Stereoisomere des Thalidomids gezogen (Shealy et al., 1965; Fabro et al., 1965). Es wurde festgestellt, dass sowohl das Racemat als auch die beiden Isomere fruchtschädigend wirken, sich für die S(−)-Form des Thalidomids allerdings ein höherer Grad an Toxizität beobachten lässt als für die R(+)-Form (Fabro et al., 1967). Auch die chemischen, pharmazeutischen und toxikologischen Fachdiskurse kreisten um die Frage, ob und wie der Contargan-Fall hätte verhindert werden können. Die Stereochemie und ihre Rolle in der Arzneimittelwirkung steht dabei häufig im Zentrum. In den 1950er Jahren war die chirale Eigenschaft vieler Arzneistoff-Kandidaten und wie dieser Aspekt sich auf dessen Wirkungsspektrum auswirkt zwar bekannt[19], entsprechende Pharmakovigilanztests war allerdings weder in den Arzneimittelgesetzen vorgeschrieben, noch gängige Praxis der Arzneimittelentwicklung (Roth, 2007). Zumal in den 1960er Jahren die Aufspaltung von racemischen Gemischen in technischer Hinsicht äußerst aufwendig galt, wurde die Berücksichtigung der Stereochemie erst mit Aufkommen leistungsfähiger Flüssig-Chromatografen zur Racematspaltung in den späten 1970er Jahren systematisch berücksichtigt (De Camp, 1989, S. 2).

---

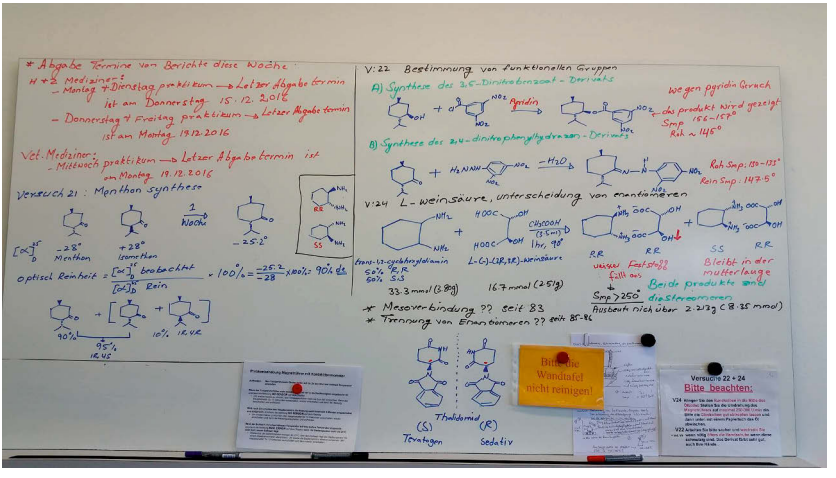
18 Siehe zur historischen Studienlage die Arbeiten von (Knightley et al., 1979, 255-274) und (Freitag, 2005, S. 30-44). Letztere fasst insbesondere auch die zahlreichen pädiatrischen und orthopädischen Untersuchungen zum Phänomen der Phokomelie zusammen und wie in diesem wissenschaftlichen Diskurs durch Ein- und Ausschlusskriterien das sog. Dysmelie-Kind hervorgebracht wurde.

19 Der Zeitraum zwischen den 1880er und den 1930er Jahren wird in der Chemiegeschichte als frühe Hochphase des pharmakologischen Enantiomervergleiches eingestuft (vgl. 2.3). Etliche Naturstoffe, deren Derivate und synthetische Stoffe wurden auf ihrer optische Aktivität hin überprüft und dementsprechend in Bezug auf ihre Metabolisierung und Wirkungsweisen *in vivo* wie *in vitro* hin erforscht (Gal, 2006, S. 18). Arthur Robertson Cushny legte 1926 einem umfassenden Report über diese Studien vor (Cushny, 1926), bei dem er jedoch das Augenmerk eher auf physikalische Eigenschaften und die optische Rotation der Enantiomere legte als die chemischen Strukturformeln, welche er weitestgehend aussparte (Parascandola, 2012).

Die Legitimation dieser (relativ teuren) Laborausstattung in der organischen Chemie (vgl. Abschnitt 2.3) begründete sich in den 1970er Jahren über die Verheerungen des Contergan-Falls, der an einer mangelhaften technischen Ausstattung der Labore festgemacht wurde. Für die pharmazeutische Produktentwicklung ebenso wie für die Arzneimittelsicherheit stellte sich in der Folge die Frage, ob ein reines Enantiomer (ohne den „Ballast" bzw. die „Verunreinigung" eines wirkungslosen zweiten Isomers) nicht die Wirkung eines Arzneimittel potentieren bzw. bei einem schädlichen Enantiomer das Risiko verringern ließe (Ariëns, 1984). Mit weiteren Reformen internationaler Arzneimittelgesetzgebungen zog schließlich die Chiralität Ende der 1980er Jahre in die Vorschriften der Zulassungsverfahren von Pharmazeutika ein (De Camp, 1989). Dies fiel mit mehreren historischen Tendenzen zusammen, die in Kapitel 2 beschrieben werden: dem Ende der *golden age of drug discovery* und dem Beginn der sog. Innovationskrise in der Pharmaindustrie, wobei die Chiralität als zusätzliche, kostspielige Hürde im Zulassungsverfahren und als Innovationshemmnis abgelehnt wurde. Die Chiralität sorgt seither im F&E-Prozess industrieller Arzneimittel für ein erhöhtes Maß an Komplexität, zumal im Rahmen der Pharmakokinetik chiraler Moleküle es dazu kommen kann, dass einzelne Isomere unter bestimmten Bedingungen im Körper in die jeweils andere Form racemisieren, sprich umwandeln können (Meierhofer et al., 2001). Darüber hinaus ermöglichten die neuen Technologien der Racematspaltung auf der anderen Seite der organisch-chemischen Grundlagenforschung einen regelrechten Forschungsboom und die Stereochemie erfreute sich nicht zuletzt ihrer pharmazeutischen Anwendungen großen Zulauf ehe der Trend nach der Jahrtausendwende wieder abebbte, als das Feld als ausgeschöpft galt (vgl. 3.2).

Lang: Wie erklären Sie sich, dass [die Stereochemie in den 1990er Jahren] diese Attraktion hatte?
Prof. Pejačević: Damals hat unser Lehrstuhlinhaber ganze BÜCHER drüber geschrieben und das war natürlich (.) von so fundamentaler Bedeutung, dass es ja irgendwie jeden Menschen fasziniert. Thalido-Thalidomid war nicht SO lange her muss ich sagen. Das ist ja fast in meiner GeneraTION in der das passiert ist und dann kam eben die ganzen Verfahren auf zur stereoselektiven Synthese, zur chiralen Chromatografie zu der Verwendung in der pharmazeutischen Industrie. Und eben die ganze Arzneimittelindustrie (.) hat dann danach auch die Standards verSCHÄRFT wirklich für die Testung von Enantiomeren und auch für den Metabolismus. […] Ich bin da keine Expertin weil ich halt weder Pharmazeut noch Organiker bin aber ich weiß mit Sicherheit, dass das natürlich ein Kanonenschlag war! Danach ist man ja wirklich erst auf das Problem [der Chiralität] aufmerksam geworden durch dieses Thalidomid.

Thalidomidhaltige Präparate waren darüber hinaus nie ganz aus der medizinischen Praxis verschwunden. Bereits 1965, nur vier Jahre nach dem Verkaufsstopp der Grünenthal-Präparate, verschaffte ein Arzt in Israel mit einem übriggebliebenen Arzneimittel auf Thali-domid-Basis einem Lepra-Patienten Linderung. Als der Patient daraufhin nicht nur von einem erholsamen Schlaf berichtete, sondern auch ein deutlicher Rückgang der Lepra-Sympto-me beobachtet werden konnte (Sheskin, 1965), fand das Molekül wieder auf den Markt zurück, allerdings unter verschärften Abgaberegelungen. Thalidomid verfügt über ein sehr vielfältiges Wirkungsspektrum, so wirkt es nicht nur sedativ und teratogen, sondern auch antiinflammatorisch wie im Falle von Lepra und antiangiogenetisch, d.h. es verhindert die Bildung einer Blutzufuhr bei Tumoren wie dem multiplen Myelom, einer Form des Hautkrebses (Teo et al., 2005; Wu et al., 2005). Das Monitoring nach der Zulassung thalidomidhaltiger Präparate bzw. strukturverwandter Derivate fällt heute besonders streng aus, insbesondere bezüglich der Prävention bei Schwangeren (ebd.) Die Auseinandersetzung mit der Chiralität in Pharmazeutik, Biomedizin und Stereochemie war in diesem Sinne zwischen den späten 1970er Jahren und der Jahrtausendwende nachhaltig durch die Suche nach den Ursachen für die Contergan-Katastrophe geprägt.



Diese Fotografie (SL) entstand im Rahmen der teilnehmenden Beobachtungen in den Chemiepraktika für Medizinstudent/innen. Die Tafel zeigt den Versuchsaufbau zu stereochemischen Experimenten, die die Student/innen in einer bestimmten Lehreinheit absolvieren müssen. Thalidomid wird dabei besonders hervorgehoben um die Bedeutung der Chiralität in der medizinischen Praxis zu betonen.

In diesem Zusammenhang wurde wiederholt die implizite, etablierte Arbeitsteilung zwischen Medizin und Naturwissenschaften problematisiert und kriti-

siert, dass innerhalb der biomedizinischen und pharmazeutischen Produktentwicklung zu wenig Kommunikation und Austausch von Wissen zwischen Disziplinen und Feldern vorherrscht (Luhmann, 2001, S. 71ff.). Der Contergan-Fall wurde in der Folge immer wieder als legitimierendes Beispiel für die Forderung nach einem intensiveren interdisziplinären Austausch zwischen Medizin und Naturwissenschaften herangezogen, indem die Verheerungen hervorgehoben wurden, die sog. Übersetzungslücken mit sich führen können. In der Ausbildung angehender Ärzt/innen werden diese regelmäßig mit der Bedeutung chemischer Inhalte im ärztlichen Wissensschatz konfrontiert (vgl. Abb. 5.1). Debatten um den Contergan-Fall kommen im Diskurs i.d.R. dann auf, wenn (vor allem im Zuge der Deakademisierungstendenzen der Medizinausbildung) die Bedeutung chemischer Grundlagenkenntnisse im Medizinstudium infrage gestellt werden.[20] Insbesondere dann, wenn Zweifel an den chemischen Inhalten im Medizinstudium geäußert werden, funktioniert der Verweis auf den Contergan-Fall als intelligible Rechtfertigung.

Der Verweis auf das Versagen der etablierten Arbeitsteilung im Contergan-Fall dient den Feldern der Chemie dazu, ihren Platz im Gefüge der Wissenschaften zu behaupten, den sie insbesondere dadurch bedroht sieht, dass lebenswissenschaftliche Zugriffe auf die molekulare Welt zunehmend dominant werden und diejenigen der organischen Strukturchemie (vor allem vor dem Hintergrund des Paradigmenwechsels vom kleinen zum großen Molekül in der Pharmaindustrie, vgl. Abschnitt 4.1) als nicht mehr zeitgemäß erscheinen lassen. Heute gilt die Chiralität in den Feldern der Medizin (in Bezug auf Arzneistoffe, etwa in der Pharmakologie) als beherrschbar und man geht im Allgemeinen davon aus, dass sich eine Katastrophe wie der Contergan-Fall nicht wiederholen wird. Ärzt/innen vertrauen voll auf Fertigpharmazeutika und ihre eigenen Fähigkeiten in der Verschreibung.

---

20 Die Debatten um den Status der Medizin und der Mediziner/innen-Ausbildung schwanken zwischen der Idee, die Medizin im Gefüge der Naturwissenschaften zu halten und auf der idealtypischen Gegenseite Ärzt/innen zu „Gesundheitsingenieur/innen" und aus der akademischen Landschaft zu lösen, da es sich ohnehin um keine vollwertige Wissenschaft handelt (Biller-Andorno and Roduit, 2016; Feuerstein, 2011). Psychiater Dr. Silcher schätzt die Situation folgendermaßen ein: *„Also die Medizin ist ja an und für sich eine sehr pragmatische Wissenschaft. Ich hatte mal als Studentenvertreter eine Diskussion mit einem Professor, der meinte damals, man müsste eigentlich die Medizin aus der Akademie RAUSnehmen. Also man müsste wieder einen Schritt zurück machen und der Mediziner soll wie ganz am Anfang zu den Metzgern gehen, also so eine LEHRE machen. Weil 99 Prozent der Mediziner interessieren sich nicht für Wissenschaft, sondern für die SACHE und für das Handling von Problemen. Also zwischen eine SAU zu schlachten oder äh richtig zu schlachten und ein Teil von einem Menschen richtig chirurgisch zu entfernen, ist die Nähe (1) eher gegeben als zum Beispiel zwischen einem Chirurgen und einem Psychiater"*.

Auch wenn die Chiralität in der pharmazeutischen Pharmakovigilanzforschung heute der allgemeinen Wahrnehmung nach abschließend erforscht ist und von enantiospezifischen Wirkungsspektren keine negativen Überraschungen mehr erwartet werden, spielt die Chiralität noch immer eine wichtige Rolle im Verhältnis zwischen Chemie und Biomedizin. Die Abgrenzungsdynamiken der beiden Felder treten darin deutlich zutage. Auf der einen Seite lassen sich über die Chiralität (insbesondere des Thalidomid-Moleküls) Brücken schlagen zwischen organischer Chemie und der medizinischen Praxis. Die Relevanz chemischer Inhalte lässt sich ebenso plausibel vermitteln wie die des interdisziplinären Austausches in Zeiten sich hybridisierender Felder und zuspitzender Expertisen. Auf der anderen Seite werden chemische Grundlagen in der Medizinausbildung zunehmend rechtfertigungsbedürftig. Dies zeigt sich auf drei Ebenen: der erwähnten Deakademisierung der ärztlichen Ausbildung in Anbetracht überfüllter Curricula, den ausgelagerten klinischen Laboranalysen, die kaum ein/e Ärzt/in noch selbst anfertigt und dem Trend, dass sich die medizinische Forschung zunehmend in Richtung hybrider, molekularer Lebenswissenschaften bewegt. Organische Chemie und Biomedizin driften in Anbetracht dieser Tendenzen zunehmend auseinander, was insbesondere für die Felder der Chemie ein Abhandenkommen wichtiger etablierter Legitimationsnarrative in der Akquise akademischer Ressourcen bedeutet.

5.3 Reflexionen zum Konzept der translationalen Medizin

Die Felder von Chemie und Biomedizin befinden sich in einem historisch gewachsenen, fluiden Abgrenzungsverhältnis, das permanent ausgehandelt und aktualisiert wird. Dieses Abgrenzungsverhältnis im Sinne einer Arbeitsteilung spiegelt sich auch in den verschiedenen wissenschafts- und forschungspolitischen Trends sowie Innovationsdispositiven des 20. und 21. Jahrhunderts wieder. Da die etablierten Grenzen zwischen Medizin und Naturwissenschaften mit der einheitswissenschaftlichen Präidee einer prinzipiellen Unterscheidung zwischen Grundlagen- und Anwendungsforschung korrespondierten, wurde die Arbeitsteilung zwischen diesen Feldern in der Forschungspolitk des Kalten Krieges auch institutionell verankert (Schauz, 2014a). Dass die Naturwissenschaften die grundlegenden Naturgesetze erforschen, aus denen die Industrie Anwendungen entwickelt, die dann von Mediziner/innen ans Patient/innen-Bett transferiert werden, war lange als Innovationsmodell fest in den Fachidentitäten der beteiligten Kollektive verankert. Ärzt/innen sind sich bis heute bewusst darüber, *„reine Anwender"* zu sein, die in eigener Forschung und Praxis auf externe *„Zuweiser"* von Wissensbeständen, Methoden, Molekülen und Produkten angewiesen sind. Die Präidee der Arbeitsteilung ermöglicht in einem komplexen

Feld ohne klare Grenzen zumindest vage Orientierungspunkte für die Grenzen der eigenen Zuständigkeit. Im Translationsparadigma, das mittlerweile in den Innovationsstrategien zahlreicher anwendungsorientierter biotechnologischer und ingenieurswissenschaftlicher Bereiche etabliert ist, wird die Präidee einer Arbeitsteilung allerdings in jüngster Zeit problematisiert und erfährt eine Disruption (Mittra, 2016c).

Im Zusammenhang mit forschungspolitischen Diskursen um Innovation, Interdisziplinarität, Großprojektforschung und einer verstärkten Zusammenarbeit von Akademie und Privatwirtschaft hat sich in den medizinischen Fachwissenschaften, der internationalen Wissenschaftspolitik sowie den Innovationsdispositiven verschiedener gesundheitsbezogener Industriezweige das Programm der translationalen Medizin etabliert (Westfall et al., 2007). Das forschungspolitische Programm der *translational medicine*, deren Entwicklung und Implementierung zur Mitte der 1990er Jahre ihren Lauf nahmen, übersetzt gewissermaßen die Innovationsdispositive des weiter gefassten *translational turn*[21] in die Felder der Biomedizin (Chai und Shih, 2013). Ausgangspunkt des neuen Paradigmas bildet die Diagnose langwieriger und wenig produktiver Innovationsprozesse der pharmazeutischen und medizintechnologischen Industrie (Mittra, 2016c). Diese werden erstens auf Kommunikationsprobleme aufgrund zu geringer interdisziplinärer Ausrichtung (Ioannidis, 2006) und zweitens auf eine datenbasierte Komplexitätssteigerung[22] zurückgeführt, die den Innovationsprozess technisch behindert (Folkers, 2011). So wird davon ausgegangen, dass insbesondere der enorme Wissenszuwachs in den *Molecular Life Sciences* zu einer Diffusion der Wissensformen und einer Zuspitzung von Expertisen führt, die an den behandlungspraktischen Medizinbetrieb kaum noch anschlussfähig sind (Woolf, 2008).

Das Programm der translationalen Medizin wurde in der Folge entworfen, um die diagnostizierten Übersetzungslücken zwischen Grundlagenforschung und

21 Ein *translational turn* lässt sich darüber hinaus in verschiedenen anderen Disziplinen feststellen, vor allem in den Ingenieurs- und Technikwissenschaften. Auch dort besteht Übersetzungsbedarf, da anwendungsbezogene Produktentwicklung und Innovation kaum noch an die abstrakten physikalischen Erkenntnisse der letzten Jahre anknüpfen können (Chai und Shih, 2013, S. 3).

22 Wie Bernadette Bensaude-Vincent kritisiert, werden Komplexität, Unsicherheit und nach wie vor eher enttäuschende Erfolgsraten pharmazeutischer Innovation nicht einfach durch eine Erhöhung der Rechenleistung gelöst, denn die Übersetzungsschwierigkeiten ergeben sich aus der molekularen, biotechnologischen Perspektive selbst. Die komplexen biopharmakologischen Zusammenhänge lassen sich nicht exklusiv auf das (weit verbreitete) Credo der Reduzierbarkeit pharmakologischer Wirkung auf einen zugrundeliegenden genetischen Code lösen (Bensaude-Vincent, 2007). Vielmehr präsentieren sich die in den Lebenswissenschaften und ihre Innovationsprozesse involvierten Kollektive und Disziplinen als äußerst heterogen, was Methoden, Theorien und Prämissen betrifft.

Anwendungen zu schließen, die sich zwischen verschiedenen Kollektiven der Biomedizin (und auch nach außen) aufgetan haben (Mittra, 2016a). In diesem Abschnitt wird erläutert, welche Konsequenzen sich aus dieser Programmatik der Translation für die Grenzarbeit der chemischen und biomedizinischen Felder ergeben: Die Chemie als monolithische Systemwissenschaft gilt entsprechend der Präideen des Translationsparadigmas als veraltet, innovationsfeindlich und konservativ, sodass sie sich mittlerweile von der Realität medizinischer Anwendungen weit entfernt bewegt (ebd.). Durch die gezielte Förderung hybrider, interdisziplinärer, problembezogener wissenschaftlicher Felder – vor allem im Bereich der *Molecular Life Sciences* und Biotechnologie – wird an diesem Beispiel besonders deutlich, wie die Chemie allmählich an epistemischem Einfluss auf die Medizin verliert. Der Chemie zugerechnete Konzepte wie die Chiralität verschwinden aus der Produktentwicklung und geraten auch in der Praxis zunehmend in Vergessenheit. Dies zeigt sich wiederum in paradigmatischer Art und Weise in den Zugriffen auf die molekulare Welt, bei der hybride Lebenswissenschaften entsprechend der Innovationsmodelle der klassischen organischen Synthesechemie als überlegen gelten.[23]

In der Folge werden die bisherige Entwicklung, Programmatik und die Präideen der translationalen Medizin erörtert und vor dem Hintergrund der Befunde zur *Boundary Work* zwischen Chemie und Biomedizin neu bewertet. Diese Lesart erlaubt Rückschlüsse über die Lage der Chemie in Zeiten sich hybridisierender Felder und sich wandelnder Innovationsdispositive. Die Chemie steht dabei stellvertretend für die als klassische Großdisziplinen verstandenen Felder, die in Anbetracht gegenwärtiger forschungspolitischer Dispositive als Auslaufmodell gelten. Darüber hinaus erfolgt eine kritische Revision der Diagnose der Übersetzungsprobleme zwischen den erwähnten Kollektiven, die nicht ausschließlich einer wachsenden Komplexität wissenschaftlicher Wissensproduktion und Datenfülle geschuldet sind. Vielmehr wird argumentiert, dass diese aus der inhärenten Grenzarbeit zwischen Medizin und Chemie hervorgehen, die sich bereits zu Zeiten der frühen akademischen Etablierung der Chemie ergeben hat und in die zeitgenössischen epistemischen Kulturen eingeschrieben sind – und damit trotz aller Probleme essentiell für die Stabilität des Feldes.

Bei der translationalen Medizin handelt es sich um kein einheitliches Konzept, vielmehr versammelt sich unter dem Begriff ein vielstimmiger Diskurs mit

23 Die vorliegenden Analysen zum Paradigma der translationalen Medizin und die entsprechenden Thesen zu den Widersprüchen der Programmatik gehen auf meine unveröffentlichte Masterarbeit (Lang, 2014) zurück. Diese bestehenden Befunde werden vor dem Hintergrund der vorliegenden Analysen zur Grenzarbeit zwischen Chemie und Medizin neu gelesen und kontextualisiert, sodass hiermit ein Originalbeitrag vorliegt, der weit über die Befunde der Masterarbeit hinausgeht. Die entsprechende Stelle wird im Text kenntlich gemacht.

teilweise widersprüchlichen und gegenläufigen Ansätzen, Präideen und politischen Zielsetzungen. Als kleinster gemeinsamer Nenner besteht allerdings der Anspruch, den Wissenstransfer zwischen verschiedenen Instanzen des Medizinbetriebes zu erleichtern und die Wissensübersetzung zu beschleunigen (Mittra, 2016c, S. 87). Häufig fällt in diesem Zusammenhang das Schlagwort *„from bench to bedside"*, was sich auf die Forderung bezieht, dass Labor- und Grundlagenforschung stärker in Austausch mit der klinischen Forschung und Praxis gestellt werden sollen, da diese sich im Zuge der Ausdifferenzierung des biomedizinischen Betriebes mehr und mehr voneinander entfernt haben (Woolf, 2008, S. 211). Translationale Mediziner/innen sind dem Ideal nach Personen, die in mehreren Bereichen qualifiziert sind und etwa auf molekularer Ebene mit Hilfe von Biomarkern oder Tiermodellen maßgeschneiderte Diagnosen entwickeln und aus diesen direkt Anwendungen an das Krankenbett übersetzen können. Zu diesem Zweck werden spezielle Studiengänge[24] ins Leben gerufen, außerdem Journals gegründet, Konferenzen abgehalten, Koordinierungsstellen eingerichtet und Preise verliehen (Vignola-Gagné et al., 2013).

Die translationale Medizin[25] wurde in den späten 1990er Jahren in den USA als Teil der nationalen Gesundheitsstrategie des *National Institute of Health* gefördert (Zerhouni, 2005). Das Programm steht für eine stärkere Vernetzung von klinischer Grundlagenforschung und Praxis ein, was in der Phrase *„from bench to bedside"* Ausdruck findet. Mit Translation ist dabei allerdings eher in seltenen Fällen eine Übersetzung im linguistischen oder semantisch-qualitativen Sinne, etwa zwischen Fachkulturen oder bestimmten Formen des *tacit knowledge* gemeint (Coller, 2008), sondern zwischen sog. Auflösungsebenen, also zwischen submolekularen, molekularen, makromolekularen, biomolekularen, zellspezifischen und patient/innen-bezogenen Datensätzen. Das Translationsparadigma knüpft damit an eine Wissenschaftstheorie des Emergentismus an (Folkers, 2011): Wie in den

24 Spezielle Ausbildungs- und Studienprofile im Sinne der *translational medicine* wurden etwa in Masterstudiengängen wie *Master of Science in Translational Medical Research* oder der Molekularen Medizin ausgegründet. Expert/innen, die in diesen interdisziplinären Lebenswissenschaften ausgebildet werden, sollen die bisher eingesetzten Ärzt/innen ersetzen, die qua Ausbildung zu weit von der klinischen Forschung entfernt sind und zudem in Anbetracht der Krisen der Gesundheitssysteme ohnehin mehr in der Patient/innen-Versorgung benötigt werden (Fulda, 2012).

25 In denselben Zeitraum fällt zudem die Entstehung und Förderung weiterer Medizinstile und Konzepte, wie etwa Evidenzbasierter Medizin, Individualisierter Medizin, Personalisierter Medizin oder auch der Stratifizierten Medizin, deren Überschneidungen fließend sind und keine klare Abgrenzung erlauben (Kollek, 2012). Ein wesentlicher Unterschied zwischen translationaler und personalisierter Medizin liegt darin, dass biomarkerbasierte Diagnosen und Behandlungen im Rahmen der Individualisierten Medizin beim zu behandelnden Individuum enden und in der translationalen Medizin darüber hinaus Erkenntnisse formuliert werden sollen, die sich wiederum auf eine gesamte Population übertragen lassen (ebd.).

Abschnitten 6.2 und 2.3 deutlich wird, war insbesondere die pharmazeutische Industrie eine Fürsprecherin neuerer Emergenztheorien, die sich von der Entwicklung neuer computertechnologischer Verfahren der künstlichen Intelligenz eine Antwort auf ihre Innovationskrise erhoffte. Mit dem Paradigma der translationalen Forschung war für verschiedene Industriezweige mit Fokus auf den Gesundheitsbereich eine plausible Erklärung für die Innovationskrise gefunden, die trotz technischem Fortschritt und systematischer Umstellung auf biotechnologische Verfahren kein Ende zu nehmen schien: Übersetzungsprobleme zwischen Wissensbeständen wurden als Ursache definiert, politisiert und für Förderprogrammatiken operationalisiert. Emergenztheorien bilden gewissermaßen ein wissenschaftsphilosophisches Fundament des Translationsparadigmas, zumal beide ein Weltbild implizieren, das von einer in Seinsschichten und Komplexitätsniveaus klassifizierten Wirklichkeit ausgeht, zwischen denen Wissen übersetzt werden muss – was allerdings aufgrund von ansteigender Datenkomplexität erschwert wird (Weber, 2013).

In Anbetracht dieser Prämissen wird auch der forschungspolitische Kontext der neuen *Bio Healtheconomy* deutlich, die sich im Zuge der fundamentalen Paradigmenwechsel in der Forschungspolitik seit den 1980er Jahren herausgebildet hat (Mittra, 2016c, S. 87). Eine Innovationspolitik, die verstärkt auf *public-private partnerships*, Interdisziplinarität, problem- und gegenstandsorientierte sowie anwendungsorientierte Programme setzte, war in der praktischen Umsetzung verstärkt mit Fragen und Problemen der Zusammenarbeit und Wissenskommunikation in immer größeren und heterogeneren Kollektiven[26] und Verbünden konfrontiert (ebd.). Diese Fragen und Probleme wurden in der Ausrichtung der translationalen Programmatik erstens auf Biomarker und zweitens auf die Frage nach der Extrapolation von Forschungsdaten adressiert:

Komplexe Krankheitsbilder wie Krebs, Morbus Alzheimer oder auch Diabetes werden wie in Kapitel 4 ausführlich behandelt, in ihrer Erforschung, Diagnostik, Behandlung und Prävention immer weniger alleinig der niedermolekularen Chemotherapie des *small molecules*-Paradigmas und den entsprechenden Biorezeptoren überlassen. Vielmehr herrschen im Zuge der diskutierten *Bio*-Molekularisierung der Medizin Körper- und Krankheitsbilder vor, die an biochemische, molekularbiologische und biotechnologische Wissensbestände und Technologien anknüpfen. In Diagnostik und Behandlung spielen nun nicht mehr Krankheitserreger, die den Körper von extern befallen eine Rolle, sondern vor allem biochemische Stoffe des eigenen Körpers auf Molekülebene und in

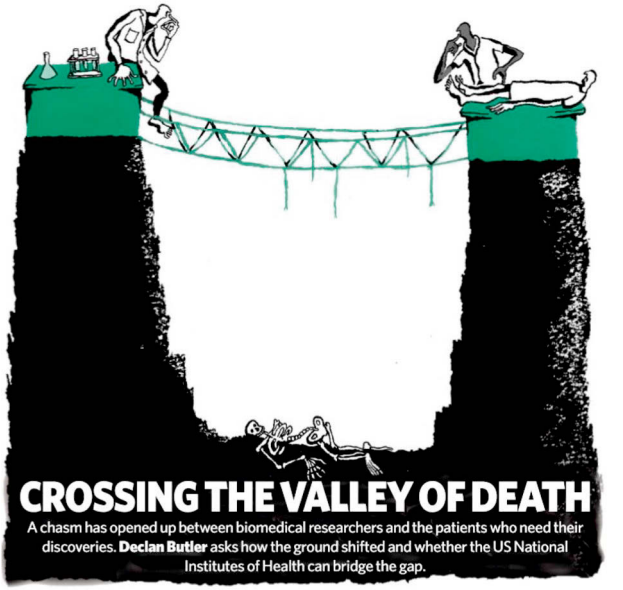
26 So ist es kein Zufall, dass translationale Programme häufig inform institutionenübergreifender Forschungscluster implementiert werden, die Unispitäler, Hochschulen, medizintechnische und pharmazeutische Privatfirmen miteinander verknüpfen, die sehr hohe Investitionen erfordern.

welcher Weise sie etwa mit Bestandteilen der DNA interagieren (Egloff et al., 2011). Der Denkstil wandelte sich also von der Annahme, körperfremde Stoffe würden den Körper schädigen[27], dahingehend, dass Krankheitswahrscheinlichkeiten bereits in der Genetik des Körpers festgelegt seien, mithilfe von Gentests prognostizierbar und vor allem durch maßgeschneiderte biotechnologische Therapeutika behandelbar wären. Die Idee wandelte sich somit auch hin zur Annahme einer grundsätzlichen Pathologie des Gewebes, das durch Prävention verhindert werden kann (Gisler, 2011).

Im Zuge dieser Trends erfuhren statistische Verfahren (vor allem in ihrer automatisierten Form) eine erhebliche Aufwertung in den Feldern der Biomedizin, die im Translationsparadigma zum zentralen Medium der Wissensübersetzung avancierten. Die Extrapolation zwischen verschiedenen Datensätzen spielte dabei insbesondere in den Industriezweigen der Pharmazeutik und Medizintechnologie eine erhebliche Rolle. Die lange Dauer und Risiken der biomedizinischen Produktentwicklung ergeben sich demnach nicht nur aus den verschärften Zulassungsverfahren, sondern auch daraus, dass Forschungsergebnisse sich häufig nicht von einer auf eine andere Betrachtungsebene extrapolieren ließen (Folkers, 2011). Zwischen einer spezifischen Genexpression (Genotyp) und einem konkreten, makroskopischen körperlichen Erscheinungsbild (Phänotyp) kann es etwa zu einer extrem großen Varianz an Phänomenen kommen. Ein weiteres Problem sind verschiedene Tiermodelle und ihre begrenzte Übertragbarkeit auf menschliche Populationen (Martić-Kehl und Schibli, 2012) oder auch die gängige Praxis der klinischen Studien, Behandlungen im ersten Schritt an gesunden, männlichen Freiwilligen zu testen, was bei einer heterogenen Kohorte multimorbider Patient/innen verschiedenen Alters und Geschlechts völlig andere Ergebnisse hervorbringt (und letztere gar gefährden kann).

Der formulierte Übersetzungsbedarf zwischen Grundlagenforschung und Anwendungen am Behandlungsbett ergibt sich nicht zuletzt daraus, dass die Lücke zwischen beiden Bereiche angesichts wachsender Komplexität an Forschungsdaten schwer überbrückbar sind. Dennoch legitimiert sich der Ruf nach Translation über als statistisch signifikante kommunizierte Erfolge und unverzichtbare biotechnologische Innovationen, die über Leben und Tod entscheiden (vgl. Abb. 5.2). Im Zentrum dieser Narrative steht die Diagnose, dass sich eine unproduktive Ausdifferenzierung, metaphorisch als Graben umschrieben, zwischen sog. Grundlagenforschung und den medizinischen Anwendungsbereichen herausgebildet hat

27 Das Verhältnis von Pathologischem und Gesundem hat sich soweit gewandelt, dass nicht wie früher von einem normalen Zustand der Gesundheit ausgegangen wird (anhand dessen konstruierten Ideals dann Krankheit als Abweichung verstanden wird), sondern: *„da alle Menschen bestimmte Dispositionen für Krankheiten in sich tragen, gibt es auch kein »risikofreies« Genom mehr; in diesem Sinne werden genetische Risiken normal*" (Kollek, 2012, S. 43).



Die prominenteste Legitimationsstrategie des Translationsparadigmas bezieht sich in der Medizin auf das Narrativ personalisierten Nutzens maßgeschneiderter Behandlungen im Dienste von Patient/innen. Übernommen aus (Butler, 2008).

(Butler, 2008). Demzufolge wird es im Medizinbetrieb immer schwieriger, den enormen Wissenszuwachs im molekularen Wissen über den menschlichen Organismus und seine Erkrankungen in konkrete und erfolgreiche Gesundheitsanwendungen und Behandlungserfolge zu überführen. Diese Diskurse weisen viele Überschneidungen mit den Debatten um die sog. Innovationskrise der pharmazeutischen Industrie (vgl. Abschnitt 4.1) auf, denn auch die Industriezweige der Biotechnologie, Medizintechnik und *Public Health*-Strategien hängen i.d.R. diesem Innovationsmodell an (Vignola-Gagné et al., 2013).

Neuere Auseinandersetzungen und Evaluationen zu den bisherigen Auswirkungen der Translationsprogrammatik deuten allerdings darauf hin, dass die bisherigen Maßnahmen die bestehenden Kommunikationsgräben zwischen Disziplinen und Instanzen der biomedizinischen Produktentwicklung zu einer paradoxen Situation geführt haben: So weiten sich im Zuge translationaler Maßnahmen die „*research silos*" bzw. Gräben zwischen den Kollektiven eher noch aus anstatt diese zu überbrücken (Lang, 2014). So stößt man in der Literatur (vgl. Abb. 5.3) häufig auf die sog. translationalen Blöcke mit den Bezeichnungen T1, T2, T3 und T4 (Khoury et al., 2007, S. 665). Es handelt sich dabei um größere Kollektive von Fachwissenschaftler/innen und entsprechenden exoterischen Kreisen in

Translation research phase	Notation	Types of research	Examples
T1	Discovery to candidate health application	Phases I and II clinical trials; observational studies	Is there an association between *BRCA* mutations and breast cancer?
T2	Health application to evidence-based practice guidelines	Phase III clinical trials; observational studies; evidence synthesis and guidelines development	What is the positive predictive value of *BRCA* mutations in at-risk women?
T3	Practice guidelines to health practice	Dissemination research; implementation research; diffusion research Phase IV clinical trials	What proportion of women who meet the family history criteria are tested for *BRCA* and what are the barriers to testing?
T4	Practice to population health impact	Outcomes research (includes many disciplines); population monitoring of morbidity, mortality, benefits, and risks	Does *BRCA* testing in asymptomatic women reduce breast cancer incidence or improve outcomes?

Die pluralen Konzeptionen der translationalen Medizin, die mittlerweile nebeneinander bestehen, wurden einem Versuch der Kategorisierung unterzogen. Insgesamt vier verschiedene Subkonzepte versuchen, einzelne Übersetzungsschritte im biomedizinischen Innovationsprozess zu steuern. Entnommen aus (Khoury et al., 2007, S. 666).

Forschungspolitik und Privatwirtschaft, die jeweils ein anderes Verständnis von translationaler Medizin teilen. Wie in Fußnote 23 besprochen, beziehen sich die folgenden vier Absätze auf die Ergebnisse meiner unveröffentlichten Masterarbeit aus dem Jahre 2014 (Lang, 2014), die hiermit zum ersten Mal publiziert werden. Die Ausdifferenzierung des forschungspolitischen Konzepts in die translationalen Blöcken T1-4 sowie die Analyseergebnisse ihrer jeweiligen Charakteristika, Bedeutungszusammenhänge und Präideen stellen das zentrale Thema der Masterarbeit dar. Die zentrale Aussage der Masterarbeit – dass sich die translationale Medizin selbst ausdifferenziert hat und paradoxerweise der Übersetzung bedarf anstatt den Übersetzungsbedarf zwischen medizinischen Kollektiven zu gewährleisten – wird in der Folge ebenfalls referiert und in Anschluss an die Forschungsfrage nach der Grenzarbeit der Chemie neu gelesen.

„T1 translational research" verspricht, biomolekulare Krankheitsmechanismen auf der Grundlage von Biomarkern zu verstehen und daraus geeignete Diagnosen, Therapien und Medikamente zu entwickeln (Woolf, 2008, S. 211). Es umfasst die Phasen I und II[28] der etablierten klinischen Testreihen (Szilagyi, 2009, S. 74), die darauf abzielen, quantitative Häufigkeiten, Wahrscheinlichkeiten und Zusammenhänge zu erheben. T1 versteht sich als die Grundlagenforschung im translationalen Gesamtprogramm und findet in starker Anlehnung an das *Human Genome Project* auf der molekularbiologischen Ebene statt: Es geht darum,

28 Bei der Medikamentenentwicklung in Phase I klinischen Studien werden Wirkstoffe und Prototypen von Medikamenten an gesunden Proband/innen angewandt und deren körperliche Reaktionen untersucht (wie sich der Wirkstoff im Körper verteilt, welche Stoffwechselprozesse, Ablagerungen, etc. zu beobachten sind). Wird keine Schädigung der standardisiert gesunden Proband/innen festgestellt, werden auch entsprechend erkrankte Personen miteinbezogen. In Phase II wird experimentell versucht, die optimale Dosierung zu bestimmen (Schumacher und Schulgen, 2008, S. 292ff.).

so viele Biomarker wie möglich zu entdecken, zu *mappen* und in Hinblick auf Wechselwirkungen untereinander zu untersuchen (Grimshaw et al., 2012, S. 2). Aufgrund dieser hohen Konformität mit den Vorstellungen von Translation seitens aktueller *research policies*, stellt T1 auch das hegemoniale Modell der translationalen Medizin dar, denn Forschungsvorhaben im Sinne dieser Programmatik erhalten mit Abstand die höchsten finanziellen Zuschüsse und andere Ressourcen des wissenschaftlichen Feldes (ebd.).

