SITZUNGSBERICHTE

LEIBNIZ-SOZIETÄT DER WISSENSCHAFTEN

Einfachheit als Wirk-, Erkenntnis und Gestaltungsprinzip

Arbeitskreis „Prinzip Einfachheit“
der
Leibniz-Sozietät der Wissenschaften zu Berlin

Wissenschaftliche Vorträge 2016–2019

Herausgegeben von
Werner Krause, Erdmute Sommerfeld & Herbert Hörz

Mit Beiträgen von Andreas Meisel,
Franz Prüß, Rainer Schimming, Erdmute Sommerfeld,
Alexander Unzicker

BAND 149

JAHRGANG 2022

Die Leibniz-Sozietät der Wissenschaften zu Berlin e.V.

ist eine freie Vereinigung von Natur-, Geistes- und Sozialwissenschaftlern. In ihren Traditionen geht sie zurück auf die im Jahre 1700 gegründete Kurfürstlich-Brandenburgische Societät der Wissenschaften, eine der ältesten wissensenschaftlichen Institutionen in Deutschland, sowie auf ihren geistigen Vater und ersten Präsidenten, Gottfried Wilhelm Leibniz. Mit ihr ist sie historisch durch die über Jahrhunderte ununterbrochene Zuwahl ihrer Mitglieder und deren wissenschaftliches Wirken verknüpft.

Die Sozietät, im Jahre 1993 mit Sitz in Berlin konstituiert, baut auf eigenständigen Forschungen ihrer Mitglieder auf und bietet ihnen ein Forum der Diskussion und Publizität. Im Plenum, in den Klassen und Arbeitskreisen pflegen ihre Mitglieder und Gäste besonders den interdisziplinären Diskurs und die Erörterung aktueller Grundprobleme von Wissenschaft und Gesellschaft. Die Sozietät will durch ihre Tätigkeit einen angemessenen Beitrag zum geistigen Leben in unserer Zeit leisten.

Vorstand (Präsidium) der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften zu Berlin

Herbert Hörz; Wissenschaftsphilosophie und -geschichte
Ehrenpräsident

Gerda Haßler; Sprachwissenschaft, Romanistik
Präsidentin

Lutz-Günther Fleischer; Verfahrenstechnik, Thermodynamik
Vizepräsident

Dorothee Röseberg; Romanistik, Kulturwissenschaft
Vizepräsidentin

Heinz-Jürgen Rothe; Arbeitspsychologie
Schatzmeister

Michael Schippan; Russische und Osteuropäische Geschichte
Sekretar des Plenums

Gerhard Pfaff; Chemie
Sekretar der Klasse für Naturwissenschaften und Technikwissenschaften

Kerstin Störl; Linguistik, Romanistik, Altamerikanistik
Sekretarin der Klasse für Sozial- und Geisteswissenschaften

Begründet im Jahre 1700
als Brandenburgische Societät der Wissenschaften

SITZUNGSBERICHTE
BAND 149 JAHRGANG 2022

LEIBNIZ-SOZIETÄT DER WISSENSCHAFTEN ZU BERLIN

Diese Publikation erfolgte mit freundlicher Unterstützung des Senats von Berlin.

Impressum

Herausgeberin: Gerda Haßler, Präsidentin der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften zu Berlin e.V.
Briefanschrift: Leibniz-Sozietät der Wissenschaften zu Berlin e.V.
Langenbeck-Virchow-Haus, Luisenstr. 58/59, 10117 Berlin
Homepage http://www.leibnizsozietaet.de

Briefanschrift der Redaktion:
Leibniz-Sozietät der Wissenschaften zu Berlin e.V., Redaktionskollegium,
Langenbeck-Virchow-Haus, Luisenstr. 58/59, 10117 Berlin

Im Auftrag der Leibniz-Sozietät e.V. erschienen im trafo Wissenschaftsverlag
Dr. Wolfgang Weist, Finkenstr. 8, 12621 Berlin
Telefon: 030/61 29 94 Fax: 030/61 29 94 21
e-mail: info@trafoberlin.de

Druck: Ortmaier Druck, Frontenhausen

Bezugsbedingungen: Die Reihe „Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät“ erscheint in unregelmäßigen Abständen etwa viermal jährlich.
Bestellungen sowie fortlaufender Bezug bitte über Ihre Buchhandlung oder direkt beim trafo Wissenschaftsverlag Dr. Wolfgang Weist

Redaktionelle Durchsicht dieses Bandes: Erdmute Sommerfeld, Werner Krause, Georg B. Kaiser (BMB-BuchManufacturBerlin)

Redaktionsschluss: 22.02.2022
ISSN 0947-5850 ISBN 978-3-86464-226-5

Inhalt

Werner Krause, Erdmute Sommerfeld, Herbert Hörz
Vorwort 7

Rainer Schimming
Essay über Einfachheit 17

Alexander Unzicker
Naturkonstanten, wissenschaftliche Revolutionen und Einfachheit in der Physik 27

Franz Prüß
Einfachheit in der Pädagogik, insbesondere in der Didaktik 59

Andreas Meisel
Therapie neurologischer Erkrankungen nach dem Prinzip Einfachheit 95

Erdmute Sommerfeld
Schaffung von Voraussetzungen für einfache Prozesse: ein Grundprinzip nicht nur in der menschlichen Informationsverarbeitung? 119

Autorin und Autoren 187

Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften zu Berlin *149 (2022), 7–16*

Vorwort

Vorworte werden häufig überschlagen. Das ist schade. Sie berichten von der Absicht der Autoren, von den Hintergründen und von den Menschen, die geholfen haben, so auch hier.

Um die Ergebnisse des Arbeitskreises „Prinzip Einfachheit" einordnen zu können, um zu verstehen, warum wir so gefragt haben, wie wir gefragt haben, ist es notwendig, zu den Wurzeln unseres Anliegens zurückzukehren. Wir müssen dazu etwas „ausholen". Doch der Reihe nach.

Im Jahre 2010 wurde der Arbeitskreis „Prinzip Einfachheit" gegründet, um die Allgemeingültigkeit dieses Prinzips und dessen Voraussetzungen zu untersuchen, nachdem das Prinzip im Rahmen der menschlichen Informationsverarbeitung – gleichsam wie ein Axiom – theoretisch und experimentell belegt wurde. In diesem Band legen wir ein zusammenfassendes Ergebnis der nunmehr zehnjährigen Arbeit vor.

„Ist Einfachheit ein universelles Prinzip zum Erkennen, ein universelles Prinzip der Wirkung und ein universelles Prinzip zum Gestalten in den unterschiedlichsten Disziplinen der Wissenschaft? Wenn ja, wie ist es zu begründen und welche Rolle spielt es bei der Be- und Verwertung von Erkenntnissen?" Diese Fragen standen am Beginn unserer Diskussionen aus der Sicht der kognitiven Psychologie und der Wissenschaftsphilosophie (Sommerfeld et al. 2010). Im Eröffnungsvortrag sind zwei Schwerpunkte für die Arbeit unseres Arbeitskreises skizziert worden: *Prinzip Einfachheit* in den unterschiedlichsten Disziplinen und *Schaffung von Voraussetzungen für Einfachheit* (Sommerfeld 2010a, b). Im zweiten thematischen Band (Hörz et al. 2016a) wird – mit Bezug zu den Vorträgen und Diskussionen aus den unterschiedlichen Fachdisziplinen – die Vielfalt der Problematik mit ihren Möglichkeiten erörtert (Hörz et al. 2016b). An diesen so aufgespannten Rahmen wollen wir erinnern und schließlich müssen wir Bilanz ziehen. Die wissenschaftlichen Beiträge aus der zehnjährigen Tätigkeit des Arbeitskreises wurden unter dem Aspekt der Schaffung von Voraussetzungen für Einfachheit

analysiert und Ergebnisse dieser ersten Analyse systematisch dargestellt (Sommerfeld in diesem Band).