T2 hat sich in Abgrenzung zu T1 herausgebildet und ist vor allem durch die Kritik an diesem definiert, die primär auf der Beobachtung fußt, dass die Innovationen der Molekulargenomik und -Technologie nicht wirklich bei den Patient/innen ankommen. Ihre Forschungstätigkeiten finden primär in klinischen Studien der Phase III[29] statt und beschäftigt sich mit phänotypischen Ausprägungen von Krankheitsformen (Khoury et al., 2007). In ihrer epistemischen Ausrichtung forscht die T2 translationale Forschung in die entgegengesetzte Richtung: Anwendungen werden auf der Grundlage empirisch beobachteter Patient/innen-Daten erhoben. Sie basieren damit im Gegensatz zu T1 nicht auf Rückschlüssen vom Genotyp (basalen molekularen Grundlagen des Lebens), sondern auf dem Phänotyp (Szilagyi, 2009, S. 74)). Neben diesen *„major translational blocks"* sind noch zwei weitere Konzepte zu erwähnen, T3 und T4, die primär im Bereich des *Public Health Managements* angesiedelt sind und weder der Grundlagenforschung noch der klinischen Forschung zuzurechnen sind. Im Sinner einer Übersetzung *„from benchside to bedside to curbside"* (Mata und Davis, 2012) sind diese auf die Implementierung der in T1 und T2 entwickelten Innovationen wie Immuntherapien und diagnostischer Testverfahren in der klinischen Praxis als maßgeschneiderte, individualisierte Behandlungskonzepte für bestimmte Risikogruppen zugeschnitten (ebd).

Mit dieser Ausdifferenzierung in vier translationale Blöcke trat die paradoxe Situation ein, dass sich verschiedene Forschungskollektive genau innerhalb der institutionellen Gräben angesiedelt haben, die sie eigentlich zu überbrücken versprechen (Lang, 2014, S. 39). Die translationale Medizin kämpft in ihrem Etablierungsprozess gegen festgefahrene Strukturen, Präideen und hegemoniale Denkstile des biomedizinischen Betriebes an: Die Arbeitsteilung zwischen verschiedenen Disziplinen und Sphären (Labor, Klinik, Büro) der medizinischen Wissensproduktion (Szilagyi 2009: 71). Die Tendenz, dass sich mit der Ausdifferenzierung dieser Disziplinen und Expertisen auch das Wissen in immer kleiner werdenden Kollektiven konzentriert, sodass Wissensübersetzungen langwierig und

29 Bei klinischen Studien der Phase III handelt es sich um langwierige Wirksamkeitsuntersuchungen mit großen Patient/innenpopulationen, die Wirksamkeit, Unbedenklichkeit bei möglichst verschiedenen Gruppen von Patient/innen nachweisen sollen (Schumacher und Schulgen, 2008, S. 17).

voller Kommunikationsprobleme sind, stehen ihr im Weg. Die Kritik an immer enger gefassten Expertisen ist in den aktuellen biomedizinischen Diskursen omnipräsent (Clarke und Shim, 2011, S. 180ff.). Die translationale Medizin setzt sich auf ambivalente Weise mit diesem Befund auseinander, da sie zum einen die Verhältnisse kritisiert, aus denen sie selbst erwachsen ist und die dem eigenen Handeln zugrunde liegt. Letzten Endes reproduzieren und verstärken Programmatiken der Translation disziplinäre Ausdifferenzierungen, indem sie nicht bei den bestehenden Disziplinen ansetzen und deren Wissenstransfer verbessern, sondern wiederum neue, hybride Felder erschaffen und fördern, zwischen denen es wiederum zu übersetzen gilt (Lang, 2014, S. 40.).

In der ambivalenten Auseinandersetzung mit der Präidee der interdisziplinären Arbeitsteilung werden verschiedene Konsequenzen der Hybridisierung biomedizinischer Felder und ihrem Verhältnis zu den Nachbardisziplinen deutlich: Während etablierte Systemwissenschaften und die spezifizierte Arbeitsteilung (insbesondere zur organischen Chemie) zwischen diesen immer mehr infrage gestellt wird, profitieren interdisziplinäre und problembezogene Großforschungsverbände und neu entstandene *Technosciences* von den *shifts* in der Forschungspolitik. Ärzt/innen und Chemiker/innen werden zugunsten spezialisierter Lebenswissenschaftler/innen aus der medizinischen Wissensproduktion herausgedrängt. Analog zu den Entwicklungen in der pharmazeutischen Industrie, die sich im Zuge der *merger mania* der 1990er Jahre weitestgehend von der chemischen Industrie getrennt und biotechnologischen *Life Sciences* zugewandt hat, verliert auch die klassische organische Synthesechemie zunehmend an Bedeutung in der medizinischen Grundlagenforschung wie auch in der klinischen Praxis aus denen die hauseigene Analytik fast vollständig ausgelagert wurde. Hier zeigt sich in besonderem Maße der Niedergang des *small molecule*-Paradigmas, wie im vorangegangenen Kapitel ausführlich dargelegt wurde. Auch wenn die organische Chemie nach wie vor die primäre Sozialisationsinstanz zahlreicher externer Disziplinen darstellt, erscheinen ihre Theorien, Bildsprachen und Methoden angesichts der biotechnologischen Dominanz auf einer intuitiven Ebene als nicht mehr zeitgemäß.

Diese Verschiebung der etablierten Feldgrenzen, Arbeitsteilungen und Zuständigkeiten von Disziplinen erfahren seit der molekularbiologischen und biotechnologischen Revolution seit den 1970er Jahren Jahre eine erhebliche Disruption. Zahlreiche hybride, problem- und anwendungsorientierte Disziplinen der *Molecular Life Sciences* sind entstanden und konkurrieren seither mit Systemwissenschaften wie der organischen Chemie um Ressourcen im Wissenschaftssystem. Es zeigt sich, dass sich die Anwendungsbereiche der Chemie, in denen die Chemie bislang ihre „Nützlichkeit" (Breslow, 1997) in besonderem Maße legitimieren konnte, immer stärker in die Bereiche Minen- und Bauwesen, fossile Ressourcengewinnung und Batterieforschung verlagern, während die Anwendungsmöglichkeiten

chemischen Wissens im Gesundheitsbereich tendenziell immer stärker den Biowissenschaften zugerechnet werden (Schummer, 2017c). Damit kommt der Chemie zunehmend die wichtigste Legitimationsquelle abhanden: ihr Nutzen für die menschliche Gesundheit und verschiebt sich in Bereiche, die der menschlichen Gesundheit (und der Umwelt) eher schaden, was sich zudem auf chemophobe Ressentiments in verschiedenen gesellschaftlichen Kontexten niederschlägt.

Die zunehmende Aneignung der molekularen Welt durch die Lebenswissenschaften hat zudem Konsequenzen für den biomedizinischen Wissenstransfer und lässt sich in Zusammenhang mit der paradoxen Situation des Translationsparadigmas setzen: So zeigt sich, dass die häufig kritisierte Ausdifferenzierung von Feldern und Expertisen im biomedizinischen Betrieb, die als Ursache der Probleme des Wissenstransfers bewertet wird, sich als Konsequenz eines inhärenten Abgrenzungsprozesses verstehen lässt. In der sozialen Arena der molekularen Welt ist eine Wissensübersetzung nur bedingt vorgesehen und möglich, denn diese Welt ist umkämpft und selbst als Produkt der disziplinären Grenzarbeit zwischen verschiedenen disziplinären Kollektiven hervorgebracht worden. Die Welt des Molekularen präsentiert sich nicht als einheitliche Betrachtungsebene der Natur, sondern ist selbst abhängig von disziplinär organisierten technischen Zugriffen, ästhetischen wie ikonografischen Traditionen, Fachsprachen und Bezügen. Die Arena des Molekularen ist umkämpft, denn sie wird von konkurrierenden Denkkollektiven bewirtschaftet: mit den Anwendungen im pharmazeutischen, biotechnologischen, materialwissenschaftlichen und datenwissenschaftlichen Hybrid-Disziplinen bietet die molekulare Welt seit der molekularbiologischen Revolution der 1970er Jahre eine schier unerschöpflich anmutende Quelle für kommerziell erfolgreiche Innovationen. Mit dem *translational turn* kam es gewissermaßen in verschiedenen Wissenschafts- und Forschungsbereichen zu einer Abwertung der etablierten Großdisziplin, die als innovationsfeindlich problematisiert wird. Am Beispiel der Chemie zeigt sich daher, welche Konsequenzen die disziplinären Re-Konfigurationen für die Großdisziplinen im Allgemeinen haben.

6 *„Wir gehen so tief wie man nur gehen kann“*: Chiralität in Quantenchemie und Wissenschaftsphilosophie

Der analytische Blick auf die Zugriffe auf chirale Phänomene in der Quantenchemie und deren Rezeption in der Wissenschaftsphilosophie offenbart einen blinden Fleck in der bestehenden Theorie wissenschaftlicher Grenzarbeit. In den laufend fortschreitenden Aushandlungsprozessen von Beziehungen und Grenzen zwischen wissenschaftlichen Disziplinen erweisen sich Narrative von Autonomie und Reduzierbarkeit als omnipräsent. Mit Autonomie ist dabei nicht die Verteidigung des Wissenschaftsbetriebes vor außerwissenschaftlicher Einflussnahme in der Demarkation von *science* und *non-science* gemeint (Gieryn, 1983, S. 789), sondern bezieht sich auf eine Konfliktlinie zwischen wissenschaftlichen (Sub-)Disziplinen selbst. Vielmehr steht die Aneignung, Sedimentierung und Verteidigung eigener, disziplinspezifischer Gegenstände, Theorien und Zugriffe auf die Welt, die unabhängig von fachfremden Ontologien, Methoden und Semantiken sind, im Mittelpunkt (Janich, 1998, S. 8). Das Gegenteil zu dieser Form der disziplinären Autonomie stellt in diesem Sinne die Reduzierbarkeit in der Beschreibung von interdisziplinären Verhältnissen dar. Diese zeigt sich etwa in der Annahme, dass die Quantenphysik die Grundlage der gesamten Chemie sei oder der Prämisse einer Arbeitsteilung und Abhängigkeit im Zugang zu disziplinspezifischem Wissen, wenn biologische Prozesse erst durch chemische Methoden zugänglich werden (ebd., S. 9). Dies ist unmittelbar mit den Präideen einer in Wirklichkeitsschichten klassifizierten Natur, einer Einheit sowie Hierarchie der Naturwissenschaften verknüpft.

Auch wenn diese Konzepte in der gegenwärtigen Wissenschaftsforschung als Anachronismen gelten, leben sie in den fachspezifischen *styles of reasoning* als Präideen fort und sind mit Konflikten verbunden, die insbesondere im gegenwärtigen Zeitalter der Hybridisierung wissenschaftlicher Disziplinen zum Tragen kommen (Stengers, 2011b, S. 212). In den Feldern der Chemie zeigt sich ein ambivalenter und konfliktgeladener Umgang mit Fragen der Reduzierbarkeit molekularer Gegenstände auf quantenphysikalische *Erste Prinzipien*. Diese Aushandlungen

um die Autonomie bzw. Reduzierbarkeit chemischen Wissens offenbaren zudem, dass ein Graben zwischen den Fachkulturen der theoretischen Chemie und den experimentellen Feldern in Organik und Anorganik entstanden ist. Die Abgrenzung erfolgt dabei auf den Ebenen der jeweiligen fachkulturellen Habituierung sowie den philosophischen Beiträgen aus den beiden idealtypischen Bereichen, die die empirische Materialgrundlage der vorliegenden Analyse darstellen. Die Geister scheiden sich in diesem Bereich insbesondere an der Interpretation des Verhältnisses von chemischer Struktur und Quantenphysik. Während die Reduzierbarkeit auf die Gesetze der Quantenmechanik in weiten Bereichen der chemischen Felder als latente und unbehagliche Bedrohung gilt, die die Erkenntnisleistung der Chemie abzuwerten scheint, erkennen Vertreter/innen der Quantenchemie ein Emanzipationspotential für die Chemie in eben diesem Reduktionismus: Ein *tiefes* physikalisches Fundament verspricht demnach ein höheres Maß an wissenschaftlicher *Härte* und Positivität, als es die *alltagspraktischen* Anwendungen der organischen Synthesechemie jemals zu leisten vermögen. In diesem Kontext stellt insbesondere die molekulare Chiralität ein häufig rezipiertes Fallbeispiel dar, anhand dessen sich die Kontroversen um eine (Nicht-)Reduzierbarkeit der Chemie entfalten. Als Grenzobjekt dient die Chiralität den beiden Diskurspositionen gleichermaßen als rares Beispiel, anhand dessen sich ihre antagonistischen Prämissen bewahrheiten.

In diesem Kapitel werden in der Folge drei zentrale Befunde zur Grenzarbeit der chemischen Felder an ihrer *fundamentalsten* Stelle abgehandelt und zueinander in Beziehung gesetzt:

- Die erste Beobachtung besteht darin, dass sich mit der Etablierung der Quantenmechanik ein hybrider Grenzbereich zwischen Physik und Chemie herausgebildet hat, der sich mit den *fundamentalsten* Aspekten chemischer Theorie beschäftigt. Dieses Feld hat sich bezüglich Methoden und Kulturen des Erkenntnisgewinns immer stärker der Physik angenähert und zugleich von den laborbezogenen Feldern der Chemie entfernt, wodurch ein Graben zwischen chemischer Theorie und Empirie entstanden ist.
- Es zeigt sich zweitens, dass im theoretischen Zugriff auf das Molekulare zunehmend physikalische Konzeptionen dominant werden. Dies bezieht sich allerdings nicht auf die Annahme des Reduktionismus selbst, sondern vielmehr auf die aus der Physik stammenden Semantiken von Wirklichkeitsebenen, Einheitswissenschaft, Emergenz und Tiefe wissenschaftlicher Betrachtung. Diese Begriffe waren bis vor wenigen Jahren in der Chemie eher unbekannt und zogen erst über die jüngsten chemiephilosophischen Debatten sowie Förder- und Innovationsdispositive der chemischen Industrie in die Fachkulturen der Chemie ein (Simões und Gavroglou, 2001, S. 52). Es wird

argumentiert, dass der quantenphysikalische Reduktionismus viel grundlegendere Präideen in die Chemie transportierte: Die Dominanz physikalischer Fragestellungen in der Wissenschaftsphilosophie infolge der Erschließung der Quantenwelt habe zu einer Omnipräsenz von Emergenz- und Reduktionsfragen in den Fachdebatten geführt. Die Chemie schied infolge dessen gänzlich aus dem Dialog mit den Geisteswissenschaften aus und wurde erst im Zuge der Vertrauenskrise der Chemie in den 1990er Jahren wiederbelebt.

- Dies zeugt drittens davon, dass geisteswissenschaftliche Anbindungen sowie theoretische Praktiken in Wissensproduktion und Grenzarbeit der naturwissenschaftlichen Felder eine deutlich größere Rolle spielen als bislang angenommen und in Analysen der Wissenschaftsforschung berücksichtigt werden sollten.

6.1 Ist Chemie auf (Quanten-)Physik reduzierbar?

Mit dem Aufkommen der Quantenmechanik und der Feststellung, dass chemische Struktur und Bindung durch physikalische Gesetzmäßigkeiten erklärbar sind, setzte sich in den 1920er Jahren zunehmend die These durch, dass die gesamten Gegenstände der Chemie seien auf die Physik reduzierbar seien (Bensaude-Vincent und Simon, 2012e). In der Folge wird zunächst hergeleitet, welche Konsequenzen sich daraufhin für die Dynamiken und Grenzen der chemischen Felder ergaben. Es entstand in diesem Zusammenhang ein hybrider, *fundamentaler* Grenzbereich zwischen Chemie und Physik, der sich auf einer theoretisch-abstrakten Ebene der mathematischen Gleichungen und computergestützten Modellierungen diesen Grenzphänomenen widmete (Nye, 2018). Auf diese Weise löste sich die theoretische Chemie aus dem breiteren Kontext der chemischen Felder heraus und etablierte sich als eigenständige chemische Teildisziplin mit großen Schnittmengen in Physik, Mathematik und *Computer Sciences* (Gavroglou und Simões, 2012).

Dieses Feld grenzte sich in der Folge immer stärker von der organischen Synthesechemie und anderen experimentalpraktischen Forschungsbereichen der Chemie ab und übernahm in der Ressourcengenerierung ähnliche Strategien, wie sie sich bereits in der Teilchen- bzw. Hochenergiephysik als erfolgreich erweisen hatten: Die Unterscheidung zwischen Grundlagenforschung und angewandter Forschung[1] setzte die Quantenchemie in eine antagonistische Position

1 Bei den Begriffen der Grundlagenforschung und angewandten Forschung gilt stets zu reflektieren, dass es sich um forschungspolitische Unterscheidungen handelt, die historisch kontingent im Kontext verschiedener Innovationsmodelle des 20. Jahrhunderts entstanden sind und daher nicht unreflektiert in der Wissenschaftsforschung reproduziert werden soll-

zur organischen Synthesechemie (Frenking, 1998). Narrative der Fundamentalität, der *Tiefe* wissenschaftlicher Erkenntnis und auch der Einheit und Hierarchie der Wissenschaften verhalfen dem jungen Fach dazu, für die Chemie eher ungewöhnliche Quellen der Forschungsförderung zu erschließen und sich im akademischen Bereich zu etablieren und neben den industrienahen Bereichen der Chemie zu behaupten. Die ständige Abgrenzung der theoretischen von den anwendungsorientierten Bereichen der Chemie hat allerdings längerfristig zu einer Spaltung der beiden Bereiche geführt, wie es sich in den gegenwärtigen Fach- und Wissenskulturen sowie Beiträgen von Chemiephilosoph/innen manifestiert (ebd.).

Was ist eigentlich Chemie und was macht einen genuin chemischen Gegenstand aus? Sind es der auf seine Zusammensetzung hin analysierte Stoff und seine Transformationen, der die Identität des Feldes sichern? (Soentgen, 2008) Erlauben am ehesten die ausgefeilten, historisch gewachsenen Praktiken, materiellen Kulturen und Objekte eine analytische Annäherung an die Chemie? (Klein und Reinhardt, 2014) Oder sind es die Elemente, nachdem die Suche nach diesen einige Jahrzehnte lang das Fortschrittsstreben der Chemie dominiert hatte? (Hendry et al., 2012) Auch die molekulare Struktur (Buchler, 2004), Bindung (Van Brakel, 2012), Reinheit (Bensaude-Vincent und Simon, 2012d) und Synthese (Dolino, 2018) sind basale Konzepte, auf die die Chemie häufig zurückgeworfen wird. Die mentalen Modelle der Chemie und ihre ikonografische Repräsentation sind überwiegend durch die epistemischen Praktiken der organischen Synthesechemie geprägt und an die entsprechende Modelle der molekularen Welt gebunden, die im 19. Jahrhundert in diesem Fachbereich hervorgebracht wurden, wie in Kapitel 2 nachgewiesen wurde. Dies zeigt sich nicht nur in dieser Auswahl chemiephilosophischer Publikationen, sondern auch im Feld[2] selbst:

Im Rahmen meiner teilnehmenden Beobachtungen im Labor der anorganischen Chemie führte ich eine sozialwissenschaftliche Methode ein, bei der ich einen Doktoranden der Chemie bat, mit einer Fotokamera seinen Arbeitsplatz zu fotografieren. Anschließend würde ich ihn zu seinen Aufnahmen interviewen. Herr Rolla findet direkt Gefallen an der Aufgabe und verlässt den durch eine Glaswand vom Labor abgetrennten Bürobereich, legt die Sicherheitsausrüstung an und betritt den Laborraum seiner Forschungsgruppe. Im Uhrzeigersinn fotografiert er zunächst jeweils in Nahaufnahme eine der elektrischen Waagen, das Ultraschallgerät, den Rotationsverdampfer sowie ein Gerät zur Größenbestimmung von Nanopartikeln. Es folgen Panoramaaufnahmen der freistehenden

---

ten (Schauz, 2014b). Dieses Kapitel setzt sich intensiv mit den Folgen dieser Programmatik in den Feldern der Chemie auseinander.

2 Analysen zum Selbstverständnis von Chemiker/innen, die zu einem ähnlichen Ergebnis bezüglich der Hegemonie der organische Synthesechemie kommen, finden sich u.a. bei (Groh, 2004; Laszlo, 2007).

lab bench im Zentrum des Raumes, der Kapelle[3] und des Chemikalienregals. Er nimmt in seiner Erzählung Anteil an der Szenerie, insbesondere der sog. *Z-Sizer*, das Messgerät zur Größenbestimmung von Nanopartikeln nimmt darin viel Raum ein, denn Herr Rolla ist der offizielle Verantwortliche für die Instandhaltung des Gerätes. Auch die hochsensible Waage wird wortreich umschrieben: *„For me, the balance is the symbol of chemistry itself, the balance stands for our thrive for exact work and measurement and achieving a maximum purity of substances"*. Nachdem auch die *„random chemicals"* im Chemikalienregal oberhalb des Labortischs beschrieben sind, fällt mir auf, dass der Promovend ein Gerät weder abgebildet noch erwähnt hat: seinen PC. Die statistische Bereinigung, Auswertung und Interpretation von Experimentaldaten, die direkt von den Analysegeräten an das Gerät übertragen werden, nehmen neben Emailkorrespondenz den Großteil seiner täglichen Arbeitszeit in Anspruch. Dennoch empfindet er diese Tätigkeiten nicht als *„typical chemical work"*. Herr Rolla hat die Aufgabenstellung so umgesetzt, dass er darum bemüht war, die Arbeit in einem für die Chemie möglichst repräsentativen Setting wiederzugeben.

Dieser Fall steht dafür, welche Praktiken, Wissensformen und Zugriffe auf die empirische Realität implizit als chemische gelten und welche diesen gegenüber sekundär gesetzt und als von der Norm abweichend nachgeordnet sind. Auch Herrn Rollas Vorstellung von der Chemie ist vom ikonografischen Erbe der organischen Chemie und deren mentalen Modellen geprägt. Es besteht dabei eine Diskrepanz zwischen Idealbild chemischer Wissensproduktion und gelebter Praxis: Die organische Synthesechemie, die sich molekularen Phänomenen widmet, gilt nach wie vor als die normale Chemie, während alle anderen sekundär gesetzt werden. Selbst der Einsatz von Computern wird dabei ausgeklammert, selbst wenn chemisches Forschen ohne diesen gar nicht mehr möglich wäre. Die theoretische Chemie führt vor diesem Hintergrund ein Dasein, das sich implizit an diesen Idealen messen lassen muss, obwohl sie am stärksten von den epistemischen Welten der *klassischen* chemischen Praxis abweicht – denn computergestützte Modellierungen stellen das Hauptwerkzeug der theoretischen Chemiker/innen dar, während man sie im Labor i.d.R. nicht antrifft. Das epistemische Übergewicht der organischen Chemie drückt sich bei Vertreter/innen der theoretischen Chemie in der Positionierung des eigenen Faches im Dualismus von Grundlagenforschung und Anwendung aus. Insbesondere im Bereich der Quantenchemie wird eine epistemische Nähe zu den *fundamentalsten* Bereichen der Physik betont und sich von angewandten, alltagsnahen Bereichen der Chemie

3 Als Kapelle wird umgangssprachlich eine Sicherheitswerkbank bezeichnet, die sich hinter einer beweglichen Glasscheibe und festen Sicherheitswänden befindet und mit einem Abzug für Dämpfe und Gase ausgestattet ist. Im Feld gilt die Kapelle als feststehender Begriff und es findet sich kein angemessenes Synonym.

abgegrenzt.[4] Die Reduzierbarkeit chemischer Phänomene auf die physikalischen Grundkräfte und -gesetze stellt in diesem Bereich keine Bedrohung für das chemische Selbstbewusstsein dar, sondern wird gar als Strategie im Ressourcen- und Repräsentationskonflikt gegen die industrienäheren Subdisziplinen der Chemie eingesetzt. Es folgt ein Überblick über diese Strategien vor dem Hintergrund der Entstehung der Quantenchemie und ihrer gegenwärtigen Fachkultur.

Für die Chemie bedeutete die Entwicklung der Quantenmechanik den zeitweisen Verlust einer eigenenständigen chemischen Theorie der Materie, des Moleküls, dessen Struktur sowie der molekularen Bindung. Daraus ergab sich die wachsende Trennung zwischen theoretischer und praktischer Chemie, die durch die Dispositive der Forschungsförderung der folgenden Jahre noch verstärkt wurde, wie in der Folge erörtert wird: In wissenschaftshistorischer Sicht nahm die Erschließung der Quantenwelt ihren Anfang zu Beginn des 20. Jahrhunderts als Chemiker/innen wie Physiker/innen auf experimentellem und theoretischem Wege in zunehmend mikroskopische Bereiche der Materie vorstießen (Gavroglou und Simões, 2012, S. 3f.) und diverse naturwissenschaftliche Einzeltheorien – etwa des Lichts, der Thermodynamik, elektromagnetischer Felder oder der Gaskinetik – zu umfassenderen naturwissenschaftlichen Theoriegebäuden zu vereinigen versuchten (Sieroka, 2014, S. 47f.). An den Grenzbereichen von Chemie, Physik und Mathematik bildete sich ein hybrides Feld verschiedener theoretisch orientierter Naturwissenschaften heraus, deren Ziel bis heute darin besteht, den fundamentalsten Naturgesetzen und Dynamiken der Materie auf den Grund zu gehen (Simões und Gavroglou, 2001). Hybride Subdisziplinen wie Quantenchemie, theoretische Chemie, physikalische Chemie, chemische Physik, Quantenchemie oder molekulare Physik formierten sich in der Auseinandersetzung mit der aufkommenden Theorie der Quantenmechanik (Gavroglou und Simões, 2012, S. 23f.), die aus historischer Sicht einen interessanten Sonderfall chemischer Grenzarbeit darstellten. Da das Selbstverständnis gleichermaßen am Status einer Subdisziplin von Mathematik, Physik und Chemie orientiert war (und ist), erfolgt(e) die Abgrenzung in erster Linie von Feldern wie der experimentell orientierten organischen Chemie, die sich auch in den zeitgenössischen Felder noch immer widerspiegelt:

> The tension between tradition and modernity expressed itself not only in laboratory practice, but also in the conceptualization of chemical entities, such as key intermediates in chemical reactions. The 1960s saw the flare-up of the

4 Die Abgrenzung erfolgt aufgrund der geschilderten Repräsentationskonflikten insbesondere von der angewandten organischen Chemie, experimentellen Bereiche der Anorganik wie etwa der Materialforschung sowie chemischen Feldern mit Umwelt- und Medizinbezug finden sich aber ebenso häufig.

> 'classical-nonclassical ion' controversy, [...] [which] helped to form up a dividing line between, roughly speaking, two groups A and B. Group A was that of the traditionalists and conservatives, led by synthetic organic chemists who draw their power from the labor market, trained people for the employment by the pharmaceutical industry, and gave primacy to observation and experiment opposed to theory and calculations. Group B was that of the modernists, led by physical and quantum chemists to whom the Schrödinger equation was the Rosetta Stone, who gave primacy to deducing conclusions from first principles and to numerical calculations, and who saw themselves as pioneers (Laszlo, 2007, S. 345f.).

Zentrale Aspekte der physikalischen Fachkultur wie die Präideen einer holistischen, fundamentalen, nach *Tiefe* strebenden Wissensproduktion (Erlemann, 2004) sowie einer hierarchischen Ordnung der Natur und der zuständigen Wissenschaften (Hossenfelder, 2018, S. 65) zogen auf diesem Wege in die Chemie ein (Bensaude-Vincent und Simon, 2012e): Die Klassifizierung der Wirklichkeit in sog. Auflösungsebenen etwa war dem Denkstil der Chemiker/innen ebenso fremd wie die in diesem Zusammenhang stehende Idee der Reduzierbarkeit chemischer auf physikalische Eigenschaften (Gavroglou und Simões, 2012, S. 257). Wie in diesem Abschnitt argumentiert wird, zeigt sich die wachsende Dominanz physikalischer Zugriffe auf die molekulare Welt nicht in der (postulierten) Reduzierbarkeit chemischer – molekularer – Phänomene auf physikalische, sondern darin, dass in der Physik entstandene Präideen wie die Tiefe wissenschaftlicher Betrachtung, Universalität von Naturphänomenen, Einheitswissenschaft, Reduktionismus und Emergentismus in den Fachkulturen der Chemie aufgenommen wurden und gegenwärtig in forschungs- und wissenschaftspolitischen Kontexten reproduziert werden.

Wie in Abschnitt 2.3 dargelegt wurde, spielten bei der Entdeckung der Quantenmechanik die Radioaktivität sowie das elektromagnetische Spektrum eine entscheidende Rolle, da mit der Formulierung einer Theorie des Atomkernes und des Kernzerfalls die inner-atomaren Dynamiken in den Fokus rückten[5] und eine Reformulierung der bestehenden Atomtheorien durch Niels Bohr zur Folge hatte (Bohr, 1913). Demnach besteht ein Atom aus einem positiv geladenen Atomkern

5 Eine detaillierte Rekonstruktion der historischen Entwicklungslinien zwischen der Theoriebildung zur Radioaktivität und Entstehung der Teilchenphysik siehe bei (Bleck-Neuhaus, 2013, Kapitel 2). Darüber hinaus finden sich im Kanon der Chemiegeschichte einige Arbeiten, die insbesondere die Verwobenheit der Quantenmechanik mit chemischer Erkenntnisproduktion betonen (Barkan, 1992; Bleck-Neuhaus, 2013; Brändas und Kryachko, 2004; Gavroglou und Simões, 2012; Laszlo, 2007; Nye, 1993; Nye, 2016; Nye, 2018; Nye et al., 1992; Psarros, 2001; Reinhardt, 2001a; Reinhardt, 2004; Reinhardt, 2006; Steinhauser, 2014; Strom und Wilson, 2013; Simões, 2002; Simões und Gavroglou, 2001; Van Tiggelen, 2001).

(bestehend aus einer elementspezifischen Anzahl Protonen und Neutronen), der von einer bestimmten Anzahl negativ geladener Elektronen in bestimmten Abständen umkreist wird. Diese Umlaufbahnen der Elektronen werden dabei als Orbitale bezeichnet und bewegen sich je nach Anzahl der Elektronen in einer bestimmten Anzahl von Schalen, die die sog. Atomhülle bilden (Psarros, 2008, S. 302ff.). Mit diesem Atommodell lag eine Kategorie vor, mit der sich die Zuständigkeitsbereiche von physikalischen und chemischen Wissenschaften auf einer neuen epistemischen Ebene klar unterscheiden und zuordnen lassen: Da chemische Reaktionen ausschließlich auf dem Austausch von Elektronen zwischen Verbindungen in der Atomhülle basieren, die Atomkerne jedoch nicht in molekulare Reaktionen und Bindungsverhalten involviert sind, bildete sich an dieser Stelle eine ungeschriebene Arbeitsteilung zwischen Chemie und Physik heraus (ebd.), die sich in der späteren quantenmechanischen Formulierung des Atomaufbaus, der beteiligten Teilcheninteraktionen bis hin zur chemischen Bindung, molekularen Struktur und Chiralität fortpflanzt (Ruedenberg und Schwarz, 2013, S.13;16).

Zudem erhielt die neue Atomtheorie eine umfassende quantenmechanische und später eine quantenfeldtheoretische Formulierung. Elektronen und ihre Schalen werden im Sinne der Quantenmechanik nicht als Objekte mit einer konkreten räumlichen Position verstanden, sondern als Kräftefelder mit bestimmten Aufenthaltswahrscheinlichkeiten von gebündelter Energie (ebd.). Es handelt sich bei Elektronen und anderen Elementarteilchen um abstrakte, mathematisch formulierte Gegenstände, deren materielle Existenz nach dem klassischen physikalischen Weltbild nur schwer intelligibel ist, denn Elementarteilchen besitzen die Eigenschaften von Wellen und Teilchen gleichermaßen, obwohl es sich dabei weder um Teilchen noch um Wellen handelt (Bleck-Neuhaus, 2013, S. 17). Auf der inner-atomaren Ebene der Elementarteilchen ist die Materie somit unscharf und unbestimmt, die Elektronendynamik der Teilchen erfolgt über den Austausch von gequantelten Energie-Bündeln, die zwischen Atomen aufgenommen bzw. abgegeben werden. Auf dieser Feststellung beruht Max Plancks Bezeichnung des Wirkungsquantums $\hbar$, die sich später stellvertretend für denjenigen physikalischen Bereich etablierte, dessen Observablen nicht der klassischen Mechanik unterliegen (ebd.).[6] Im Laufe der Zeit wurden verschiedene Eigenschaften der Materie festgestellt, die ausschließlich in Quantensystemen beobachtbar sind,

6 Die Dynamiken von Wellen, Teilchen wie Photonen und atomspektroskopischen Phänomenen werden dadurch erklärt, dass Elektronen sich auf bestimmten Bahnen um einen Kern bewegen, deren Energie ein ganzzahliges Vielfaches einer elementspezifischen Grundenergie betragen. Jedes Orbital ist durch die Hauptquantenzahl *n* und den Bahn- sowie Eigendrehimpuls charakterisiert. Elektronen bilden demnach im elektrischen Feld eines Atoms eine stehende Welle (Bleck-Neuhaus, 2013, S. 17).

so etwa Spin, Drehimpuls und Parität. Bei diesen sog. Observablen handelt es sich um mathematische Objekte, die wiederum in sog. Eigenzuständen auftreten können (ebd., S. 106).

Mit dem *zoom* in das Atom und seine Bestandteile hinein wurde deutlich, dass die Elementarteilchen völlig anderen physikalischen Gesetzmäßigkeiten folgen als makroskopische Objekte. Dies lag darin begründet, dass die im 19. Jahrhundert entwickelte mechanische Lehre – heute als klassische Mechanik bezeichnet – sich an Körpern und Objekten orientierte, die als physische Objekte in Raum und Zeit diskret lokalisierbar sind (ebd.). Demnach können sich zwei Körper nicht zur gleichen Zeit räumlich exakt an der gleichen Stelle aufhalten, denn eine essentielle Eigenschaft der klassisch observierbaren Materie ist es, Raum zu verdrängen. Bei Elementarteilchen wie Elektronen trifft dies hingegen nicht zu: Auch wenn Elektronen im Modell häufig in der grafischen Darstellung als Kügelchen eine objektnahe, symbolische Gestalt erhalten, verfügen sie kaum über eine Masse (ebd., S. 58). Entsprechend des um 1925 entstandenen Atommodells der Quantenphysik verfügen Teilchen wie Elektronen über die Eigenschaften von Wellen, d.h. sie bewegen sich mit einer bestimmte Masse und Geschwindigkeit im Raum, wobei sie aber nie eine klare Position einnehmen, sondern immer nur eine relative Aufenthaltswahrscheinlichkeit (eine zeitlich bedingte Ausdehnung im Raum) zwischen zwei möglichen Minimal- bzw. Maximalpunkten (ebd.). Es finden dabei Überlagerungen (sog. Interferenzen) von Teilchen im Raum statt. Sie sind somit nicht fix im Raum lokalisierbar, ihr Aufenthaltsort wird stattdessen als Wahrscheinlichkeitsfunktion (z.B. einer Elektronenaufenthaltswahrscheinlichkeit) wiedergegeben. Nach Erwin Schrödingers quantenmechanischem Formalismus lässt sich die Ausbreitung von Teilchen im Raume bzw. die Wahrscheinlichkeit, dass sie sich in einem räumlichen Gebilde aufhalten, als Wellenfunktion Ψ für alle entsprechenden Teilchen eines Systems darstellen (Psarros, 2008, S. 303):

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi(x,t) = (-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2}{dx^2} + V(x))\Psi(x,t)$$

Mit dem Zugriff einer Energiegleichung auf die Dynamiken von Elementarteilchen lag eine Beschreibung für den inneren Atomaufbau vor und sollte sich auch bald beim Nachvollziehen des molekularen Strukturaufbaus und der chemischen Bindung als hilfreich erweisen (Ruedenberg und Schwarz, 2013, S. 27f.). Diese wurden, wie in Abschnitt 2.3 dargelegt, in enger Auseinandersetzung mit der molekularen Spiegelasymmetrie entwickelt, wobei insbesondere Friedrich Hund und Robert Mullikan mit der quantenmechanischen Ausformulierung des Orbitalmodells einen wichtigen Beitrag in der Geschichte der theoretischen Chemie leisteten (Quack, 2014, S. 66). Auch Linus Pauling, Walter Heitler und Fritz London sind mit der Entwicklung ihrer Valenzstrukturtheorie zur molekularen Bindung in den 1920er Jahren in der Geschichtsschreibung des Faches repräsen-

tiert (Nye, 1993, S. 245). Die Bestimmung einer Lokalisation von Teilchen bzw. Atomen im Raume und die Beschreibung ihres Bindungsverhaltens zu Atomen und Molekülen erfolgt bis heute über die Berechnung des stationären Zustandes eines quantenmechanischen Systems[7] unter Berücksichtigung der Position ihrer Elektronen e und Nuklei k, einem Eigenzustand E des sog. Hamiltonoperator $\hat{H}$, nachdem die (zeitunabhängige) Schrödingergleichung aufgelöst wird (Atmanspacher, 2016b, S. 532):

$$\hat{H} \cdot \Psi(x_e, x_k) = E \cdot \Psi(x_e, x_k)$$

Nachdem endgültig der Beweis für die Existenz von Atomen in der Physik durchgedrungen war[8] und im Zuge dessen auch die sub-atomare bzw. inneratomare Welt der Materie erschlossen war (Bleck-Neuhaus, 2013, S. 16), präsentierte sich die Natur Ende der 1920er Jahre in ihren *kleinsten* Dimensionen als Zusammenspiel von Teilchen, Kräften und Ladungen, deren Dynamiken sich zwar berechnen ließen, sich aber jeglicher Anschaulichkeit entzogen. Stattdessen wurden völlig neue – rein quantenmechanisch formulierbare – Größen und Phänomene wie Spin, Drehimpuls und voraussetzungsreiche, ebenfalls mathematisch formulierte Erhaltungsgrößen und -Sätze in der Theorie der Materie relevant (ebd., S. 249ff.). Die Chemie erhielt in der Folge eine physikalische Fundamentaltheorie der molekularen Struktur sowie der chemischen Bindung und Reaktion, die sich rasch durchsetzte. Aus diesem Sachverhalt wurde in der Folge die These der Reduzierbarkeit der Chemie auf physikalische Gesetze abgeleitet, die die Grenzarbeit der chemischen Felder bis heute nach innen wie außen durchzieht (Bensaude-Vincent und Stengers, 1996, S. 236ff.). Der Physiker Paul Dirac brachte

7 Die Bezeichnung des Systems für einen zu untersuchenden Phänomenbereich entspricht der Terminologie der Quantenphysik und war in den chemischen Wissenschaften bis Mitte des 20. Jahrhunderts abwesend. Analog zu einem Quantensystem wird in Abgrenzung hierzu von einem molekularen System bzw. einem Zell-System gesprochen. Diese semantische Unterscheidung macht deutlich, in welchem Maße die hierarchisierende Klassifizierung in Auflösungs- bzw. Betrachtungsebenen in die epistemische Kultur der physikalischen Wissenschaften eingeschrieben ist und in andere wissenschaftliche Felder einfließt.

8 Die Existenz der Atome stellt in der historischen Grenzarbeit zwischen Chemie und Physik einen Knotenpunkt dar. Wie in 2.1 bereits ausgeführt wurde, arbeiteten Chemiker/innen bereits im 19. Jahrhundert mit einer Heuristik des Atoms und bauten ihre Theorie wie Praxis der molekularen Struktur darauf auf. Diese pragmatische Herangehensweise, die trotz erheblicher Ungewissheiten eine chemische Wissensproduktion ermöglichte, lehnten Physiker/innen hingegen weitestgehend ab. Der Atomismus, der Annahme der Existenz von Atomen, war eine der umstrittensten Annahmen in der Geschichte der Chemie und wurde gar zur Diskredition des gesamten Faches ins Feld geführt. Erst mit Jean-Baptiste Perrins endgültigem Beweis im Jahre 1913 erkannten auch die letzten Physiker/innen die Atome als Bestandteile der Materie an. In der Folge wurde das Atom in der Grenzarbeit zwischen den Disziplinen von der Physik angeeignet (Stengers, 2011a).

diese Schlussfolgerung in seiner zusammenfassenden Formulierung der zeitgenössischen Quantentheorie folgendermaßen auf den Punkt:

> The underlying physical laws necessary for the mathematical theory of a large part of physics and the whole of chemistry are thus completely known, and the difficulty is only that the exact application of these laws leads to equations much too complicated to be soluble (Dirac, 1929, S. 714).

Auch wenn die Schrödingergleichung sich anfangs nur für Atome von relativ geringer Komplexität wie Wasserstoff und Helium exakt auflösen ließ, implizierte Dirac dennoch, dass sich mit einer erhöhten Rechenleistung die gesamte Chemie prinziell in der Verteilung von Elektronen ausdrücken lässt (Bensaude-Vincent und Simon, 2012b, S. 166f.). Die Idee der Reduzierbarkeit chemischer Phänomene auf physikalische und mathematische Gesetze war jedoch zum gegebenen Zeitpunkt nicht neu, sondern zeichnete sich bereits seit der Entstehung der Physik als moderne Naturwissenschaft im physikalischen sowie mathematischen Denken und Wissenschaftsverständnis ab (Bensaude-Vincent und Simon, 2012e). Unter Chemiker/innen hingegen war diese wissenschaftshierarchisierende Strategie im Umgang mit der materiellen Natur hingegen im 18. und 19. Jahrhundert eher schwach ausgeprägt, selbst als sich im Zeitalter der Biochemie im Grunde auch biologische Prozesse auf chemische zurückführen ließen (Simões und Gavroglou, 2001). *Dirac's claim*[9] wurde in den Folgejahren unter forschungspraktisch orientierten Chemiker/innen jedoch kaum rezipiert. In der organischen Strukturchemie, die nach wie vor das Leitparadigma der Chemie bildete, wurde kaum auf die vermeintliche Reduzierbarkeit und die quantenmechanische Theorie der Chemie reagiert und man empfand sie zudem nicht als existenzbedrohend (Simões, 2002). Dennoch trat mit dem Aufstieg der Quantenmechanik, wie in 2.3 bereits ausführlich diskutiert wurde, ein forschungspraktischer Wandel in den Feldern der Chemie ein, der sich insbesondere in vier Ausprägungen zeigte:

Erstens wurde der Wandel in Form der sog. Instrumentellen Revolution (Chamizo, 2019) spürbar, die eine fundamentale Umstrukturierung des standardisierten Chemielabors mit sich führte. Physikalischen Apparaturen wie NMR-Spektroskope ersetzten sukzessive die aufwendigen Präparations- und Analysemethoden der Nass-Chemie, bei der das NMR-Proberöhrchen eine der ikonischen Insignien der Chemie ablöste, nämlich das Reagenzglas (Laszlo, 2007, S. 338). Zweitens wandelte sich die akademische Chemie zu einer kostenintensiven *Big Science* mit hochpreisigen Geräten, was zu völlig neuen Strategien in der akademischen Einwerbung von Ressourcen und Karrieren von Forscher/innen sowie einer grundsätzlichen Verschiebung der Zentren chemischer Gelehrsamkeit

9 Diese Bezeichnung ist dem Titel des Artikels (Simões, 2002) entlehnt.

aus Europa in die USA und China zur Folge hatte (Griesar, 2004a). Drittens geriet die Chemie mit diesen Veränderungen in einen völlig neuen Fokus der Forschungsförderung, was diese ab den 1950er Jahren den Innovationsdispositiven des Kalten Krieges[10] unterwarf (Kragh, 2001). Viertens entwickelte sich aus dem Problem, dass sich nur eine begrenzte Anzahl an molekularen (und anderer Phänomenen auf *höheren* Wirklichkeitsebenen direkt auf die ersten Prinzipien der Quantenmechanik zurückführen ließen, ein Narrativ, das sich insbesondere für die Geschichte der *Data Sciences* als bedeutend erweisen sollte.

Demnach etablierte sich ein Narrativ, das von einer komplexen Wirklichkeit als mehrstufiges System ausgeht, hinter dem allerdings ein ordnendes, kybernetisches Schema steht, das es zu entschlüsseln gilt (Mainzer, 1998, S. 36). Als Analogien zu den ersten Prinzipien der Quantenphysik werden durch datengestützte Modellierungen entsprechende Modelle konstruiert, entsprechend derer sich auch bei komplexen, makroskopischen Systemen Muster erzeugen lassen. In diesem Kontext steht die Entwicklung von Hochleistungsrechnern, die sich auch in der theoretischen Chemie durchsetzten (Primas, 1985, S. 112). All diese Entwicklungen trugen dazu bei, dass sich theorie- und laborbezogene Felder der Chemie zunehmend von einander entfernten, zumal dieser Prozess durch die Reduktionssemantik der Innovationsdispositive von Grundlagenforschung und anwendungsorientierter Forschung forciert wurde.

Die Reduzierbarkeitsthese chemischer auf physikalische Eigenschaften wurde strategisch so genutzt, dass die Wissenschaft von den Molekülen, Stoffen und Elementen sich in ein lineares Innovationsmodell der Einheitswissenschaft eingliedern ließ. Dies trieb die Spaltung von organischer Synthesechemie und den theoretischen Feldern der Chemie noch weiter voran und sedimentierte sie zunehmend in der jeweiligen Fachidentität. Die Chemie konnte mit einer quantenmechanisch-physikalischen Fundamentaltheorie in militär- und industrienahen Großprojekten erstmals Ressourcen mobilisieren, die zuvor nicht verfügbar gewesen wären (Reinhardt, 2001b) und so traten etliche an der Theorie ausgerichteten Chemiker/innen als Anhänger/innen der Quantenmechanik auf (Laszlo, 2007, S. 340). Dem unrühmliche Erbe der Alchemie, das in der allgemeinen Vorstellung des Faches noch nicht gänzlich abgestreift gewesen war, konnte eine *harte*, mathematisch formalisierte, vollwertige Naturwissenschaft entgegengestellt werden, die sich an den epistemischen Kriterien der Physik messen lassen konnte (und diese im Laufe der Zeit gar in Bezug auf die Höhe von Fördermitteln übertraf) (Steinhauser, 2014, S. 45). Die flächendeckende Anwendung der NMR-Spektroskopie in der chemischen Laboranalytik ermöglichte

10 Eine Analyse der Verkettungen zwischen der Erfolgsgeschichte der Quantenmenchanik und den Innovationsdispositiven einer repressiven, technokratischen Wissenschaftskultur des Kalten Krieges liegt mit (Barad, 2007) vor.

wiederum eine Vielzahl statistisch relevanter Bestätigungen der Prämissen der Quantentheorie. Reduktionismus und Physikalismus haben so keinesfalls zu einer Obsoleszenz der Chemie als Wissenschaft geführt, sondern im Gegenteil: „die Chemie wurde in neuen, prestigereichen physikalischen Begriffen interpretiert, damit sie im Kern bleiben konnte wie sie war" (ebd.).

Dass die Reduzierbarkeit der Chemie auf die Physik intelligibel wurde, wurde durch Jahrzehnte intensiver experimenteller wie theoretischer Arbeit aktiv hervorgebracht und immer wieder aktualisiert und aufrechterhalten (Stengers, 2010b, S. 16). Erst eine ausreichende Menge statistischer Auswertungen mit Datensätzen aus den verschiedensten physikalischen, biologischen und chemischen Systemen brachte der Quantenmechanik (und Quantenfeldtheorie) ein erhebliches Maß an Evidenz ein (Bell, 1992). Dass eine Aussage wie „das, was dem gesunden Menschenverstand so unerklärlich und rätselhaft erscheint, hat seine Existenz inzwischen millionenfach in der Praxis bewiesen" (Röthlein, 2010, S. 49) mit epistemischen wie infrastrukturellen Machtfragen verbunden ist, bekam die (Teilchen-)Physik selbst rasch zu spüren und profitierte in erheblichem Maße von immensen öffentlichen Fördermitteln und der Einrichtung von Großanlagen wie dem CERN. Die Suche nach immer neuen Teilchen der subatomaren Welt war ressourcenintensiv und immer wieder rechtfertigungsbedürftig (Stengers, 2010a). Als erfolgreiche Strategie erwies sich dabei stets der implizite Verweis auf die Annahme einer Hierarchie der Wissenschaften und das lineare Innovationsmodell der Wissenschaften (Galison, 1996, S. 7) und die Fundamentalität der quantenphysikalischen Erkenntnis, die alleine schon um ihrer selbst Willen erstrebenswert sei (Stengers, 2011c, S. 222). Die gegenwärtigen Diskurse um die Chiralität der Teilchen und der fundamentalen Asymmetrien bedienen ebenfalls diese Rhetorik, wenn von einem der letzten Geheimnisse der Natur die Rede ist und die Bedeutung der Lösung dieses Rätsels an keinerlei Anwendungszwang geknüpft ist.[11] Die Fundamentalität, die auf der Präidee einer Hierarchie der Wissenschaften basiert, wurde zur mächtigsten Ressource der Teilchenphysik, derer sich in der Folge auch Quantenchemie und theoretische Chemie bedienten und bis heute nutzen (ebd.).

11 An dieser Stelle sind vorweg die grundlegenden Unterschiede in der Erkenntnisgewinnung zwischen organischer und theoretischer Chemie anzuführen. Die Hypothesenprüfung erfolgt in der Chemie seit ihrer Vernaturwissenschaftlichung i.d.R. über das Experiment bzw. das erfolgreiche Einwirken auf die Struktur von Stoffen im Sinne einer Synthese. Die theoretische Chemie hebelte dieses Prinzip aus und hatte zu Beginn deswegen Schwierigkeiten den etablierten Gütekriterien chemischer Forschung in der Ressourcenakquirierung zu entsprechen (Frenking, 1998, S. 103). Darüber hinaus zeigen historische Lehrbuchanalysen, dass sich mathematische Methoden nur sehr zögerlich in die Gedankengebäude der theoretischen Chemie integrieren ließen und es zu heftigen Kontroversen in diesem Fachbereich kam, ob die Operatorenschreibweise überhaupt praktikabel sei (Simões und Gavroglou, 2001, S. 52).

Die in Abschnitt 2.3 erwähnten, kostspieligen physikalischen Mess- und Analysegeräte dienen ebenso der Evidenzgenerierung wie hochsensible Laserspektrometer, Teilchenbeschleuniger und Hochleistungscomputer, was die quantenchemischen Forschungsbereiche den *Big Science*-Forschungssettings der Teilchen- bzw. Hochenergiephysik annäherte. Die Abgrenzung von anwendungsorientierten bzw. praktischen Bereichen der Chemie in Organik wie Anorganik transportiert das Bild von zwar epistemisch völlig getrennten Bereichen, die allerdings für eine umfassende Generierung chemischen Wissens – und damit industrieller Anwendungen – gleichermaßen berücksichtigt und gefördert werden müssen (Quack, 2015). Legitimation verschaffen sich diese kostenintensiven Projekte auch in der Chemie durch die in der Wissenschaft außergewöhnliche Erfolgsgeschichte der Quantenmechanik sowie durch den Verweis auf die strikte semantische Trennung von Grundlagenforschung und anwendungsorientierter Forschung in der Forschungsförderung (Frenking, 1998, S. 107). Als Grundlage der Chemie weist die Quantenchemie im technischen Anwendungsbereich industriell gefertigter und erfolgreicher technologischer Produkte auf ihre quantenmechanische Grundlage[12] (ebd.). Es ist kein Zufall, dass sämtliche Interview-Partner/innen, die als Vertreter/innen der theoretischen Chemie gelten, lange Jahre in angewandten Bereichen wie der datenbasierten Modellierung in der Risiko-, Energie- oder Arzneimittelforschung beschäftigt waren, ehe sie sich gegen Ende der Karriere den tiefen Fragen der Natur zugewandt haben.[13] Das Versprechen einer Übersetzung fundamentaler Kenntnisse über die Dynamiken der Materie lässt sich erfolgreich in derzeit aufstrebende ingenieurswissenschaftliche Bereiche wie Materialwissenschaften, Robotik, *Data Science* oder *Machine Learning* einbetten.

Gegenwärtig bestehen die Felder der theoretischen Chemie bzw. der Quantenchemie aus relativ kleinen, lokalen Kollektiven und Forschungsgruppen, deren Mitglieder kaum in Laboratorien anzutreffen sind, denn sie beschäftigen sich in

12 In diesem Zusammenhang werden insbesondere Technologien im Bereich der Computertechnologie wie *Quantum Computing* oder *Quantum Cryptography* zur Datenverschlüsselung genannt. Es hat sich mittlerweile ein gewisser Kanon an Anwendungen etabliert, die auf die Quantenmechanik zurückgeführt werden. Dazu zählen neben Kernwaffen und Kernspinresonanz vor allem Diode und Transistor, die die Grundelemente der zeitgenössischen Elektronik darstellen (Feynman, 2013). Es fällt auf, dass die meisten Anwendungen im Bereich militärnaher Forschung entstanden sind (Barad, 2007, S. 253).

13 Ein emeritierter Professor der anorganischen Chemie drückt diesen thematischen Wechsel von angewandten zu intellektuell reizvollen theoretischen Problemen der Chemie (wie der Chiralität) gegen Ende der akademischen Laufbahn folgendermaßen aus: „*Genau, Materialien haben wir gemacht, Wirkstoffstrukturen. Die letzten zehn Jahre dann fast nur noch Batterieforschung. Und das was ich die letzten fünfunddreißig Jahre gemacht hab, das geht nur mit zwanzig Leuten und tollen Labors. Im Moment, ja also wenn man das alles schon erreicht hat, dann kann auch mal mutig sein und sagen: Jetzt schauen wir mal die GANZE Welt an.*“

erster Linie mit computergestützten Simulationen, die die Vorhersage chemischer Prozesse leisten (Psarros, 2001, S. 47). Die forschungspraktischen Grundlagen bilden dabei die Lösungen komplexer Gleichungssysteme, die auf den physikalischen und chemischen Erkenntnissen der Quantenmechanik beruhen und die molekulare Welt der Strukturen, Bindungen und Reaktionen als direkte Verlängerung der fundamentalsten Dynamiken der Materie und ihrer Bausteine verstehen. Auch in diesem Bereich lassen sich die im mathematischen Modell prognostizierten, abstrakten Naturphänomene nur durch erheblichen technischen Aufwand experimentell erfahrbar machen (Gavroglou und Simões, 2012, S. 24). Die Grenzen zwischen Chemie und Physik (sowie Mathematik und *Computer Sciences*) werden in diesen abstrakten, durch strenge mathematische Formalismen bestimmten Bereichen bewusst verwischt und als der Wissensproduktion hinderlich infrage gestellt. Es wird ein postdisziplinäres Wissenschaftsmodell einer vereinigten Fundamentalwissenschaft vertreten und häufig auch gelebt, etwa in der Gestaltung universitärer Lehre und Betreuungsverhältnissen, aber auch in intensiven philosophischen Auseinandersetzungen, wie die empirische Analyse des Feldes zeigt.

In Chemie wie Physik gleichermaßen haben die Jahrzehnte überspannende Grenzarbeit zwischen Grundlagen- und Anwendungsforschung auch zu getrennten Fachkulturen zwischen experimentell orientierten und einem sich als Fundamentalwissenschaft verstehenden Feld geführt. Die Abgrenzung der Quantenchemie von der organischen Synthesechemie (und analog der Experimentalphysik) erfolgt auf einer epistemischen wie praktischen Ebene, denn die praxisbezogene, handwerkliche und an der molekularen Struktur bzw. physikalischen Makrowelt orientierte Forschungsarbeit erscheint in den herausgearbeiteten Narrativen als weniger intellektuell reizvoll bzw. weniger *tief* bezüglich des leitenden Erkenntnisinteresses. Den Kolleg/innen im Labor wird eine experimentalpraktische Pedanterie unterstellt, die als Kontrastfolie der eigenen Fachidentität herangezogen wird.[14] Analog zum Leitmodell einer pyramidenförmigen Hierarchie der Wissenschaften wird die Beschäftigung der Quantenmechanik mit den fundamentalsten Teilchen und deren Wechselwirkungen zum tiefsten Punkt in dieser Hierarchie, und alles andere scheint darauf aufzubauen bzw. zu Anwendungsbereichen der

14 Im Interview mit einem Experimentalchemiker wird deutlich, dass bereits im Grundstudium der Dualismus von theorieorientierten und experimentellen physikalischen Subdisziplinen in die Sozialisation eingeschrieben wird: *„Also ich hab mich einfach lieber mit irgendwelchen mathematischen Formalismen rumgequält-rumgeschlagen und nicht damit, irgendwelche Apparaturen zu polieren oder an irgendwelchen Stellschrauben wieder das System einzujustieren. Ja, ist halt so 'ne VORLIEBE, nicht? Und halt so'n bisschen dieser ideologische Aspekt, dass ich von Anfang an mit den Theoretikern größere Sympathien gehabt habe und die haben teilweise auch so eine antiexperimentelle Ideologie verbreitet, nicht? So 'ne SCHMUTZIGE Welt und eben die Theorie – das ist noch so der schöne der HIMMEL, da funktioniert noch alles ganz GLATT" [lacht].*

Quantenmechanik zu werden. In den Semantiken von Tiefe und Fundamentalität, die sie ihren fachspezifischen Fragestellungen und Arbeitsweisen zuschreiben, grenzen sich Vertreter/innen der Quantenchemie gegen eine dem „*Kochen*" verschriebene, laborgebundene, synthetische Organik ab und betonen die epistemische Nähe zur theoretischen bzw. Quantenphysik. Die Begründung einer physikalischen Theorie der Chemie stellt dabei den Ursprungsmythos der eigenen Disziplin dar und die Erweiterung dieser zählt zu den Zielen des Faches.

> *Lang: Und wie haben Sie sich sonst Wissen über Chiralität angeeignet?*
> *Prof. Wolf-Ferrari: Wir hatten an [unserer] Universität einen Professor, er war ein GLANZvoller Vertreter der Geschichte der Chiralität IN der organischen Chemie und er hat eben auch forschungsmäßig seine Synthesen bearbeitet. Irgendwelche prochiralen (1) Methylgruppen, mit denen man dann nach einem Baukastenprinzip chirale Mittel AUFbauen kann, nicht? […] Und das hab ich zur Kenntnis genommen. Organische Chemie war damals schon nicht mehr etwas was mich sehr INTERESSIERT hat aber man hat das halt so aufgenommen, nicht? (.) Ein wesentlicher Punkt wurde dann, dass man dann in meiner Zeit in der theoretischen Chemie – DA wurde man dann konfrontiert mit Versuchen der ERKLÄRUNG! (.) Woher kommt [die Chiralität]? (.) Und da ist das also VIEL, VIEL tiefer gewesen! Da ist man eigentlich so weit gegangen wie man überhaupt GEHEN kann heute.*

Die Relationskategorie tieferer und höherer wissenschaftlicher Fragen, Betrachtungsweisen und Phänomene impliziert und reproduziert verschiedene Präideen, die aus der Physik in die Chemie gewandert sind und sich dort im Laufe der Zeit sedimentierten. Die historisch gewachsene Beziehung zwischen Quantenchemie und den fundamentalen, physikalischen Wissenschaften im Rahmen der Formulierung der Quantenmechanik hat nicht nur zu einer physikalischen Theorie des Molekularen und einer Revolution des chemischen Labors geführt. Die wachsende Dominanz physikalischer Zugriffe auf die etablierten Gegenstände der Chemie zeigt sich darüber hinaus auf der Ebene der semantischen Feinheiten, die sich darin offenbaren, *wie* über die molekulare Welt gesprochen wird und *wie* chemische und physikalische Wissensproduktion zueinander ins Verhältnis gesetzt werden. So etwa in der Rhetorik von Emergenztheorien, welche aus einem physikalischen *style of reasoning* entsprang und sich allmählich auch in der Chemie durchsetzt, indem sie auch in diesem Bereich über bestimmte Innovationsdispositive vermehrt Anwendung fand und in der Philosophie der Chemie Debatten anstieß.

Die molekulare Welt wird im Sinne einer Betrachtungsebene behandelt, die in ein hierarchisches Pyramidenmodell aufeinander aufbauender *Seinsschichten*, *Komplexitätslevels*, *Wirklichkeitsebenen*, *Körnigkeiten* oder *Auflösungsstufen* integriert wird. Diese Semantiken waren dem chemischen Denken bis vor wenigen Jahren

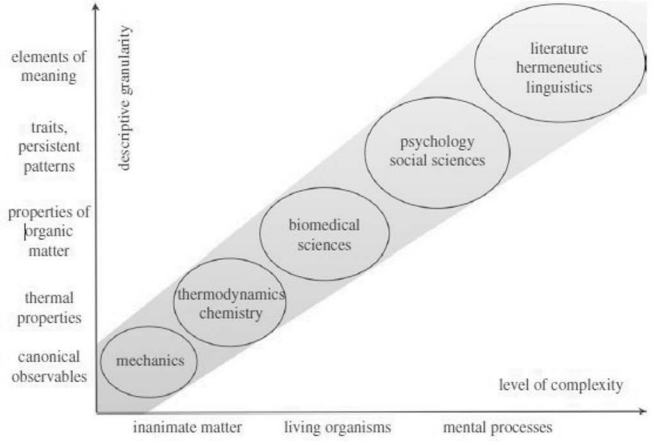
eher fremd und wurden entsprechend zeigt sich in der gesteigerten Verwendung der Einfluss physikalischer Semantiken in der Chemie (Simões und Gavroglou, 2001, S. 52). Die sukzessive Übernahme dieses Grundverständnisses von Natur, Wirklichkeit und Wissenschaft wanderte einerseits über die theoretische Chemie in die chemischen Felder ein, die im Zuge der Entstehung der Quantenmechanik verstärkt von diesen physikalischen Konzeptionen geprägt wurden. Zudem bestand eine enge Wechselbeziehung zwischen den theoretischen Feldern der Physik und Chemie mit der Wissenschaftsphilosophie und -politik sowie deren zugrundeliegenden Innovationsdispositiven. Von der Übernahme physikalischer Weltbilder in den hybriden Grenzbereichen der Chemie zeugt eine Reihe von Präideen und Narrativen, die sich in der Interviewstudie zur Chiralität herausarbeiten ließen und im folgenden Abschnitt 6.2 ausführlich behandelt werden.

6.2 *„Chirality as a unifying concept"*

Die zentralen Befunde dieses Kapitels – dass zwischen den Fachkulturen der theoretischen und laborbasierten Feldern der Chemie ein Graben entstanden ist und im Zuge dessen physikalische Konzeptionen des Molekularen zunehmend dominant werden – werden in diesem Abschnitt in Bezug auf ihre Wechselbeziehungen mit der Wissenschaftsphilosophie erörtert. Die Wissenschaftsphilosophie des 20. Jahrhunderts war erheblich durch physikalische Weltbilder, Fallbeispiele, Fragestellungen und Modelle der Materie geprägt, was sich in der Folge in den Semantiken der Wissenschaftspolitik und den Dispositiven der Forschungsförderung niederschlug (Schummer, 2006). In der Folge wurden diese physikalischen Konzeptionen auch in der Chemie präsent, was sich in der Aneignung und Umdeutung etablierter chemischer Konzepte und Phänomene – wie der Chiralität – nachweisen lässt. Wie in der Folge erörtert wird, reproduzieren insbesondere jüngere Emergenz- und Systemtheorien die ursprünglich aus der Physik stammenden Narrative der Einheit und Hierarchie der Wissenschaften. Dies zeigt sich in paradigmatischer Weise in der Rezeption der Erkenntnisse der Quantenchemie zur Chiralität, seit es Quantenchemiker/innen gelungen ist, einen empirischen Zusammenhang zwischen molekularer und subatomarer Spiegelasymmetrie zu bestimmen. In der Wissenschaftsphilosophie – und insbesondere unter durch die Quantenchemie geprägten Chemiephilosoph/innen – finden Emergenztheorien eine starke Rezeption, die sich in drei miteinander verwobenen Diskurssträngen niederschlägt:

Erstens bietet sich die Chiralität als eines der wenigen Beispiele an, bei dem sich ein chemisches Phänomen (strukturelle Asymmetrie des Moleküls) tatsächlich auf ein physikalisches Phänomen (schwache Wechselwirkungen und fundamentale Asymmetrien der Materie) reduzieren lassen könnte. Dieser Sachverhalt hat

zweitens wissenschaftsphilosophische Debatten befruchtet, die einer holistischen Betrachtung der Entstehung des Lebens und *emergence of the mind* gewidmet sind (Atmanspacher, 2016a). Der zugrundeliegende Denkstil zeigt sich drittens in der Behandlung der Chiralität als Universalismus der Natur, der sich auf sämtlichen Ebenen der Wirklichkeit zeigt und die (physikalischen) Präideen von Einheit und Hierarchie der Wissenschaften in der Chemie mitträgt. Damit zeige ich auf, dass die Wissenschaftsphilosophie in der Grenzarbeit der Wissenschaft nicht wegzudenken ist und die Verwobenheit von Natur- und Geisteswissenschaften in der Analyse wissenschaftlicher Felder und ihrer Dynamiken berücksichtigt werden sollte. Doch zunächst seien die Konzeptionen der Einheitswissenschaft in ihren wissenschaftsphilosophischen Dimensionen auseinandergesetzt, bevor auf die Chiralität und ihre Rezeptionskontexte und Projektionen eingegangen wird.



Modell zum Zusammenhang zwischen emergenten Beschreibungsebenen und wissenschaftlichen Feldern/Disziplinen. Übernommen aus (Atmanspacher et al., 2014).

Die Präidee der Einheitswissenschaft richtet sich nach einer Vorstellung von der Natur als teleologisch und positiv aufeinander aufbauendes System und einer Wissenschaft, die in der Erforschung der Natur durch eine gemeinsam geteilte Sprache, Methodologie und Gesetzmäßigkeiten vereint ist (Mittelstraß, 1998, S. 49f.). Das zugrundeliegende Naturverständnis gliedert diese Aspekte in hierarchisch klassifizierte Phänomenbereiche wie etwa Elementarteilchen, unbelebter Materie, belebter Materie bis hin zu Organismen und den mentalen und sozialen Funktionen des Menschen. Die (Natur-)Wissenschaften, die diese Phänomene erforschen, siedeln sich in diesem Wissenschaftsverständnis parallel zu dieser Hierarchie der Natur in ihrer Betrachtungsebene des Atomaren, Submolekularen, Molekularen und Organischen an. Dieser Annahme nach *bauen* auch die Diszi-

plinen von Mathematik, Physik, Chemie, Biologie bis hin zu Psychologie und Sozialwissenschaften in dieser Reihenfolge *aufeinander auf* und dem Ideal nach fließt das Wissen zwischen den Disziplinen von *unten* nach *oben* (Findlay und Thagard, 2012). So gelangt das Wissen *später* in anwendungsorientierte Bereiche wie Medizin oder Ingenieurswissenschaften und sorgt für Wissenszuwachs und Fortschritt, was ein lineares Fortschrittsmodell als Innovationsdispositiv impliziert. Die historisch normativ besetzten Begrifflichkeiten von Grundlagenforschung und anwendungsorientierter Forschung und ihre Verwendung spiegeln diese Annahmen ebenso wieder (Schauz, 2014a, S. 275) wie metawissenschaftliche Fragen nach Reproduzierbarkeit (Atmanspacher et al., 2014) und Interdisziplinarität (Fischer, 2011, S. 38f.).

Der Chemie wird in diesem Modell eine mittige Position zwischen Physik und den Lebenswissenschaften zugedacht (Balaban und Klein, 2006), die sich in der Zuschreibung der *Central Science* im Laufe des 20. Jahrhunderts materialisierte (Roth, 2015; Bertozzi, 2015) und sich mittlerweile im Selbstverständnis der Disziplin sedimentiert hat (Reinhardt, 2001b, S. 1). Diesem Verständnis von der Rolle der Chemie im Konzert der Wissenschaften liegt die Annahme zugrunde, dass die Mehrzahl ihrer Phänomene auf physikalische Phänomene zurückzuführen sei und dass die Chemie zugleich durch die biochemischen Übergänge die Grundlage des Lebens darstelle (Hendry, 2012). Die Natur präsentiert sich in diesem logisch-empiristischen Zugang als mehr oder weniger geschlossenes System aus fundamentalen Wechselwirkungen und Kräften, die sich in anorganischen molekularen Strukturen niederschlagen und diese sich wiederum in der Welt des Lebendigen äußern: nämlich als ein perfektes Zusammenspiel, das in der kodifizierten Sprache der Mathematik im Buch der Natur festgehalten ist und von objektiven Wissenschaftler/innen entschlüsselt werden muss. Dieses positivistisch-holistische Verständnis von Natur und Wissenschaft ist weit verbreitet im Wissenschaftsverständnis von Naturwissenschaftler/innen, wenn nicht konstitutiv für ihre Beziehungen im wissenschaftlichen Feld (Koppman et al., 2015, S. 41f.).

Die Einheitswissenschaft bzw. die Einheit der Wissenschaften auf phänomenologischer, nomologischer, methodologischer und semantischer Ebene wird in diesem Zusammenhang als Präidee verstanden, die im Paradigma des Wiener Kreises entstanden ist und sich trotz dessen Niedergangs im Wissenschaftsverständnis zahlreicher wissenschaftlicher Felder und deren epistemischen Kulturen bis heute erhalten hat (Mittelstraß, 1998, S. 56f.). Von den frühen Enzyklopädien der Aufklärung über die Wissenssoziologie Auguste Comtes (Comte, 1974) und dem Paradigma des Logischen Empirismus hin zu zeitgenössischen Ansätzen im Zeitalter von *Big Data*, *Quantum Computing*, Modellierung und künstlicher Intelligenz besteht unter vielen Wissenschaftler/innen und Wissenschaftsphilosoph/innen das Bedürfnis, die wissenschaftlichen Aufgabenbereiche und Diszi-

plinen in ein geordnetes Schema zu überführen und zueinander ins Verhältnis zu setzen (Beggs et al., 2012). Ob als Baum, als Skala, als Quilt, als Pyramide oder als Netzwerk – die Darstellung der Hierarchie der Wissenschaften basierend auf verschiedenen Klassifikationsschemata ist bis heute in aller Munde und als mächtige Präidee wirksam, auch wenn sie in der Wissenschaftsphilosophie nicht erst seit der konstruktivistischen Wende lange umstritten ist und als überholt gilt (Galison, 1996).

Die Vorstellung der Einheitswissenschaft findet sich zwar bereits in früheren Zeiten, dennoch wird dieses Konstrukt am ehesten mit dem Wiener Kreis in Verbindung gebracht (ebd., S. 50ff.). Dieses Kollektiv, bestehend aus Vertreter/innen des Logischen Empirismus, erlebte seine Blütezeit in den 1920er und 1930er Jahren. Diese stand eng mit der Erfolgsgeschichte der Quantenmechanik und den Hoffnungen in Verbindung, die an Revolution der physikalischen Theorie gebunden waren. Die Vorstellung einer *„theory of everything"*, einer mathematisch-physikalischen Weltformel, sollte nach Paul Oppenheim und Hilary Putnam dabei vor allem durch die Reduktion chemischer, biologischer und sozialwissenschaftlicher Theorien auf die Theoriegebilde der (Quanten-)Physik geleistet werden (Oppenheim und Putnam, 1958). In dieser Arbeit zeigt sich besonders prägnant der Gedanke einer Einteilung der Wirklichkeit in sechs höhere bzw. tiefere *Levels*[15], denen eine gemeinsame Grundfunktion zugrunde liegen müsse, so die Hypothese (ebd.). Dieser sog. starke Reduktionismus, wie ihn auch Paul Dirac implizit vertrat, geht von einer nomologischen Beziehung von Wirklichkeitsstrukturen bzw. Phänomenen aus, ist ebenfalls auf eine holistische Theorie einer Weltformel angelegt (Primas, 1985, S. 109) und fand in der Folge zahlreiche Anhänger/innen, denn diese Prämissen waren an die Hoffnungen technischen Fortschritts in der Physik und entsprechende *Big Science*-Projekte geknüpft. Die positiven Erwartungen, die dem Reduktionismus zunächst entgegengebracht wurde, wurde in der Folge allerdings relativiert: Längst nicht alle Naturphänomene (weder der Chemie, noch anderer Naturwissenschaften) gehorchen unmittelbar den Gesetzen der Quantenmechanik – trotz allen Fortschritts in Form von Teilchenbeschleunigern und Hochleistungscomputern – und reduktionistische Annahmen wurden mit der Zeit zunehmend entkräftet:

> The dream of the logical-positivism at the beginning of the 20th century was the unity of sciences, according to which all scientific disciplines could be explained by means of the laws of fundamental physics. In this reductionist context, physics was at the top in the hierarchy of natural sciences due to its fundamental character whereas chemistry was relegated to an inferior position to

15 Putnam und Oppenheim unterschieden zwischen *6. social groups, 5. (multicellular) living things, 4. cells, 3. molecules, 2. atoms* und *1. elementary particles*. (ebd., S. 9).

> the extent that it was supposedly derived from quantum physics. However, at the beginning of this century it is possible to stress that chemistry is neither a reduced science nor a branch of physics (Labarca und Lombardi, 2008, S. 438).

Der Logische Positivismus büßte als wissenschaftsphilosophische Strömung in der Mitte den 20. Jahrhunderts allmählich an Bedeutung ein. An seine Stelle traten im Zuge der konstruktivistischen bzw. linguistischen Wende Paradigmata, die sich eher mit einer Phänomenologie der Wissenschaften und deren sozialer Verfasstheit beschäftigten. Mit der Annahme beobachter/innen-abhängiger, multipler Realitäten, in denen auch die Annahme einer wahren Erkenntnis in ihrer Standortgebundenheit bzw. als Produkt sozialer Aushandlungsprozesse zu verstehen ist, erübrigte sich auch die Idee einer Hierarchie der Wissenschaften und der Natur (Galison, 1996). Die Dekonstruktion von Objektivität als historisch kontingente Idee ging auch mit der Entthronung der Naturwissenschaften und insbesondere der Physik als Leitdisziplin der Objektivität und Wahrheit einher. Insbesondere die Idee der *unity of science* wurde intensiv kritisiert (ebd.). Die Präidee der Einheitswissenschaft ist allerdings nicht mit der Tradition des Logischen Empirismus untergegangen. Folgt man dieser Präidee durch die wissenschaftsphilosophischen Beiträge und Narrative von Fachwissenschaftler/innen im Feld, fällt auf, dass die Wissenschaftsphilosophie tief gespalten ist (Janich, 1998). Insbesondere poststrukturalistische und konstruktivistische geistes- und sozialwissenschaftliche Theorien zur naturwissenschaftlichen Praxis und Erkenntnis werden in diesen Feldern kaum rezipiert oder stoßen tendenziell auf Ablehnung[16] (Humphreys, 2016). Um das Verhältnis zwischen Disziplinen zu verstehen, bedienen sich philosophische Beiträge vieler Naturwissenschaftler/innen daher seit den 1980er Jahren vermehrt Emergenztheorien (Janich, 1998, S. 8), die in der Folge näher auseinandergesetzt werden.

Theorien der Emergenz verfügen ebenso wie die Reduktionstheorien über eine längere Tradition und es hat sich gezeigt, dass unter diesem Begriff völlig unterschiedliche Ansätze vereint werden, die auf divergierenden Prämissen, Argumenten und Bezugnahmen beruhen (Heintz, 2004). Sieht man von dieser erheblichen Diversität ab, bleiben zwei gemeinsame Kernideen erhalten: erstens, dass sich die Emergenz als Gegenteil der Reduktion versteht und zweitens, dass emergente Eigenschaften stets ein mehr ergeben als die Summe ihrer Teile (Manafu,

16 In diesem Kontext sind insbesondere die Polemiken der *Science Wars* der 1990er Jahre zu nennen, bei denen insbesondere Vertreter/innen der Quantenphysik erhebliche Kritik an poststrukturalistischen Beiträgen zur Wissenschaftsforschung äußerten. Sie empfanden die analytischen Zugriffe auf naturwissenschaftliche Gegenstände als Angriff auf ihr Fach und platzierten gar Nonsens-Artikel in angesehenen geisteswissenschaftlichen Fachzeitschriften um aufzuzeigen, wie wissenschaftlich unvertretbar diese Beiträge seien (Sokal und Bricmont, 1998).

2013). Auch Emergenztheorien operieren dabei mit der Klassifizierung von Hierarchiebenen der Natur und folgen der Annahme, dass sich gleichartige Teile wie Atome zu einem komplexeren System wie einem Molekül zusammenschließen. Die Abgrenzung zu den verschiedenen Spielarten der Reduktion erfolgt dadurch, dass höhere Systeme wie ein Molekül nicht mit den einzeln betrachteten Atomen gleichgesetzt werden, aus denen sie sich zusammensetzen. Moleküle verfügen über emergente (nicht reduzierbare) Eigenschaften, die sich in den unteren Auflösungsebenen der atomaren Abene nicht wiederfinden. Auf der analytischen Ebene findet somit eher eine Induktion statt einer Deduktion statt. Demnach verfügt jede Hierarchieebene über eigene Theorien und Phänomene, sie sind nur in Ausnahmefällen direkt durch tieferliegende Theorien erklärbar (Luisi, 2002, S. 117). Emergenztheorien finden gegenwärtig in der Philosophie der Chemie Anklang, denn ihnen wird ein weniger reduktionistisches und hierarchisches Bild vom Verhältnis zwischen Chemie und Physik zugeschrieben (Bishop und Atmanspacher, 2006).

Doch auch wenn Reduktions- und Emergenztheorie(n) einen analytischen Gegensatz bilden, basieren beide Ansätze auf ähnlichen Prämissen, nämlich dem Bezug auf Beziehungen zwischen Teilen und dem Ganzen innerhalb eines mehrschichtigen Systems. Was darin implizit gleichermaßen verhandelt wird, ist der Versuch einer Reduktion der Komplexität der Natur, die rasante Vermehrung wissenschaftlichen Wissens und die Ausdifferenzierung der wissenschaftlichen Disziplinen im 20. Jahrhundert (Primas, 1985, S. 109). Die Klassifikationsterminologie sog. Seinsschichten, Auflösungsebenen, Körnigkeit oder Komplexitätsniveaus ist mit der Idee der Einheitswissenschaft sowie einer funktional differenzierten Erkenntnisarbeit wissenschaftlicher Disziplinen geknüpft. Diese Arbeitsteilung ist darüber hinaus an asymmetrische Machtverhältnisse gebunden, die in der Wissenschaftsphilosophie eher implizit auf einer erkenntnistheoretischen Ebene umkämpft sind. Fragen der Autonomie einer Wissenschaft sind direkt mit der Grenzarbeit wissenschaftlicher Felder verbunden. Auch wenn es nicht näher expliziert wird, büßt eine Disziplin direkt an Prestige ein, sobald ihre Gegenstände auf etwas Fremdem aufbauen bzw. auf dessen Prinzipien zurückzuführen sind (Stichweh, 1984, S. 489ff.). Aussagen wie „Chemie ist nur angewandte Physik“ oder „die Chemie ist eine Hilfswissenschaft der Biologie“ gelten als Schmähungen und sind in der Philosophie und Geschichte der Chemie immer wieder Ausgangspunkt von wissenschaftstheoretischen Interventionen gewesen (Hendry et al., 2012, S. 5). Fundamentalität und Unabhängigkeit gelten als erstrebenswerte epistemische und ontologische Ressourcen im Feld der Wissenschaften (Galison, 1996).