Wir nehmen hier einiges vorweg, um alle Beiträge dieses Bandes einzuordnen.

Anhand einiger Beispiele wollen wir zunächst Vorstellungen und Ideen verdeutlichen, die uns bei der Gründung des Arbeitskreises und während des gesamten Arbeitsprozesses begleitet haben und so unsere Fragestellung veranschaulichen und untermauern.

Kategorien für ein Prinzip Einfachheit: Zunächst bekannte Beispiele

Ein erstes Beispiel: Das Ohmsche Gesetz enthält bekanntlich *drei* Größen: Spannung, Strom und Widerstand. Dafür wird der Einfachheit halber der Widerstand als temperaturunabhängig angenommen. Streng genommen ist der Widerstand aber temperaturabhängig, sodass eigentlich *vier* Größen das Ohmsche Gesetz ausmachen. Aus Einfachheitsgründen (weil die Temperatur in vielen praktischen Fällen vernachlässigt werden kann, denn der Widerstand sollte sich im Schaltkreis nicht erhitzen) wird das Ohmsche Gesetz auf *drei* Größen reduziert.[1] Mit Hörz (2010) äußert sich hier das Prinzip Einfachheit als Prinzip einer *wissenschaftlich berechtigten Vereinfachung* (Prinzip Einfachheit als *Erkenntnisprinzip*). Im Beitrag von Karl-Heinz Bernhardt (2010) gibt es dafür eine Reihe weiterer Belege. Hier wird weggelassen, was nicht unbedingt benötigt wird.

Ein zweites Beispiel: Es soll ein reibungs*freies* Getriebe[2] konstruiert werden. Bekanntlich wird die Reibung von einer bestimmten Anzahl von Faktoren bestimmt wie Material, Oberflächenbeschaffenheit des Materials, Viskosität des Getriebeöls, usw. Um das Getriebe reibungsfrei zu konstruieren, sollten sich die Zahnräder nicht berühren. Bei einem herkömmlichen Getriebe ist diese Forderung nicht zu erfüllen. Gestaltet man aber die Zähne der Zahnräder magnetisch und zwar so, dass sich „Nordpol“ und „Nordpol“ gegenüberstehen, stoßen sich die Zähne bekanntlich ab. Die Kraftübertragung erfolgt ohne Berührung. Damit wird die Anzahl der Reibungseinflussfaktoren *reduziert*. Herbert Hörz spricht in diesem Fall vom Prinzip Einfachheit als *Gestaltungsprinzip*.

1 Das Beispiel „Ohmsches Gesetz“ entstammt der Vorlesung von Professor Dr. Ing. Eugen Philippow über Theoretische Elektrotechnik an der TU Ilmenau (damals Hochschule für Elektrotechnik) in den fünfziger Jahren des vergangenen Jahrhunderts.

2 Das Beispiel „reibungsfreies Getriebe“ entstammt dem Schrifttum des VEB Carl Zeiss Jena in den sechziger Jahren des vergangenen Jahrhunderts.

Wir finden das auch im Theoretischen. Im Beitrag von Unzicker (in diesem Band) wird darauf verwiesen, dass durch *Vereinigung der einst getrennten Phänomene* des Elektromagnetismus und der Optik die Anzahl von Konstanten um eins reduziert werden kann, weil die Ausbreitungsgeschwindigkeit von elektrischen Wellen der des Lichtes entspricht, also nicht mehr unterschieden werden muss.

Ein drittes Beispiel: Das Prinzip Einfachheit als *Wirkprinzip* (Hörz 2010) soll an einem Beispiel aus der menschlichen Informationsverarbeitung charakterisiert werden: Gegeben ist folgende Mathematikaufgabe (Heinrich 1997): Wie viel Diagonalen hat ein 23-Eck? So ganz dunkel erinnern wir uns noch an unsere Mathematikkenntnisse aus der Schule; das Problem sollte eigentlich iterativ lösbar sein: Anzahl der Diagonalen eines Vierecks, eines Fünfecks, eines Sechsecks, eines Siebenecks, usw. Auch dann, wenn die Aufstellung einer Iterationsformel erfolgversprechend erscheint, hat man das Gefühl, es mit einer *großen* Schrittanzahl zu tun zu haben und ist deshalb leicht geneigt aufzugeben. Gelingt es aber, diese Aufgabe ins Bildhafte zu übertragen, d. h. sich das Bild eines 23-ecks vorzustellen, wird die Lösung einfach (die Anzahl der Lösungsschritte *klein*; ein mathematisch Hochbegabter löste diese Aufgabe in sechs Sekunden.): Von jeder Ecke führen 22 Linien weg. Davon sind zwei Linien Außenkanten, also keine Diagonalen. Die verbleibenden 20 Linien müssen halbiert werden, da eine Diagonale durch zwei Kanten repräsentiert wird; also zehn Diagonalen gehen von jedem Eckpunkt aus. Da es 23 Eckpunkte gibt, gibt es genau 230 Diagonalen. Die Transformation der Aufgabe in eine bildhaft-anschauliche Vorstellung, also in eine andere Repräsentation, *reduziert* die Anzahl der Lösungsschritte deutlich: eine Vereinfachung. Das ist aber bisher Phänomenologie. Kann man die *Transformation der Aufgabe in eine andere Repräsentation* durch Messung objektivieren, frei von subjektiver Reflexion?

Seit Mitte des vergangenen Jahrhunderts ist unstrittig, dass beim Lösen deduktiver Inferenzprobleme (in der psychologischen Literatur als Ordnungsprobleme bezeichnet, die ein- oder mehrrelational sein können) die Lösungszeit mit wachsender Inferenzschrittanzahl abfällt und nicht ansteigt, wie die formale Logik postuliert. Dieser Widerspruch hat zu der Annahme geführt, dass die Versuchspersonen intern eine lineare Ordnung aufbauen und den (mehrschrittigen) Schlussprozess auf einen (einschrittigen) Vergleichsprozess reduzieren.

Krause, Seifert und Sommerfeld (1987) haben die interne Repräsentation beim Lösen *zweirelationaler* Ordnungsprobleme aus den Lösungszeiten bestimmt und konnten zeigen, dass bei Annahme eines Minkowski-Raumes

sich die subjektive Metrik der internen Repräsentation in den meisten Fällen als euklidische Metrik im zweidimensionalen subjektiven Raum abbilden lässt. Die Antwortprozedur ist dann eine Abstandsbestimmung im subjektiven Raum und nicht eine größere Anzahl von Inferenzschritten.