Dass die Präidee der Einheitswissenschaft aus den physikalischen in die chemischen Felder eingezogen ist und dort zu einer Aneignung und Re-Interpretation etablierter chemischer Konzepte geführt hat, zeigt sich am Fallbeispiel der Chiralität. Im Bereich der Quantenchemie wird versucht, ei-

nen Zusammenhang zwischen makromolekularen, molekularen, atomaren und subatomaren Phänomenen der Händigkeit theoretisch wie experimentell herzustellen. Von besonderem Interesse ist dabei, ob sich die spiegelasymmetrische Struktur chiraler Moleküle auf die fundamentalen Wechselwirkungen der Materie und die dort vorherrschenden Asymmetrieverhältnisse zurückführen lässt. Sollte dies abschließend gelingen, läge mit dem Fall der Chiralität eines der raren Beispiele vor, mit dem ein chemisches auf ein physikalisches Phänomen reduzierbar wäre. Dies wird in der wissenschaftsphilosophischen Rezeption dieser Forschung im Sinne des *„dreams of unity"*[17] in der Wissenschaft verhandelt und entsprechende Hoffnungen darauf projiziert. Die Verhandlung der Chiralität in der theoretischen Chemie zeigt darüber hinaus, wie sehr sich die dort angewandten Praktiken und *styles of reasoning* von den bereits laborbezogenen Fachkulturen der organischen und anorganischen Chemie, aber auch pharmazeutischer Produktentwicklung, Oberflächenforschung und Kristallografie unterscheiden. Die Grenze zwischen einem quantenphysikalischen und -chemischen Zugriff auf das Molekül ist an dieser fundamentalsten Stelle gänzlich verwischt, während sich entsprechende Forscher/innen von den Strukturkonzeptionen der organischen Chemie abgrenzen. Sie verweisen auf die Fundamentalität ihrer Forschung und reproduzieren mit der Semantik der Ebenen und deren Hierarchien physikalische Denkstile, wie sich in der Folge zeigt.

Die Chiralität spielt in den Theoriegebäuden und Experimentalpraktiken von Quantenmechanik und Quantenfeldtheorie eine entscheidende Rolle und wird zu den fundamentalen Phänomenen der subatomaren Welt gezählt. Als Eigenschaft von Quantensystemen bezieht sich diese Form der Chiralität auf die Verletzungen von fundamentalen Symmetrien bezüglich Ladung, Zeit und Parität der Materie unter Einfluss der schwachen Wechselwirkung beim radioaktivem Betazerfall, die durch ein Ungleichgewicht von händigen Austauschteilchen erzeugt wird (Latal, 1991). Quantenphysikalische und -mechanische Zugriffe auf die Chiralität beschäftigen sich demnach nicht direkt mit makroskopischen Strukturen oder Objekten wie Kristallen oder Schneckenhäusern, deren Chiralität sich mit einer räumlich wahrnehm- oder darstellbaren Spiegelbildlichkeit beschreiben lässt, sondern mit abstrakten, mathematischen Beschreibungen von fundamentalen Symmetrieverhältnissen zwischen Materie und physikalischen Grundkräften, die in algebraisch formulierten Formeln und Gleichungen wiedergegeben werden (Sieroka, 2014, S. 102). Diese Betrachtungsweise versteht sich als die Suche nach den Ersten Prinzipien der Quantenmechanik und wird tendenziell dem epistemischen Zuständigkeitsbereich der Teilchenphysik bzw. theoretischen Physik zugerechnet. Dennoch sind die Grenzen zwischen physikalischen und chemischen Systemen in der

17 Diese Formulierung, die sich zudem in der Überschrift dieses Abschnitts wiederfindet, geht auf den Titel des Artikels (Labarca und Lombardi, 2008) zurück.

Quantenmechanik fließend, insbesondere in ihrem jeweiligen Zugriff auf submolekulare, atomare wie subatomare Phänomene wie der Chiralität. Es hat sich ein hybrider Grenzbereich zwischen theoretischer bzw. mathematischer Chemie und Physik herausgebildet, wobei in den letzten Jahren insbesondere Chemiker/innen gewichtige Beiträge zur Theoriebildung leisten (Quack, 2011) und sich zudem an verschiedenen wissenschaftsphilosophischen Projekten beteiligen (Mainzer, 1996).

> *Dr. Hoffmann: Was ich unter Chiralität verstehe? Wenn mir jemand „Chiralität" sagt, dann denk ich in erster Linie mal an einen wissenschaftlichen Begriff. Und ICH denke – weil ich in dem Bereich meine Ausbildung bekommen hab – natürlich in erster Linie an Molekülstrukturen. […] Und wir haben einerseits in den fundamentalen Wechselwirkungen der Physik die sehr interessante TATSACHE, dass die grundlegenden Gesetze in der Physik eigentlich ANDERS als ursprünglich mal vermutet nicht symmetrisch wirklich links- und rechtshändig sind, sondern ASYMMETRSICH. Das hat man in den fünfziger Jahren experimentell nachweisen können beim Betazerfall. Zusätzlich weiß man in der CHEMIE schon länger, dass bestimmte Stoffe, die in einer links- oder rechtshändigen Form vorkommen, […] ganz andere chemische Eigenschaften haben. (1) Was man noch nicht GANZ verstanden hat, ist wie die zwei Sachen zusammenhängen. Also es gibt da mehrere Hypothesen dazu. Aber auf jeden Fall finde ich, das ist ein sehr interessantes Feld, weil der Begriff der Chiralität eigentlich eine Case Study […] der Frage ist, wie denn unsere sehr abstrakten fundamentalen Theorien mit den ein bisschen greifbareren – makroskopisch wäre jetzt übertrieben – aber zumindest chemisch und molekularrelevanten Sachen, die ich im Labor kenne oder die ich aus der Pharmazie kenne, wie das zusammenhängen könnte. Das find ich persönlich am Begriff der Chiralität am spannendsten.*

Die Überschneidung physikalischer und chemischer Felder von der tiefsten bzw. fundamentalsten Betrachtungswarte der Materie aus ist durchzogen von der Grenzarbeit zwischen chemischen und physikalischen Konzeptionen der materiellen Welt im Allgemeinen und der Chiralität im Speziellen. Wie bei diesem Vertreter der theoretischen Chemie deutlich wird, lässt sich epistemisch zwischen physikalischen, chemischen und biowissenschaftlichen Konzeptionen der Chiralität unterscheiden, er betont zugleich aber auch die unmittelbaren Zusammenhänge im Sinne von aufeinander aufbauenden Betrachtungsebenen. Wie in der Präidee einer horizontalen Arbeitsteilung zwischen Disziplinen entlang definierter Betrachtungsebenen der Natur liegt es in diesen Diskursen besonders nahe, ontologische und theoretische Beziehungen zwischen verschiedenen Ebenen herzustellen und etwa strukturchemische Phänomene auf fundamentale Prinzipien der Quantenmechanik zurückzuführen (Müller-Herold, 2016, S. 24 f.). Phänomene molekularer Strukturasymmetrie gelten zwar als klassische Observablen und sind somit nicht direkt den Formalismen der Quantenmechanik zugänglich (Amann et al., 1988), dennoch zählt es mitunter zu den

zentralen wissenschaftlichen Betätigungsfeldern der Quantenchemie, in diesem Bereich Zusammenhänge zwischen molekularen und quantenmechanischen Systemen computergestützt zu simulieren bzw. theoretisch zu approximieren (Müller-Herold, 2016, S. 26f.). In diesem Zusammenhang werfen Phänomene der Symmetrieverletzung nach wie vor ungeklärte Fragen auf, etwa nach dem Ursprung der Homochiralität des Lebens (Luisi, 2016, S. 69ff.), nach dem Ursprung der molekularen Chiralität sowie einer Begründung für symmetriebezogene Ungleichverteilungen der Materie gegenüber der Antimaterie (Quack, 2014, S. 77). In der Folge seien nun zunächst die wesentlichen Prinzipien und Aspekte der Quantenmechanik in Hinblick auf die Chiralität angeführt.

Die Chiralität tritt in der relativistischen Quantenfeldtheorie auf drei Ebenen auf, die auf verschiedenem Wege miteinander verwoben sind: bei Atomen, Elementarteilchen und bezüglich (der Verletzung) der Parität in quantenmechanischen Systemen. Die Parität[18] zählt neben Zeit und Ladung zu den fundamentalen Eigenschaften eines physikalischen Systems (ob klassisch oder quantenmechanisch) und bezieht sich auf dessen Symmetrieverhältnisse im Raume, die sich ändern können wenn das System (i.d.R. an einem Punkt) gespiegelt wird (Bleck-Neuhaus, 2013, S. 448f.). Die Parität kann entweder erhalten oder verletzt werden, wobei sich quantenmechanische und klassische Observablen in ihrem Verhalten unterscheiden. Wird ein makroskopisches Objekt wie eine Spirale gespiegelt, zeigt sich, dass sich deren Symmetrieverhältnisse grundsätzlich nicht ändern, genauso wenig wie sich die Gestalt eines Systems ändert, wenn die Zeit rückwärts liefe (Gardner, 1991, S. 81f.). Das Spiegelbild der Spirale kann zwar von einer rechtshändigen (positiven) auf eine linkshändige (negative) Parität (Windungsrichtung) wechseln, verliert aber *per se* seine chirale Eigenschaft nicht, indem das Gewinde etwa verschwände. Gleiches gilt für achirale und andere symmetrische Objekte, die durch Spiegelung grundsätzlich nicht asymmetrisch werden können (aus einer Kugel wird trotz Spiegelung kein händiges Objekt). Bei dieser ausbleibenden Veränderung von Symmetrieverhältnissen spricht man von Paritätserhaltung, die bei allen klassischen Systemen zutrifft.

Bei quantenmechanischen Systemen kann es bei der Spiegelung jedoch zu Verletzungen dieser Parität kommen, wie 1956 durch Wu Chien-Shiung erstmals

18 Der Begriff der Parität stammt ursprünglich aus der Mathematik und bezieht sich auf gerade bzw. ungerade Zahlen und deren (un)gleichmäßige Verteilung bei verschiedenen Settings von Zufallsexperimenten (Gardner, 1991, S. 82ff.). In Bezug auf (a)symmetrische Systeme bezieht sich der Paritätsbegriff jedoch nicht auf eine (Un-)Gleichverteilung, sondern lediglich auf den Fakt, dass ein System potentiell rechts oder links ausgerichtet sein kann (ebd., S. 87). In diesem Zusammenhang wird oftmals auf Immanuel Kant verwiesen (Gardner, 1991), der bereits 1768 auf den Rechts-Links-Unterschied in der Natur (im Sinne der Händigkeit) verwies und diesen Unterschied in eine Theorie des Raumes und der Raumwahrnehmung integrierte (Kant, 1920).

experimentell nachgewiesen wurde (Wu, 1957). Demnach führt die Kernkraft der schwachen Wechselwirkung beim radioaktiven Betazerfall von Atomkernen zu einer alternierten Symmetrie in submolekularen Systemen. Dies wird wiederum dadurch begründet, dass beim Betazerfall[19] Elementarteilchen beteiligt sind, deren Verhalten durch ihre chirale Eigenschaft bedingt wird. Eine Reihe von Elementarteilchen verfügt – vom Prinzip ähnlich wie die bereits bekannten Aminosäuren – über eine enantiodiskriminierende Chiralität als intrinsische Eigenschaft, sodass sie ausschließlich entweder in links- oder rechtshändiger Form vorkommen. Demnach kommen beispielsweise μ- und τ-Neutrinos ausschließlich in linkshändiger Form und Antineutrinos in rechtshändiger Form vor. Auch die Wechselwirkungen und Beziehungen zwischen Elementarteilchen folgen dabei ebenfalls enantioselektiven Kopplungsprozessen, wie etwa die W-Bosonen. Die Austauschteilchen folgen dabei ebenfalls händigen Prinzipien. Die Paritätsverletzung zeigt sich beim radioaktiven Kernzerfall dadurch, dass es zu einem Überschuss linkshändiger Neutrinos kommt, sprich: die Parität – das anteilige Gleichgewicht zwischen rechts- und linkshändigen Teilchen – zugunsten linkshändiger Teilchen aufgehoben wird.

Die Paritätsverletzung beim Betazerfall wird ursächlich auf die Kernkraft der schwachen Wechselwirkung zurückgeführt. Bei der schwachen Wechselwirkung handelt es sich um eine der vier Grundkräfte[20] der Physik, die jedoch ausschließlich auf der Ebene quantenmechanischer Systeme wirkt. Als eine der beiden Kernkräfte wirkt sie im Atomkern, wo sie auf Leptonen (siehe Abb. 6.1) und Quarks einwirkt, die daraufhin ihre Identität sowie bestimmte Eigenschaften verändern. Die schwache Wechselwirkung wurde 1956 erstmals im sog. Theta-Tau Puzzle in

19 Der radioaktive Betazerfall wurde bereits um 1900 phänomenologisch von Alpha- und Gammastrahlung unterschieden (Bleck-Neuhaus, 2013, S. 435). Als Entdecker der Betastrahlung gilt Enrico Fermi (Fermi, 1934).

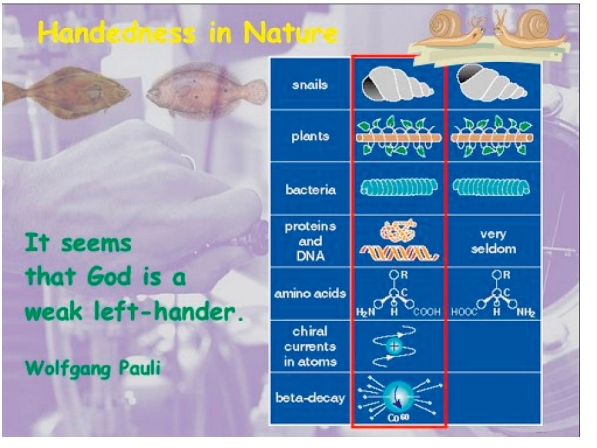
20 Zu den vier physikalischen Grundkräften zählen schwache Wechselwirkung, starke Wechselwirkung, elektromagnetische Kraft und Gravitation. Die Gravitation, auch Schwerkraft oder Erdanziehungskraft genannt, bezieht sich auf makroskopische Objekte und wird daher als rein klassisch verstanden, da sie in quantenmechanischen Systemen kaum messbar ist (Philipsen, 2018, S. 4). Die Kraft der elektromagnetischen Wechselwirkung ermöglicht in ihrer quantenfeldtheoretischen Formulierung weitreichende Erklärungsmodelle makroskopischer Phänomene wie chemische Bindung und Reaktion, Elektrizität, Licht und Magnetismus. Die starke Wechselwirkung hängt mit der gegenseitigen Anziehung von Quarks und Hadronen zusammen, was dazu führt, dass die Protonen und Neutronen im Atomkern (nicht-radioaktiver Elemente) aufgrund der Ladungsverhältnisse nicht voneinander abgestoßen werden und auseinanderfliegen. Diese Kernkraft beschreibt somit die Naturgesetze des Atomaufbaus und seiner Stabilität, während die schwache Wechselwirkung die Instabilität erklärt, zu der es etwa beim Radioaktiven Betazerfall kommt, sobald die Schwache gegenüber der starken Wechselwirkung überwiegt und Elektronen aus dem Nukleus herausgeschossen werden (ebd.).

Zusammenhang mit der Paritätsverletzung gebracht (Lee und Yang, 1956a). Lee Tsung-Dao und Yang Chen-Ning postulierten, dass beim Betazerfall ein mysteriöses Teilchen namens K-Meson in zwei verschiedene Teilchen zerfällt, nämlich in ein θ-Meson mit gerader Paritätszahl und ein τ-Meson mit einer ungeraden Paritätszahl. Im sog. Wu-Experiment wurde dies experimentell bestätigt: Beim extremen Herunterkühlen von ^{60}Co (hochradioaktive Cobalt-Isotope) auf eine Temperatur nahe dem absoluten Nullpunkt zeigte sich, dass die Elektronen nicht in zufällig verteilter Richtung aus dem Kern herausschießen, sondern entweder in *nördliche* oder *südliche* Richtung. Dabei trat auch noch eine ungleiche Verteilung zugunsten von Elektronen auf, die in *südliche* Richtung deuteten. Der Nachweis der schwachen Wechselwirkung wurde in der Physik heterogen aufgefasst. Die Natur, die sich *bis dato* selbst in ihrer inner-atomaren, quantenmechanischen Formulierung als tendenziell harmonisch und symmetrisch präsentiert hatte, gewann eine Größe hinzu, die diese Ordnung erheblich zu stören schien. Unter Physiker/innen wie Richard Feynman, dem Begründer der Quantenelektrodynamik, regte sich Widerstand dagegen, die Existenz dieser neuen Kraft und ihren de-harmonisierenden Einfluss auf die Materie anzuerkennen und Wolfgang Pauli kommentierte diese bahnbrechende Entdeckung folgendermaßen: „I do *not* believe that the Lord is a weak left-hander" (zit. n.: Gardner, 1991, S. 93).

Die schwache Wechselwirkung und ihre Effekte auf molekulare Strukturen fand in der Folge nicht nur in der physikalischen Betrachtung der Chiralität Niederschlag, sondern auch in den Diskursen der theoretischen Chemie bzw. der Quantenchemie. Die Feststellung des Einflusses der Paritätsverletzung auf molekulare Strukturen gelang Martin Quack und Jürgen Stohner mittels spektroskopischer Messung eines winzigen energetischen Unterschiedes zwischen den Enatiomeren einfacher molekularer Verbindungen wie dem CHBrClF (Bromochlorofluoromethan) im Femto- bzw. Picojoule-Bereich (Quack und Stohner, 2000; Quack und Stohner, 2001). Diesen Befunden wird zudem das Potential zugeschrieben, in einem erweiterten experimentellen Setting die Wirkung der Paritätsverletzung auf molekulare Systeme nachzuweisen und so eine Erklärung für den Ursprung der Homochiralität des Lebens sowie des Überschusses der Materie gegenüber der Antimaterie zu formulieren (Luisi, 2016, S. 69). Darüber hinaus verblüffte auch die Tatsache, dass die schwache Wechselwirkung als einzige Kernkraft sich zu Materie und Antimaterie unterschiedlich verhält: Sie wirkt ausschließlich auf Materieteilchen, die im Uhrzeigersinn und auf Antimaterieteilchen, die gegen den Uhrzeigersinn rotieren (ebd.).

Diese Beziehungen zwischen chiralen Phänomenen auf den Ebenen von Molekülen, Atomen und Elementarteilchen werden seither unterschiedlich interpretiert und erlauben verschiedene Projektionen auf mögliche Beweise der Reduzierbarkeit *höherer* Chiralitätsphänomene auf die Ersten Prinzipien der Quantenmechanik, denen dabei die Präidee der Einheitswissenschaft innewohnt. Die

Chiralität wird in diesem Zusammenhang als Universalismus der Natur verhandelt, der auf sämtlichen Ebenen der Natur vorkommt, was ein gefestigtes Narrativ bildet. Die Chiralität dient in diesem Narrativ als *unifyer*, von dem man sich die Herstellung von einer Einheit der Wissenschaften erhofft. Die Rezeption der quantenchemischen Forschung zur Chiralität und der Reduzierbarkeit molekularer Händigkeit auf die fundamentalen Wechselwirkungen findet vornehmlich in wissenschaftsphilosophischen Kollektiven statt, die in der Folge näher ausgeführt werden. Dazu zählen erstens die populärwissenschaftlichen Beiträge der Chemie, in denen die Chiralität (gerade aufgrund des Universalismus) einen der wenigen anschaulichen Gegenstände darstellt, mit denen die Chemie ein öffentliches Laienpublikum erreicht. Zweitens wird die Chiralität in den Beiträgen zur Chemiephilosophie rezipiert, wobei durch die Quantenchemie informierte Denker/innen die Reduzierbarkeitsthese der Chiralität als Instrument der Emanzipation von einer durch die organische Synthesechemie dominierte Chemiephilosophie ins Feld führen. Drittens erfahren Emergenztheorien in der gegenwärtigen Wissenschaftsphilosophie generell eine Renaissance (Stengers, 2011c) und die Chiralität dient als beliebtes Beispiel für eines der raren universellen bzw. emergenten oder reduzierbaren Phänomene. Im Kontext von *Big Data* und verschiedenen Innovationsdispositiven der Inter- und Transdisziplinarität sind die Fragen nach Wissensübersetzung omnipräsent. Diese drei Rezeptionskontexte seien nun näher ausgeführt:



Diese Vorlesungsfolie wurde freundlicherweise durch einen der interviewten Chemieprofessoren zur Verfügung gestellt. Die grafische Aufbereitung bedient das Narrativ der Universalität chiraler Phänomene auf sämtlichen Betrachtungsebenen der Natur.

> These are wonderfully deep questions, which will take us into many and varied aspects of social life and anthropology, and into the workings of the brain and the subtleties of human language. They will require us to look at our asymmetric bodies, with their asymmetric heart, liver, stomach, kidneys and even testicles; down into the amino acids and sugars, the building blocks of our body, which are also asymmetric; and, finally, into the asymmetries of physics itself, and hence of the universe (McManus, 2002, S. xv).

Folgt man der Chiralität durch die Diskurse der Populärwissenschaft, Wissenschaftskommunikation und Wissenschaftsphilosophie fällt auf, dass sie in diesen i.d.R. als ein chemisches Phänomen geschildert wird, das sich im Sinne eines Universalismus auf sämtliche Phänomenbereiche von Natur und Kultur erweitern und übertragen lässt. Wie in diesem Zitat deutlich wird, wird die Rechts-Links-Asymmetrie in einer Skalierung geschildert, die auf Universalität, Hierarchie und eine deduktive Kausalität ausgerichtet ist. Demnach sind chirale Phänomene ebenso in den Produkten menschlicher Kultur nachweisbar wie in Phänotyp und Genotyp von Organismen bis *hinunter* in den molekularen Aufbau des Lebens und die atomare und subatomare Welt der fundamentalen Asymmetrien. Dieses Narrativ zeigt sich häufig in populärwissenschaftlichen Auseinandersetzungen mit der Chiralität, etwa in Studium Generale-Vorlesungen zum Thema Symmetrie (Schurig, 2002), TV-Dokumentationen, Wissenschaftsmuseen, Buchbänden[21] und Veranstaltungen mit emanzipativer Absicht wie sog. Linkshändertagen.[22] In diesen Kontexten befinden sich häufig Chemiker/innen unter den Referent/innen, arbeiten bei der Ausstellungskuration mit und fungieren als Autor/innen, so auch einige Gesprächspartner/innen im Laufe des Projektes (vgl. 6.3). In der Wissenschaftspopulation und -kommunikation der Chemie handelt es sich bei der Chiralität um eines der Schlüsselkonzepte, die an öffentliches Interesse anschlussfähig ist[23], vor allem aufgrund der zahlreichen alltagsnahen Beispiele, die abstrakte molekulare und submolekulare Aspekte der Natur mit Beispielen aus

21 Siehe beispielsweise: (Birch, 2016; Brunner, 1999; Rein, 1993; Gardner, 1982; McManus, 2002; McManus et al., 2010).

22 Linkshänder/innen und ihre identitätspolitische Interessensvertretung waren deutlich in die Popularisierung von chiralitätsbezogenen Universalismen von Links-Rechts-Gegensätzen involviert (McManus, 2002, S. 205). Zur Geschichte der Linkshänder/innen siehe (Jutzi, 2014).

23 Der Stand der Wissenschaftspopularisierung und -kommunikation chemischen Wissens wurde im Vergleich zu physikalischem, biologischem oder psychologischem Wissen als besonders mangelhaft bewertet (Fischer, 2004). Die Chemie ist im Alltagswissen der Öffentlichkeit wenig präsent, als Schulfach unbeliebt und scheint auf wichtige weltbildstiftende Fragen zur Entstehung des Universum oder der Evolution der Menschen keine Anworten zu liefern (Winter et al., 2017, S. 78). In jüngster Zeit zeichnet sich aber ein Wandel in der Landschaft der Populärwissenschaft ab und auch chemische Perspektiven finden dort allmählich Anklang (Nguyen-Kim, 2019).

Kunst, Literatur, dem menschlichen Körper und der Gestalt von Tieren verweben (Brunner, 2001). Das Universalitäts-Narrativ zur Chiralität zeugt davon, wie sich in den chemischen Feldern Präideen von Einheit und Hierarchie der Wissenschaften mittlerweile sedimentieren konnten – aber auch wie diese für die Repräsentation des Faches im Dialog mit der Öffentlichkeit nutzbar gemacht werden: Der Chemie gelingt es auf diese Art und Weise ihre Wissensbestände zu popularisieren und mit einem weiter gefassten Publikum zu teilen.

Die zur Veranschaulichung eingeführten Beispiele aus Alltag, Tier- und Pflanzenwelt werden so auch in Vorlesungen und Unterrichtsmaterialien der Chemie verwendet und sind in der feldspezifischen Sozialisation omnipräsent. Vorlesungsfolien wie Lehrbücher sind reich mit Bildern und mit als kurios inszenierten Exempeln aus Kunst, Architektur, Literatur, Tierreich und mechanischen Raffinessen illustriert (ebd.). Der Universalismus ist die zentrale narrative Strategie, die die Diskurse, Felder und Schauplätze der Chiralität miteinander verbindet und wissenschaftliches Wissen für das Alltagswissen anschlussfähig macht. Als eines der wenigen universellen Phänomene, das in der Natur omnipräsent erscheint, ist die Chiralität immer wieder Gegenstand inter- und transdisziplinärer Projekte (Quack und Hacker, 2016) bzw. dient als Ankerpunkt in der Überwindung fachkultureller Grenzen (ebd.). Zahlreiche Publikationen heben die Universalität der Chiralität hervor[24] und spannen einen Bogen von theoretischer Physik und Chemie bis hin in die Gehirnforschung und die angewandte Biomedizin. Mit der impliziten wie expliziten Annahme, dass die Chiralität der Materie mit derjenigen der Moleküle, Makromoleküle, Kristalle, Organismen und der menschlichen Händigkeit verknüpft sein muss, werden wissenschaftliche Präideen von Einheitswissenschaft und einer Hierarchie der Wissenschaften reproduziert (vgl. Abb. 6.2).

Zu den zentralen chiralitätsbezogenen Forschungsdesiderata der Quantenchemie zählt die Formulierung einer Quantentheorie der molekularen Struktur, wobei die molekulare Spiegelasymmetrie latent im Mittelpunkt steht (Frenking, 1998, S. 106). Seit den 1960er Jahren wird an einer möglichen theoretischen Lösung dieses Problems geforscht und verschiedene mathematische und computergestützte Modelle wie die sog. Lorentz-Transformation oder die Born-Oppenheim-Methode werden ins Feld geführt, um diese Reduktion zu ermöglichen (Primas, 1983). Zu den Praktiken zählen die Lösung verschiedener Gleichungssysteme und in letzter Zeit auch vermehrt das Mitwirken in philosophischen Debatten um Emergenz und Reduktion, während insbesondere auf das quantenmechanische Modell

24 Siehe als Auswahl: (Anderson, 1972; Hahn, 1989; Mainzer, 1996; Hargittai und Hargittai, 1996; Hargittai und Hargittai, 2009; Wagnière, 2007; Heilbronner und Dunitz, 1993; Janoschek, 1991; Kondepudi und Asakura, 2006; Lough und Wainer, 2002; Riehl, 2010; Van Cleve und Frederick, 1991; Wachtel und Jendrusch, 1993).

spontaner Symmetriebrechung verwiesen wird (Mainzer, 1998, S. 41). Die omnipräsenten Denkfiguren der hierarchisch klassifizierten Wirklichkeitsebenen und der Einheit der Wissenschaft sind dabei insbesondere im Zusammenhang mit den Ausdifferenzierungs- und Hybridisierungstendenzen der wissenschaftlichen Felder zu beobachten (Primas, 1983, S. 1). Die Reduzierbarkeit der Chemie auf die Physik wird in den Feldern der Quantenchemie und in ihren wissenschaftsphilosophischen Anbindungen begrüßt und steht ganz im Sinne des Projektes der Wiedervereinigung der Naturwissenschaften. Darüber hinaus wird auf eine abschließende, quantenmechanische Theorie der molekularen Struktur und deren Asymmetrien die Hoffnung einer möglichen Revolution projiziert, die die Chemie *endlich* in eine positive Wissenschaft überführen könnte:

> However, the emphasis on experimental methods – until 1927 out of necessity, after that out of ignorance – lead to the development that chemistry became a discipline of engineering rather than science. As a science, chemistry has not yet really developed, because quantum chemical research of the many chemical phenomena is still in an infant stage (Frenking, 1998, S. 107).

Dies drückt wiederum die Abgrenzung der *„mit Bleistift und Papier"* (bzw. Computermodellen) operierenden Vertreter/innen der Quantenchemie von der organischen Synthesechemie aus. Insbesondere im jüngeren akademischen Feld der Philosophie der Chemie beobachten Quantenchemiker/innen eine Dominanz organisch-chemischer Perspektiven, die sich aus der Beschäftigung mit Laborpraktiken, Synthesen, Objekten und der gesellschaftlichen Einbettung der Chemie ergeben. Die Praktiken der theoretischen Chemie, die sich gänzlich der Anschaulichkeit entziehen, hohe Überschneidungen mit der Physik aufweisen und sich primär in Computersimulationen abspielen, finden in diesen Diskursen kaum eine Rezeption (Mainzer, 1998). Dies wird etwa auch in der Kritik daran deutlich, wie sich die mentalen Modelle der organischen Chemie chemische Konzepte wie die Chiralität angeeignet haben und sämtliche Zugriffe auf die Chiralität jenseits der molekularen Struktur als sekundär setzen (Frenking, 1998, S. 104). Wie im folgenden Abschnitt 6.3 erläutert wird, bildet insbesondere die Reduktionsthese der Chemie auf die Physik einen Knotenpunkt des Konfliktes zwischen diesen beiden idealtypischen Positionen. Während Quantenchemiker/innen in einer Reduktion chemischer Phänomene auf physikalische Gesetze die Chance sehen, die Chemie vom Status einer technikdominierten Ingenieurswissenschaft zu befreien und ihr endlich die nötige Tiefe zu verleihen, die für den Status einer harten Wissenschaft erforderlich ist (ebd., S. 106), die sich mit der Physik messen lassen kann, gilt auf der Gegenseite der Reduktionismus als Bedrohungsszenario für die Chemie, die durch eine Reduzierbarkeit auf die Physik ihre Fachautonomie einbüßen würde. Diese Konflikte werden auf das *Boundary Object* der Chiralität

projiziert: während Chemiephilosoph/innen wie Eric Scerri in der Chiralität eine absolut irreduzible Eigenschaft erkannten (Scerri und McIntyre, 1997), gilt die Reduzierbarkeit der molekularen Chiralität auf die fundamentalen Gesetze der Materie in der Quantenchemie als unmittelbar vor dem Durchbruch stehend.

Das Primat der Wiedervereinigung der Naturwissenschaften, das auf die Reduzierbarkeit molekularer Chiralität auf quantenmechanische Theorien projiziert wird, blieb jedoch nicht auf die Diskurse der Chemie und ihrer Philosophie beschränkt, sondern ist in weitere Kontexte der Wissenschaftsphilosophie und Innovationsdispositive der Forschungsförderung gewandert. Auf die *Big Science*-Projekte des 20. Jahrhunderts im Bereich der Teilchen- und Hochenergiephysik und der Humanwissenschaften wie das *Human Genome Project* sind im 21. Jahrhundert neue gefolgt.[25] Neue hybride – und vor allem großdatenbankbasierte – Großforschungsbereiche der synthetischen Biologie, des *Genetic Engineering* und die Fortsetzung des *Human Brain Project* im Sinne neuronaler Netzwerke und *computer assisted molecular design* (er-)fordern einen inter- bzw. transdisziplinären Zugriff auf die Natur. Diese Innovationsdispositive stehen im Kontrast zum monodisziplinären Narrativ vergangener Zeiten, der den Ansatz einer „rein biologischen" Betrachtunsgweise bzw. einem *„purely chemical approach"* vertrat (Stengers, 2011b, S. 215). Mit Inter- und Transdisziplinarität wurde allerdings weniger eine aktive Zusammenarbeit zwischen Disziplinen realisiert, sondern erschienen in ihrer Umsetzung als reine Mikro-Makro-Reduktionismen, bei denen sich Biolog/innen einseitig sozialwissenschaftliche Felder aneigneten oder chemische Gegenstände in der Physik behandelt wurden. Damit erodierte das etablierte Disziplinengefüge, was zu erheblichen Konflikten führte (ebd., S. 212):

25 Als Treiber dieser Entwicklung wirkte insbesondere die pharmazeutische Industrie, deren Produktentwicklung viele Jahre umspannt und häufig an Übersetzungsebenen scheitert (Folkers, 2011, S. 208). So scheiden Wirkstoffkandidaten häufig dadurch aus, dass ihr toxikologisches Wirkungsspektrum *in vitro* zwar günstig ist, jedoch in Tiermodellen oder an Versuchspersonen nicht die erhofften Effekte zeigt. Die Arzneistoffentwicklung impliziert ein lineares Innovationsmodell, das aus laufenden Übersetzungen von Befunden in einem korporativen Kontext in einer strikt chronologischen und hierarchischen Arbeitsteilung zwischen Forschungsabteilungen besteht (Mittra, 2016c, S. 90f.). Von der ersten Idee über das *computer assisted drug design* hin zu ersten Synthesen und toxikologischen und klinischen Studien, sind sämtliche Forschungsschritte rational aufeinander abgestimmt (Atmanspacher et al., 2014). Die pharmazeutische Industrie war einer der ersten Bereiche, die Technologien der Künstlichen Intelligenz einsetzte, um diese Schritte zu optimieren. Dieses Innovationsmodell prägte sich zunehmend auch in andere Wissenschaftskulturen und der Wissenschaftspolitik ein. *Big Data* wurde in zahlreichen Wissenschaftsfeldern, etwa bei der Wetter- und Klimaforschung, Neuro-, Agrar-, oder Gesundheitswissenschaften zum Leitmotiv. Es handelt sich dabei vor allem um all jene Disziplinen, deren Forschungspraxis sich auf die statistische Erhebung und Verarbeitung großer, quantifizierter Datensätze verschob, bei denen jedoch eine zu große Komplexität nur zu eher gering formalisierbaren Theorien führt (Stengers, 2011c).

> Scientists are surrounded by references to the unity of science. They can be found in tales about the historical development of science, and in the theories and practices of contemporary science. Long ago, biology was invaded by chemistry; chemistry was invaded by physics; and, long before, physics was conquered by mathematics. References can also be found in public policies about science – some sort of unity must be assumed to make sense of the ever fashionable desire for interdisciplinary and multidisciplinary research, for example. New subjects are born of old, such as computer science of mathematics, electronics, logic and linguistics. Computer science is trying to invade everything (Beggs et al., 2012, S. 54).

Diese disziplinären Spaltungen, Abgrenzungen und Konflikte im ausgehenden 20. Jahrhundert verschärften insbesondere nach den unversöhnlichen Polemiken der *Science Wars* wiederum die Sehnsucht nach einer Einheit der Wissenschaft, was in verschiedenen wissenschaftsphilosophischen Kollektiven zu einer Rückbesinnung auf sog. Emergenztheorien führte (Stengers, 2011b, S. 209). Diese waren auf zweierlei Ebenen um eine Schlichtung bemüht: Einerseits sollte ein allzu leichtfertiger Reduktionismus vermieden werden, indem die Einzigartigkeit jeder Betrachtungsebene im Sinne emergenter Eigenschaften betont wird und andererseits durch die Suche nach *Dingen*, welche das gesamte Spektrum der Realität abbilden, sprich: Universalismen der Natur (und Kultur). Projekte wie die *emergence of life* (Luisi, 2016), die in einer holistischen Theorie der Entstehung des Lebens um eine Integration physikalisch-geologischer, chemisch-präbiotischer und biologischer Evolution bemüht sind oder der *emergence of conciousness* (Atmanspacher, 2016a) bedienen sich dabei häufig des Fallbeispiels Fallbeispiels der Chiralität. Als Universalismus, der sich nahtlos auf sämtlichen Wirklichkeitsebenen präsentiert, von den tiefsten und fundamentalsten Wechselwirkungen bis hin zu lebendigen Organismen und kulturellen Ausdrucksformen gilt sie dabei als Vorbild in der Suche nach einer gegenstandsbezogenen Formel mittlerer Reichweite.

6.3 Chiralität als irreduzible Eigenschaft in der Philosophie der Chemie

Wie deutlich wird, beschäftigen sich diverse interdisziplinäre Kollektive in theoretischer Chemie und Physik sowie der Wissenschaftsphilosophie in ihrer Grenzarbeit mit dem ontologischen Verhältnis zwischen Quantenmechanik und molekularer Struktur. Insbesondere die Chiralität stellt dabei einen beliebten Ankerpunkt dar, da sie sich als einen der seltenen Universalismen der Natur behandeln lässt und die Präidee der Einheitswissenschaft nährt. Mit der Expansion auf etliche nicht-molekulare Phänomenbereiche büßt die Chiralität in diesem Zusammen-

hang ihre Eigenschaft als exklusiv chemischer Gegenstand ein, über den die organische Chemie (wie in 2.1 deutlich wird) im Zuge der Erschaffung und Aneignung der molekularen Welt eine gewisse Hegemonie etablierte. Mit dem impliziten Verweis auf die aus der Physik stammenden Präideen einer Einheitswissenschaft und eines hierarchischen Klassifikationsmodells der Wirklichkeit wird die komplexe, auf der Chemie begründete molekulare Welt zu einer Betrachtungsebene unter vielen. Sie lässt sich nicht nur in mikro-reduktionistischen Operationen auf die Gesetze der Physik reduzieren, sondern wird auch für die Zugriffe *höher*stehender Disziplinen wie den *Life Sciences* durchlässig. Diesem Problem nehmen sich die Philosophie und Geschichte der Chemie an, die an der Grenzarbeit der chemischen Felder teilnehmen.

In der Folge seien nun insbesondere die Zusammenhänge von einer geisteswissenschaftlichen Auseinandersetzung mit den Naturwissenschaften geschildert, die einen essentiellen Teil der Grenzarbeit wissenschaftlicher Felder darstellen. Dieser Befund stützt sich auf die Feststellung, dass insbesondere Geschichte und Philosophie der Chemie zeitweise fast zum Erliegen gekommen sind, sodass wissenschaftstheoretisch ungeschulte Chemiker/innen der drohenden Auflösung der eigenen Disziplin und der wachsenden gesellschaftlichen Kritik in den 1990er und 2000er Jahren nichts entgegenzusetzen hatten. Im Vergleich etwa zu Physik und Biologie, die stets über Anbindungen an Wissenschaftsjournalismus, Fachdidaktik und Ethik verfügten und zudem die Wissenschaftsphilosophie dominierten, war die Chemie in diesen Diskursen über Jahrzehnte hinweg kaum präsent. Die Wiederbelebung der chemiebezogenen Wissenschaftsforschung in den 1990er Jahren entsprach einem Hilferuf und es war kein Zufall, dass sich die primären Forschungsbezüge mit der analytischen Erklärung der Autonomie der Chemie (von der Physik) und mit identitätspolitischen Fragen nach *boundary – identity – territory* der Chemie beschäftigten. Die Chiralität spielte in diesem Kontext wiederum eine zentrale Rolle. Ganz im Gegensatz zu denjenigen Chemiephilosoph/innen, die sich aus ihrer Identifikation mit der theoretischen Chemie heraus der Quantenphysik zuwandten und Hoffnungen auf eine Reduktion der molekularen Struktur auf fundamentale Wechselwirkungen hegten, waren diese neuen Stimmen im chemiephilosophischen Diskurs darum bemüht, die molekulare Chiralität zu einer irreduziblen Eigenschaft zu erklären.

> "Is there a future for chemists?" All the areas [such as materials sciences, biotechnology or polymer sciences] began in chemistry in one way or another, but chemistry is in danger of being squeezed out of the picture as the fields of material science and biotechnology mature. Chemists have been adept at retaining a foot-hold in both fields by being flexible and emphasizing the advantages chemistry can bring to their development. Worldwide, chemical societies and chemistry faculties are scrambling to retain a viable position in bo-

> th areas. This process involves a redefinition of chemistry that is both broad in scope but also sees it as a service discipline. Ultimately, chemistry may fracture along the fault-line between the solid state and the living state, and thus become part of two "mega-sciences", materials science on the one hand and biomolecular sciences on the other (Morris, 2001b, S. 200).