Ob diese Interpretation so nachvollzogen wird oder nicht, mag durchaus strittig sein, wichtig ist, dass mit dieser Analyse mentaler Repräsentationen Eigenschaften nachweisbar sind, die im Text (also der externen Repräsentation) nicht enthalten sind. Sie müssen das Resultat der Transformation des Textes in eine interne Repräsentation (kognitive Struktur) sein (Krause 2000).

Uns geht es hier um die Transformation ins Bildhaft-Anschauliche und die Vereinfachung. *Die Anwendung des Prinzips Einfachheit hat hier die Transformation in eine andere Repräsentation zur Voraussetzung.* Soweit ein Beispiel für die 3. Kategorie: Prinzip Einfachheit als Wirkprinzip (Hörz 2010).

Zur Definition für ein Prinzip Einfachheit

In dem Bemühen, das *Prinzip Einfachheit* zu definieren, bevorzugen wir den Gedanken: *eine Anzahl wird kleiner*, bezogen auf eine Ausgangs- bzw. Referenzsituation. Eine Verringerung der Anzahl bezieht sich – wie aus den Beispielen hervorgeht – sowohl auf eine geringere Anzahl von Operationen in einem Lösungsprozess als auch auf eine geringere Anzahl von Elementen und Relationen einer Struktur. Auch die von Alexander Unzicker bevorzugte Definition ordnet sich hier ein: „Einfache Naturgesetze sind mit einer *Reduzierung der Anzahl* unabhängiger Naturkonstanten verbunden“ (Unzicker in diesem Band). Rainer Schimming (in diesem Band) stellt der Einfachheit die Komplexität gegenüber und behandelt vor dem Hintergrund dieser Dialektik die Frage der Messbarkeit. Er verdeutlicht, dass dieses Problem der Messbarkeit in einer Vielzahl von Disziplinen der Theoretischen Informatik vorkommt. Erinnert sei nur an die Erörterung von Komplexitätsmaßen. Der Gedanke der „Anzahl“ ist vielen Betrachtungen gemeinsam. Deshalb haben wir ihn – gleichsam als Vereinfachung – in den Vordergrund gerückt. Zugleich wird durch seinen Beitrag aber deutlich, dass im Arbeitskreis nur ein geringer Teil möglicher Fragestellungen zum Prinzip Einfachheit angesprochen werden konnte.

Das Prinzip Einfachheit in anderen Disziplinen

Die Frage, ob das in der menschlichen Informationsverarbeitung gefundene und dort an bestimmte Voraussetzungen gebundene Prinzip Einfachheit auch in *anderen* Disziplinen eine wichtige Rolle spielen kann, kann mit „ja“ be-

antwortet werden. Karl-Heinz Bernhardt (2016) hat in seinem Beitrag darauf hingewiesen, dass unter der *Voraussetzung* von Kenngrößen des globalen Klimawandels (Strahlungsantrieb, Klimasensitivität) und „unter der Annahme verschiedener, von der gesellschaftlichen und technologischen Entwicklung abhängiger Szenarien künftiger Treibhausgasemissionen“ *Vorhersagen* „für die Veränderung der globalen Mitteltemperatur an der Erdoberfläche und den zu erwartenden Meeresspiegelanstieg“ *möglich geworden* sind.

> „Auf dieser Grundlage wurde auch das viel diskutierte, auf der Weltkonferenz in Calcun im Jahre 2010 erstmals international anerkannte Ziel formuliert, die globale Erwärmung auf 2 Grad C gegenüber der vorindustriellen Ära zu beschränken ... Dabei kann auch die maximal zulässige Menge fossilen Kohlenstoffs angegeben werden, die noch verbrannt werden darf, ohne dieses ... Begrenzungsziel für die anthropogen bedingte globale Erwärmung zu verfehlen.“ (Bernhardt 2016)

Prinzip Einfachheit als Erkenntnisprinzip beim Finden adäquater Modelle des globalen Klimawandels unter der Voraussetzung der Transformation traditioneller Größen der Meteorologie (Temperatur, Druck, usw.) in Kenngrößen des Prozesses des globalen Klimawandels.

Das Prinzip Einfachheit in der Pädagogik erörtert Franz Prüß (in diesem Band) in seinem Beitrag. Meisel (in diesem Band) befasst mit der Therapie neurologischer Erkrankungen. Der Beitrag verdeutlicht, dass ein Prinzip Einfachheit, angewandt auf die Therapie, eine individualisierte Medizin im Blickwinkel hat. Dennoch wird offenbar, dass es sich hier um eine dialektische Einheit von Einfachheit und Komplexität handelt, die das Herausschälen von Voraussetzungen für bzw. die Schaffung von Voraussetzungen für ein Prinzip Einfachheit nicht leicht macht. Mit dem Prinzip Einfachheit in der Evolution befasst sich Werner Ebeling (2016) in seinem Beitrag im Band 125/126. Im Beitrag von Erdmute Sommerfeld (in diesem Band) wird am Beispiel der „Darwinfinken“ gezeigt, dass ein Prinzip der Schaffung von Voraussetzungen für einfache Prozesse auch unabhängig vom Menschen zu beobachten ist. Aus einer ersten Analyse von Beiträgen aus naturwissenschaftlichen, geisteswissenschaftlichen und sozialwissenschaftlichen Disziplinen resultieren Beispiele, die dafür sprechen, dass eine solche Schaffung von Voraussetzungen für einfache Prozesse ein disziplinübergreifendes Prinzip sein kann. Dennoch – so weist die Autorin darauf hin – erlauben einzelne Beispiele noch keine Generalisierung. Fundierte Aussagen darüber, ob diese Beispiele empirisch belegt sind, widerlegt werden können oder noch zu überprüfen sind, können nur von den entsprechenden Fachwissenschaftlern gemacht werden.

Voraussetzungen und Schaffung von Voraussetzungen für Einfachheit

Im obigen Beispiel („Wieviele Diagonalen hat ein 23-Eck?“) ist die Voraussetzung für die Verringerung der Schrittanzahl beim Lösen des mathematischen Problems die bildhaft-anschauliche Vorstellung, und die Schaffung einer solchen Voraussetzung beinhaltet die Transformation der begrifflichen Repräsentation des Problems in eine bildhaft-anschauliche Vorstellung. Dass dieser Prozess keineswegs einfach ist, versteht sich von selbst. Aber eins ist uns wichtig: das Prinzip Einfachheit ist an eine Struktur (kognitive Struktur, interne Repräsentation) gebunden, die erst eine Verringerung der Schrittanzahl ermöglicht. Die Bildung oder *Schaffung* einer solchen Struktur kann ein sehr aufwändiger Prozess sein, der wiederum eine Flexibilität von Elementen und Relationen und ein entsprechendes Steuerkriterium (Motiv, Bestreben) voraussetzt. Um beim obigen Beispiel zu bleiben, die Fähigkeit der Transformation der Aufgabe von einer begrifflichen in eine bildhaft-anschauliche Vorstellung, die eine Verringerung der Lösungsschrittanzahl ermöglicht, muss erlernt oder sogar trainiert werden. Mathematisch Hochbegabten fällt das viel leichter als mathematisch Normalbegabten. Auch die von Unzicker (in diesem Band) postulierte Herstellung von Beziehungen zwischen Gebieten der Physik unter Erfüllung eines Äquivalenzprinzips ordnet sich hier als Voraussetzung ein. In seinem Beitrag demonstriert er, wie erst durch die Vereinigung von physikalischen Theorien Naturkonstanten eliminiert werden können.