Um die Jahrtausendwende befand sich die Chemie, wenn man dem zitierten Chemiehistoriker Peter J. T. Morris und seinen Kolleg/innen[26] folgt, in einer Krisensituation simultaner Omnipräsenz und Auflösung: Man stellte eine sukzessive Auflösung der Chemie in hybride Felder wie Materialwissenschaften oder *Molecular Life Sciences* fest, die sich an den Grenzen der etablierten monolithischen Naturwissenschaften herausgebildet haben. Aus den drei Großdisziplinen Physik, Chemie und Biologie scheinen zwei geworden zu sein: Materialwissenschaften und molekulare Lebenswissenschaften. Die Chemie, verstanden als eine Instanz zwischen den anderen beiden Nachbarinnen, hatte demnach ihre angestammten epistemischen Bereiche, Theorien und Gegenstände auf diese Bereiche ausgeweitet und wurde simultan durch diese absorbiert (ebd.). Dies hatte zum Ergebnis, dass die Chemie und ihre Gegenstände nun omnipräsent zu sein schienen und zugleich unsichtbar bzw. dem Aufgaben- und Kompetenzbereich anderer Disziplinen zugeschrieben wurden. Die Lage der Chemie stellte sich dementsprechend als paradoxe Situation der gleichzeitigen Expansion auf der epistemischen Ebene im Zuge der Molekularisierung verschiedener Nachbardisziplinen und Auflösung in mehrere hybride Subfelder dar. Dabei erwies sich insbesondere die molekulare Welt als umkämpft. Die chemischen Wissenschaften verfügten in diesem Sinne nicht mehr alleinig über ihr angestammtes Terrain des Molekularen und seit sie über ihre industriellen Anwendungen zunehmend in Kritik geraten waren, sahen sie sich mit neuen Herausforderungen konfrontiert, die insbesondere an den Schnittstellen von Gesellschaft, Wissenschaft und Politik angesiedelt waren. Hier sind vor allem der sog. Etikettenschwindel, die diagnostizierte Philosophieferne der Chemie und die öffentliche Chemophobie zu nennen, die in der Folge jeweils vorgestellt werden:

Historiker/innen und Philosoph/innen der Chemie beschäftigten sich insbesondere Mitte der 2000er Jahre mit einer Reihe fatalistischer Szenarien und erkannten den Anfang vom Ende der Chemie in einem schleichenden „Etikettenschwindel" (Schummer, 2017c). Demnach scheinen sich Chemiker/innen in ihren fachlichen Positionierungen immer weiter von ihrer Zugehörigkeit zur Chemie zu distanzieren und lieber von molekularer Forschung, Materialwissenschaften oder *Polymer Sciences* zu sprechen und zu schreiben (end.). Bestehende Felder

26 Siehe auch: (Bensaude-Vincent und Stengers, 1996; Bertomeu-Sánchez et al., 2008b; Laszlo, 2007; Levere, 2001b; Morris, 2008; Reinhardt, 2001a; Schummer et al., 2007)

und etablierte epistemische Territorien der Chemie werden auf diesem Wege „schleichend umbenannt" und in der Folge entstanden basierend auf diesen Entwicklungen neue wissenschaftliche Subdisziplinen, die dem Einflussbereich der Chemie entschwinden und ihr nach und nach Ressourcen und Forschungsgegenstände abgraben (ebd.). Chemiker/innen scheinen sich wenig darüber bewusst zu sein, wie sie dabei die drohende Absorption ihrer eigenen Disziplin in andere hybride Wissenschaftsfelder vorantreiben und naiv forschungspolitischen Trends folgen, die ihr eigenes Ende zur Folge haben könnten (Winter et al., 2017). Fachverbände wie die *Gesellschaft deutscher Chemiker*, die *Royal Society of Chemistry* oder die *American Society of Chemistry* mahnten diese Entwicklungen insbesondere zur Jahrtausendwende an, als die Verbände in ihren statistischen Erhebungen einen Mitgliederschwund verzeichneten und auch erhebliche Einbrüche von Studierendenzahlen, sodass deutlich wurde, dass der wissenschaftliche Nachwuchs zunehmend in andere Felder abwanderte (GDCh, 2017).

In der Kritik steht in diesem Kontext auch die diagnostizierte „Philosophieferne der Chemie" (Mittelstraß, 1992, S. 10), die sich daraus ergibt, dass sich die Chemie wissenshistorisch am weitesten entfernt von den Geisteswissenschaften entwickelt hat und aufgrund dessen über wenig epistemologische, ethische und gesellschaftspolitische Selbstreflektion verfügt (ebd.). Im Gegensatz zu Fachbereichen wie Medizin und Biowissenschaften, in denen die Ethik fest implementiert ist, hat sich für die chemischen Wissenschaften erst in den letzten beiden Jahrzehnten eine solche zögerlich begründet. Auch der Dialog mit der Öffentlichkeit wurde im Vergleich zu anderen Disziplinen später und weniger intensiv betrieben (Markl, 1992). Dies scheint ihr nun zum Verhängnis geworden zu sein, denn durch diesen mangelnden Kontakt und ihre Absenz in den Diskursen der Populärwissenschaft (Fischer, 2004, S. 27f.) sieht sich die Chemie nicht nur mit Nachwuchsproblemen konfrontiert, sondern ist auch unter Legitimationsdruck geraten. Im populären Wissenschaftsverständnis ist die Chemie vergleichsweise wenig präsent und das Bild der Chemiker/innen ist mit negativen Klischeevorstellungen beladen (Weingart, 2007). Zudem liefert die Chemie im Gegensatz zu Physik und Biologie derzeit keine wesentlichen Welt- noch Menschenbilder, die im populären Wissenschafts- bzw. Naturverständnis verankert wären (Winter et al., 2017).

Als dritte dieser Herausforderungen sah sich die Chemie insbesondere in den 1980er und 1990er Jahren verstärkt mit Legitimationsschwierigkeiten im Sinne einer Vertrauenskrise konfrontiert, die sich aus einer Reihe an Unfällen in Chemiefabriken und daraus resultierenden Umweltkatastrophen und Schäden an Gesundheit und Menschenleben ergaben (Brand, 1993). Chemiker/innen in Akademie und Industrie stellten sich der öffentlichen Kritik damals nur unzureichend entgegen oder solidarisierten sich gar mit den Industriekonzernen, die diese Desaster zu verantworten hatten und relativierten die Folgen für Mensch und Umwelt

(Schummer, 2017a). Dies gipfelte zeitweise gar in einer beobachteten Chemophobie in der populären Wahrnehmung der Chemie. Die sog. Chemophobie (Gribble, 2013) zeichnet sich durch die kollektive Haltung aus, das Chemische bilde einen Antagonismus zum Natürlichen, was in einer kategorischen Ablehnung allen Synthetischen und *Künstlichen* gipfelt (Schummer, 2003). Die Chemie wird demnach als Instanz verstanden, die außerhalb der Natur steht, die Natur lediglich imitiert, manipuliert und ihr letztenendes schadet. Diese Tendenzen wurden etwa in den Diskursen der 1980er Jahre um die Öffnung des deutschen Biermarktes für ausländische Produkte, die dem Reinheitsgebot nicht entsprechen, deutlich. Auch wenn wohl primär finanzielle Interessen das bis 1990 gültige Importverbot aufrechterhielten, argumentierten seine Verfechter/innen mit ihrer Besorgnis um die Gesundheit der Bevölkerung, die durch den pauschal unterstellten Einsatz von Chemikalien im ausländischen Bier bedroht wäre. Das gefürchtete „Chemiebier" wurde zur Fokussierungsmetapher dieses Diskurses, die in Abgrenzung zum *natürlichen*, einheimischen Produkt gehandelt wurde (Speckle, 1998). Ähnliche Tendenzen finden sich bis heute in der Etikettierung von Kosmetika („ohne chemische Zusätze"), industriell verarbeiteten Lebensmitteln („98 Prozent natürliche Inhaltsstoffe"), und (alternativen) Arzneistoffen. Dieses Alltagsverständnis vom Chemischen wird häufig von Chemiehistoriker/innen kritisiert, die diesem die Losung „alles ist Chemie" entgegenstellen (Böschen, 2004). In diesem Sinne wird darauf hingewiesen, dass chemische Prozesse wie Gerben, Brauen, Verbrennen oder die Keramikerzeugung bereits vor etlichen Zehntausenden von Jahren die ersten Proto-Chemiker/innen hervorgebracht haben und chemische Technologien und Praktiken zu den Grundkonstanten der Menschwerdung zählen (Cobb und Goldwhite, 1995).

In diesem Kontext spielt die Neubegründung der Philosophie sowie der Geschichte der Chemie als akademische Felder und Subdisziplinen eine gewichtige Rolle. Neben intrinsisch motivierten Fragestellungen nach dem Wesen der Chemie und ihren genuin chemischen wissenschaftsphilosophischen Fragestellungen, Praktiken und Zugängen zur Natur wirkten sich auch die erwähnten extrinsischen Anreize aus. Die öffentliche Ablehnung der Chemie gegenüber, die mangelnde Fähigkeit des kritischen und reflektierten Denkens unter Chemiker/innen sowie die wachsende Aneignung chemischer Gegenstände und Zuständigkeitsbereiche durch hybride Zwischenfelder gelten als zentrale Ursachen für die Wiederbelebung dieser – beinahe – ausgestorbenen Forschungsbereiche (Schummer, 2006). Es wurden große Hoffnungen in Bezug auf die Behebung dieser drei Kerndilemmata projiziert: Die Verbände der chemischen Industrie oder auch die *Gesellschaft Deutscher Chemiker e.V.* förderten durch ihre Fonds in den 1990er und 2000er Jahren insbesondere in Deutschland einige Symposien und Dialogprojekte zwischen Chemie und Geisteswissenschaften mit dem Ziel, das Verhältnis zwischen Öffentlichkeit und Chemie zu bestimmen und ggf. Strategien zu dessen Verbesserung

zu erarbeiten. Hierzu zählen etwa die philosophisch ausgerichteten *Erlenmeyer Kolloquien* der 1990er Jahre.[27] Vergleichbare Projekte und Veranstaltungen standen zunächst unter dem Vorzeichen einer experimentellen Annäherung zwischen Geisteswissenschaften und der Chemie.[28] Von der Förderung der chemiebezogenen Wissenschaftsforschung profitierten insbesondere Geschichte und Philosophie der Chemie, die sich dem Verhältnis zwischen Gesellschaft, Chemie und anderen Disziplinen annahmen.

Mit der Frage nach der Ausdifferenzierung und Amalgamierung der chemischen Disziplinen mit anderen Feldern haben sich insbesondere Historiker/innen der Chemie seit der Jahrtausendwende auseinandergesetzt. Deren Fachkonferenzen, Sammelbände und Zeitschriftenbeiträge der letzten 15 Jahre scheinen vor allem um drei Themen zu kreisen: *identity, boundary and territory of chemistry*.[29] Die (drohende) Auflösung und Identitätskrise der Chemie wurden insbesondere in der Chemiegeschichte der 1990er und 2000er Jahre zu den Leitfragen des Diskurses erhoben (Meinel, 2017). So waren etwa die größeren Konferenzen des Faches den Fragen nach Identitäten, Territorien und Grenzen der Chemie gewidmet, die erstmals in historische und soziale Kontexte (jenseits industriekapitalistischer Fortschrittsnarrative) gesetzt wurden. Die Wiederentdeckung der Chemie als Gegenstand der Wissenschaftsgeschichte (nachdem zwischen 1920 und 1985 fast kein einziges Werk zur Chemiegeschichte veröffentlicht worden war)[30] stand im Zeichen einer epistemischen Emanzipationsbewegung und Chemiehistoriker/innen treten seither als zentrale Akteur/innen der chemischen Grenzarbeit auf. Chemiker/innen sowie Chemiehistoriker/innen verhandelten die Entstehung einer eigenständigen Fachhistoriografie der Chemie (unabhängig von Medizin-, Industrie-, Pharmazie- oder Institutionengeschichte) stets vor dem Hintergrund der angesprochenen gesellschaftlichen Kritik an der Chemie (Hampel, 2017).

Die Chemie in der Geschichte überhaupt sichtbar zu machen, einen essentiellen Kern der chemischen Identität herauszuarbeiten und gegenüber der physikalisch und biowissenschaftlich dominierten Wissenschaftsgeschichte gesondert

---

27 Siehe: (Janich und Psarros, 1994; Janich und Psarros, 1996; Janich und Psarros, 1998).

28 Siehe: (GDCh, 2015; Griesar, 2004b; Mauskopf, 1993; Mittelstraß und Stock, 1992; Reinhardt, 2001a; Renn, 1998; Janich und Rüchardt, 1996; Weitze et al., 2017).

29 Siehe exemplarisch: (Bensaude-Vincent, 1998; Bertomeu-Sánchez et al., 2008b; Callapez et al., 2005; Buchler, 2011; Janich, 1998; Laszlo, 2007; Münch und Baier, 2012; Palló, 2008; Reinhardt, 2001b; Ruthenberg und van Brakel, 2008; Thomas, 2012).

30 Es muss an dieser Stelle festgehalten werden, dass der Blick auf die Tradition der Chemiephilosophie eurozentrisch ist. Im gleichen Zeitraum bestand etwa in der Deutschen Demokratischen Republik und anderen sozialistischen Staaten der Zufluss chemischer Beiträge zur Wissenschaftsphilosophie fort (Schummer, o J), insbesondere da diese durch Friedrich Engels eigene chemiephilosophische Schriften geprägt waren, die *im Westen* nicht rezipiert wurden (Schummer, 1996).

hervorzuheben, stand im Zentrum dieser Bestrebungen (McEvoy, 2016).[31] Gleiches gilt für die universitäre Lehre und die Vermittlung chemiehistorischer Inhalte. In Europa gilt diese noch immer als schwach institutionell verankert, jedoch macht eine wachsende Zahl an Initiativen[32] auf diese Lücke aufmerksam und versucht sie zu schließen[33]. In ihren Bemühungen, für eine Emanzipation und Autonomie der Chemie einzustehen und ihre Einzigartigkeit im Gefüge der Wissenschaften hervorzuheben, überschneidet sich der chemiehistorische Diskurs mit dem der Philosophie der Chemie. Letzteres Feld grenzt sich von der etablierten Wissenschaftsphilosophie ab, die primär von Physiker/innen und Geisteswissenschaftler/innen betrieben wird und daher auch einen erkenntnistheoretischen Fokus auf jene Disziplinen bietet. Die Chemie und die chemische Perspektive bleiben dabei unterrepräsentiert, die Sichtbarmachung und Betonung der Unterschiede zu diesen benachbarten Disziplinen entspricht einer deliberativen Identitätspolitik (Thomas, 2012). Können Biolog/innen oder Physiker/innen wie Thomas Kuhn tatsächlich auch für Chemiker/innen und deren Erfahrungshorizonte sprechen? Meint der gängige wissenschaftsphilosophische Kanon die Chemie mit? Und: „*What might philosophy of science look like if chemists built it?*" (Hoffmann, 2007). Erkenntnistheoretisch wie ontologisch drängt sich dabei insbesondere die Frage auf, ob es genuin chemische Gesetzmäßigkeiten und Größen in der Natur gibt, die unabhängig von physikalischen Größen und Kräften existieren bzw. nicht auf diese zurückzuführen sind (Harré, 2012). Die Unabhängigkeitserklärung der

31 Allgemein gefasste Chemiehistoriografien der letzten Jahre siehe unter: (Bensaude-Vincent und Stengers, 1996; Breslow, 1997; Brock, 1992; Brock, 2000; Brock, 2002; Brock, 2011; Brock, 2013; Brock, 2016; Hirota, 2016; Levere, 2001b; Morris, 2015). Sie unterscheiden sich von den vor 1920 erschienen Werken primär dadurch, dass sie die Geschichte der Chemie und ihrer Gegenstände, Methoden, Objekte und Akteur/innen in den jeweiligen gesellschaftlichen Kontext setzen, während die klassischen Beiträge vor dieser Zäsur eher als positivistisch eingestuft werden (McEvoy, 2016, S. 170). Zu letzteren zählen etwa die historiografischen Werke berühmter Chemiker/innen wie Ida Freund (Freund, 1904), Wilhelm Ostwald (Ostwald, 1906) oder Hermann Kopp (Kopp, 1843), die zur Zeit der „*Belle Époque*" der Chemie (Bensaude-Vincent und Stengers, 1996, S.208) weder deren Reduzierbarkeit auf andere Wissenschaften noch eine übermäßige öffentliche Kritik zu befürchten hatten.

32 Die Sichtbarmachung der Chemie wird von Chemiehistoriker/innen u.a. auch ganz praktisch betrieben: Branchenverbände wie die *Gesellschaft Deutscher Chemiker e.V.* haben etwa 1999 damit begonnen, „Historische Stätten der Chemie" auszuzeichnen und die *American Chemical Society* hat bereits 1992 das *National Historic Chemical Landmarks Program* ins Leben gerufen. Dabei werden etwa bestimmte Gebäude mit Informationstafeln versehen, um bestimmte, dort stattgefundene chemische Entdeckungen und ihre Entdecker/innen zu würdigen und die Chemie und ihren Beitrag zum Fortschritt entsprechend öffentlich wahrnehmbar zu machen.

33 Vgl. hierzu zur Übersicht (Suay-Matallana und Bertomeu-Sánchez, 2017).

Chemie von der Physik stellt zwischen den Zeilen einiger Autor/innen ein großes Anliegen dar (Bensaude-Vincent und Simon, 2012e).

Die Philosophie der Chemie als junges akademisches Feld begann sich erst in den letzten zwanzig Jahren erfolgreich zu institutionalisieren und kämpft noch heute um einen Platz innerhalb der Wissenschaftsphilosphie (Schummer, 2017c). Es wurden Gesellschaften, Zeitschriften und Konferenzen im Namen der Philosophie der Chemie ins Leben gerufen, grundständige Lehr- und Übersichtswerke erarbeitet[34] und ihre Inhalte finden sich auch zunehmend in der Chemieausbildung wieder. Eine der häufigsten Fragen der Philosophie der Chemie lautet dabei: Wie verhalten sich Chemie und Physik und ihre jeweiligen Gegenstände zueinander? Verfügt die Chemie über eigene Naturgesetze, die nicht auf physikalische reduziert werden können? (Harré, 2012) Oder zugespitzter: „Ist Chemie auf Physik reduzierbar?" (Primas, 1985). Insbesondere die epistemische, ästhetische, praxeologische und ontologische Abgrenzung von der (Quanten-)Physik erscheint in diesen Diskursen als erstrebenswertes Ziel (Bensaude-Vincent und Simon, 2012e). Im Diskurs ist man mehrheitlich um eine Falsifikation bzw. Relativierung bemüht und Reduktionismus sowie Physikalismus werden dabei als epistemologische Probleme bzw. Kontrapositionen formuliert (Hendry, 2012).

Reduktionismen und Physikalismen galten zum Gründungszeitpunkt der neuen Chemieforschung gewissermaßen als Ursünde, die mit der Formulierung von *Dirac's claim* zum schleichenden Niedergang der Chemie geführt hatte (Scerri, 2016). In der Chemiegeschichte galt längere Zeit die Arbeitshypothese, dass die (vermeintliche) Reduzierbarkeit der Chemie auf die Gesetze der Quantenphysik dazu geführt habe, dass die Chemie eigene wissenschaftsphilosophische Beiträge eingebüßt und in der Folge die Rückbindung mit Geisteswissenschaften und Gesellschaft verloren habe (ebd.). Mittlerweile wurden diese Annahmen allerdings revidiert und mit einer ausführlichen Forschung zur Geschichte der Instrumentellen Revolution (siehe Abschnitte 2.3 und 6.1) wurde deutlich, dass die Etablierung der Quantenmechanik als fundamentales Rahmenwerk der Chemie zwar erhebliche Veränderungen mit sich gebracht hatte, die der Chemie insgesamt aber eher nützten als schadeten (ebd.). Dennoch lohnt sich ein Rückblick auf diese Diskurse, denn sie erlauben Rückschlüsse auf bisher eher weniger beachtete Aspekte in der Grenzarbeit der chemischen Felder:

In der chemiephilosophischen Ergründung des Verhältnisses von Chemie und Physik – und vor allem der analytischen Abgrenzungspraktiken – griffen in den 1980er Jahren bereits die Pionier/innen der Chemiephilosophie wie Hans Primas[35] und Pier Luigi Luisi Emergenztheorien auf. Dem Reduktionismus wurde somit

34 (Baird et al., 2006; Bhushan und Rosenfeld, 2000; Wünsch, 2000; Llored, 2013; Sobczyńska et al., 2004; Woody et al., 2012).

35 Vgl. (Primas, 1983; Primas, 1998; Primas, 1985).

eine Reihe von Theorien der Emergenz entgegengestellt, die aufzeigen sollten, dass das Verhältnis von Chemie und Quantenphysik sich nicht im reduktionistischen Sinne als Beziehung zwischen Theorien oder Phänomenen beschrieben werden kann, sondern dass sich die jeweiligen Gegenstände und Bezugspunkte auf völlig unterschiedlichen Ebenen verschiedener Systeme bewegen (Manafu, 2013). Demnach bilden die komplexer (d.h. zahlreicher) werdenden Phänomene auf höherliegenden Seinsschichten Eigenschaften aus, die bei denjenigen Dingen aus denen sie sich zusammensetzen, nicht beobachtbar sind:

> In fact, once those four segments have formed a square, they are no longer open-ended and the very essence of a cube perturbs the properties of the flat surfaces that form it, obliging them into more than one single plane. In other words, simultaneously with the emergence of the novel property at the higher level, there is a modification of the properties of the components (Luisi, 2002, S. 187).

Darüber hinaus wurden gezielt Fallbeispiele gesucht und erörtert, bei denen physikalische Gesetzmäßigkeiten, Prozesse und Größen an die Grenzen der Erklärungskraft stoßen (Heintz, 2004). In diesem Zusammenhang ist seither die molekulare Eigenschaft der Chiralität immer wieder im Gespräch, denn für die asymmetrische Isomerenstruktur organischer wie anorganischer Verbindungen wurde bis heute noch keine abschließende quantenphysikalische Erklärung formuliert, trotz Messung des Energieunterschiedes zwischen Isomeren (Meierhenrich, 2011). Die molekulare Eigenschaft der Chiralität wird als eine genuin chemische Eigenschaft kommuniziert, die als irreduzibel auf die physikalischen Grundgesetze der Natur gilt (Van Brakel, 2012; Le Poidevin, 2000; Anderson, 1972). So lässt sich das Phänomen molekularer Chiralität nicht nur nicht mit einem adäquaten theoretischen Konstrukt aus der Quantenmechanik erklären, sondern es ist zu beobachten, dass sich die Chiralität auf der Ebene des Supramolekularen (vgl. Kapitel 3) anders verhält als im kleinen Molekül: Während die Enantiomere eines Moleküls mit einem einzigen Asymmetriezentrum gleich stabil sind sowie über die gleichen Spektra verfügen und auch bezüglich ihrer thermodynamischen Eigenschaften identisch sind, tritt dies bei komplexen Makromolekülen mit multiplen Asymmetriezentren seltener auf (Van Brakel, 2012). Zudem ist es oftmals unmöglich zu erklären, welche molekularen Mechanismen zu einer enantioselektiven (unterschiedlichen) Wirkung *in vivo* führen.

> Substances are more than their composition. But enantiomerism I think encourages us to take a step in the other direction. For [...] a full understanding of the identity of an enantiomer assigns a role to a global property of space. That there is a difference between the *d* and the *l* forms of a substance depends on spatial geometry, and so is not wholly determined by the intrinsic

> microphysical properties of the molecule (or of entities at a deeper level of analysis). This hardly restores chemistry to the position of near-complete autonomy from physics that it enjoyed in the eighteenth-century, but it does suggest that in chemistry one sometimes needs to look further up, rather than further down, the hierarchy of nature (Le Poidevin, 2000, S. 140).

Diese Argumentation zeugt von der impliziten Grenzarbeit, die sich in den Auseinandersetzungen mit der Chiralität in Quantenchemie und Chemiephilosophie widerspiegelt: während manche Forscher/innen keinen Aufwand scheuen, die Lücken zwischen den Emergenzebenen zu schließen und an einer universellen Theorie der Symmetriebrechung zu arbeiten, versuchen andere die Unterschiede zwischen den Ebenen zu betonen und eine jeweilige Unabhängigkeit zu erhalten (Labarca und Lombardi, 2008, S. 439). Die Extrapolation bzw. die Gültigkeit von Wissen zwischen Emergenzebenen stellt ein zentrales Problem des aktuellen Wissenschaftsfeldes dar. An diesen Schnittstellen zeigen sich die Konflikthaftigkeit und disziplinäre Machtverhältnisse, die sich zwischen kollektiven wissenschaftlichen Akteur/innen und der Hegemonie von Deutungen der materiellen Welt entspinnen. Hierbei liegt ein Fall von Grenzarbeit vor, denn die Einheit der Naturwissenschaft kann als wissenschaftspolitische Bewegung bezeichnet werden, die von einigen hingegen als Bedrohung wahrgenommen wird und als Gegenreaktion die Verteidigung der Gegenstände ihres Fachbereiches nach außen hin bewirkt.

In der Philosophie der Chemie sind derweil die Debatten um Grenzen, Territorien und eine inhärente Identität der Chemie wieder abgeklungen – parallel zu den Befürchtungen einer möglichen Auflösung des Feldes. Die Suche nach einem gemeinsamen Kern der Chemie wurde weitestgehend aufgegeben und es herrscht derweil ein antiessentialistisches Verständnis von den chemischen Feldern vor, das vor allem an Praktiken, Orten und Objekten der Chemie orientiert ist (Bensaude-Vincent, 2018). Auch die Abgrenzung der Philosophie der Chemie in ihren Bestrebungen nach einer Autonomie der Chemie vom wissenschaftsphilosophischen *Mainstream* fallen mittlerweile gemäßigter aus. Dennoch wurde durch diese Identitätssuche der chemiebezogenen Wissenschaftsforschung ein Bewusstsein für die Beziehungen zu den Geisteswissenschaften geschaffen, das Chemiker/innen in den vorangegangenen Jahrzehnten abhanden gekommen war. Der verstärkte Dialog mit der Öffentlichkeit, die Suche nach einem chemischen Beitrag zu den globalen Problemen der Gegenwart (Palermo, 2018) oder aus der Chemie stammende, analytische Begriffsprägungen wie das *Anthropozän* (Crutzen, 2002) wären ansonsten nicht möglich gewesen. An dieser Stelle wird deutlich, wie sehr Geistes- und Naturwissenschaften trotz vermeintlichem Graben der „Zwei Kulturen" (Kreuzer, 1987) miteinander verwoben sind – und was geschieht, wenn dieser Kontakt abbricht. An dieser Stelle sei in diesem Zusammenhang das De-

siderat formuliert, dass auch die *Science and Technology Studies* diese Beziehungen verstärkt in die Analysen technowissenschaftlicher Felder miteinbeziehen (Sutter, 2012, S. 440) und zudem auch den Praktiken theoretischen Arbeitens jenseits des Labors, wie es etwa in der theoretischen Chemie bzw. Physik praktiziert wird, mehr Aufmerksamkeit zukommen zu lassen.

7 Schluss und Ausblick

Die vorliegenden Analysen beschreiben die Wanderung der molekularen Eigenschaft der Chiralität durch verschiedene wissenschaftliche Felder und ihre Grenzbereiche von der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts bis in zur Gegenwart. Auch wenn die chiralen Phänomene auf den ersten Blick unscheinbar und alltäglich anmuten mögen, erlauben sie doch Einblicke in die heterogenen Differenzierungs- und Grenzziehungsdynamiken der Naturwissenschaften im Spiegel sich wandelnder wissenschafts- und innovationspolitischer Dispositive. So wird gezeigt, dass die molekulare Welt dabei einen Dreh- und Angelpunkt der disziplinären Konfigurationsprozesse darstellt, die insbesondere Rückschlüsse auf die gegenwärtige Lage der Chemie erlauben. Denn ebenso wenig wie die Disziplin der Chemie selbst erweist sich auch das Molekulare als einheitliche oder monolithische Instanz der Naturforschung. Die Heterogenität der chemischen Subdisziplinen und Grenzbereiche mit lebenswissenschaftlichen und physikalischen Forschungsbereichen drückt sich in der Heterogenität der molekularen Welten aus. So bestehen neben der klassischen molekularen Welt der organischen Synthesechemie auch makro-, sub- und supramolekulare Welten nebeneinander, die in multiplen soziotechnischen Settings mit jeweils unterschiedlichen Expertisen, Methoden, Apparaten, Theorien und Weltbildern, Innovatiosdispositiven und gesellschaftlichen Projektionen hervorgebracht und aufrechterhalten werden.

Es handelt sich bei diesen multiplen molekularen Welten nicht etwa um *Stereoisomere* oder Darreichungsformen ein und derselben Realität, die sich lediglich in verschiedene Seinszustände oder Betrachtungsebenen aufteilen lässt (vgl. Abschnitt 6.2). Vielmehr können sie vor dem Hintergrund der vorgestellten Befunde als soziotechnische Hervorbringungen verstanden werden. Die Gemachtheit der molekularen Welten an den heterogenen Schnittstellen verschiedener Akteur/innen, Disziplinen, Orte der Wissensproduktion, Apparate, Moleküle, Teilchen, Kräfte, Tiere, Medien, etc. entfaltet sich dabei im Fallbeispiel der Chiralität und der Inkommensurabilität des Molekularen: Ein und dasselbe Konzept kann von unterschiedlichen Akteur/innen abhängig von deren stilgebundenem Sehen, Erkennen und Wahrnehmen völlig unterschiedliche ontische Bezüge, Bedeutungszuschreibungen und Sinnzusammenhänge aufweisen. Im Sinne eines

Boundary Objects weist die Chiralität eine enorme Plastizität auf, die die Zusammenarbeit ohne Konsens in den heterogenen, intersziplinären Grenzbereichen der Lebenswissenschaften und Materialforschung ermöglicht.

In der Migration der molekularen Eigenschaft der Chiralität durch die Felder der Chemie, Physik, Biowissenschaften, Pharmazie, Medizin und Philosophie wird deutlich, wie sich eine unscheinbare, alltägliche molekulare Eigenschaft selbst immer wieder in ihrer Phänomenologie wie Epistemik transformiert und zugleich auf die Dynamiken der entsprechenden wissenschaftlichen Felder einwirkt und an deren Wandel beteiligt ist. Die Chiralität als Konzept der Rechts-Links-Händigkeit bzw. Spiegelasymmetrie in der Natur nahm ihren Anfang an der Schnittstelle von organischer Synthesechemie und Kristallografie zur Mitte des 19. Jahrhunderts (vgl. Abschnitt 2.1). Die Entdeckung dieser Strukturasymmetrien in Kristallen wie auch organischen Stoffen durch Louis Pasteur, Jacobus Hericus Van 't Hoff und Joseph Achille Le Bel prägte die Entstehung und Entwicklung des molekularen Weltbildes der organischen Chemie und der Biochemie entscheidend mit. Die Chiralität wurde in der Folge als genuin chemischer Begriff aufgefasst und sedimentierte sich in den Lehrbüchern der organischen Chemie und prägte seither die stilgebundene Sozialisation all jener Wissenschaftler/innen auch in den außer-chemischen Bereichen, die sich mit der molekularen Welt beschäftigen (vgl. Abschnitt 2.4).

Gemäß dieser Lesart zur Rolle, die die Chiralität in der Chemiegeschichte spielt, führten insbesondere strukturbezogene Konzeptionen wie die Chiralität dazu, dass sich die molekulare Welt als genuin chemischer Gegenstands- und Phänomenbereich etablierte. Die molekulare Welt ermöglichte der der Chemie gewissermaßen einen gemeinsam geteilten Kern und Ausgangspunkt chemischen Handelns und Denkens. Selbst für Chemiker/innen der anorganischen Chemie, die sich eher mit Festkörpern als mit Molekülen beschäftigen, scheint die Heuristik des Moleküls den eigentlichen Kern der Chemie auszumachen. Die Identitätskrise der Chemie, die Chemiephilosoph/innen und -historiker/innen um die Jahrtausendwende feststellten, lässt sich in diesem Zusammenhang vor dem Hintergrund der Diffusion und Pluralisierung molekularer Welten im 20. Jahrhundert deuten (vgl. Abschnitt 6.3). Mit dem Entstehen hybrider Wissenschaftsfelder wie Nano- und Materialwissenschaften, Molekularbiologie und Biotechnologie entstanden makro-, supra- oder submolekularer Welten, die sich deutlich von demjenigen der organischen Synthesechemie des 19. Jahrhunders unterschieden – und im Laufe der Zeit an epistemischer Deutungsmacht zunahmen. Die Identitätskrise der Chemie, die durch die Amalgamierung mit physikalischen und lebenswissenschaftlichen Bereichen zu einer Omnipräsenz und gleichzeitig zu einer Unsichtbarkeit der Chemie führte (vgl. Abschnitt 1.1) hängt in Anschluss an diese Interpretation mit der Diffusion der molekularen Welten zusammen, in Bezug auf die genuin chemische Heuristiken an epistemischer Dominanz einge-

büßt haben. Die Wanderung der Chiralität durch verschiedene außer-chemische Disziplinen zeugt von der Diffusion molekularer Welten und die Aneignung dieser durch physikalische wie lebenswissenschaftliche Kollektive, wie in der Folge nochmals in Kürze rekapituliert wird:

Im 20. Jahrhundert wanderte die Chiralität schließlich in die verschiedenen außer-chemischen Felder und hinterließ dort jeweils ihre Spuren, angefangen bei den Schnittstellen zwischen Chemie und Physik. Mit der Entstehung der physikalischen Chemie etablierte sich ein physikalischer Zugriff auf die molekulare Welt, denn molekulare Prozesse wie chemische Bindung und Reaktion wurden mit physikalischen Größen der Elektrizität theoretisch verknüpft und empirisch begründet (vgl. Abschnitt 2.3). Mit der Entdeckung der Radioaktivität und den daran anschließenden reformierten Atommodellen und -theorien sedimentierte sich der physikalische Zugriff auf molekulare Welten und Konzeptionen – wie auch der Chiralität. Mit der Quantenmechanik, die in den 1920er Jahren die klassische Mechanik für die physikalische Theorie der nicht-anschaulichen, mikroskopischen (und damit auch der molekularen) Welt ablöste, erschien jeglicher genuin chemische Zugriff auf diese obsolet, da sie letztendlich auf die Physik zurückzuführen seien (vgl. Abschnitt 5.2). Dieser Physikalismus und Reduktionismus prägte die Wissenschaftsphilosophie des 20. Jahrhunderts bis in die 1980er Jahre hinein nachhaltig und die Chemie verlor im Zuge dessen die Anbindung an die Geisteswissenschaften (vgl. Abschnitt 5.3). In den 1960er Jahren etablierten Kernphysiker/innen darüber hinaus auch ein eigenes Chiralitätskonzept der Teilchendynamiken, die gegenwärtig auf empirischem wie theoretische Wege mit der molekularen Spiegelasymmetrie in Verbindung gesetzt werden sollen (vgl. Abschnitt 5.1).

In diesem Kontext zeigt sich zudem, dass insbesondere forschungspolitische Innovationsdispositive als Treiber für die Etablierung des Physikalismus und der diskursiven Dominanz physikalischer über chemische Zugriffe auf die mikroskopische Welt fungierten. Die *Big Science*-Projekte im Zuge militärnaher Forschungsprojekte in den USA schufen gewissermaßen Tatsachen, die die chemische Wissensproduktion ab der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts nachhaltig prägten und veränderten. Die sog. NMR-Revolution (technische Spektroskopiemethoden auf der Grundlage von Kernspinresonanz) führte zur Physikalisierung und Transformation des standardisierten Chemielbors in einen physikalischen Ort, denn *High Tech*-Verfahren wie Spektroskopiemethoden ersetzen zunehmend die etablierten Methoden der Nass-Chemie, die als deutlich störanfälliger und weniger objektiv galten (vgl. Abschnitt 2.3). Darüber hinaus wurden physikalische Zugriffe auf die molekulare Welt insbesondere in ingenieurswissenschaftlichen Bereichen dominant, aus denen sich teilweise über Jahrhunderte etablierte chemische Anwendungsbereiche speisten, namentlich den Materialwissenschaften, der Werkstoffkunde und der Geologie (vgl. Kapitel 3). Auch in diesen Bereichen ersetzten

in der Folge kostenintensive, in *public-private partnerships* entstandene Apparate wie das Rastertunnelmikroskop in der Analytik etablierte chemische Methoden. Die Aneignung der molekularen Welt durch die Physik zeigt sich auch in diesem Fall am Beispiel der Chiralität, denn dieses Konzept wird in den physikalischen Fachwortschatz integriert und dabei auf eine Reihe physikalischer Phänomene erweitert, die im *ursprünglichen* – sprich: chemischen – Sinne eigentlich nicht als chiral gelten (vgl. Abschnitt 3.2).

Wie ein Blick auf die Verbreitung der Chiralität in der aktuellen Wissenschaftslandschaft zeigt, hat die Chemie im Zuge dieser Physikalisierung nicht nur in den Bereichen der Nano-, Material- und Oberflächenforschung an epistemischer Hegemonie eingebüßt, sondern auch in zwei weiteren traditionellen Anwendungsbereichen chemischen Wissens: Pharmazie und Medizin. Die vergleichenden Analysen zum Umgang mit der molekularen Chiralität in der hoch- und niedermolekularen pharmazeutischen Grundlagenforschung weisen nach, dass im Zuge der Molekularisierung der Biologie und später der Medizin seit der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts auf die Bausteine des Lebens bezogene Fragen in der molekulare Forschung immer bedeutender wurden (siehe Kapitel 4). Mit den neueren *Big Science*-Projekten wie dem *Human Genome Project* und dem innovationspolitischen Programm der konvergierenden Technologien im Bereich Nano-, Bio-, Informations- und Neuroforschung (NBIC) seit den 1990er Jahren wurden zunehmend außer-chemische Zugriffe auf die molekularen Welten dominant. Dies drückt sich etwa auch in der Re-Konfiguration der chemisch-pharmazeutischen Industrie der 1990er Jahre aus, im Rahmen derer die chemische Industrie sich fortan weitgehend auf Basis-, Fein- und Spezialchemikalien konzentrierte und entsprechende Konzerne ihre Sparten so neu ausrichteten, dass die pharmazeutische Entwicklung und Produktion näher mit der Agrochemie zusammenrückte (vgl. 4.1). Durch Fusionen und Abspaltungen bildeten sich dabei integrierte *Life Science*-Konzerne heraus, die sich in der Folge immer stärker an Biochemie und Biotechnologie orientierten und in ihren Innovationsverständnis die klassische organische Synthesechemie immer mehr zur Abgrenzungsfolie stilisierten und als innovationsfeindlich stigmatisierten. Auf diesem Wege verliert die Chemie seit den 1990er Jahren zunehmend an epistemischer Hegemonie über einen Anwendungsbereich, der über zwei Jahrhunderte zu ihren primären Legitimationsinstanzen zählte: die menschliche Gesundheit.

Die zunehmende Dominanz eines biowissenschaftlichen Zugriffs auf das Molekulare zeigt sich in diesem Zusammenhang in der Transition vom kleinen zum großen Molekül, das ebenfalls in Kapitel 4 behandelt wird. Diese Transition beschreibt den Trend in der pharmazeutischen Forschung und Entwicklung, dass hochmolekulare Biomoleküle, die als maßgeschneiderte Antwort auf komplexe Krankheitsbilder wie Morbus Alzheimer und Krebserkrankungen der klassischen chemischen *magic bullet drug* als überlegen aufgefasst werden. Die fortschreitende

Aneignung der molekularen Welt durch die Lebenswissenschaften zeigt sich über die Innovationsdispositive der pharmazeutischen Industrie hinaus zudem in den Feldern der biomedizinischen Forschung und Praxis, wozu insbesondere neuere, auf biotechnologische Innovationen ausgerichtete Paradigmata wie die translationale Medizin (vgl. 5.3) beitragen. Auch in diesem Bereich wird der molekular gefasste Körper zunehmend als komplexes Zusammenspiel hochmolekularer biochemischer Prozesse gesehen, denen das *small molecule* der klassischen organischen Synthesechemie nicht mehr gerecht zu werden verspricht. Wie in Kapitel 5 argumentiert wird, erfährt angesichts dieser neuen Innovationsdispositive die Präidee der Arbeitsteilung zwischen Medizin und Chemie eine Disruption, die das Verhältnis der beiden Felder über Jahrhunderte geprägt hatte (vgl. Abschnitt 5.1). Angesichts der (Bio-)Molekularisierung der Medizin in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts und der sog. biotechnologischen Revolution verlieren chemische *styles of reasoning* in der biomedizinischen Forschung und Praxis zunehmend an epistemischer Hegemonie.