Der vorläufige Versuch, für den zweiten Komplex unseres Arbeitskreises „Schaffung von Voraussetzungen für Einfachheit“ etwas Allgemeines zu formulieren, könnte lauten:

- Transformation von Elementen in Elemente so, dass abgeleitete bzw. abzuleitende Information mit integriert wird (Beispiel Meteorologie, statt Temperatur und Druck Strahlungsantrieb).
- Transformation von Strukturen in Strukturen so, dass abgeleitete bzw. abzuleitende Information mit integriert wird (Beispiel menschliche Informationsverarbeitung, Lösung deduktiver Inferenzen, Lösung von Ordnungsproblemen).
- Transformation von Modalitäten (Beispiel menschliche Informationsverarbeitung, Lösung geometrischer Probleme, Transformation von mathematischen Formeln in geometrische Figuren, Transformation von Texten in Bilder), aber auch Transformation von Wissen (Beispiel Physik, Vereinigung von Theorien) oder allgemein Transformation von Räumen.

Diese Transformationsprozesse sind bisher kaum aufgeklärt. Um solche möglichen Prozesse zur Schaffung von Voraussetzungen in einem Begriff zu erfassen, spricht Erdmute Sommerfeld in ihrem Beitrag von der *Bildung von Makroelementen*.

Wie kann man solche Transformationsprozesse anregen, wie also die geforderten Voraussetzungen schaffen?

Wir müssten jene Prozesse kennen, die die oben skizzierten Transformationsprozesse bewirken – und das disziplinübergreifend. Dann könnte vereinfachendes Denken auch gelehrt werden – und zwar disziplinübergreifend.

Wenn wir die oben skizzierten Transformationsprozesse allgemein kennen und auch disziplinübergreifend vermitteln können, dann sollte es möglich sein, disziplinübergreifend Prozesse zu vereinfachen, wie das am Beispiel der Pädagogik (Prüß in diesem Band) dargestellt ist. So könnte vereinfachendes Denken gefördert werden. Die Aufklärung der oben skizzierten Transformationsprozesse und deren Bedingungen könnte ein Thema für einen weiteren Arbeitskreis sein.

So bedeutsam dieses Postulat der Förderung auch sein mag, über eines müssen wir uns im Klaren sein: Die Methoden, die zur Erfüllung der Ziele unseres Arbeitskreises verwendet wurden, waren die des Vergleichens, des Prüfens von Ähnlichkeiten etc., also weiche Methoden, mit denen Fehler unvermeidbar sind. Wenn wir das obige Postulat der Förderung exakt erfüllen wollen, bedarf es der Vorausberechenbarkeit, die nur durch eine *Theorie* der menschlichen Informationsverarbeitung erfüllt werden kann. Der Arbeitskreis hat diese schmerzliche Lücke besonders deutlich werden lassen, zugleich aber eine Vision genährt: das Prinzip Einfachheit könnte ein erstes Axiom sein.

Solange solche Theorien fehlen, muss das Prozessgeschehen auf der Beschreibungsebene erfolgen, wie Franz Prüß (in diesem Band) dies für das komplexe und komplizierte Prozessgeschehen der Allgemeinen Didaktik der Pädagogik zeigt. Die Auswahl begrenzter Operationenfolgen macht „angestrebte Resultate in begrenzten Zeiträumen sichtbar, minimiert Misserfolge und vermeidet sonst notwendige Wiederholungen," wie Franz Prüß schreibt. Darin äußert sich hier der Vorteil der Vereinfachung.

Die Schaffung von Voraussetzungen für einfache Prozesse der Anforderungsbewältigung ist der erste Schwerpunkt im Beitrag von Erdmute Sommerfeld. Die Bildung von Makroelementen spielt als Voraussetzung für das

Wirksamwerden des Prinzips Einfachheit eine wichtige Rolle. Schließlich wird in einem zweiten Schwerpunkt nach der Schaffung von Voraussetzungen für einfache Prozesse auch in anderen Disziplinen gefragt und damit die Frage nach der Allgemeingültigkeit gestellt. Bemerkenswert ist die Methode. Ein und dasselbe Schema wird zur Analyse aller Disziplinen angewendet. Nur so können Gemeinsamkeiten und Unterschiede deutlich werden. Natürlich kann man da manches auch anders sehen, aber der verhängnisvolle Brauch, Arbeiten unterschiedlicher Disziplinen beziehungslos nebeneinander zu stellen und das Ganze dann als interdisziplinär zu bezeichnen, wird hier durchbrochen.

Man kann diesen zusammenfassenden Beitrag noch unter einem anderen Aspekt beleuchten. Es ist eine allgemeine Annahme, dass Laborbefunde auch in der Praxis gelten und umgekehrt, Erscheinungen in der Praxis auch im Labor nachweisbar sind. Diese Plausibilität gilt auch für die menschliche Informationsverarbeitung: Eigenschaften der menschlichen Informationsverarbeitung, nachgewiesen im Experiment, sollten sich auch in der Vielfalt menschlicher Tätigkeiten in den verschiedensten Disziplinen niederschlagen. Dies wird in diesem Beitrag gezeigt. Indem die Ergebnisse der Beiträge des zehnjährigen Arbeitskreises unter dem Aspekt der Schaffung von Voraussetzungen für einfache Prozesse in systematischer Weise analysiert und zusammenfasst wurden, kann für eine Reihe von Beispielen aufgezeigt werden, dass ein Prinzip der menschlichen Informationsverarbeitung, nachgewiesen im Labor, in den verschiedensten Disziplinen praktisch wirksam ist.

Man mag darüber streiten, ob die eine oder andere Interpretation so oder so benannt werden sollte. Die hier verwendete Methode des Vergleichens gehört zu den „weichen“ Methoden, wie Lothar Sprung (1984) zu sagen pflegte. Damit sind natürlich auch bei der Replikation Abweichungen nicht ungewöhnlich.

Am Ende der Tätigkeit unseres Arbeitskreises, nach zehn Jahren, 23 publizierten Beiträgen und zahlreichen Diskussionen ist es Zeit, ein Resümee zu ziehen. Wissen wir nun mehr als zu Beginn der Arbeit unseres Arbeitskreises Prinzip Einfachheit?

Ein Prinzip Einfachheit (eine Anzahl wird kleiner) haben wir angegeben. Die Schaffung von Voraussetzungen für einfache Prozesse (Bildung von Makroelementen) haben wir analysiert. Das Prinzip Einfachheit findet sich in verschiedenen Disziplinen. Es ist wirksam, wenn die Voraussetzungen geschaffen werden können. Bedingungen dazu sind formuliert (Transformationsprozesse). Damit hat der Arbeitskreis seine Aufgabe erfüllt.