Somit zeigt sich, dass mittlerweile auch zunehmend Physiker/innen und Biolog/innen Beiträge zum Wissenszuwachs über die molekularen Welten leisten und diese aktiv mitgestalteten. In den Modellen, Bildern, Zeichnungen, Texten und Fragestellungen zum Molekül und seiner belebten wie unbelebten Umwelt spiegeln sich seit jeher die unterschiedlichen disziplinären Prämissen und Weltbilder wieder. Zu diesen disziplinspezifischen Zugriffen zählt etwa auch die Art und Weise, wie diese disziplinären Kollektive sich spezifische Gegenstände aneignen, verteidigen und wieder aufgeben. Angesichts der gegenwärtigen Hybridisierung wissenschaftlicher Disziplinen lassen sich weitreichende Re-Konfigurationen der wissenschaftlichen Felder beobachten. Insbesondere die Welt des Molekularen erscheint dabei als soziale Arena der disziplinären Grenzarbeit. Die Betrachtung der molekularen Welt zählt nicht mehr exklusiv in den Zuständigkeitsbereich der Chemie, sondern wird neben physikalisch ausgerichteten Kollektiven auch von einer wachsenden Bioökonomie einverleibt und mit hybriden biotechnologischen Prämissen, Methoden, Ikonografien, Theorien aufgeladen. Auch verschiedenen hybriden Bindestrichdisziplinen der *-omics* und *-sciences*, die sich von den etablierten Großdisziplinen abgrenzen und dabei sind, sich eigene Räume und Wirklichkeiten zu erschaffen, dient das Molekulare mittlerweile als Kern des Denkens und Schaffens. Interessant ist dabei, wie in diesen Feldern, die sich als postdisziplinär, hybridisiert und problembezogen verstehen, mit klassischen Konzeptionen des Molekularen umgegangen wird, die in den etablierten Zuständigkeitsbereich der Chemie fallen. So lässt sich die Chiralität etwa in den physikalisch ausgerichteten Bereichen der Nano- und Materialforschung aufgrund der inhärent vorhandenen Physikalismus und Reduktionsthese aneignen und in den physikalischen Wortschatz integrieren, während in den Lebenswissenschaften dies nicht der Fall

ist und die Chiralität allmählich aus dem basalen Verständnis des Molekularen verschwindet (vgl. 3.2).

Diese narrativen Strategien der Grenzarbeit, in der es um die Aneignung bzw. Aussonderung von Begrifflichkeiten, Konzeptionen und Semantiken geht, dienen letztendlich den beteiligten Kollektiven als diskursive Mittel in der Ressourcenakquise: Bei den molekularen Welten handelt es sich derweil um den epistemisch-ontischen Zugriff auf die Natur, der von Wissenschaftler/innen am häufigsten bemüht wird. Dies spiegelt sich auch in den zeitgenössischen Innovationsdispositiven der verschiedensten technoscientifischen Forschungs- und Entwicklungsbereiche wieder. In Bezug auf Diagnostik und Therapie von Krankheiten, agrartechnologische Produkte wie Pestizide oder die Optimierung von Energiespeichern (um nur dreierlei Beispiele[1] zu nennen) gelten molekulare Zugriffe einem molaren bzw. makroskopischen als weit überlegen. Ein molekularer Zugriff auf die verschiedenen Anwendungsbereiche der aufstrebenden *Technosciences* gilt als besonders vielversprechend in Bezug auf potentielle Innovationen in den verschiedensten Bereichen. Auf diesem Wege unterlaufen immer weiter gefasste Bereiche der Wissenschaften und Forschungsbereiche eine Molekularisierung, was zu erheblichen Disruptionen im etablierten Disziplinengefüge der Wissenschaften führt und weiterhin führen wird.

Diese Befunde zu den Felddynamiken der chemischen Wissenschaften erlauben Rückschlüsse über die Rolle, die die etablierte Großdisziplin gegenwärtig in der Wissenschaft spielt. Auch wenn die Disziplin angesichts der Innovationsdispositive der neoliberalen, wirtschaftsnahen Universität seit den 1990er Jahren zunehmend unter Druck geraten ist (vgl. 1.2 und 3.1) und auch die Wissenschaftsforschung im Zuge dessen ihr baldiges Ende zugunsten hybrider *-sciences* und *-studies* angekündigt hat (Filk, 2010, S. 104ff.), scheint sie gegenwärtig dennoch als persistent. Verschiedene Attraktoren, Trends und Innovationsdispositive mögen ihre Spuren hinterlassen und mittelfristig im Disziplinengefüge Spannungen erzeugen, die Elastizität der Disziplin ermöglicht ihr Fortbestehen. Sie zeigen die vorliegenden Untersuchungen zu den chemischen Wissenschaften, dass die Wissensproduktion nach wie vor disziplinär organisiert ist und insbesondere entlang der im 19. Jahrhundert etablierten Binnendifferenzierungen in organische, anorganische, physikalische und Biochemie erfolgt (Stichweh, 1984). An den hybriden

1 Doch gerade auch vor dem Hintergrund dieser drei Beispiele fällt auf, wie heterogen molekulare Zugriffe ausfallen können und welche Unterschiede zwischen einen Zugriff der organischen Synthesechemie und den gegenwärtigen molekularbiologischen, biotechnologischen (und physikalischen) Zugriffen bestehen. Auch die organische Strukturchemie gilt in Bezug auf die Innovationsdispositive anwendungsorientierter Bereiche in Medizin und Biotechnologie mittlerweile als überholt und lebenswissenschaftlichen Zugriffen gegenüber als unterlegen (vgl. Kapitel 4 und 5).

Grenzbereichen werden – wie für die Nanowissenschaften, pharmazeutische Industrie, Biomedizin und Quantenchemie aufgezeigt wurde – sind im Lauf der Zeit plurale molekulare Welten entstanden, in denen physikalische und biologische epistemiken, Weltbilder die tradierten chemischen marginalisieren. Was die Persistenz der Chemie als Ganzes allerdings gewährleistet, ist der implizite diskursive Verweis darauf, dass die Chemie als generalisiertes Konglomerat die *gesamte* molekulare Welt in ihrer Vielgestaltigkeit abbildet, während besagte, hybride physikalische und biowissenschaftliche Zugriffe immer nur einen partikulären Ausschnitt behandeln.

Wie dieser Beitrag der Wissenssoziologie der Chemie zeigt, werden die disziplinären Differenzierungsdynamiken der Wissenschaften nicht nur durch epistemische Kulturen des Experiments (Knorr-Cetina, 2002) und geteilte Fachidentitäten (Felt et al., 2013) geprägt, sondern auch durch den Verweis auf einen gemeinsam geteilten epistemische Raum, der einerseits vage genug ist, um auch außerhalb der Gemeinschaft stehenden *styles of reasoning* daran teilhaben zu lassen und andererseits geschlossen genug, um die epistemische Hegemonie darüber zu behaupten. Im Falle der Chemie handelt es sich bei diesem epistemischen Raum um die molekulare Welt, in anderen etablierten Disziplinengefügen entspräche dies etwa dem Sozialen in der Soziologie oder dem Lebendigen in der Biologie – ebenfalls nicht minder voraussetzungsreiche und vielschichtige Konzeptionen, die eine Grenzarbeit ermöglichen. An dieser Stelle lässt sich das Forschungsdesiderat formulieren, herauszufinden, wie sich Disziplinen Soziologie oder Biologie dieser epistemischen Räume in ihrer Abgrenzung nach außen. So wäre es beispielsweise interessant, herauszufinden, wie in anderen wissenschaftlichen Bereichen jenseits der Chemie mit Reduktionsthesen im Rahmen der disziplinären *Boundary Work* verhandelt wird, die gerade vor dem Hintergrund neuerer Innovationsdispositive und der Renaissance der Präidee der Einheitswissenschaft an Einfluss gewinnen (vgl. Abschnitt 6.2). Vor diesem Hintergrund sei zudem ein zweites Forschungsdesiderat formuliert: Wie insbesondere in Kapitel 6 deutlich wird, spielen die Geisteswissenschaften (wie in jenem Beispiel der Wissenschaftsphilosophie) eine erhebliche Rolle in der naturwissenschaftlichen Grenzarbeit (und umgekehrt). So wurde gezeigt, dass insbesondere jene Emergenz- und Reduktionsthesen, die als Präideen in die weiter gefassten Innovationspositive des NBIC-Paradigmas überwiegend aus den Fachwissenschaften selbst stammten und ein erkenntnistheoretisches Fundament bereitstellten. Die Wissenschaftsforschung hat sich im Wesentlichen auf die experimentellen Praxen der Naturwissenschaften fokussiert und dabei die theoretischen, philosophischen und metaphysischen Aspekte tendenziell vernachlässigt.

Zum Abschluss sei schließlich der Beitrag dieses Buches zum bestehenden Kanon der Chemieforschung evaluiert und die Bedeutung der Chemie für künftige wissenschaftssoziologische Vorhaben hervorgehoben. So wurden eine Reihe

chemiehistorischer und -philosophischer Fragestellungen, Befunde und Interpretationen der Chemie und ihrem Verhältnis zur Gesellschaft referiert und diskutiert. Insbesondere die Chemiehistoriker/innen Bernadette Bensaude-Vincent, Ursula Klein, Elisabeth Vaupel, Carsten Reinhardt und Joachim Schummer zählen zu den Pionier/innen einer Sozial- bzw. Kulturgeschichte der Chemie, die seit den 1990er Jahren über einen positivistischen historiografischen Duktus hinausgingen und die historischen Gegenstände der chemischen Erkenntnis in heterogene soziale Kontexte eingebettet betrachteten (McEvoy, 2016, S. 170). Genuin sozialwissenschaftliche (und vor allem empirische) Beiträge zu den gegenwärtigen Feldern der Chemie sind allerdings noch rar gestreut und beziehen sich im Wesentlichen auf die gesellschaftliche Wahrnehmung (und Kritik) an der Chemie und ihren Industrien (Hampel, 2017), Arbeitsbedingungen in der chemischen Industrie (Streckeisen, 2007; Suckale, 2016), Unterrichtsforschung und Chemiedidaktik sowie Wissenschaftskommunikation und -journalismus (Remenyi et al., 2017). Selbst Überlegungen zu einer Ethik der Chemie sind noch verhältnismäßig jung und ein entsprechendes Forschungsfeld ist erst in den 1990er Jahren entstanden (Koch, 2017). Insbesondere empirische sozial- und kulturwissenschaftliche Zugriffe auf die Felder der Chemie können einen vertiefenden Beitrag zum Verständnis der Chemie als *Teil* der Gesellschaft ermöglichen.

Die bestehenden Beiträge zum Verhältnis von Chemie und, die vor allem vor dem Hintergrund einer Förderung chemischer Branchenverbände entstehen, bilden darüber hinaus in erheblichem Kontrast zu neueren chemieanthropologischen Ansätzen wie der *chemosphere*, den *chemical geographies* und der *chemosociality* (vgl. Abschnitt 1.3). Letztere beschäftigen sich mit sozialen Gemeinschaften, politischen Auseinandersetzungen und Diskursen, die aus kollektiver Chemikalien- und Risikoexpositionen und den entsprechenden Folgen für Gesundheit und Umwelt entstehen. Diese kritischen Ansätze, die sich zu einem großen Teil auch als Teil des Aktivismus gegen industrielle Interessen verstehen, werden entsprechend wenig rezipiert von Chemiehistoriker/innen und Philosoph/innen, die die Diskurse um die Rolle der Chemie in der Gesellschaft anführen. Der Unterschied zwischen diesen beiden Paradigmata der chemiebezogenen Forschung wird vor allem in der abweichenden Semantik deutlich: Während chemieanthropologische Ansätze die Gesundheits- und Umweltrisiken, die von der chemischen Industrie ausgehenen, in den Vordergrund stellt, bemühen sich Chemiehistoriker/innen und -philosoph/innen darum, offen „chemophobe" Semantiken diskursiv zu entkräften und die positiven Seiten der Chemie hervorzuheben.

Insgesamt lässt sich festhalten, dass in der sozialwissenschaftlich ausgerichteten Wissenschaftsforschung Chemiebezüge eine Minderheit ausmachen. Der überwiegende Anteil empirischer Fallbeispiele stammen aus den molekularen Lebenswissenschaften, verschiedenen ingenieurswissenschaftlichen Bereichen und der Teilchen- bzw. Hochenergiephysik. In Bezug auf die (gegenwärtigen) Expe-

rimentalpraxen, Objekte und soziotechnischen Bedingungen der chemischen Erkenntnis waren Vertreter/innen der *Science and Technology Studies* bislang zurückhaltend. Mit dieser Untersuchung zu den sozialen Felddynamiken der Chemie und ihrer Grenzarbeit liegt somit ein Beitrag vor, der um eine erhöhte Sichtbarkeit der Chemie als Gegenstand der Wissenschaftsforschung bemüht ist.

Abbildungsverzeichnis

Seite 20: Die schematische Darstellung und Demonstration der molekularen Händigkeit anhand der spiegelbildlichen Isomere des Alanins nach Blackmond.

Seite 32: Die schematische Darstellung und Demonstration der molekularen Händigkeit anhand der spiegelbildlichen Isomerere des Alanins. URL: https://medium.com/a-spoonfulof-sugar/biological-homochirality-one-of-lifes-greatest-mysteries-2031f4700c4b (15.05.2020).

Seite 37: Der Vergleich zweier Molekülmodell-Konventionen. URL: https://eic.rsc.org/feature/pictures-of-the-molecular-world/2000103.article (15.05.2020).

Seite 38: Die geometisch-schematische Gegenüberstellung enantiomorpher Quarzkristalle.

Seite 43: Ein 3D-Modellversuch zur Darstellung der Theorie der räumlichen spiegelasymmetrieschen Struktur bestimmter Stoffe wie der Weinsäure ($C_4H_6O_6$).

Seite 49: Schulwandbild: „Nebenprodukte der Entgasung von Steinkohle“ (um 1950/60).

Seite 54: „Ueber die Configuration des Traubenzuckers und seiner Isomeren“ (Auszug; Emil Fischer, 1891).

Seite 56: Die schematische und illustrierte Darstellung der S(−) und R(+)-Enantiomere des Limonens $C_{10}H_{16}$.

Seite 58: Eine Darstellungsform des Chiralitätsprinzips in der Chemielehre.

Seite 70: Die Anwendung der Prioritätenregel nach der Cahn-Ingold-Prelog-Konvention (CIP) zur Bestimmung des chiralen Drehsinns.

Seite 93: Die softwaregestützte Simulation zweier gegensätzlicher helikaler Schraubenmoleküle.

Seite 93: Die Darstellung der gegenseitigen Abgrenzung in der Stereochemie zwischen den Nomenklaturen organischer Verbindungen mit einem Stereozentrum und helikaler Supramoleküle.

Seite 110: Das biotechnologische Krebsmedikament Herpecetin als Beispiel für monoklonale Antikörper (CC-BY-SA-3.0).

Seite 138: Die Entwicklung von pharmazeutischen Innovationen als risikoreiches, multidisziplinäres, langwieriges und kostenintensives Unterfangen.

Seite 171: Versuchsaufbau zu stereochemischen Experimenten im Rahmen von Chemiepraktika für Medizinstudent/innen.

Seite 179 Das Narrativ des personalisierten Nutzens maßgeschneiderter Behandlungen im Dienste von Patient/innen als Legitimationsstrategie des Translationsparadigmas.

Seite 180: Plurale Konzeptionen der translationalen Medizin.

Seite 202: Modell zum Zusammenhang zwischen emergenten Beschreibungsebenen und wissenschaftlichen Feldern/Disziplinen.

Seite 212: Das Narrativ der Universalität chiraler Phänomene auf sämtliche Betrachtungsebenen der Natur.

Literatur

Adner, R. und Kapoor, R. (2010). Value creation in innovation ecosystems: How the structure of technological interdependence affects firm performance in new technology generations. *Strategic Management Journal*, (31):306–333.

Agranat, I. und Caner, H. (1999). Intellectual property and chirality of drugs. *Drug Discovery Today*, 4(7):313–321.

Agranat, I., Caner, H., und Caldwell, J. (2002). Putting chirality to work: the strategy of chiral switches. *Nature Reviews Drug Discovery*, 1(10):753–768.

Ahuja, S. (2011). Chirality of biomolecules and biotechnology products. In Ahuja, S. (Hg.), *Chiral separation methods for pharmaceutical and biotechnological products*, S. 441–466. Wiley-VCH, Hoboken.

Amabilino, D. B. (Hg.) (2009). *Chirality at the nanoscale: Nanoparticles, surfaces, materials and more*. Wiley-VCH, Weinheim.

Amann, A., Cederbaum, L. S., und Gans, W., (Hgs.) (1988). *Fractals, Quasicrystals, Chaos, Knots and Algebraic Quantum Mechanics*, Bd. 235 der *NATO ASI Serie C*, Springer, Dordrecht.

Anderson, P. W. (1972). More is different: Broken symmetry and the nature of the hierarchical structure of science. *Science*, 177(4):393–396.

Anonymus (2001). Chemienobelpreis 2001: Die händige Synthese. *Deutsche Apotheker Zeitung*, (44):70.

Ariëns, E. J. (1984). Stereochemistry, a basis for sophisticated nonsense in pharmacokinetics and clinical pharmacology. *European Journal of Clinical Pharmacology*, 26(6):663–668.

Atkins, P. W. (2015). Chemistry: A very short introduction. Oxford University Press, Oxford.

Atmanspacher, H. (2016a). Non-commutative structures from quantum physics to consciousness studies. In Atmanspacher, H. und Müller-Herold, U. (Hgs.), *From chemistry to consciousness*, S. 127–146. Springer, Cham.

Atmanspacher, H. (2016b). Relevance criteria for reproducibility: The contextual emergence of granularity. In Atmanspacher, H. und Maasen, S. (Hgs.), *Reproducibility*, S. 527–540. Wiley-VCH, Weinheim.

Atmanspacher, H., Bezzola Lambert, L., Folkers, G., und Schubiger, P. A. (2014). Relevance relations for the concept of reproducibility. *Journal of The Royal Society Interface*, 11(94):2013–1030.

Bailey, D. und Brown, D. (2001). High-throughput chemistry and structure-based design: survival of the smartest. *Drug Discovery Today*, 6(2):57–59.

Baird, D. (1993). Analytical chemistry and the 'big' scientific instrumentation revolution. *Annals of Science*, 50(3):267–290.

Baird, D., McIntyre, L., und Scerri, E. (Hgs.) (2006). *Philosophy of Chemistry: Synthesis of a New Discipline*. Springer, Dordrecht.

Balaban, A. und Klein, D. (2006). Is chemistry 'the central science'? How are different sciences related? Co-citations, reductionism, emergence, and posets. *Scientometrics*, 69(3):615–637.

Ball, P. (2003). Molecules: A Very Short Introduction. Oxford University Press, Oxford.

Barad, K. (1999). Agential realism: feminist interventions in understanding scientific practices (1998). In Biagioli, M. (Hg.), *The science studies reader*, S. 1–11. Routledge, New York.

Barad, K. (2007). *Meeting the universe halfway: Quantum physics and the entanglement of matter and meaning*. Duke University Press, Durham.

Barkan, D. K. (1992). A usable past: creating disciplinary space for physical chemistry. In Nye, M. J., Richards, J. L., und Stuewer, R. H. (Hgs.), *The invention of physical science*, S. 175–201. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.

Barr, D. A., Matsui, J., Wanat, S. F., und Gonzalez, M. E. (2010). Chemistry courses as the turning point for premedical students. *Advances in health sciences education: theory and practice*, 15(1):45–54.

Barron, L. D. (2009). An introduction to chirality at the nanoscale. In Amabilino, D. B. (Hg.), *Chirality at the nanoscale*, S. 1–27. Wiley-VCH, Weinheim.

Barry, A. (2015). Pharmaceutical matters: The invention of informed materials. In Drazin, A. und Küchler, S. (Hgs.), *The social life of materials*, S. 49–68. Bloomsbury Academic Publishing, London und New Delhi und New York.

Bayer AG (2019). Small and large molecules. URL: http://pharma.bayer.com/en/innovation-partnering/technologies-and-trends/small-and-large-molecules/, zuletzt abgerufen: 15.05.2020.

Beggs, E. J., Costa, J. F., und Tucker, J. V. (2012). Unifying science through computation: Reflections on computability and physics. In Pombo, O., Torres, J. M., Symons, J., und Rahman, S. (Hgs.), *Special sciences and the unity of science*, S. 53–80. Springer, Dordrecht.

Bell, J. S. (1992). Wider die „Messung". *Physikalische Blätter*, 48(4):267–273.

Beneke, S. und Ottomeyer, H. (2002). Die zweite Schöpfung: Bilder der industriellen Welt vom 18. Jahrhundert bis in die Gegenwart. Edition Minerva, Wolfratshausen.

Bensaude-Vincent, B. (1998). The autonomy of chemistry and the chemical revolution. In Janich, P. und Psarros, N. (Hgs.), *The autonomy of chemistry*, S. 109–118. Königshausen und Neumann, Würzburg.

Bensaude-Vincent, B. (2001). The construction of a discipline: Materials science in the united states. *Historical Studies in the Physical and Biological Sciences*, 31(2):223–248.

Bensaude-Vincent, B. (2007). Nanobots and nanotubes: Two alternative biomimetic paradigms of nanotechnology. In Riskin, J. (Hg.), *Genesis redux. Essays in the history and philosophy of artificial life.* University of Chicago Press, Chicago.

Bensaude-Vincent, B. (2008). The new identity of chemistry as biomimetic and nanoscience. In Bertomeu-Sánchez, J. R., Burns, D. T., und Van Tiggelen, B. (Hgs.), *Neighbours and Territories. The Evolving Identity of Chemistry: Proceedings of the 6th International Conference on the History of Chemistry. Leuven, Belgium, 28.08.-01.09.2007*, S. 53–64. Memosciences, Louvain-la-Neuve.

Bensaude-Vincent, B. (2009). Synthetic biology as a replica of synthetic chemistry? Uses and misuses of history. *Biological Theory*, 4(4):314–318.

Bensaude-Vincent, B. (2011). Das Konzept von Werkstoffen in historischer Perspektive. *NTM Zeitschrift für Geschichte der Wissenschaften, Technik und Medizin*, 19(1):107–123.

Bensaude-Vincent, B. (2016). Building multidisciplinary research fields: The cases of materials science, nanotechnology and synthetic biology. In Merz, M. und Sormani, P. (Hgs.), *The Local Configuration of New Research Fields*, S. 45–60. Springer, Cham.

Bensaude-Vincent, B. (2018). Chemists without borders. *Isis*, 109(3):597–607.

Bensaude-Vincent, B., Loeve, S., Nordmann, A., und Schwarz, A. (2017). Introduction: The genesis and ontology of technoscientific objects. In Bensaude-Vincent, B., Loeve, S., Nordmann, A., und Schwarz, A. (Hgs.), *Research objects in their technological setting*, S. 1–12. Routledge Taylor und Francis, London und New York.

Bensaude-Vincent, B. und Simon, J. (2012a). Atoms as fictions. In Bensaude-Vincent, B. und Simon, J. (Hgs.), *Chemistry: The impure science*, S. 185–200. Imperial College Press, London und Singapur.

Bensaude-Vincent, B. und Simon, J. (2012b). Atoms or elements. In Bensaude-Vincent, B. und Simon, J. (Hgs.), *Chemistry: The impure science*, S. 155–173. Imperial College Press, London und Singapur.

Bensaude-Vincent, B. und Simon, J. (2012c). Chemistry creates its object. In Bensaude-Vincent, B. und Simon, J. (Hgs.), *Chemistry: The impure science*, S. 101–116. Imperial College Press, London und Singapur.

Bensaude-Vincent, B. und Simon, J. (Hgs.) (2012d). *Chemistry: The impure science*. Imperial College Press, London und Singapur, 2. Auflage.

Bensaude-Vincent, B. und Simon, J. (2012e). Chemistry versus physics. In Bensaude-Vincent, B. und Simon, J. (Hgs.), *Chemistry: The impure science*, S. 133–154. Imperial College Press, London und Singapur.

Bensaude-Vincent, B. und Simon, J. (2012f). The space of the laboratory. In Bensaude-Vincent, B. und Simon, J. (Hgs.), *Chemistry: The impure science*, S. 55–80. Imperial College Press, London und Singapur.

Bensaude-Vincent, B. und Stengers, I. (1996). *A history of chemistry*. Harvard University Press, Cambridge.

Bertomeu-Sánchez, J. R., Burns, D. T., und van Tiggelen, B. (2008a). Introduction. In Bertomeu-Sánchez, J. R., Burns, D. T., und Van Tiggelen, B. (Hgs.), *Neighbours and Territories. The Evolving Identity of Chemistry: Proceedings of the 6th International Conference on the History of Chemistry. Leuven, Belgium, 28.08.-01.09.2007*, S. 12–18. Memosciences, Louvain-la-Neuve.

Bertomeu-Sánchez, J. R., Burns, D. T., und Van Tiggelen, B. (Hgs.) (2008b). *Neighbours and Territories. The Evolving Identity of Chemistry: Proceedings of the 6th International Conference on the History of Chemistry. Leuven, Belgium, 28.08.-01.09.2007*. Memosciences, Louvain-la-Neuve.

Bertozzi, C. R. (2015). The centrality of chemistry. *ACS central science*, 1(1):1–2.

Berzelius, J. J. (1806). *Föreläsningar i Djurkemien*. Stockholm.

Berzelius, J. J. (1831). Composition de l'acide tartrique et de l'acide racémique (Traubensäure). *Annales de chimie et de physique*, 46:113–147.

Bhushan, N. und Rosenfeld, S. M. (Hgs.) (2000). *Of minds and molecules: New philosophical perspectives on chemistry*. Oxford University Press, Oxford und New York.

Bieberbach, A. (2004). Chemie und Patentrecht. In Griesar, K. (Hg.), *Wenn der Geist die Materie küsst*, S. 235–267. Harri Deutsch, Frankfurt am Main.

Biller-Andorno, N. und Roduit, J. A. R. (2016). Medical humanities in Switzerland: Moving forward. *Schweizerische Ärztezeitung*, 97(42):1466–1467.

Binnig, G. und Rohrer, H. (1986). Scanning tunneling microscopy – from birth to adolescence: Nobel lecture, december 8, 1986. URL: https://www.nobelprize.org/uploads/2018/06/binnig-lecture.pdf, zuletzt abgerufen: 15.05.2020.

Birch, H. (2016). *50 Schlüsselideen Chemie*. Springer, Berlin und Heidelberg.

Birch, K. (2017). Rethinking value in the bio-economy: Finance, assetization, and the management of value. *Science, Technology & Human Values*, 42(3):460–490.

Bishop, R. C. und Atmanspacher, H. (2006). Contextual emergence in the description of properties. *Foundations of Physics*, 36(12):1753–1777.

Blackmond, D. G. (2010). The origin of biological homochirality. *Cold Spring Harbor Perspectives in Biology*, 2(5):1–17.

Blaschke, G., Kraft, H. P., Fickentscher, K., und Köhler, F. (1979). Chromatographische Racemattrennung von Thalidomid und teratogene Wirkung der Enantiomere. *Arzneimittelforschung*, 29(10):1640–1642.

Blaser, H.-U. (2010). Industrielle asymmetrische Hydrierung „made in switzerland". *Nachrichten aus der Chemie*, 58(9):864–867.

Bleck-Neuhaus, J. (2013). *Elementare Teilchen: Von den Atomen über das Standard-Modell bis zum Higgs-Boson*. Springer Spektrum, Berlin und Heidelberg.

Boeck, G. (2004). Chemie unverzichtbar. *Deutsches Ärzteblatt*, 101(44):2929.

Bohr, N. (1913). On the constitution of atoms and molecules: Part I. *Philosophical Magazine*, 26:1–25.

Böschen, S. (2004). Das doppelte Gesicht der Chemie: Fortschrittsgarantin und Risikoproduzentin. In Griesar, K. (Hg.), *Wenn der Geist die Materie küsst*, S. 179–195. Harri Deutsch, Frankfurt am Main.

Bourdieu, P. (1998). Vom Gebrauch der Wissenschaft: Für eine klinische Soziologie des wissenschaftlichen Feldes. UVK, Konstanz.

Boyer, M. (2011). Paul Ehrlichs Chemotherapie: Die Anfänge des Rational Drug Design. In Egloff, R., Gisler, P., und Rubin, B. (Hgs.), *Modell Mensch*, S. 181–197. Chronos, Zürich.

Brand, E. N. (1993). The chemical industries and their publics: How can history help? In Mauskopf, S. (Hg.), *Chemical Sciences in the Modern World*, S. 356–364. University of Pennsylvania Press, Philadelphia.

Brändas, E. J. und Kryachko, E. S. (2004). Fundamental world of quantum chemistry: A tribute to the memory of Per-Olov Löwdin. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.

Brenna, E., Fuganti, C., Gatti, F. G., und Serra, S. (2011). Biocatalytic methods for the synthesis of enantioenriched odor active compounds. *Chemical Reviews*, 111(7):4036–4072.

Breslow, R. (1997). Chemistry today and tomorrow: The central, useful, and creative science. American Chemical Society, Washington DC.

Briken, K. und Kurz, C. (2010). Die Ökonomie biowissenschaftlicher Wissensproduktion. In Liebsch, K. und Manz, U. (Hgs.), *Leben mit den Lebenswissenschaften*, S. 113–129. transcript, Bielefeld.

Brock, W. H. (1992). The Fontana history of chemistry. Fontana Press, London.

Brock, W. H. (1993). The Norton history of chemistry. W.W. Norton, New York.

Brock, W. H. (1999). Justus von Liebig: Eine Biographie des grossen Naturwissenschaftlers und Europäers. Springer, Wiesbaden.

Brock, W. H. (2000). The chemical tree: A history of chemistry. Norton, New York.

Brock, W. H. (2002). Justus von Liebig: The chemical gatekeeper. Cambridge University Press, Cambridge.

Brock, W. H. (2011). The case of the poisonous socks: Tales from chemistry. RSC Publishing, Cambridge.

Brock, W. H. (2013). Viewegs Geschichte der Chemie. Springer, Berlin und Heidelberg.

Brock, W. H. (2016). The history of chemistry: A very short introduction. Oxford University Press, Oxford.

Brunner, H. (1999). Rechts oder links: In der Natur und anderswo. Wiley-VCH, Weinheim.

Brunner, H. (2001). Die DNA-Doppelhelix – mal rechts, mal links? *Nachrichten aus der Chemie*, 49(6):760–762.

Brunner, H. (2004). Rechts oder links. In Müller, A. (Hg.), *Facetten einer Wissenschaft*, S. 163–180. Wiley-VCH, Weinheim.

Buchler, J. W. (2004). Chemistry seen as molecular architecture with a note on the german term „Stoff". In Sobczyńska, D., Zeidler, P., und Zielonacka-Lis, E. (Hgs.), *Chemistry in the philosophical melting pot: Extended versions of the lectures given at the IVth Summer Symposium in Philosophy of Chemistry and Biochemistry, Poznań 2000*, S. 73–97. Peter Lang, Frankfurt am Main.

Buchler, J. W. (2011). Der Begriff „Stoff" sichert die Identiät der Chemie: Posterpräsentation GDCh-Wissenschaftsforum Chemie, Bremen, 4.-7. September 2011.

Burhop, C., Kißener, M., Schäfer, H., und Scholtyseck, J. (2018). Merck: Von der Apotheke zum Weltkonzern. C.H. Beck, München.

Butler, D. (2008). Translational research: crossing the valley of death. *Nature*, 453(7197):840–842.

Bützer, P. (2009). Contergan, Thalidomid: Eine systemdynamische Analyse. URL: http://www.buetzer.info/fileadmin/pb/pdf-dateien/contergan.pdf, zuletzt abgerufen: 15.05.2020.

Cahn, R. S., Ingold, C. K., und Prelog, V. (1956). The specification of asymmetric configuration in organic chemistry. *Experientia*, 12(3):81–94.

Cahn, R. W. (2010). *The coming of materials science*. Pergamon, Amsterdam.

Callapez, M. E., Malaquias, I., Santos, R., und Rosa, H. (Hgs.) (2005). *Chemistry, Technology and Society. Book of Abstracts. Fifth International Conference on History of Chemistry, Estoril and Lisbon, September 6th to 10th, 2005*. URL: https://www.euchems.eu/wp-content/uploads/2015/06/Chemistry-Technology-and-Society.pdf, zuletzt abgerufen: 15.05.2020.

Callon, M. (1999). The role of lay people in the production and dissemination of scientific knowledge. *Science, Technology & Society*, 4(1):81–94.

Carreira, E. M. und Yamamoto, H. (2012). *Comprehensive Chirality*. Elsevier Science, Amsterdam.

Chai, S. und Shih, W. (2013). Fostering translational research: Using publicprivate partnerships to improve firm survival, employment growth, and innovative performance: Working paper 13-058: Harvard Business School. URL: http://ssrn.com/abstract=2197876, zuletzt abgerufen: 15.05.2020.

Chamizo, J. A. (2017). The fifth chemical revolution: 1973–1999. *Foundations of Chemistry*, 19(2):157–179.

Chamizo, J. A. (2019). About continuity and rupture in the history of chemistry: the fourth chemical revolution (1945–1966). *Foundations of Chemistry*, 21(1):11–29.

Charmaz, K. (2006). Constructing Grounded Theory: A Practical Guide Through Qualitative Analysis. Sage, London.

Choi, H. und Shields, B. (2015). A place for materials science: Laboratory buildings and interdisciplinary research at the university of pennsylvania. *Minerva*, 53(1):21–42.

Cintas, P. (2007). Tracing the origins and evolution of chirality and handedness in chemical language. *Angewandte Chemie International Edition*, 46(22):4016–4024.

Clarke, A. und Shim, J. K. (2011). Medicalization and biomedicalization revisited: Technoscience and transformations of health, illness and american medicine. In Pescosolido, B. A. (Hg.), *Handbook of the sociology of health, illness, and healing*, S. 173–199. Springer, New York.

Clarke, A. E. und Leigh Star, S. (2008). Chapter 5: The social worlds framework: A theory / methods package. In Hackett, E. J. (Hg.), *The handbook of science and technology studies*, S. 113–137. MIT Press, Cambridge.

Cobb, C. und Goldwhite, H. (1995). Creations of fire: Chemistry's lively history from alchemy to the atomic age. Perseus Books, New York.

Cohen, E. (1912). Jacobus Henricus van't Hoff: Sein Leben und Werken. Akademische Verlagsgesellschaft, Leipzig.

Cohen, L. H. (1998). Glass, paper, beans: Revelations on the nature and value of ordinary things. Random House, New York.

Coller, B. S. (2008). Translational research: Forging a new cultural identity. *Mount Sinai Journal of Medicine*, (75):478–487.

Collet, A., Crassous, J., Dutasta, J.-P., und Guy, L. (2006). Molécules chirales: Stéréochimie et propriétés. EDP Sciences, Les Ulis.

Colli, L. und Guarna, A. (2018). The dextrorotatory sweet asparagine of arnaldo piutti: the original product is conserved in florence. *Substantia*, 2(2):125–130.

Comte, A. (1974). Die Soziologie: Die positive Philosophie im Auszug: Herausgegeben von Friedrich Blaschke. Alfred Kröner Verlag, Stuttgart.

Conrad, P. (2007). The medicalization of society: On the transformation of human conditions into treatable disorders. Johns Hopkins University Press, Baltimore.

Cooper, M. (2012). Pharmakologie im Zeitalter des verteilten Experiments. In Lettow, S. (Hg.), *Bioökonomie*, S. 109–132. transcript, Bielefeld.

Cornish-Bowden, A. (2011). History of enzyme chemistry. *Engineering in Life Sciences*. URL: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/9780470015902.a0003466, zuletzt abgerufen: 15.05.2020.

Crutzen, P. J. (2002). Geology of mankind. *Nature*, (415):23.

Cushny, A. R. (1926). Biological relations of optically isomeric substances. The Williams and Wilkins Company, Baltimore.

Daemmrich, A. (2002). A tale of two experts: Thalidomide and political engagement in the United States and West Germany. *Social History of Medicine*, 15(1):137–158.

Dahm, R. (2008). Discovering DNA: Friedrich Miescher and the early years of nucleic acid research. *Human genetics*, 122(6):565–581.

De Camp, W. (1989). The FDA perspective on the development of stereoisomers. 1:2–6.

Diel, A. (2019). Deutschlands Pharmaindustrie 2018: Zwischen Exportstärke und Exportrisiken: IW-Kurzbericht 24/2019.

Dierichs, H. (1990). Contergan. In Hafner, G. M. und Jacoby, E. (Hgs.), *Die Skandale der Republik*, S. 62–68. Hoffmann u. Campe, Hamburg.

Dirac, P. A. M. (1929). Quantum mechanics of many-electron systems. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 123(792):714–733.

Dolino, L. G. O. (2018). Chemistry as a creative science. *Foundations of Chemistry*, 20(1):3–13.

Donohue, M. J. (2014). Stereochemistry, chirality and human health. URL: http://www.toxipedia.org/download/attachments/17044484/report, zuletzt abgerufen: 15.05.2020.

Dresselhaus, M. S. (1992). Materials science and cultural change. *New Literary History*, 23(4):839–844.

Drexler, E. K. (1986). Engines of Creation: The Coming Era of Nanotechnology. Anchor Books, New York.

Easson, L. H. und Stedman, E. (1933). Studies on the relationship between chemical constitution and physiological action: Molecular dissymmetry and physiological activity. *Biochemical Journal*, 27(4):1257–1266.

Eckart, W. U. (2017). Geschichte, Theorie und Ethik der Medizin. Springer, Berlin.

EFPIA (2018). The pharmaceutical industry in figures: Key-data 2018. URL: https://tinyurl.com/yd22zjse, zuletzt abgerufen: 15.05.2020.

Egloff, R., Gisler, P., und Rubin, B. (2011). Konturierungen des Menschlichen – Einleitung. In Egloff, R., Gisler, P., und Rubin, B. (Hgs.), *Modell Mensch*, S. 9–10. Chronos, Zürich.

Enns, M., Rester, D., und Seeberger, B. (2009). Studienüberblick zur Lebenssituation älter werdender Contergan-geschädigter Menschen. *Heilberufe*, 61(S2):35–40.

Erlemann, M. (2004). Inszenierte Erkenntnis: Zur Wissenschaftskultur der Physik im universitären Lehrkontext. In Arnold, M. und Fischer, R. (Hgs.), *Disziplinierungen*, S. 53–90. Turia + Kant, Wien.

Ernst, K.-H. (2012). Molecular chirality at surfaces. *Physica status solidi B*, 249(11): 2057–2088.

Ernst, R. (2016). Hans Primas and his early pathway. In Atmanspacher, H. und Müller-Herold, U. (Hgs.), *From chemistry to consciousness*, S. 1–14. Springer, Cham.

Etzkowitz, H. und Leydesdorff, L. (2000). The dynamics of innovation: from national systems and „Mode 2" to a triple helix of university – industry – government relations. *Research Policy*, (29):109–123.

Fabro, S. und Smith, S. L. (1966). The teratogenic activity of thalidomide in the rabbit. *Journal of Pathology and Bacteriology*, (91):511–519.

Fabro, S., Smith, S. L., und Schumacher H. (1965). Studies on the relationship between the chemical structure and embryotoxic activity of thalidomide and related compounds. *Embryopathic activity of drugs*, S. 194–209.

Fabro, S., Smith, S. L., und Williams, R. T. (1967). Toxicity and teratogenicity of optical isomers of thalidomide. *Nature*, (215):296.

FDA (1992). Development of new stereoisomeric drugs. URL: https://www.fda.gov/drugs/guidancecomplianceregulatoryinformation/guidances/ucm122883.htm, zuletzt abgerufen: 15.05.2020.