Ein Wort des Dankes geht an alle Beteiligten. Der Arbeitskreis war – dem Charakter der Leibniz-Sozietät folgend und diesen Vorteil nutzend – interdisziplinär zusammengesetzt. Interdisziplinarität birgt die Gefahr des Nebeneinanderstellens in sich. Genau das Gegenteil war der Fall.

Die Diskussionen waren hart in der Sache, aber getragen von hohem Respekt gegenüber der Argumentation des anders Denkenden. Die Bemühungen, sich in die Denkweise der Vertreter der jeweils anderen Disziplin zu vertiefen, waren gepaart mit vitaler Neugier und Hochachtung vor den Schlussfolgerungen der Vortragenden und Diskutanten. Ins Ökonomische gewendet, jeder bekam mehr als er gab. Für dieses hohe Engagement sei allen Beteiligten gedankt.

Berlin, im Januar 2022

Werner Krause,
Erdmute Sommerfeld,
Herbert Hörz

Literatur

Bernhardt, K.-H. (2010): Diskussionsbemerkungen zur „Einfachheit". Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften, Bd. 108. Berlin: trafo Verlag, 121–125. https://leibnizsozietaet.de/wp-content/uploads/2012/11/09_bernhardt2.pdf

Bernhardt, K.-H. (2016): Komplexität und Einfachheit im Klimasystem der Erde. Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften, Bd. 125/126. Berlin: trafo Verlag, 25–47. https://leibnizsozietaet.de/wp-content/uploads/2016/01/K-H.-Bernhardt.pdf

Ebeling, W. (2016): Ist Evolution vom Einfachen zum Komplexen gerichtet? Über Werte und Emergenz. Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften, Bd. 125/126. Berlin: trafo Verlag, 69–80. https://leibnizsozietaet.de/wp-content/uploads/2016/01/W.-Ebeling.pdf

Heinrich, F. (1997): Diskussionsmaterial zur Untersuchung der Doppelrepräsentationshypothese und einige Bemerkungen aus mathematikdidaktischer Sicht (unveröffentlicht).

Hörz, H. (2010): Philosophischer Reduktionismus oder wissenschaftlich berechtigte Reduktionen? Zu den erkenntnistheoretischen Grundlagen des Prinzips Einfachheit. Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften, Bd. 108. Berlin: trafo Verlag, 11–36. https://leibnizsozietaet.de/wp-content/uploads/2011/05/02_hoerz.pdf

Hörz, H./Krause, W./Sommerfeld, E. (Hrsg.) (2016a): Einfachheit als Wirk-, Erkenntnis- und Gestaltungsprinzip (II): Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät, Bd. 125/126. Berlin: trafo Verlag. https://leibnizsozietaet.de/wp-content/uploads/2012/10/Band-125-126-Gesamtdatei-neu.pdf

Hörz, H./Krause, W./Sommerfeld, E. (2016b): Sind komplexe Systeme einfach? Bilanz des Arbeitskreises „Prinzip Einfachheit. Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät der Wissenschaf-

ten, Bd. 125/126. Berlin: trafo Verlag, 7–24. https://leibnizsozietaet.de/wp-content/uploads/2016/01/H.Hörz-W.Krause-E.Sommerfeld.pdf

Krause, W./Seifert, R./Sommerfeld, E. (1987): Ausbildung und Transformation kognitiver Strukturen im Problemlösen. Forschungsbericht, ZKI-Informationen 2/87. Berlin: Zentralinstitut für Kybernetik und Informationsprozesse, Akademie der Wissenschaften der DDR.

Krause, W. (2000): Denken und Gedächtnis aus naturwissenschaftlicher Sicht. Göttingen: Hogrefe.

Sommerfeld, E. (2010a): Ganztägige wissenschaftliche Plenarveranstaltung „Einfachheit als Wirk-, Erkenntnis- und Gestaltungsprinzip“ am 8. April 2010, Einführung. Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften, Bd. 108. Berlin: trafo Verlag, 7–9. https://leibniz sozietaet.de/wp-content/uploads/2011/05/01_sommerfeld1.pdf

Sommerfeld, E. (2010b): Einfachheit – ein Grundprinzip in den unterschiedlichsten Disziplinen? Anregungen zur interdisziplinären Diskussion. Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften, Bd. 108. Berlin: trafo Verlag, 145–163. https://leibnizsozietaet.de/wp-content/uploads/2011/05/15_sommerfeld.pdf

Sommerfeld, E./Hörz, H./Krause, W. (Hrsg.) (2010): Einfachheit als Wirk-, Erkenntnis- und Gestaltungsprinzip (I), Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften, Bd. 108. Berlin: trafo Verlag. https://leibnizsozietaet.de/wp-content/uploads/2012/10/Gesamtband-SB-108-2010.pdf

Sprung, L./Sprung, H. (1984): Grundlagen der Methodologie und Methodik der Psychologie. Berlin: VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften.

Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften zu Berlin *149 (2022), 17–25*

Rainer Schimming

Essay über Einfachheit

Kurzfassung

Einfachheit kann nur zusammen mit ihrem Gegensatz, d. h. Komplexität, verstanden und diskutiert werden. Eine gewisse Unschärfe dieser Begriffe ist typisch für komparative Eigenschaften. Wir schlagen Definitionen vor, behandeln die Begriffslogik sowie exemplarisch Einfachheit als Erkenntnis- bzw. Wirkprinzip und fragen schließlich nach Komplexitätsmaßen. Die volle Wirklichkeit ist überkomplex und kann nicht vermessen werden; erst Abstraktionsprozesse führen zu endlicher Komplexität. Ein universelles Maß gibt es allerdings nicht. Eine vorgestellte Realisierung auf einem Computer hilft weiter, führt auf eine Reihe naheliegender Komplexitätsmaße.

Abstract

Simplicity can be reasonably studied and understood only together with its opposite – complexity. Both these terms are somewhat fuzzy, which is typical for comparative properties. Here we propose definitions, and we discuss conceptual logic, epistomology, as well as some appearances of simplicity and complexity. Last but not least, we ask for numerical measures of complexity. Full reality is over-complex and, therefore, cannot be measured. An effort of abstraction is needed to make the world measurable. Computer science helps to find numerical measures of complexity. There is a variety of these; a universal measure is not available.

1. Einleitung

Der vorliegende Aufsatz hat das Paar gegensätzlicher Eigenschaften Einfachheit und Komplexität zum Gegenstand. Sowohl formale als auch inhaltliche Aspekte, d. h. Begriffslogik einerseits und Bedeutungen andererseits, kommen zur Sprache. Unsere Definition stützt sich auf den Begriff der Struktur, über den wir an anderer Stelle geschrieben haben (Schimming 2019): Einfach heißt wenig strukturiert, komplex heißt reich strukturiert. Unschärfe, nämlich Abhängigkeit von einer Situation des Vergleichs, ist hierbei nicht zu vermeiden, denn diese ist typisch für komparative Eigenschaf-

ten. Wir stellen eine kurze Taxonomie von Eigenschaften und Relationen zusammen (Teil 4). Allgemein unterscheidet man rein klassifikatorische, komparative und metrische Eigenschaften. Unter Umständen kann eine komparative zu einer metrischen Eigenschaft avancieren. Diese besondere Frage werfen wir für Einfachheit und Komplexität auf (Teil 5).