Feeney, J. (1992). Development of high resolution NMR spectroscopy as a structural tool. In Bud, R. und Cozzens, S. E. (Hgs.), *Invisible connections*, S. 199–216. SPIE Optical Engineering Press, Bellingham.

Fell, U. (2000). Disziplin, Profession und Nation: Die Ideologie der Chemie in Frankreich vom Zweiten Kaiserreich bis in die Zwischenkriegszeit. Leipziger Universitätsverlag, Leipzig.

Felt, U., Igelsböck, J., Schikowitz, A., und Völker, T. (2013). Growing into what? The (un-)disciplined socialisation of early stage researchers in transdisciplinary research. *Higher Education*, 65(4):511–524.

Fermi, E. (1934). Versuch einer Theorie der Beta-Strahlen. *Zeitschrift für Physik*, 88(3-4):161–177.

Feuerstein, G. (2011). Der Arzt als Gesundheitsingenieur? Wissenschaft, Technik und das Schicksal der Autonomie. In Dickel, S., Franzen, M., und Kehl, C. (Hgs.), *Herausforderung Biomedizin*, S. 285–300. transcript, Bielefeld.

Feynman, R. P. (1959). Plenty of room at the bottom: Vortrag am 29.12.1959. URL: http://www.its.caltech.edu/feynman/plenty.html, zuletzt abgerufen: 15.05.2020.

Feynman, R. P. (2013). QED: Die seltsame Theorie des Lichts und der Materie. Piper, München und Zürich, 17. Auflage.

Filk, C. (2010). Logistik des Wissens – integrale Wissensforschung und Wissenschaftskommunikation, Bd. 183/184 *Massenmedien und Kommunikation*. Universitätsverlag Siegen, Siegen.

Findlay, S. D. und Thagard, P. (2012). How parts make up wholes. *Frontiers in Physiology*, 3:1–10.

Fischer, D. und Breitenbach, J. (Hgs.) (2017). *Die Pharmaindustrie: Einblick – Durchblick – Perspektiven*. Springer Spektrum, Berlin, 4. Auflage.

Fischer, E. (1891). Ueber die Configuration des Traubenzuckers und seiner Isomeren. II. *Berichte der deutschen chemischen Gesellschaft*, 24(2).

Fischer, E. (1895). Ueber den Einfluss der Konfiguration auf die Wirkung der Enzyme III. *Berichte der deutschen chemischen Gesellschaft*, 28(2):1429–1438.

Fischer, E. P. (2004). Wie viel Naturwissenschaft braucht der gebildete Mensch? In Griesar, K. (Hg.), *Wenn der Geist die Materie küsst*, S. 23–36. Harri Deutsch, Frankfurt am Main.

Fischer, K. (2011). Interdisziplinarität im Spannungsfeld zwischen Forschung, Lehre und Anwendungsfeldern. In Fischer, K., Laitko, H., und Parthey, H. (Hgs.), *Interdisziplinarität und Institutionalisierung der Wissenschaft*, S. 37–58. Wissenschaftlicher Verlag Berlin, Berlin.

Flack, H. D. (2003). Chiral and achiral crystal structures. *Helvetica Chimica Acta*, 86(4):905–921.

Fleck, L. (2012). Entstehung und Entwicklung einer wissenschaftlichen Tatsache. Suhrkamp, Frankfurt am Main, 9. Auflage.

Fleck, L. (2014a). Schauen, Sehen, Wissen. In Werner, S. und Zittel, C. (Hgs.), *Denkstile und Tatsachen*, S. 390–418. Suhrkamp, Berlin.

Fleck, L. (2014b). Wie entstand die Bordet-Wassermann-Reaktion und wie entsteht eine wissenschaftliche Tatsache im Allgemeinen? In Werner, S. und Zittel, C. (Hgs.), *Denkstile und Tatsachen*, S. 181–210. Suhrkamp, Berlin.

Flügel, R. M. (2011). Chirality and life: A short introduction to the early phases of chemical evolution. Springer, Berlin und Heidelberg.

Folkers, G. (2011). Von der Umkehrung der Pyramide: Menschenbilder in Medizin und Pharmazie. In Egloff, R., Gisler, P., und Rubin, B. (Hgs.), *Modell Mensch*, S. 199–218. Chronos, Zürich.

Folkers, G. (2016). On re-positioning. In Abel, G. und Plümacher, M. (Hgs.), *The Power of Distributed Perspectives*, S. 189–213. De Gruyter, Berlin und Boston.

Forman, P. (1997). Recent science: Late modern and post-modern. In Söderquist, T. (Hg.), *The Historiography of Contemporary Science and Technology*, S. 179–213. Taylor and Francis, Hoboken.

Fortin, S., Lombardi, O., und Martínez González, J. C. (2018). Let us build better boats: An answer to Jeffrey Seeman's „Moving beyond insularity in the history, philosophy, and sociology of chemistry". *Foundations of Chemistry*, 7:288.

Francotte, E. (2006). Isolation and production of optically pure drugs by enantioselective chromatography. In Francotte, E. und Lindner, W. (Hgs.), *Chirality in drug research*, S. 155–187. Wiley-VCH, Weinheim.

Francotte, E. und Lindner, W. (Hgs.) (2006). *Chirality in drug research*. Wiley-VCH, Weinheim.

Freemantle, M. (2003). Chemistry at its most beautiful. Pasteur's separation of enantiomers tops list of the most memorable discoveries in chemistry. *Chemical and Engineering News*, 81(34):27–30.

Freitag, W. (2005). Contergan: Eine genealogische Studie des Zusammenhangs wissenschaftlicher Diskurse und biographischer Erfahrungen. Waxmann, Münster.

Frenkel, H. (1961). Contergan-Nebenwirkungen: Zentralnervöse Auffälligkeiten und polyneuritische Symptome bei Langzeitmedikation von n-Phthalylglutaminsäure-amid. *Die Medizinische Welt*, (18):970–975.

Frenking, G. (1998). Heretical thoughts of a theoretical chemist about the autonomy of chemistry as a science in the past and the present. In Janich, P. und Psarros, N. (Hgs.), *The autonomy of chemistry*, S. 103–108. Königshausen und Neumann, Würzburg.

Freund, I. (1904). The study of chemical composition: An account of its method and historical development, with illustrative quotations. Cambridge University Press, Cambridge.

Fulda, S. (2012). Medizin als Wissenschaft: Ärztemangel in der klinischen Forschung. *Forschung & Lehre*, (1):28–29.

Gal, J. (2006). Chiral drugs from a historical point of view. In Francotte, E. und Lindner, W. (Hgs.), *Chirality in drug research*, S. 3–26. Wiley-VCH, Weinheim.

Gal, J. (2007). Carl Friedrich Naumann and the introduction of enantio terminology: a review and analysis on the 150th anniversary. *Chirality*, 19(2):89–98.

Gal, J. (2013a). Molecular chirality in chemistry and biology: Historical milestones. *Helvetica Chimica Acta*, 96(9):1617–1657.

Gal, J. (2013b). Molecular chirality: Language, history, and significance. In Schurig, V. (Hg.), *Differentiation of enantiomers I // Differentiation of enantiomers*, S. 1–20. Springer, Berlin.

Gal, J. (2017). Pasteur and the art of chirality. *Nature Chemistry*, 9(7):604–605.

Gal, J. und Cintas, P. (2013). Early history of the recognition of molecular biochirality. In Cintas, P. und Amabilino, D. B. (Hgs.), *Biochirality, Origins, evolution and molecular recognition*, S. 1–40. Springer, Berlin.

Galison, P. (1996). Introduction: The context of disunity. In Galison, P. und Stump, D. J. (Hgs.), *The disunity of science*, S. 1–33. Stanford University Press, Stanford.

Gardner, M. (1982). Unsere gespiegelte Welt: Denksportaufgaben und Zaubertricks. Ullstein, Berlin.

Gardner, M. (1991). The ozma problem and the fall of partity. In Van Cleve, J. und Frederick, R. E. (Hgs.), *The philosophy of right and left*, S. 75–95. Kluwer, Dordrecht und Boston und London.

Garfield, S. (2001). Lila: Wie eine Farbe die Welt veränderte. Siedler, Berlin.

Gaudillière, J.-P. und Rheinberger, H.-J. (2004). Introduction. In Gaudillière, J.-P. und Rheinberger, H.-J. (Hgs.), *From molecular genetics to genomics*, S. 1–6. Routledge, London und New York.

Gautier, C. und Bürgi, T. (2009). Chiral nanoparticles. In Amabilino, D. B. (Hg.), *Chirality at the nanoscale*, S. 67–91. Wiley-VCH, Weinheim.

Gavroglou, K. und Simões, A. (2012). Neither physics nor chemistry: A history of quantum chemistry. MIT Press, Cambridge.

GDCh (2015). Präambel der AG Chemie und Gesellschaft in der Gesellschaft deutscher Chemiker e.V. URL: https://tinyurl.com/yadhs7lx, zuletzt abgerufen: 15.05.2020.

GDCh (2017). Chemiestudiengänge in Deutschland – statistische Daten 2016: Eine Umfrage der GDCh zu den Chemiestudiengängen an Universitäten und Fachhochschulen. URL: https://tinyurl.com/ydxq77vc, zuletzt abgerufen: 15.05.2020.

Gemballa, G. (1993). Der dreifache Skandal: 30 Jahre nach Contergan; eine Dokumentation. Luchterhand, Hamburg.

Germer, E., Bader, H. J., Boeck, G., und Schunk, A. (2002). Mediziner und Chemie – motiviert, aber wenig Vorwissen. *Nachrichten aus der Chemie*, 50(7-8):838–840.

Gieryn, T. F. (1983). Boundary-work and the demarcation of science from non-science: Strains and interests in professional ideologies of scientists. *American Sociological Review*, 48(6):781–795.

Girtler, R. (2001). *Methoden der Feldforschung*. Böhlau, Wien, 4. Auflage.

Gisler, P. (2011). Vom ganzen Körper zum molekularen Objekt: Das serologische Museum an der Rutgers University 1948-1974. In Egloff, R., Gisler, P., und Rubin, B. (Hgs.), *Modell Mensch*, S. 141–167. Chronos, Zürich.

Glazer, A. M. (2016). Crystallography: A very short introduction. Oxford University Press, Oxford.

Gribble, G. W. (2013). Food chemistry and chemophobia. *Food Security*, 5(2):177–187.

Griesar, K. (2004a). Die chemische Industrie im Wandel – Triebkräfte und Katalysatoren. In Griesar, K. (Hg.), *Wenn der Geist die Materie küsst*, S. 269–303. Harri Deutsch, Frankfurt am Main.

Griesar, K. (Hg.), (2004b). *Wenn der Geist die Materie küsst: Annäherungen an die Chemie*. Harri Deutsch, Frankfurt am Main.

Griesar, K. und Thomas, M. (2017). Integration von Lehrinhalten im Themenfeld „Chemie und Gesellschaft“ in die Chemie-Ausbildung. In Weitze, M.-D., Schummer, J., und Geelhaar, T. (Hgs.), *Zwischen Faszination und Verteufelung*, S. 139–143. Springer, Berlin und Heidelberg.

Grimshaw, J. M., Eccles Martin P., Lavis, J. N., Hill, S. J., und Squires, J. E. (2012). Knowledge translation of research findings. *Implementation Science*, 50(7):1–17.

Groh, L. (2004). Trial and error – die Sozialisation zum Chemiker. In Griesar, K. (Hg.), *Wenn der Geist die Materie küsst*, S. 211–234. Harri Deutsch, Frankfurt am Main.

Hacking, I. (1985). Styles of scientific reasoning. In Rajchman, J. (Hg.), *Postanalytic philosophy*, S. 145–165. Columbia University Press, New York.

Hacking, I. (1992). ‚Style‘ for historians and philosophers. *Studies in History and Philosophy of Science Part A*, 23(1):1–20.

Hahn, W. (1989). Symmetrie als Entwicklungsprinzip in Natur und Kunst. Langewiesche, Königstein.

Hampel, J. (2017). Ein notwendiges Übel? Chemie in der öffentlichen Wahrnehmung. In Weitze, M.-D., Schummer, J., und Geelhaar, T. (Hgs.), *Zwischen Faszination und Verteufelung*, S. 37–54. Springer, Berlin und Heidelberg.

Haraway, D. (1988). Situated knowledges: The science question in feminism and the privilege of partial perspective. *Feminist Studies*, 14(3):575–599.

Hargittai, I. und Hargittai, M. (1996). Symmetry: A unifying concept. Random House, New York.

Hargittai, M. und Hargittai, I. (2009). Symmetry through the Eyes of a Chemist. Springer, Dordrecht, 3. Auflage.

Harré, R. (2012). Laws in chemistry. In Woody, A., Hendry, R. F., und Needham, P. (Hg.), *Philosophy of Chemistry*, S. 339–354. Elsevier, Amsterdam und Boston.

Heilbronner, E. und Dunitz, J. D. (1993). Reflections on symmetry: In chemistry – and elsewhere. Helvetica Chimica Acta, Basel und Weinheim und New York.

Heintz, B. (2004). Emergenz und Reduktion. *Kölner Zeitschrift für Soziologie und Sozialpsychologie*, 56(1):1–31.

Helbig, H. (2018). Welträtsel aus Sicht der modernen Wissenschaften: Emergenz in Natur, Gesellschaft, Psychologie, Technik und Religion. Springer, Berlin.

Hellwich, K.-H. (2002). Stereochemie – Grundbegriffe. Springer, Berlin und Heidelberg.

Helm, F. (1966). Tierexperimentelle Untersuchungen und Dysmeliesyndrom. *Arzneimittelforschung*, 16:1232–1244.

Hendry, R. F. (2012). Reduction, emergence and physicalism. In Woody, A., Hendry, R. F., und Needham, P. (Hg.), *Philosophy of Chemistry*, S. 367–386. Elsevier, Amsterdam und Boston.

Hendry, R. F., Needham, P., und Woody, A. I. (2012). Introduction. In Woody, A.,

Hendry, R. F., und Needham, P. (Hgs.), *Philosophy of Chemistry*, S. 3–18. Elsevier, Amsterdam und Boston.

Henkel, A. (2010). Soziologie des Pharmazeutischen. Theoretische Erschließung, genealogische Untersuchung, exemplarische Anwendung. *Zeitschrift für Soziologie*, 41(2):126–141.

Henkel, A. (2011). Soziologie des Pharmazeutischen. Nomos, Baden-Baden.

Hentschel, K. (2011). Von der Werkstoffforschung zur Materials Science. *NTM Zeitschrift für Geschichte der Wissenschaften, Technik und Medizin*, 19(1):5–40.

Hentschel, K. und Reinhardt, C. (2011). Zur Geschichte der Materialforschung. *NTM Zeitschrift für Geschichte der Wissenschaften, Technik und Medizin*, 19(1):1–3.

Hirota, N. (2016). A history of modern chemistry. Kyoto University Press und Trans Pacific Press, Kyoto und Melbourne.

Hoffmann, R. (2007). What might philosophy of science look like if chemists built it? *Synthese*, 155(3):321–336.

Hofmann, K. und Budde, F. (2006). Todays's chemical industry: which way is up? In Budde, F., Felcht, U.-H., und Frankemölle, H. (Hgs.), *Value Creation*, S. 1–10. Wiley-VCH, Weinheim.

Homburg, E. (2018). Chemistry and industry: A tale of two moving targets. *Isis*, 109(3):565–576.

Homburg, E. und Travis, A. S. (1998). Introduction. In Homburg, E., Travis, A. S., und Schröter, H. G., (Hgs.), *The Chemical Industry in Europe, 1850–1914*, S. 1–6. Kluwer, Dordrecht.

Homburg, E., Travis, A. S., und Schröter, H. G. (Hgs.), (1998). *The Chemical Industry in Europe, 1850–1914: Industrial growth, pollution, and professionalization*. Kluwer, Dordrecht.

Hossenfelder, S. (2018). Das hässliche Universum: Warum unsere Suche nach Schönheit die Physik in die Sackgasse führt. Fischer, Frankfurt am Main.

Hottois, G. (2013). Some remarks on the origin, scope and evolution of the notion of „technoscience". In Llored, J.-P. (Hg.), *The philosophy of chemistry*, S. 320–329. Cambridge Scholars, Newcastle upon Tyne.

Humphreys, P. (2016). Introduction: New directions in philosophy of science. In Humphreys, P. (Hg.), *The Oxford handbook of philosophy of science*, S. 1–12. Oxford University Press, New York.

IFPMA (2017). The pharmaceutical industry and global health: Facts and figures 2017. URL: https://www.ifpma.org/wp-content/uploads/2017/02/ifpmafacts-and-figures-2017.pdf, zuletzt abgerufen: 15.05.2020.

Interpharma (2019). Pharmamarkt Schweiz. URL: https://www.interpharma.ch/fakten-statistiken/1946-pharma-markt-schweiz, zuletzt abgerufen: 15.05.2020.

Ioannidis, J. P. (2006). Evolution and translation of research findings: From bench to where? *PLoS clinical trials*, 1(7):1–5.

Janich, P. (1998). Die Selbständigkeit der Chemie im Verhältnis zu ihren Nachbarwissenschaften: Ziele und Ergebnisse des 3. Erlenmeyer-Kolloquiums für Philosophie der Chemie. In Janich, P. und Psarros, N. (Hgs.), *The autonomy of chemistry*, S. 1–30. Königshausen und Neumann, Würzburg.

Janich, P. (2004). Was ist und wozu treibt man Chemie? Versuch einer philosophischen Antwort. In Griesar, K. (Hg.), *Wenn der Geist die Materie küsst*, S. 49–65. Harri Deutsch, Frankfurt am Main.

Janich, P. (2015). Handwerk und Mundwerk. C.H. Beck, München.

Janich, P. und Psarros, N. (Hgs.) (1994). *Philosophische Perspektiven der Chemie: 1. Erlenmeyer-Kolloquium der Philosophie der Chemie*. BI Wissenschaftsverlag, Mannheim.

Janich, P. und Psarros, N. (Hgs.) (1996). *Die Sprache der Chemie: 2. Erlenmeyer-Kolloquium der Philosophie der Chemie*. Königshausen & Neumann, Würzburg.

Janich, P. und Psarros, N. (Hgs.) (1998). *The autonomy of chemistry: 3rd Erlenmeyer Colloquy for the Philosophy of Chemistry*. Königshausen und Neumann, Würzburg.

Janich, P. und Rüchardt, C. (Hgs.) (1996). *Natürlich, technisch, chemisch: Verhältnisse zur Natur am Beispiel der Chemie*. De Gruyter, Berlin und New York.

Janoschek, R. (Hg.), (1991). *Chirality: From Weak Bosons to the Alpha-Helix*. Springer, Berlin und Heidelberg.

Jasanoff, S. und Kim, S.-H. (Hgs.), (2015). *Dreamscapes of modernity: Sociotechnical imaginaries and the fabrication of power*. The University of Chicago Press, Chicago und London.

Jungmayr, P. (2012). Die Contergan-Tragödie. *Deutsche Apotheker Zeitung*, (49).

Jutzi, S. (2014). Nur für Linkshänder: Das Buch. Fischer, Frankfurt am Main.

Kant, I. (1920). Von dem ersten Grunde des Unterschiedes der Gegenden im Raume: Anlässlich der 7. Mitglieder-Versammlung der Maximilian-Gesellschaft, die am 9. Oktober 1920 in Frankfurt am Main tagte, in der Officina Serpentis gedruckt. Ursprüngliches Erscheinungsjahr 1768. Tieffenbach, Steglitz.

Kay, L. E. (2001). Wer schrieb das Buch des Lebens? Information und Transformation der Molekularbiologie. In Hagner, M. (Hg.), *Ansichten der Wissenschaftsgeschichte*, S. 489–523. Fischer, Frankfurt am Main.

Kessel, N. (2013). Doriden von Ciba: sleeping pills, pharmaceutical marketing, and thalidomide, 1955–1963. *History and Technology*, 29(2):153–168.

Khoury, M. J., Gwinn, M., Yoon, P. W., Dowling, N., Moore, C. A., und Bradley, L. (2007). The continuum of translation research in genomic medicine: how can we accelerate the appropriate integration of human genome discoveries into health care and disease prevention? *Genetics in Medicine*, 9(7):665–674.

Kim, J. H. und Scialli, A. R. (2011). Thalidomide: The tragedy of birth defects and the effective treatment of disease. *Toxicological Sciences*, 122(1).

Kirk, B. (1999). Der Contergan-Fall: Eine unvermeidbare Arzneimittelkatastrophe? Zur Geschichte des Arzneistoffs Thalidomid. Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft, Stuttgart.

Klein, C. und Reinhardt, C. (2014). Objetcs of chemical inquiry. In Klein, U. und Reinhardt, C. (Hgs.), *Objects of chemical inquiry*, S. VII–XVII. Watson Publishing International, Sagamore Beach.

Klein, U. (2005). Technoscience avant la lettre. *Perspectives on Science*, 13(2):226–266.

Klein, U. (2016). Nützliches Wissen: Die Erfindung der Technikwissenschaften. Wallstein Verlag, Göttingen.

Knight, D. (Hg.), (1998). *The making of the chemist: The social history of chemistry in Europe, 1789-1914*. Cambridge University Press, Cambridge.

Knightley, P., Evans, H., Potter, E., und Wallace, M. (1979). Suffer the children: The story of Thalidomide. Andre Deutsch, London.

Knoche, B. und Blaschke, G. (1994). Stereoselectivity of the in vitro metabolism of thalidomide. *Chirality*, 6:221–224.

Knorr-Cetina, K. (2002). Wissenskulturen: Ein Vergleich naturwissenschaftlicher Wissensformen. Suhrkamp, Frankfurt am Main.

Koch, W. (2017). Ethische Grundsätze als Leitlinien der Gesellschaft deutscher Chemiker. In Weitze, M.-D., Schummer, J., und Geelhaar, T. (Hgs.), *Zwischen Faszination und Verteufelung*, S. 121–129. Springer, Berlin und Heidelberg.

Kollek, R. (2012). Individualisierung der Medizin: Medizintheoretische und gesellschaftliche Implikationen eines mehrdeutigen Leitbilds. *Zeitschrift für Evidenz, Fortbildung und Qualität im Gesundheitswesen*, (106):40–45.

Kondepudi, D. und Asakura, K. (2006). Chiral asymmetry in nature. In Busch, K. W. und Busch, M. A. (Hgs.), *Chiral analysis*, S. 25–45. Elsevier, Amsterdam und Boston.

Kopp, H. (1843). Geschichte der Chemie. Friedrich Vieweg und Sohn, Braunschweig.

Koppman, S., Cain, C. L., und Leahey, E. (2015). The joy of science: Disciplinary diversity in emotional accounts. *Science, Technology, & Human Values*, 40(1):30–70.

Kragh, H. (2001). From geochemistry to cosmochemistry: the origin of a scientific discipline, 1915-1955. In Reinhardt, C. (Hg.), *Chemical sciences in the 20th century*, S. 160–190. Wiley-VCH, Weinheim und New York.

Krastel, F., Petersen, F., Roggo, S., Schmitt, E., und Schuffenhauser, A. (2006). Aspects of chirality in natural products drug discovery. In Francotte, E. und Lindner, W. (Hgs.), *Chirality in drug research*, Methods and principles in medicinal chemistry, S. 67–94. Wiley-VCH, Weinheim.

Kreuzer, H., (Hg.) (1987). *Die zwei Kulturen: Literarische und naturwissenschaftliche Intelligenz; C. P. Snows These in der Diskussion*. dtv, München.

Kruse, J. (2015). Qualitative Interviewforschung: Ein integrativer Ansatz. Beltz Juventa, Weinheim und Basel, 2. Auflage.

Küchler, S. (2015). Materials: The story of use. In Drazin, A. und Küchler, S. (Hgs.), *The social life of materials*, S. 267–282. Bloomsbury Academic, London und New Delhi und New York.

Kuhn, T. S. (2014). Die Struktur wissenschaftlicher Revolutionen. Suhrkamp, Frankfurt am Main, 2. Auflage.

Kunz, W., Keller, H., und Mückter, H. (1956). N-Phthalyl-Glutaminsäure-imid: Experimentelle Untersuchungen an einem neuen synthetischen Produkt mit sedativen Eigenschaften. *British Medical Journal*, 6(8):426–430.

Kurath, M. und Kaiser, M. (2010). Fragile Disziplinen: Identitäts-Diskurse und Transformationsprozesse in den Nanowissenschaften und Nanotechnologien. In Lucht, P. (Hg.), *Technologisierung gesellschaftlicher Zukünfte*, S. 93–108. Centaurus, Freiburg.

Labarca, M. und Lombardi, O. (2008). The end of the dream of unity. *Current Science*, 94(4):438–439.

Landecker, H. (2007). Culturing life: How cells became technologies. Harvard University Press, Cambridge.

Lang, S. (2014). Zugewinne für die Translational Medicine durch Theorie und Praxis Ludwik Flecks (11.07.1896–05.06.1961). Masterarbeit, Universität Freiburg, Freiburg.

Laszlo, P. (2007). On the self-image of chemists, 1950–2000. In Schummer, J., Bensaude-Vincent, B., und Van Tiggelen, B. (Hgs.), *The public image of chemistry*, S. 329–367. World Scientific, Singapur und Hackensack.

Latal, H. (1991). Parity violation in atomic physics. In Janoschek, R. (Hg.), *Chirality*, S. 1–17. Springer, Berlin und Heidelberg.

Latour, B. (1990). The force and the reason of experiment. In Le Grand, H. E. (Hg.), *Experimental Inquiries*, S. 49–80. Kluwer, Dordrecht.

Latour, B. (1993). The pasteurization of France. Harvard University Press, Cambridge.

Law, J. (2017). STS as method. In Felt, U., Fouché, R., Miller, C. A., und Smith-Doerr, L. (Hgs.), *The handbook of science and technology studies*, S. 31–57. The MIT Press, Cambridge und London.

Le Bel, J. A. (1874). Sur des relations qui existent entre les formules atomiques des corps organiques et le pouvoir rotatoire de leurs dissolutions. *Bulletin de la Société Chimique de Paris*, (22):337–347.

Le Poidevin, R. (2000). Space and the chiral molecule. In Bhushan, N. und Rosenfeld, S. M. (Hgs.), *Of minds and molecules*, S. 129–142. Oxford University Press, Oxford und New York.

Lee, T.-D. und Yang, C.-N. (1956a). Charge conjugation, a new quantum number *G*, and selection rules concerning a nucleon-antinucleon system. *Il nuovo cimento*, 3(4):749–753.

Lee, T.-D. und Yang, C.-N. (1956b). Question of parity conservation in weak interactions. *Physical Review*, 104(1):254–258.

Leffingwell, J. C. (2003). Chirality & bioactivity I.: Pharmacology. URL: http://www.leffingwell.com/download/chirality-phamacology.pdf, zuletzt abgerufen: 15.05.2020.

Leigh Star, S. (2004). Kooperation ohne Konsens in der Forschung: Die Dynamik der Schließung in offenen Systemen. In Strübing, J., Schulz-Schaeffer, I., Meister, M., und Gläser, J. (Hgs.), *Kooperation im Niemandsland*, S. 58–76. Leske + Budrich, Opladen.

Leigh Star, S. (2010). This is not a boundary object: Reflections on the origin of a concept. *Science, Technology, & Human Values*, 35(5):601–617.

Leigh Star, S. und Griesemer, J. R. (1989). Institutional ecology, ‚translations' and boundary objects: Amateurs and professionals in berkeley's museum of vertebrate zoology, 1907-39. *Social Studies of Science*, 19(3):387–420.

Leker, J. und Rühmer, S. (2004). Chemie und Betriebswirtschaftslehre. In Griesar, K. (Hg.), *Wenn der Geist die Materie küsst*, S. 251–267. Harri Deutsch, Frankfurt am Main.

Lenhard-Schramm, N. (2018). Von der „Apotheke der Welt“ zum Arzneistoffimporteur. *Deutsche Apotheker Zeitung*, 44.

Lenhard-Schramm, N. und Großbölting, T. (2017). Contergan. Arzneimittelskandal und permanentes Politikum. In Großbölting, T. und Lenhard-Schramm, N. (Hgs.), *Contergan*, S. 7–22. Vandenhoeck & Ruprecht, Göttingen und Bristol.

Lenz, W. (1988). A short history of thalidomide ebryopathy. *Teratology*, 38:203–215.

Leslie, E. (2005). *Synthetic Worlds: Nature, Art and the Chemical Industry*. Reaktion Books, London.

Lettow, S. (2012). Einleitung. In Lettow, S. (Hg.), *Bioökonomie*, S. 1–17. transcript, Bielefeld.

Levere, T. H. (2001a). Atoms in space. In Levere, T. H. (Hg.), *Transforming matter*, S. 136–151. Johns Hopkins University Press, Baltimore.

Levere, T. H. (Hg.) (2001b). *Transforming matter: A history of chemistry from alchemy to the buckyball*. Johns Hopkins University Press, Baltimore.

Lichtenthaler, F. W. (1992). Emil Fischer's proof of the configuration of sugars: A centennial tribute. *Angewandte Chemie International Edition*, 31(12):1541–1556.

Lichtenthaler, F. W. (1995). 100 years „Schlüssel-Schloss-Prinzip“: What made Emil Fischer use this analogy? *Angewandte Chemie International Edition*, 33(2324):2364–2374.

Liebig, J. (1831). Ueber einen neuen Apparat zur Analyse organischer Körper, und über die Zusammensetzung einiger organischen Substanzen. *Annalen der Physik*, 97(1):1–43.

Llored, J.-P. (Hg.) (2013). *The philosophy of chemistry: Practices, methodologies, and concepts*. Cambridge Scholars, Newcastle upon Tyne.

Loeve, S. und Bensaude-Vincent, B. (2017). The multiple signatures of carbon. In Bensaude-Vincent, B., Loeve, S., Nordmann, A., und Schwarz, A. (Hgs.), *Research objects in their technological setting*, S. 185–200. Routledge Taylor and Francis, London und New York.

Logar, N. (2011). Chemistry, green chemistry, and the instrumental valuation of sustainability. *Minerva*, 49(1):113–136.

Lough, W. J. und Wainer, I. W. (2002). Chirality in natural and applied science. CRC Press und Blackwell Publishers, Osney Mead, Oxford und Boca Raton.

Löwy, I. (2011). Historiography of biomedicine: „bio“, „medicine“, and in between. *Isis*, 102(1):116–122.

Ludwig, W.-D. und Schildmann, J. (2015). Kostenexplosion in der medikamentösen Therapie onkologischer Erkrankungen. *Der Onkologe*, 21(8):708–716.

Luhmann, H.-J. (2001). Produktrisiken: Aus Katastrophen lernen. der Modellcharakter des Lehrstücks „Contergan“. In Luhmann, H.-J. (Hg.), *Die Blindheit der Gesellschaft*, S. 43–85. Gerling-Akademie-Verlag, München.

Luisi, P. L. (2002). Emergence in chemistry: Chemistry as the embodiment of emergence. *Foundations of Chemistry*, 4:183–200.

Luisi, P. L. (2016). The emergence of life: From chemical origins to synthetic biology. Cambridge University Press, Cambridge, 2. Auflage.

Lundgren, A. und Bensaude-Vincent, B. (Hgs.) (2000). *Communicating chemistry: Textbooks and their audiences, 1789–1939*. Science History Publications, Canton.

Lüönd, K. (2008). Rohstoff Wissen: Geschichte und Gegenwart der Schweizer Pharmaindustrie im Zeitraffer. Verlag Neue Zürcher Zeitung, Zürich und Basel.

Lüönd, K. (2011). Erfolg als Auftrag: Ems-Chemie: die Geschichte eines unmöglichen Unternehmens. Stämpfli, Bern.

Maasen, S. und Weingart, P. (2008). Unternehmerische Universität und neue Wissenschaftskultur. In Matthies, H. und Simon, D. (Hgs.), *Wissenschaft unter Beobachtung*, S. 141–160. VS Verlag für Sozialwissenschaften, Wiesbaden.

Mainzer, K. (1996). Symmetries of nature: A handbook for philosophy of nature and science. De Gruyter, Berlin und New York.

Mainzer, K. (1998). Computational and mathematical models in chemistry: Epistemic foundations and new perspectives in research. In Janich, P. und Psarros, N. (Hgs.), *The autonomy of chemistry*. Königshausen und Neumann, Würzburg.

Manafu, A. (2013). Concepts of emergence in chemistry. In Llored, J.-P. (Hg.), *The philosophy of chemistry*, S. 659–674. Cambridge Scholars, Newcastle upon Tyne.

Mangelings, D. und Van der Heyden, Y. (2011). Chiral separation by capillary electrophoresis. In Ahuja, S. (Hg.), *Chiral separation methods for pharmaceutical and biotechnological products*, S. 331–381. Wiley, Hoboken.

Marcovich, A. und Shinn, T. (2011). The cognitive, instrumental and institutional origins of nanoscale research: The place of biology. In Carrier, M. und Nordmann, A. (Hgs.), *Science in the Context of Application*, S. 221–242. Springer Netherlands, Dordrecht.

Margaretha, P. (2002). Chemie für Mediziner. Springer, Berlin und Heidelberg.

Markl, H. (1992). Die Natürlichkeit der Chemie. In Mittelstraß, J. und Stock, G. (Hgs.), *Chemie und Geisteswissenschaften*, S. 139–157. Akademische Verlagsgesellschaft, Berlin.

Martić-Kehl, M. I. und Schibli, R. (2012). Can animal data predict human outcome? problems and pitfalls of translational animal research. *European Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging*, 39(9):1492–1496.

Mata, H. J. und Davis, S. (2012). Translational health research: Perspectives from health education specialists. *Clinical and Translational Medicine*, 27(1):1–6.

Matsuura, T. und Koshima, H. (2005). Introduction to chiral crystallization of achiral organic compoundsspontaneous generation of chirality. *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*, 6(1):7–24.

Mauskopf, S. (Hg.) (1993). *Chemical Sciences in the Modern World*. University of Pennsylvania Press, Philadelphia.

Mauskopf, S. (2006). A history of chirality. In Busch, K. W. und Busch, M. A. (Hgs.), *Chiral analysis*, S. 3–24. Elsevier, Amsterdam und Boston.

McBride, W. G. (1961). Thalidomide and congenital abnormalities. *The Lancet*, S. 1358.

McEvoy, J. G. (2016). The historiography of the chemical revolution: Patterns of interpretation in the history of science. Routledge, London und New York.

McManus, C., Nicholls, M., und Vallortigara, G. (Hgs.) (2010). *The right hand and the left hand of history*. Taylor and Francis, Hove.

McManus, I. C. (2002). Right hand, left hand: The origins of asymmetry in brains, bodies, atoms, and cultures. Harvard University Press, Cambridge.

Meierhenrich, U. (2011). Der Ursprung der Homochiralität liegt möglicherweise im All. *Nachrichten aus der Chemie*, 59(7-8):710–713.

Meierhofer, C., Dunzendorfer, S., und Wiedermann, C. J. (2001). Theoretical basis for the activity of thalidomide. *BioDrugs: clinical immunotherapeutics, biopharmaceuticals and gene therapy*, 15(10):681–703.

Meinel, C. (2004). Molecules and croquet balls. In De Chadarevian, S. (Hg.), *Models, The third dimension of science*, S. 242–275. Stanford University Press, Stanford.

Meinel, C. (2017). Die Rolle der Chemiegeschichte in der Wissenschaftskommunikation. In Weitze, M.-D., Schummer, J., und Geelhaar, T. (Hgs.), *Zwischen Faszination und Verteufelung*, S. 85–102. Springer, Berlin und Heidelberg.

Merten, M. (2008). Pharmazeutische Industrie: „Apotheke der Welt" in Gefahr. *Deutsches Ärzteblatt*, 105(33):1714.

Merz, M. und Schumacher, C. (2004a). Innenwelten. disziplinäre Kultur und epistemische Praktiken. In Heintz, B., Merz, M., und Schumacher, C. (Hgs.), *Wissenschaft, die Grenzen schafft*, S. 107–194. transcript, Bielefeld.

Merz, M. und Schumacher, C. (2004b). Ortsbegehung. Fallstudien und erste Erkundungen. In Heintz, B., Merz, M., und Schumacher, C. (Hgs.), *Wissenschaft, die Grenzen schafft*, S. 77–105. transcript, Bielefeld.

Michael, M. (2011). Der Mensch als Assemblage: Dinge, Objekte und „Disziplinen". In Egloff, R., Gisler, P., und Rubin, B. (Hgs.), *Modell Mensch*, S. 57–70. Chronos, Zürich.

Mikhailov, O. V. (2018). Nomenclature and terminology problems of modern coordination chemistry. *Russian Journal of General Chemistry*, 88(6):1337–1348.

Mittelstraß, J. (1992). Chemie und Geisteswissenschaften. Eine Einleitung. In Mittelstraß, J. und Stock, G. (Hgs.), *Chemie und Geisteswissenschaften*, S. 9–13. Akademische Verlagsgesellschaft, Berlin.

Mittelstraß, J. (1998). Die Häuser des Wissens: Wissenschaftstheoretische Studien. Suhrkamp, Frankfurt am Main.

Mittelstraß, J. und Stock, G. (Hgs.) (1992). *Chemie und Geisteswissenschaften: Versuch einer Annäherung*. Akademische Verlagsgesellschaft, Berlin.

Mittra, J. (2016a). Crisis in the pharmaceutical industry and the promise of new biology. In Mittra, J. (Hg.), *The New Health Bioeconomy*, S. 27–56. Palgrave Macmillan, New York.

Mittra, J. (2016b). New biology and the foundations of a health bioeconomy. In Mittra, J. (Hg.), *The New Health Bioeconomy*, S. 1–26. Palgrave Macmillan, New York.

Mittra, J. (2016c). Organizational transformations and the value of interdisciplinarity. In Mittra, J. (Hg.), *The New Health Bioeconomy*, S. 87–119. Palgrave Macmillan, New York.

Mittra, J. (2016d). Regulation, policy, and governance of advanced therapies. In Mittra, J. (Hg.), *The New Health Bioeconomy*, S. 121–156. Palgrave Macmillan, New York.

Mody, C. C. M. (2001). A little dirt never hurt anyone: Knowledge-making and contamination in materials science. *Social Studies of Science*, 31(1):7–36.

Mody, C. C. M. und Choi, H. (2013). From materials science to nanotechnology: Interdisciplinary center programs at cornell university, 1960–2000. *Historical Studies in the Natural Sciences*, 43(2):121–161.

Mody, C. C. M. und Lynch, M. (2010). Test objects and other epistemic things: a history of a nanoscale objects. *The British Journal for the History of Science*, 43(3):423–458.

Mol, A. (2003). The body multiple: ontology in medical practice. Duke University Press, Durham.

Moore, G. E. (1965). Cramming more components onto integrated circuits. *Electronics*, 38(8):114–117.

Morange, M. (2012). Explanatory relationships between chemical and biological sciences. In Woody, A., Hendry, R. F., und Needham, P. (Hgs.), *Philosophy of Chemistry*, S. 509–518. Elsevier, Amsterdam und Boston.

Morris, D. G. (2001a). Chiral molecules: One stereogenic centre. In Morris, D. G. (Hg.), *Stereochemistry*, Bd. 1, S. 19–36. Royal Society of Chemistry, Cambridge.

Morris, P. J. T. (1992). Present and future applications of NMR to medicine and materials science. In Bud, R. und Cozzens, S. E. (Hgs.), *Invisible connections*, S. 217–233. SPIE Optical Engineering Press, Bellingham.

Morris, P. J. T. (2001b). Between the living state and the solid state: Chemistry in a changing world. In Reinhardt, C. (Hg.), *Chemical sciences in the 20th century*, S. 193–200. Wiley-VCH, Weinheim und New York.

Morris, P. J. T. (Hg.), (2002). *From classical to modern chemistry: The instrumental revolution*. Royal Society of Chemistry, Cambridge.