Zu den inhaltlichen Bedeutungen hat man eine eingängige Formel gefunden: „Einfachheit tritt auf als Wirk-, Erkenntnis- und Gestaltungsprinzip“ (Sommerfeld et al. 2010; Hörz et al. 2016). Hier betrachten wir Einfachheit als Erkenntnisprinzip in Teil 2 und als Wirkprinzip in Teil 3. Der Begriff „Prinzip“ wird häufig verwendet, ohne dass man sich auf eine Definition einigen konnte. Wir schlagen vor: Ein Prinzip ist eine leitende Idee, aufgefasst als Einheit von Sachaussage und Wertung. Der Inhalt der Sachaussage ist ein Wirkprinzip, die Wertung leitet Erkenntnis und Gestaltung an (Schimming/ Hörz 2009).

Dieser Essay setzt fort bzw. ergänzt vorangegangene Aktivitäten des „Arbeitskreises Einfachheit“ der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften zu Berlin (Sommerfeld et al. 2010; Hörz et al. 2016). Die Artikel der beiden Bände des Arbeitskreises bilden den Hintergrund unserer Überlegungen ohne dass wir diese einzeln zitieren. Vollständigkeit wird nicht angestrebt; einige ausgewählte Aspekte werden angesprochen.

2. Vereinfachung im Erkenntnisprozess

Den Menschen, genauer die Gattung *homo*, gibt es seit mehr als zwei Millionen Jahren auf der Erde. Die erstaunliche Persistenz verdankt er wesentlich seiner einzigartigen Fähigkeit zur Erkenntnis. Ein ganzer Zweig der Philosophie – Epistemologie – befasst sich damit. Hier gehen wir auf die Rolle von Vereinfachung im Erkenntnisprozess ein.

Die äußere Welt erscheint zunächst, d. h. unreflektiert, als unübersichtlich und widerständig. Im Zuge besserer Kenntnis erweist sie sich jedoch zum Glück als geordnet. Der Mensch kann die objektive Ordnung erkennen und in den Dienst nehmen. Das Weltbild avanciert so vom Chaos zum Kosmos (in den ursprünglichen Bedeutungen dieser Begriffe). Eine Ordnung O einer Struktur S ist per definitionem ein Regelwerk, welches S bestimmt und einfacher als S ist. Der Begriff der Regel sei dabei weit gefasst. O ist selbst wieder eine Struktur, erlaubt aber eine Beschreibung, die deutlich kürzer ist als eine 1-zu-1-Beschreibung von S. Es kann auch sein, dass S zu komplex für eine vollständige Bestandserhebung ist, dass erst O, stellvertretend für S, beschreibbar ist. Gerade so verhält es sich nach Ansicht einiger Philosophen, denen wir uns anschließen, mit der physischen Welt als S und

mit den Naturgesetzen samt Nebenbedingungen als O: Es heißt, die Welt sei unerschöpflich im Sinne von Hegels „wahrhafter Unendlichkeit“ (Hegel 1988; Hörz 2009). Und nicht nur das Weltganze sei unerschöpflich, sondern sogar jeder Ausschnitt mit unvermindertem Wirklichkeitsgehalt (Lenin 1975). Die These von der Erkennbarkeit der Welt – korrekter sollte man die Erkennbarkeit ihrer Ordnung als Prinzip setzen – wird trotz dieser erschwerenden Umstände aufrecht erhalten. Unter Verwendung des philosophischen Kategorienpaars Wesen versus Erscheinung stellen wir fest: Die Gesamtheit der Erscheinungen ist überkomplex, das Wesen – nämlich die Ordnung – ist hinreichend einfach und kann deshalb erkannt werden.

Sprache ist die Form der Erkenntnis. Einige Philosophen halten sie für die gesuchte *conditio humana* (Cassirer 1964). Ehe der Mensch an die Dinge selbst herangeht, hantiert er probeweise mit den sprachlichen bzw. mentalen Repräsentanten. Das Denken und die Kommunikation werden vor das Handeln gesetzt. Die so erreichte „Kostenersparnis“ bei der Durchsetzung in widerständiger Umgebung ist ein entscheidender Evolutionsvorteil. Die sprachliche Form ermöglicht es übrigens auch, Komplexitätsmaße zu finden; dazu später.

3. Objektive Dialektik von Einfachheit und Komplexität

Bemühen wir uns um eine aufbauende Betrachtung der physischen Welt und beginnen wir mit elementaren Quantitäten – Ausmaßen und Entfernungen, räumlichen und zeitlichen! Wir legen sozusagen ein Lineal an die Welt an. Dieses wird per Konvention geeicht, indem menschliche Maßstäbe zur Mitte bzw. zum Moderaten erklärt werden:

- Der Mesokosmos ist per definitionem den unbewehrten menschlichen Sinnen zugänglich.
- Alles Kleinere bildet den Mikrokosmos.
- Alles Größere bildet den Makrokosmos.

Der Anblick des Sternenhimmels vermittelt zwischen Meso- und Makrokosmos. Zwischen Meso- und Mikrokosmos gibt es keine solche Vermittlung. Fortgeschrittene Technik macht die beiden nicht mittleren Etagen zugänglich: Das sehr Kleine wird mit Mikroskopen erforscht, das sehr Große mit Teleskopen. Dabei ist ein Teilchenbeschleuniger ein besonderes Mikroskop, und eine in den Weltraum gerichtete Antenne eine Art von Teleskop.

Wie bei den Quantitäten, so ergibt sich auch bei den Qualitäten eine Dreiteilung. Diese ist schon aus dem Alltag geläufig: Ein Stein, ein Käfer,

ein Spielzeug sind untereinander offenbar wesentlich verschieden. Die hohe Philosophie gliedert die Welt in Bewegungsformen (Engels 1961) oder Schichten (Hartmann 1946):

– Anorganisches, d. h. die unbelebte Natur.
– Organisches, d. h. die lebendige Natur.
– Humanes, d. h. der Mensch mit seinen Werken.

Dies sind die wesentlichen Komplexitätsklassen der äußeren Welt, außerdem Stadien einer Entwicklung vom Einfachen zum Komplexen. Diverse Klassifikationen bauen auf dieser Trichotomie auf. Physik, Biowissenschaften, Humanwissenschaften sind auf die Schichten spezialisiert und ihre Disziplinen auf Unterschichten. Das Lebendige gliedert man heute in fünf Reiche – Tiere, Pflanzen, Pilze, dazu zwei Reiche von Mikroben (im Mikrokosmos angesiedelte Organismen). Der Begriff des Humanen setzt eine Klammer um verschiedenartige komplexe Strukturen (Hörz 1988):

– Menschlicher Geist, Denken und Fühlen.
– Gesellschaft, soziale Strukturen.
– Ideelle und materielle Werke des Menschen.

En passant sei bemerkt, dass die Komplexität menschlicher Erzeugnisse auch Kompliziertheit heißt.

Über jede Schicht und Unterschicht weiß man heute viel; allein die Übergänge – die Entstehung von Leben bzw. Vernunft – bleiben weiter rätselhaft (DuBois-Reymond 1974; Bohnet 2020).

Naturphilosophie umfasst auch eine Dialektik von Teil und Ganzem (Hörz 2009; Schimming 2019). Ein vorgestellter Baumeister der physischen Welt könnte eine Art „Lego“ spielen. Tatsächlich realisiert die Natur ein Lego-Prinzip – den Atomismus in einem allgemeinen Sinn. Demnach ist die stoffliche Materie körnig beschaffen, besteht aus standardisierten kleinen Bausteinen. Wenige Typen von Elementen und wenige Vorschriften der Zusammensetzung konstituieren die „Spielregeln“. Ein so einfacher Baukasten liegt der bunten und bewegten mesoskopischen Welt zugrunde.

Eine Vorstellung von Atomen kam in der Antike auf; man hielt diese für unteilbar und wegen ihrer Kleinheit für unsichtbar. Der rezente Atomismus weiß es besser, kennt eine Hierarchie kleiner und noch kleinerer Bausteine – Kristallzellen, Moleküle, Atome, Atomkern und -hülle, Elementarteilchen, Fundamentalteilchen (Konstituenten der Elementarteilchen). Eine Hierarchie großer und noch größerer Strukturen prägt auch den Makrokosmos: Ein Planet ist meist von Monden begleitet, und er umrundet einen Stern oder meh-

rere Sterne. Viele derartige Systeme gruppieren sich zu Sternhaufen oder Galaxien, diese zu Clustern und noch weiter. Schließlich ist der Mesokosmos ebenfalls von abgegrenzten Dingen bevölkert. Auffällig ist eine hierarchische Ordnung des Organischen: Molekül – Organelle – Zelle – Gewebe – Organ – Organismus – Population – Ökosystem. Die biologische Systematik klassifiziert die Organismen. Als Verwaltung der Vielfalt entstanden, betrachtet man sie heute als Ausdruck der stattgefundenen Evolution.

An den beiden quantitativen Enden des bisher Bekannten treten Vermutungen an die Stelle von Wissen: Man spekuliert über winzige Strings als Konstituenten der Fundamentalteilchen am unteren Ende und über das Multiversum als Ensemble von Universen am oberen Ende.

4. Eine kurze Taxonomie von Eigenschaften und Relationen

Die einschlägige Begriffslogik beginnt mit dem bekannten Dualismus: Jedes Ding hat Eigenschaften und jede Eigenschaft kommt einer Reihe von Dingen zu (Ujomow 1965; Pfanzagl 1968). Eine s-stellige Relation setzt mehrere Dinge gleichzeitig, genauer je s Stück, zueinander in Beziehung. Eine Eigenschaft kann man als eine einstellige Relation betrachten. Eine Relation im engeren Sinne (ohne terminologischen Zusatz) ist zweistellig.

Eine Eigenschaft, auch Merkmal oder Attribut genannt, kann sprachlich durch ein Substantiv oder ein Adjektiv ausgedrückt werden. Zum Beispiel redet man wahlweise von Einfachheit und Komplexität oder aber von „einfach“ und „komplex“. Ein Adjektiv kann Steigerungsformen haben – Positiv, Komparativ, Superlativ. Daran knüpft die folgende Einteilung an (Carnap 1958; Prechtl/Burkhard 2008). Carnap redet dabei von „Begriffsformen“; tatsächlich meint er Eigenschaften:

- Eine rein klassifikatorische Eigenschaft, z. B. wahr – falsch, natürlich – künstlich, tot – lebendig, wird nicht gesteigert. (Wir präsentieren die Beispiele als antonymische Paare.)
- Eine komparative Eigenschaft, z. B. klein – groß, gut – schlecht, einfach – komplex, heißt so, weil der Positiv eigentlich durch Ausblenden eines Kontextes aus dem Komparativ hervorgeht.
- Bei einer metrischen Eigenschaft – zusammen mit ihrem Antonym – tritt eine numerische Skala an die Stelle der drei Steigerungsformen. Eine solche Eigenschaft kann verschieden stark ausgeprägt sein; ein Wert auf der Skala gibt den Grad der Ausprägung an (Pfanzagl 1968). Die Angabe ist das Produkt aus einer reinen Zahl und einer Maßeinheit.

Ein Komparativ, z. B. „kleiner“, „besser“, „einfacher“, ist der verkürzte Ausdruck einer Relation, z. B. „kleiner als“, „besser als“, „einfacher als“. So führt das Studium von Eigenschaften zu den Relationen. Die hier angeführten Beispiele sind irreflexive Relationen. Günstiger ist es, die zugeordneten reflexiven Relationen zu studieren, z. B. hier „nicht größer als“, „nicht schlechter als“, „nicht komplexer als“. Dazu invers sind „nicht kleiner als“, „nicht besser als“, „nicht einfacher als“. Solche zu komparativen Begriffen gehörigen Relationen sind reflexiv und transitiv, mithin Präordnungen. Jede Präordnung R ist aus einem symmetrischen Anteil S und einem asymmetrischen Anteil A zusammengesetzt. S zeigt die in R enthaltenen Ähnlichkeiten an und A die in R enthaltenen Unähnlichkeiten. S ist reflexiv, transitiv und symmetrisch, mithin eine Äquivalenzrelation. S induziert eine Zerlegung des Dingbereichs in Äquivalenzklassen. A ist irreflexiv, transitiv und asymmetrisch, mithin eine Halbordnung. Je zwei Dinge des betrachteten Bereichs sind entweder äquivalent oder werden halbgeordnet miteinander verglichen oder aber sind unvergleichbar. Linearität, d. h. Vergleichbarkeit beliebiger Elementepaare des Dingbereichs, liegt im Allgemeinen nicht vor. Im Spezialfall, wenn die Eigenschaft zu einer metrischen avanciert, so wird die zugehörige Relation linear.

5. Zur Frage der Messbarkeit

Metrische Eigenschaft und messbare Größe sind gleichwertige Begriffe. Sie sind von großer Bedeutung für die Physik und andere Wissensbereiche. Man kann mit ihnen rechnen; die Disziplin Metrologie ist dem gewidmet. Man unterscheidet extensive und intensive Größen, kurz Quantitäten und Intensitäten. Eine Quantität ist per definitionem additiv im Sinne der mathematischen Maßtheorie; Beispiele sind Länge, Zeitdauer, Masse, Energie. Für eine Intensität gilt dagegen ein Mittelwertprinzip; Beispiele sind Temperatur, Druck, Dichte.

Eine komparative Eigenschaft heißt messbar, falls sie zu einer metrischen Eigenschaft avancieren kann. Das Paar Eigenschaft & Antonym geht dann in der messbaren Größe auf.

Hier fragen wir nach der Messbarkeit von Einfachheit & Komplexität. Dies ist ein viel diskutiertes großes Thema; gleich mehrere Disziplinen der sogenannten Theoretischen Informatik befassen sich damit – Kodierungstheorie, Automatentheorie, Algorithmentheorie, Berechenbarkeitstheorie. Hier beschränken wir uns auf pointierte Bemerkungen.