Morris, P. J. T. (2008). Chemistry in the 21st century: Death or transformation? In Bertomeu-Sánchez, J. R., Burns, D. T., und Van Tiggelen, B. (Hgs.), *Neighbours and Territories. The Evolving Identity of Chemistry: Proceedings of the 6th International Conference on the History of Chemistry. Leuven, Belgium, 28.08.-01.09.2007*, S. 328–334. Memosciences, Louvain-la-Neuve.

Morris, P. J. T. (2015). The matter factory: A history of the chemistry laboratory. Reaktion Books, London.

Morris, P. J. T., Travis, A. S., und Reinhardt, C. (2001). Research fields and boundaries in twentieth – century organic chemistry. In Reinhardt, C. (Hg.), *Chemical sciences in the 20th century*, S. 14–42. Wiley-VCH, Weinheim und New York.

Morrison, J. D. und Mosher, H. S. (1971). Asymmetric organic reactions. Prentice-Hall, Englewood Cliffs.

Moynihan, R. und Henry, D. (2006). The fight against disease mongering: Generating knowledge for action. *PLoS medicine*, 3(4):191.

Müller-Herold, U. (2016). Theoretical chemistry and more: Personal annotations to hans primas and his work. In Atmanspacher, H. und Müller-Herold, U. (Hgs.), *From chemistry to consciousness*, S. 23–43. Springer, Cham.

Münch, R. und Baier, C. (2012). Institutional struggles for recognition in the academic field: The case of university departments in german chemistry. *Minerva*, 50(1):97–126.

Naumann, C. F. (1856). Elemente der theoretischen Krystallographie. Wilhelm Engelmann, Leipzig.

Nesper, R. (2001). Die chemische Symbolik. In Heintz, B., Huber, J., und Benz, A. (Hgs.), *Mit dem Auge denken*, S. 173–186. Edition Voldemeer, Zürich.

Neuhaus, G. und Ibe, K. (1960). Clinical observations on a suicide attempt with 144 tablets of contergan forte (n-phthalylglutamimide). *Medizinische Klinik*, 55:544–545.

Nguyen-Kim, M. T. (2019). Komisch, alles chemisch! Handys, Kaffee, Emotionen – wie man mit Chemie wirklich alles erklären kann. Droemer, München.

Nightingale, P. und Martin, P. (2004). The myth of the biotech revolution. *Trends in Biotechnology*, 22(11):564–569.

Noorduin, W. L., Vlieg, E., Kellogg, R. M., und Kaptein, B. (2009). From Ostwald ripening to single chirality. *Angewandte Chemie International Edition*, 48(51):9600–9606.

Nye, M. J. (1992). Physics and chemistry: Commensurable or incommensurable sciences? In Nye, M. J., Richards, J. L., und Stuewer, R. H. (Hgs.), *The invention of physical science*, Boston Studies in the Philosophy of Science, S. 205–224. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.

Nye, M. J. (1993). From chemical philosophy to theoretical chemistry: Dynamics of matter and dynamics of disciplines, 1800-1950. University of California Press, Berkeley.

Nye, M. J. (2016). The republic vs. the collective: Two histories of collaboration and competition in modern science. *NTM Zeitschrift für Geschichte der Wissenschaften, Technik und Medizin*, 24(2):169–194.

Nye, M. J. (2018). Boundaries, transformations, historiography: Physics in chemistry from the 1920s to the 1960s. *Isis*, (109):587–596.

Nye, M. J., Richards, J. L., und Stuewer, R. H. (Hgs.) (1992). *The invention of physical science: Intersections of mathematics, theology, and natural philosophy since the sev-*

enteenth century; Essays in honor of Erwin N. Hiebert, Bd. 139. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.

Ochiai, H. (2013). The logical structure of organic chemistry and the empirical adequacy of the classical concept of the molecule. *HYLE – International Journal for Philosophy of Chemistry*, 19(2):139–160.

Ochiai, H. (2015). Philosophical foundations of stereochemistry. *HYLE – International Journal for Philosophy of Chemistry*, 21(1):1–18.

Olbe, L., Carlsson, E., und Lindberg, P. (2003). A proton-pump inhibitor expedition: the case histories of omeprazole and esomeprazole. *Nature Reviews Drug Discovery*, 2(2):132–139.

Oppenheim, P. und Putnam, H. (1958). The unity of science as a working hypothesis. *Minnesota Studies in the Philosophy of Science*, (2):3–36.

Ostwald, W. (1906). L'evolution d'une science, la chimie. Flammarion, Paris.

Palermo, A. (2018). Future of the chemical sciences.

Palló, G. (2008). Boundaries of chemistry: Interest and identity in early twentieth century. In Bertomeu-Sánchez, J. R., Burns, D. T., und Van Tiggelen, B. (Hgs.), *Neighbours and Territories. The Evolving Identity of Chemistry: Proceedings of the 6th International Conference on the History of Chemistry. Leuven, Belgium, 28.08.-01.09.2007*, S. 319–327. Memosciences, Louvain-la-Neuve.

Parascandola, J. (2012). The evolution of stereochemical concepts in pharmacology. In Parascandola, J. (Hg.), *Studies in the history of modern pharmacology and drug therapy*, S. 143–158. Ashgate Variorum, Farnham.

Parascandola, J. und Jasensky, R. (2012). Origins of the receptor theory of drug action. In Parascandola, J. (Hg.), *Studies in the history of modern pharmacology and drug therapy*, S. 199–220. Ashgate Variorum, Farnham.

Partington, J. R. (1970 [1961]). A history of chemistry. Macmillan, London.

Pasteur, L. (1922a). La dissymétrie moléculaire. In Pasteur, V.-R. (Hg.), *Oeuvres de Pasteur*, S. 369–380. Masson et Cie, Paris.

Pasteur, L. (1922b). Mémoire sur la relation qui peut exister entre la forme cristalline et la composition chimique, et sur la cause de la polarisation rotatoire. In Pasteur, V.-R. (Hg.), *OEuvres de Pasteur*, S. 61–64. Masson et Cie, Paris.

Pasteur, L. (1922c). Recherches sur la dissymétrie moléculaire des produits organiques naturels: Leçons professées à la société chimique de paris le 20 janvier et le 3 février 1860. In Pasteur, V.-R. (Hg.), *OEuvres de Pasteur*, S. 314–344. Masson et Cie, Paris.

Peine, A. (2011). Challenging incommensurability: What we can learn from Ludwik Fleck for the analysis of configurational innovation. *Minerva*, 49(4):489–508.

Petrucci, R. H., Herring, G. F., Madura, J. D., und Bissonnette, C. (2017). General chemistry: Principles and modern applications. Pearson, Toronto, 11. Auflage.

Pfaltz, A. (2001). Bild und spiegelbild. *Uni Nova – Wissenschaftsmagazin der Universität Basel*, (117):16–17.

Philipsen, O. (2018). Quantenfeldtheorie und das Standardmodell der Teilchenphysik. Springer, Berlin und Heidelberg.

Pizzarello, S. und Cronin, J. R. (1998). Alanine enantiomers in the murchison meteorite. *Nature*, 394(6690).

Polanyi, M. (2009 [1966]). The Tacit Dimension. The University of Chicago Press, Chicago und London.

Powers, J. C. (2012). Inventing chemistry: Herman Boerhaave and the reform of the chemical arts. University of Chicago Press, Chicago und London.

Primas, H. (1983). Chemistry, Quantum Mechanics and Reductionism: Perspectives in Theoretical Chemistry. Springer, Berlin und Heidelberg.

Primas, H. (1985). Kann Chemie auf Physik reduziert werden? Zweiter Teil: Die Chemie der Makrowelt. *Chemie in unserer Zeit*, 19(5):160–166.

Primas, H. (1998). Emergence in exact natural sciences. *Acta Polytechnica Scandinavica*, 91:83–98.

Psarros, N. (2001). Theoretical quantum chemistry as science and discipline: Some philosophical remarks on a historical issue. In Reinhardt, C. (Hg.), *Chemical sciences in the 20th century*, S. 45–50. Wiley-VCH, Weinheim und New York.

Psarros, N. (2008). Die Chemie und ihre Methoden. Wiley-VCH, Hoboken.

Quack, M. (2002). How important is parity violation for molecular and biomolecular chirality? *Angewandte Chemie International Edition in English*, 41(24):4618–4630.

Quack, M. (2011). Frontiers in spectroscopy. *Faraday Discussions*, (150):533–565.

Quack, M. (2014). The concept of law and models in chemistry. *European Review*, 22(1):50–86.

Quack, M. (2015). Über Autonomie und Freiheit der Wissenschaft: Mythen, Risiken und Chancen bei der Evaluation und Förderung der naturwissenschaftlichen Grundlagenforschung. *Debatte*, (14):21–41.

Quack, M. und Hacker, J. (Hgs.) (2016). *Symmetrie und Asymmetrie in Wissenschaft und Kunst: Vorträge anlässlich der Jahresversammlung am 18. und 19. September 2015 in Halle (Saale)*, Bd. 412. Nova acta Leopoldina, Halle (Saale) und Stuttgart.

Quack, M. und Stohner, J. (2000). How do parity violating weak nuclear interactions influence rovibrational frequencies in chiral molecules? *Zeitschrift für Physikalische Chemie*, 214(5):71.

Quack, M. und Stohner, J. (2001). Molecular chirality and the fundamental symmetries of physics: Influence of parity violation on rovibrational frequencies and thermodynamic properties. *Chirality*, 13(10):745–753.

Ramberg, P. J. (2000). Pragmatism, belief, and reduction: Stereoformulas and atomic models in early stereochemistry. *HYLE – International Journal for Philosophy of Chemistry*, 6(1):35–61.

Ramberg, P. J. (2003). Chemical Structure, Spatial Arrangement: The Early History of Stereochemistry, 1874-1914. Taylor and Francis, Florence.

Ramberg, P. J. (2014). Partial valence, residual affinity, and early stereochemistry. In Klein, U. und Reinhardt, C. (Hgs.), *Objects of chemical inquiry*, S. 141–170. Sagamore Beach, Watson Publishing International.

Rein, D. (1993). Die wunderbare Händigkeit der Moleküle: Vom Ursprung des Lebens aus der Asymmetrie der Natur. Birkhäuser, Basel.

Reinhardt, C. (2000a). Academic-industrial collaboration. In Reinhardt, C. und Travis, A. S., (Hgs.), *Heinrich Caro and the Creation of Modern Chemical Industry*, S. 177–218. Kluwer, Dordrecht.

Reinhardt, C. (2000b). Chemical theory from chemical industry. In Reinhardt, C. und Travis, A. S., (Hgs.), *Heinrich Caro and the Creation of Modern Chemical Industry*, S. 108–123. Kluwer, Dordrecht.

Reinhardt, C. (2000c). The industrial research laboratory. In Reinhardt, C. und Travis, A. S. (Hgs.), *Heinrich Caro and the Creation of Modern Chemical Industry*, S. 219–256. Kluwer, Dordrecht.

Reinhardt, C. (Hg.), (2001a). *Chemical sciences in the 20th century: Bridging boundaries*. Wiley-VCH, Weinheim und New York.

Reinhardt, C. (2001b). Disciplines, research fields, and their boundaries. In Reinhardt, C. (Hg.), *Chemical sciences in the 20th century*, S. 1–13. Wiley-VCH, Weinheim und New York.

Reinhardt, C. (2004). Chemistry in a physical mode: Molecular spectroscopy and the emergence of NMR. *Annals of Science*, 61(1):1–32.

Reinhardt, C. (2006). Shifting and rearranging: Physical methods and the transformation of modern chemistry. Science History Publications, Sagamore Beach.

Remenyi, C., Anton, M., Parchmann, I., und Wormer, H. (2017). Kapitel 9 Chemiekommunikation: Didaktik und Wissenschaftsjournalismus im Gespräch. In Weitze, M.-D., Schummer, J., und Geelhaar, T. (Hgs.), *Zwischen Faszination und Verteufelung*, S. 113–120. Springer, Berlin und Heidelberg.

Renn, O. (Hg.) (1998). Kommunikation und Konflikt. Königshausen und Neumann, Würzburg.

Rentsch, K. M. (2002). The importance of stereoselective determination of drugs in the clinical laboratory. *Journal of Biochemical and Biophysical Methods*, 54(1-3):1–9.

Rheinberger, H.-J. (1995). Kurze Geschichte der Molekularbiologie, Bd. 24. Max Planck Institut für Wissenschaftsgeschichte, Berlin.

Rheinberger, H.-J. (2006). Experimentalsysteme und epistemische Dinge. Eine Geschichte der Proteinsynthese im Reagenzglas. Suhrkamp, Frankfurt am Main.

Rheinberger, H.-J. (2008). What happened to molecular biology? *BioSocieties*, 3(3):303–310.

Rickhaus, M., Bannwart, L. M., Neuburger, M., Gsellinger, H., Zimmermann, K., Häussinger, D., und Mayor, M. (2014). Inducing axial chirality in a „Geländer“

oligomer by length mismatch of the oligomer strands. *Angewandte Chemie International Edition*, 53(52):14587–14591.

Ridings, J. E. (2013). The thalidomide disaster, lessons from the past. In Barrow, P. C. (Hg.), *Teratogenicity testing*, S. 575–586. Springer, New York.

Riehl, J. P. (2010). Mirror-image asymmetry: An introduction to the origin and consequences of chirality. Wiley-VCH, Hoboken.

Rocke, A. J. (1987). Kolbe versus the „transcendental chemists": the emergence of classical organic chemistry. *AMBIX*, 34(3):156–168.

Roco, M. C. und Bainbridge, W. S. (Hgs.) (2003). *Converging technologies for improving human performance: Nanotechnology, biotechnology, information technology and cognitive science*. Kluwer, Dordrecht.

Romero, A. M., Guthman, J., Galt, R. E., Huber, M., Mansfield, B., und Sawyer, S. (2017). Chemical geographies. *GeoHumanities*, 3(1):101–120.

Roqué, X. (2001). From radiochemistry to nuclear chemistry and cosmochemistry. In Reinhardt, C. (Hg.), *Chemical sciences in the 20th century*, S. 121–130. Wiley-VCH, Weinheim und New York.

Rose, N. S. (2007). Politics of life itself: Biomedicine, power, and subjectivity in the twentyfirst century. Princeton University Press, Princeton.

Rosenfeld, L. (2002). Clinical chemistry since 1800: Growth and development. *Clinical Chemistry*, 48(1).

Rosenfeld, S. M. und Bhushan, N. (2000). Chemical synthesis: Complexity, similarity, natural kinds, and the evolution of a „logic". In Bhushan, N. und Rosenfeld, S. M. (Hgs.), *Of minds and molecules*, S. 187–207. Oxford University Press, Oxford und New York.

Roth, D. L. (2015). Several centuries of centrality. *ACS central science*, 1(3):103–105.

Roth, K. (2007). Die unendliche chemische Geschichte – Contergan. In Roth, K. (Hg.), *Chemische Delikatessen*, S. 172–179. Wiley-VCH, Weinheim.

Röthlein, B. (2010). Die Zähmung der Quantengeister. *MaxPlanckForschung*, 4(2):48–52.

Ruedenberg, K. und Schwarz, E. W. H. (2013). Three millennia of atoms and molecules. In Strom, E. T. und Wilson, A. K. (Hgs.), *Pioneers of quantum chemistry*, S. 1–45. American Chemical Society, Washington DC.

Rüger, A. J., Kramer, J., Seifermann, S., Busch, M., Muller, T., und Bräse, S. (2012). Händigkeit – Leben in einer chiralen Welt. *Chemie in unserer Zeit*, 46(5):294–301.

Ruthenberg, K. (2016). About the futile dream of an entirely riskless and fully effective remedy: Thalidomide: Special issue „ethical case studies of chemistry". *HYLE International Journal for Philosophy of Chemistry*, 22(1):55–77.

Ruthenberg, K. und van Brakel, J. (Hgs.) (2008). *Stuff: The nature of chemical substances*. Königshausen & Neumann, Würzburg.

Saha, C. und Chakraborty, S. (2012). Dissymmetry and asymmetry: A hopeless conflict in chemical literature. *Resonance*, 17(8):768–778.

Saigo, K. (2006). Resolution of chiral drug intermediates by crystallisation. In Francotte, E. und Lindner, W. (Hgs.), *Chirality in drug research*, Methods and principles in medicinal chemistry, S. 127–154. Wiley-VCH, Weinheim.

Scarso, A. und Borsato, G. (2009). Optically active supramolecules. In Amabilino, D. B. (Hg.), *Chirality at the nanoscale*, S. 29–65. Wiley-VCH, Weinheim.

Scerri, E. (2016). The changing views of a philosopher of chemistry on the question of reduction. In Scerri, E. R. und Fisher, G. A. (Hgs.), *Essays in the philosophy of chemistry*, S. 125–143. Oxford University Press, New York.

Scerri, E. und McIntyre, L. (1997). The case for the philosophy of chemistry. *Synthese*, (111):213–232.

Schaper-Rinkel, P. (2007). Wie nanotechnologische Tatsachen entstehen: die Entwicklung der Nanotechnologie zwischen Denkstil und Politik. In Chołuj, B. und Joerden, J. C. (Hgs.), *Von der wissenschaftlichen Tatsache zur Wissensproduktion*, Studien zur Ethik in Ostmitteleuropa, S. 343–359. Peter Lang, Frankfurt am Main.

Schauz, D. (2014a). What is basic research? Insights from historical semantics. *Minerva*, 52:273–328.

Schauz, D. (2014b). Wissenschaftspolitische Sprache als Gegenstand von Forschung und disziplinärer Selbstreflektion – das Programm des Forschungsnetzwerks CASTI. *Forum Interdisziplinäre Begriffsgeschichte*, 3(2):48–62.

Schleiff, H. und Konečný, P. (2013). Staat, Bergbau und Bergakademie: Montanexpertenim 18. und frühen 19. jahrhundert – Einleitung. In Schleiff, H. und Konečný, P. (Hgs.), *Staat, Bergbau und Bergakademie*, S. 9–12. Franz Steiner Verlag, Stuttgart.

Schmelzer, M. (2016). The hegemony of growth: The OECD and the making of the economic growth paradigm. Cambridge University Press, Cambridge.

Schrott, R. (2018). Horace Walpole, Robert Merton und die Entstehung des Begriffs des Serendipischen. In Schrott, R. (Hg.), *Politiken und Ideen*, S. 226–235. Hanser, München.

Schüler, J. (2015). Die Biotechnologie-Industrie. Springer Spektrum, Berlin und Heidelberg, 1. Auflage.

Schumacher, H., Blake, D. A., Gurian, J. A., und Gillette, J. R. (1968). A comparision of the teratogenic activity of thalidomide in rabbits and rats. *The Journal of Pharmacology and Experimental Therapeutics*, 160(1):189–200.

Schumacher, M. und Schulgen, G. (2008). Methoden klinischer Studien: Methodische Grundlagen der Planung, Durchführung und Auswertung. Springer, Berlin und Heidelberg, 3. Auflage.

Schummer, J. (1996). Bibliographie chemiephilosophischer Literatur der ddr. *HYLE – International Journal for Philosophy of Chemistry*, (2):3–11.

Schummer, J. (1997). Scientometric studies on chemistry i: The exponential growth of chemical substances, 1800–1995. *Scientometrics*, 39(1):107–123.

Schummer, J. (2003). The notion of nature in chemistry. *Studies in History and Philosophy of Science Part A*, 34(4):705–736.

Schummer, J. (2004a). Interdisciplinary issues in nanoscale research. In Baird, D., Nordmann, A., und Schummer, J. (Hgs.), *Discovering the nanoscale*, S. 9–20. IOS Press, Amsterdam und Washington DC.

Schummer, J. (2004b). Philosophie der Chemie: Rück- und Ausblicke. In Griesar, K. (Hg.), *Wenn der Geist die Materie küsst*, S. 37–48. Deutsch, Frankfurt am Main.

Schummer, J. (2006). The philosophy of chemistry. from infancy toward maturity. In Baird, D., McIntyre, L., und Scerri, E. (Hgs.), *Philosophy Of Chemistry*, S. 19–39. Springer, Dordrecht.

Schummer, J. (2017a). Chemie als Teufelswerk? 2300 Jahre Chemiekritik. In Weitze, M.-D., Schummer, J., und Geelhaar, T. (Hgs.), *Zwischen Faszination und Verteufelung*, S. 9–21. Springer, Berlin und Heidelberg.

Schummer, J. (2017b). „Chemie und Gesellschaft" in der Chemieausbildung: Bedarf, Aangebote, Umsetzung. In Weitze, M.-D., Schummer, J., und Geelhaar, T. (Hgs.), *Zwischen Faszination und Verteufelung*, S. 133–138. Springer, Berlin und Heidelberg.

Schummer, J. (2017c). Einführung. In Weitze, M.-D., Schummer, J., und Geelhaar, T. (Hgs.), *Zwischen Faszination und Verteufelung*, S. 1–6. Springer, Berlin und Heidelberg.

Schummer, J. (o.J.). Philosophy of chemistry in the GDR, 1954-1990. URL: http://www.hyle.org/service/biblio/ddrliter.htm, zuletzt abgerufen: 15.05.2020.

Schummer, J., Bensaude-Vincent, B., und Van Tiggelen, B. (2007). Introduction. In Schummer, J., Bensaude-Vincent, B., und Van Tiggelen, B. (Hg.), *The public image of chemistry*, S. 1–6. World Scientific, Singapur und Hackensack.

Schurig, V. (2002). Symmetrie in Wissenschaft und Kunst II – Rechts- und Linkshändigkeit (Chiralität) in der Chemie: Studium generale Vorlesung, Montag, 24.06.2002 im Sommersemester 2002. URL: https://tinyurl.com/yamg55lh, zuletzt abgerufen: 15.05.2020.

Schurig, V. (2005). Contributions to the theory and practice of the chromatographic separation of enantiomers. *Chirality*, (17):205–226.

Schütze, C. (1997). Ein Schlafmittel weckt die Welt: Das ohnmächtige Strafrecht im Contergan-Verfahren. In Schultz, U. (Hg.), *Grosse Prozesse*, S. 392–403. C.H. Beck, München.

Schwerin, A. v. (2009). Die Contergan-Bombe. Der Arzneimittelskandal und die neue risikoepistemische Ordnung der Massenkonsumgesellschaft. In Eschenbruch, N. (Hg.), *Arzneimittel des 20. Jahrhunderts*, S. 255–283. transcript, Bielefeld.

Scriba, G. K. E. (2011). Moleküle im Spiegel: Enantiomerentrennungen mittels Kapillarelektrophorese. *q&more*, (2):8–12.

Seeman, J. I. (2017). Moving beyond insularity in the history, philosophy, and sociology of chemistry. *Foundations of Chemistry*, 104:88.

Segal, D. (2017). Materials for the 21st century. Oxford University Press, Oxford.

Shapiro, N. (2015). Attuning to the chemosphere: Domestic formaldehyde, bodily reasoning, and the chemical sublime. *Cultural Anthropology*, 30(3):368–393.

Sharon, T. (2014). Human nature in an age of biotechnology: The case for mediated posthumanism. Springer, Dordrecht.

Shealy, F. Y., Opliger, C. E., und Montgomery, J. A. (1965). Synthesis of dand l-thalidomide and related studies. *Journal of Pharmaceutical Sciences*, (17):1030–1031.

Sheskin, J. (1965). Thalidomide in the treatment of lepra reactions. *Clinical pharmacology and therapeutics*, 6:303–306.

Sieroka, N. (2014). Philosophie der Physik. C.H. Beck, München.

Sierra, T. (2009). Expression of chirality in polymers. In Amabilino, D. B. (Hg.), *Chirality at the nanoscale*, S. 115–189. Wiley-VCH, Weinheim.

Simões, A. (2002). Dirac's claim and the chemists. *Physics in Perspective*, 4(3):253–266.

Simões, A. und Gavroglou, K. (2001). Issues in the history of theoretical and quantum chemistry, 1927-1960. In Reinhardt, C. (Hg.), *Chemical sciences in the 20th century*, S. 51–74. Wiley-VCH, Weinheim und New York.

Simon, C. (1998). The rise of the swiss chemical industry reconsidered. In Homburg, E., Travis, A. S., und Schröter, H. G. (Hgs.), *The Chemical Industry in Europe, 1850–1914*, S. 9–27. Kluwer, Dordrecht.

Simon, J. (2012). Chemistry and pharmacy: A philosophical inquiry into an evolving relationship. In Woody, A., Hendry, R. F., und Needham, P. (Hgs.), *Philosophy of Chemistry*, S. 519–530. Elsevier, Amsterdam und Boston.

Sjöström, H. und Nilsson, R. (1972). *Thalidomide and the power of the drug companies*. Penguin Books, Harmondsworth.

Sobczyńska, D., Zeidler, P., und Zielonacka-Lis, E. (Hg.) (2004). *Chemistry in the philosophical melting pot: Extended versions of the lectures given at the IVth Summer Symposium in Philosophy of Chemistry and Biochemistry, Poznań 2000*. Peter Lang, Frankfurt am Main.

Soentgen, J. (2008). ‚Stuff': A phenomenological definition. In Ruthenberg, K. und van Brakel, J. (Hgs.), *Stuff*, S. 71–91. Königshausen & Neumann, Würzburg.

Soentgen, J. (2018). Gummi: Der Raum indigenen Wissens. In Soentgen, J. (Hg.), *Konfliktstoffe*, Stoffgeschichten, S. 103–130. oekom Verlag, München.

Sokal, A. und Bricmont, J. (1998). *Intellectual impostures: Postmodern philosophers' abuse of science*. Profile Books, London.

Speckle, B. (1998). „Reinheitsgebot" und „Chemiebier": Die Auseinandersetzung um das deutsche Reinheitsgebot für Bier aus kulturwissenschaftlicher Sicht. In

Renn, O. (Hg.), *Kommunikation und Konflikt*, S. 115–152. Königshausen und Neumann, Würzburg.

Stahl, M. und Baier, S. (2015). How many molecules does it take to tell a story? case studies, language, and an epistemic view of medicinal chemistry. *ChemMedChem*, 10(6):949–956.

Stapel, U. (1988). Die Arzneimittelgesetze 1961 und 1976. Deutscher Apotheker-Verlag, Stuttgart.

Steinhauser, T. (2014). Zukunftsmaschinen in der Chemie: Kernmagnetische Resonanz bis 1980. Peter Lang, Frankfurt am Main.

Steinmetz, W. (2003). Ungewollte Politisierung durch die Medien? Die Contergana affäre. In Weisbrod, B. (Hg.), *Die Politik der Öffentlichkeit – die Öffentlichkeit der Politik*, S. 195–228. Wallstein-Verlag, Göttingen.

Stengers, I. (2010a). 1. Scientific passions. In Stengers, I. (Hg.), *Cosmopolitics I*, S. 1–13. University of Minnesota Press, Minneapolis.

Stengers, I. (2010b). 2. The neutrino's paradoxical mode of existance. In Stengers, I. (Hg.), *Cosmopolitics I*, S. 14–27. University of Minnesota Press, Minneapolis.

Stengers, I. (2010c). 7. The power of physical laws. In Stengers, I. (Hg.), *Cosmopolitics I*, S. 87–97. University of Minnesota Press, Minneapolis.

Stengers, I. (2011a). 1. Atoms exist! In Stengers, I. (Hg.), *Cosmopolitics II*, S. 3–17. University of Minnesota Press, Minneapolis.

Stengers, I. (2011b). 13. The question of emergence. In Stengers, I. (Hg.), *Cosmopolitics II*, S. 207–218. University of Minnesota Press, Minneapolis.

Stengers, I. (2011c). 14. The practices of emergence. In Stengers, I. (Hg.), *Cosmopolitics II*, S. 219–233. University of Minnesota Press, Minneapolis.

Stichweh, R. (1984). Zur Entstehung des modernen Systems wissenschafticher Disziplinen: Physik in Deutschland 1740-1890. Suhrkamp, Frankfurt am Main.

Streckeisen, P. (2007). Die Chemie der immateriellen Arbeit – zur Aktualität einer materialistischen Analyse von Arbeit und Gesellschaft. In Gemperle, M. und Streckeisen, P. (Hgs.), *Ein neues Zeitalter des Wissens?*, S. 146–172. Seismo, Zürich.

Strom, E. T. und Wilson, A. K. (Hgs.) (2013). *Pioneers of quantum chemistry*. American Chemical Society, Washington DC.

Suay-Matallana, I. und Bertomeu-Sánchez, J. R. (2017). Mapping the teaching ofhistory of chemistry in europe. *Journal of Chemical Education*, 94(2):133–136.

Subramanian, G. (2007). Chiral separation techniques: A practical approach. Wiley-VCH, Weinheim, 3. Auflage.

Suckale, M. (Hg.) (2016). *Chemie digital: Arbeitswelt 4.0*. Frankfurter Allgemeine Buch, Frankfurt am Main.

Sutter, B. (2012). Wissenschaftssoziologie der Soziologie. In Maasen, S., Kaiser, M., Reinhart, M., und Sutter, B. (Hgs.), *Handbuch Wissenschaftssoziologie*, S. 429–441. Springer, Wiesbaden.

Syha, Y., Popescu, L., Wurglics, M., und Schubert-Zsilavecz, M. (2005). Geschichte der Ulcustherapie. Ein historischer Überblick. *Pharmazie unserer Zeit*, 34(3):188–192.

Szilagyi, P. G. (2009). Perspective: Translational research and pediatrics. *Academic Pediatrics*, 9(2):71–80.

Taussig, H. B. (1962). A study of the german outbreat of phocomelia. *Journal of the American Medical Association*, 180(13):1106–1114.

Teo, S. K., Stirling, D. I., und Zeldis, J. B. (2005). Thalidomide as a novel therapeutic agent: new uses for an old product. *Drug Discovery Today*, 10(2):107–114.

Thomas, G. F. (2012). The emancipation of chemistry. *Foundations of Chemistry*, 14(2):109–155.

Thomson, W. (1894). Baltimore lectures on molecular dynamics and the wave theory of light. C.J. Clay and Sons, London und Baltimore.

Tschira, G. (2003). Die Chemie in der Bildenden Kunst. Carl Bosch Museum Heidelberg, Heidelberg.

Urban, K. (2015). Materialwissenschaft und Werkstofftechnik: Ein Ritt auf der Rasierklinge. Springer, Berlin und Heidelberg, 1. Auflage.

Van Brakel, J. (2012). Substances: The ontology of chemistry. In Woody, A., Hendry, R. F., und Needham, P. (Hgs.), *Philosophy of Chemistry*, S. 191–229. Elsevier, Amsterdam und Boston.

Van Cleve, J. und Frederick, R. E. (Hgs.) (1991). *The philosophy of right and left: Incongruent counterparts and the nature of space*. The University of Western Ontario series in philosophy of science. Kluwer, Dordrecht und Boston und London.

Van der Spek, T. M. (2006). Selling a theory: The role of molecular models in J. H. van 't Hoff's stereochemistry theory. *Annals of Science*, 63(2):157–177.

Van 't Hoff, Henricus J. (1874). Voorstel tot uitbreiding der tegenwoordig in de scheikunde gebruikte structuur-formules in de ruimte: benevents een daarmeê samenhangende opmerking omtrent het verband tusschen optisch actief vermogen en chemische constitutie van organische verbindingen. V. Greven, Utrecht.

Van Tiggelen, B. (2001). The discovery of new elements and the boundary between physics and chemistry in the 1920s and 1930s. The case of elements 43 and 75. In Reinhardt, C. (Hg.), *Chemical sciences in the 20th century*, S. 131–145. Wiley-VCH, Weinheim und New York.

Vaupel, E. (2007). Wissenschaft und Patriotismus. der deutsch-französische Krieg 1870/71. *Chemie in unserer Zeit*, 41(6):440–447.

VFA (2018). Die pharmazeutische Industrie in Deutschland: Ein Branchenbericht. URL: https://tinyurl.com/y9q7zprg, zuletzt abgerufen: 15.05.2020.

Vignola-Gagné, E., Rantanen, E., Lehner, D., und Hüsing, B. (2013). Translational research policies: disruptions and continuities in biomedical innova-

tion systems in Austria, Finland and Germany. *Journal of community genetics*, 4(2):189–201.

Vogel, J. (2013). Aufklärung untertage: Wissenswelten des europäischen Bergbaus im ausgehenden 18. und frühen 19. Jahrhundert. In Schleiff, H. und Konečný, P. (Hgs.), *Staat, Bergbau und Bergakademie*, S. 13–34. Franz Steiner Verlag, Stuttgart.

Wachtel, S. und Jendrusch, A. (1993). Der Linksdrall in der Natur: Eine Entdeckung und ihr Schicksal. dtv, München.

Wagnière, G. H. (2007). On chirality and the universal asymmetry: Reflections on image and mirror image. Wiley-VCH, Zürich.

Wang, D. und Hu, E. (2011). Structural basis and computational modelling of chiral drugs. In Lin, G.-Q., You, Q.-D., und Cheng, J.-F. (Hg.), *Chiral drugs*, S. 297–321. Wiley-VCH, Hoboken.

Weber, G. M. (2013). Identifying translational science within the triangle of biomedicine. *Journal of Translational Medicine*, 11(1):1–10.

Wehling, M. (2011). Drug development in the light of translational science: shine or shade? *Drug Discovery Today*, 16(23-24):1076–1083.

Weingart, P. (2007). Chemists and their craft in fiction film. In Schummer, J., Bensaude-Vincent, B., und Van Tiggelen, B. (Hgs.), *The public image of chemistry*, S. 81–96. World Scientific, Singapur und Hackensack.

Weisberg, M. (2012). Chemical modeling. In Woody, A., Hendry, R. F., und Needham, P. (Hg.), *Philosophy of Chemistry*, S. 355–363. Elsevier, Amsterdam und Boston.

Weisz, G. (2001). Spas, mineral waters, and hydrological science in twentiethcentury france. *Isis*, 92(3):451–483.

Weitze, M.-D., Schummer, J., und Geelhaar, T. (Hg.), (2017). *Zwischen Faszination und Verteufelung*. Springer, Berlin und Heidelberg.

Welt am Sonntag (26.11.1961). Mißgeburten durch Tabletten? Alarmierender Verdacht eines Arztes gegen ein weitverbreitetes Medikament.

Wenkel, S. (2013). Die Molekularbiologie in Deutschland von 1945 bis 1975 – Ein internationaler Vergleich. PhD Thesis, Universität zu Köln, Köln.

Werner-Lobo, K. und Weiss, H. (2014). Schwarzbuch Markenfirmen: Die Welt im Griff der Konzerne. Deuticke, Wien.

Westfall, J. M., Mold, J., und Fagnan, L. (2007). Practice-based research – „blue highways“ on the NIH roadmap. *Journal of the American Medical Association*, 297(4):403–306.

Weyer, J. (2018a). Geschichte der Chemie: Band 1 – Altertum, Mittelalter, 16. bis 18. Jahrhundert. Springer, Berlin und Heidelberg.

Weyer, J. (2018b). Geschichte der Chemie: Band 2 – 19. und 20. Jahrhundert. Springer, Berlin und Heidelberg.

Wilsmann, K. M. und Zwingenberger, K. (1996). Die kontrastreiche Geschichte des Thalidomids: Thalidomid und seine Anwendungsgeschichte. *Die Waage*, 35(2):66–67.

Winter, E., Herrmann, W. A., Mittelstraß, J., und Stock, G. (2017). „Chemie und Geisteswissenschaften": Blick zurück und nach vorn. In Weitze, M.-D., Schummer, J., und Geelhaar, T. (Hgs.), *Zwischen Faszination und Verteufelung*, S. 73–84. Springer, Berlin und Heidelberg.

Wittwer, A. (2019). Warum ADHS keine Krankheit ist: Eine Streitschrift. Hirzel, Stuttgart.

Woody, A., Hendry, R. F., und Needham, P. (Hg.), (2012). *Philosophy of Chemistry*. Elsevier, Amsterdam und Boston, 1. Auflage.

Woolf, S. H. (2008). The meaning of translational research and why it matters. *JAMA*, (2):211–213.

Wu, C.-S. (1957). Experimental test of partiy conservation in beta decay. *Physical Review*, 105:1413–1415.

Wu, J. J., Huang, D. B., Pang, K. R., Hsu, S., und Tyring, S. K. (2005). Thalidomide: dermatological indications, mechanisms of action and side-effects. *The British journal of dermatology*, 153(2):254–273.

Wünsch, G. (2000). Einführung in die Philosophie der Chemie: Studienbuch für Chemiker und an Chemie Interessierte. Königshausen & Neumann, Würzburg.

Zeid, R. L. (2011). Regulatory and development considerations of chiral compounds. In Ahuja, S. (Hg.), *Chiral separation methods for pharmaceutical and biotechnological products*, S. 9–34. Wiley-VCH, Hoboken.

Zerhouni, E. A. (2005). Translational and clinical science – time for a new vision. *New England Journal of Medicine*, 353(1):1621–1623.

Zichner, L. (Hg.) (2005). Die Contergankatastrophe: Eine Bilanz nach 40 Jahren. Steinkopff, Darmstadt.

Soziologie



Michael Volkmer, Karin Werner (Hg.)

Die Corona-Gesellschaft

Analysen zur Lage und Perspektiven für die Zukunft

2020, 432 S., kart., Dispersionsbindung, 2 SW-Abbildungen
24,50 € (DE), 978-3-8376-5432-5
E-Book:
PDF: 21,99 € (DE), ISBN 978-3-8394-5432-9
EPUB: 21,99 € (DE), ISBN 978-3-7328-5432-5



Gabriele Winker

Solidarische Care-Ökonomie

Revolutionäre Realpolitik für Care und Klima

März 2021, 216 S., kart.
15,00 € (DE), 978-3-8376-5463-9
E-Book:
PDF: 12,99 € (DE), ISBN 978-3-8394-5463-3



Wolfgang Bonß, Oliver Dimbath,
Andrea Maurer, Helga Pelizäus, Michael Schmid

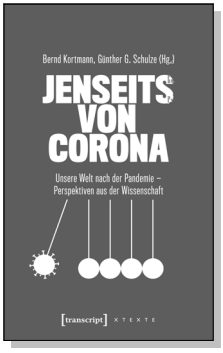
Gesellschaftstheorie

Eine Einführung

Januar 2021, 344 S., kart.
25,00 € (DE), 978-3-8376-4028-1
E-Book:
PDF: 21,99 € (DE), ISBN 978-3-8394-4028-5

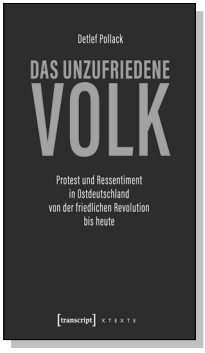
Leseproben, weitere Informationen und Bestellmöglichkeiten finden Sie unter www.transcript-verlag.de

Soziologie



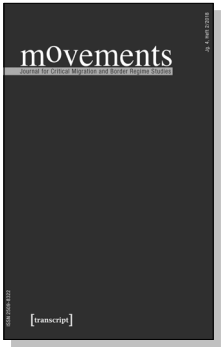
Bernd Kortmann, Günther G. Schulze (Hg.)
Jenseits von Corona
Unsere Welt nach der Pandemie – Perspektiven aus der Wissenschaft

2020, 320 S., Klappbroschur, Dispersionsbindung, 1 SW-Abbildung
22,50 € (DE), 978-3-8376-5517-9
E-Book:
PDF: 19,99 € (DE), ISBN 978-3-8394-5517-3
EPUB: 19,99 € (DE), ISBN 978-3-7328-5517-9



Detlef Pollack
Das unzufriedene Volk
Protest und Ressentiment in Ostdeutschland von der friedlichen Revolution bis heute

2020, 232 S., Klappbroschur, Dispersionsbindung, 6 SW-Abbildungen
20,00 € (DE), 978-3-8376-5238-3
E-Book:
PDF: 17,99 € (DE), ISBN 978-3-8394-5238-7
EPUB: 17,99 € (DE), ISBN 978-3-7328-5238-3



Juliane Karakayali, Bernd Kasparek (Hg.)
movements.
Journal for Critical Migration and Border Regime Studies
Jg. 4, Heft 2/2018

2019, 246 S., kart.
24,99 € (DE), 978-3-8376-4474-6

Leseproben, weitere Informationen und Bestellmöglichkeiten finden Sie unter www.transcript-verlag.de