Aus der Philosophie, jedenfalls aus der Richtung, die unsere Zustimmung hat, kommt zuerst ein abschlägiger Bescheid: Ungeschmälerte Wirklichkeit

ist unerschöpflich, mit anderen Worten – die Komplexität überschreitet jedes Maß, hat den Wert unendlich (wenn man diese Sprechweise zulässt). Erst im Zuge der Erkenntnis vorgenommene Vereinfachung eröffnet die Möglichkeit des Messens. Eine weitere Schwierigkeit tut sich auf: Die Vielfalt von Strukturen und Situationen lässt kein einheitliches Komplexitätsmaß erwarten. Wo überhaupt gemessen werden kann, ist Pluralität der Maßzahlen zu erwarten.

Wir besinnen uns an dieser Stelle auf die Sprache als die universale Form der Erkenntnis: Jede Überlegung und jedes Wissen kann sprachlich dargestellt werden. Denkeinheiten erscheinen als Texte. Ein Text ist formal gesehen eine Abfolge von Zeichen aus einem vereinbarten Zeichenvorrat. In der abstrakten einschlägigen Theorie heißt ein Zeichenvorrat Alphabet und ein Text heißt auch einfach Wort. Die Wahl des Alphabets ist nicht wichtig, denn man kann stets von dem einen in das andere umkodieren. Für Texte gibt es nun eine große Auswahl an Komplexitätsmaßen. Wir favorisieren zwei davon – (a) die Länge (d. h. Anzahl Zeichen) des Textes, (b) den Informationsgehalt nach Shannon. Letzterer ist der Grundidee nach die Anzahl der Antworten auf ja-nein-Fragen, die es mindestens braucht, um den Text zu rekonstruieren. Die Maßeinheit ist das Bit; jedes Bit zählt eine binäre Entscheidung. Die einfache Idee funktioniert allerdings nur in Spezialfällen. Für den allgemeinen Fall betrachtet man ein entsprechendes Frage-Antwort-Spiel als zufälligen Prozess. Die Größe (b) ist der Erwartungswert der Anzahl von benötigten ja-nein-Entscheidungen. Die berühmte Formel von Shannon drückt den Informationsgehalt durch die Wahrscheinlichkeiten aus, mit denen die aufeinander folgenden Zeichen im vorgelegten Text zu erwarten sind.

Wie jede Struktur S kann ein Text mehr oder weniger geordnet sein. Eine Ordnung wurde oben als Regelwerk definiert; hier kann sie mit einem Programm identifiziert werden, welches den Text erzeugt. Ein Programm ist eine Abfolge von standardisierten Anweisungen. Aus den Ausgabe-Anweisungen soll sich der in Rede stehende Text zusammensetzen. Eine Ordnung O ist ein erzeugendes Programm, welches kürzer ist als der Text S. Die Länge des kürzesten solchen Programms ist ein natürliches Komplexitätsmaß; es heißt algorithmische Komplexität nach Kolmogorov und Chaitin (Chaitin 1987).

Ein Algorithmus ist ein noch von Variablen abhängiges Programm, welches jedes durch eine Belegung der Variablen spezifizierte Problem einer gegebenen Problemklasse in endlich vielen Schritten lösen soll. Sehr hilfreich ist die Vorstellung, dass ein Programm bzw. ein Algorithmus auf einem Computer realisiert wird. Sie führt auf eine Reihe natürlicher Komplexitäts-

maße: Der benötigte Speicherplatz heißt Raumkomplexität, die Anzahl der Schritte bei einem Durchlauf des Algorithmus heißt Zeitkomplexität. Wenn es keine eindeutige Anzahl gibt, sondern eine statistische Verteilung zu den möglichen Durchläufen, so kann man minimale, mittlere und/oder maximale Werte als Komplexitätsmaße definieren. Im einfachsten Fall wird der Umfang eines Problems durch eine natürliche Zahl n gemessen; dann wird die numerische Komplexität zu einer Funktion von n. Eine Taxonomie der Funktionen führt zu einer solchen der Komplexitäten. Die damit zusammenhängende wichtige Frage der Berechenbarkeit oder Nicht-Berechenbarkeit können wir nur erwähnen.

6. Anhang: Relationentheorie

Es seien zweistellige Relationen betrachtet. Eine Formel x R y soll bedeuten: x steht in der Relation R zu y. Per definitionem steht dann y in der zu R inversen Relation zu x.

Eine Relation R heißt

... reflexiv, falls stets x R x .
... irreflexiv, falls niemals x R x .
... transitiv, falls (wenn x R y und y R z , so x R z).
... symmetrisch, falls (wenn x R y , so y R x).
... asymmetrisch, falls (wenn x R y , so nicht y R x).
... linear, falls stets (x R y oder y R x).

Der symmetrische Anteil S von R ist definiert durch x S y , falls (x R y und y R x). Der asymmetrische Anteil A von R ist definiert durch x A y , falls (x R y und nicht y R x). Dann gilt x R y, falls (x S y oder x A y).

Literatur

Bohnet, I. (2020): Die 42 größten Rätsel der Physik. Stuttgart: Kosmos-Verlag.

Carnap, R. (1958): Induktive Logik und Wahrscheinlichkeit. Wien: Springer-Verlag.

Cassirer, E. (1964): Philosophie der symbolischen Formen. Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft.

Chaitin, G. J. (1987): Algorithmische Informationstheorie. Würzburg: Physica-Verlag.

DuBois-Reymond, E. (1974): Vorträge über Philosophie und Gesellschaft. Berlin: Akademie-Verlag.

Engels, F. (1961): Dialektik der Natur. Berlin: Dietz Verlag.

Hartmann, N. (1946): Der Aufbau der realen Welt. Berlin: De Gruyter.

Hegel, G. W. F. (1988): Die Wissenschaft der Logik. In: Philosophenlesebuch. Band 2. Berlin: Dietz Verlag, 365–381.

Hörz, H. (1988): Der Mensch als biopsychosoziale Einheit. In: Geissler, E./Hörz,H. (Hrsg.): Vom Gen zum Verhalten. Berlin: Akademie-Verlag, 1–17.

Hörz, H. (2009): Materialistische Dialektik. Berlin: trafo Verlag.

Hörz, H./Krause, W./Sommerfeld, E. (Hrsg.) (2016): Einfachheit als Wirk-, Erkenntnis- und Gestaltungsprinzip. Sitzungsberichte Leibniz-Sozietät der Wissenschaften. Band 125/126.

Lenin, W. I. (1975): Materialismus und Empiriokritizismus. Lenin Werke. Band 14. Berlin: Dietz Verlag.

Pfanzagl., J. (1968): Theory of Measurement. Würzburg: Physica-Verlag.

Prechtl, P./Burkhard, F. P. (Hrsg.) (2008): Metzler Lexikon Philosophie. Stuttgart: Metzler.

Schimming, R. (2019): Wozu Dialektik? Sitzungsberichte Leibniz-Sozietät der Wissenschaften. Band 139/140, 275–281.

Schimming, R./Hörz, H. (2009): Prinzipien der Physik. Sitzungsberichte Leibniz-Sozietät der Wissenschaften, Band 101, 111–133.

Shannon, C. E. (1976): Mathematische Grundlagen der Informationstheorie. München: Oldenbourg.

Sommerfeld, E./Hörz, H./Krause, W. (Hrsg.) (2010): Einfachheit als Wirk-, Erkenntnis- und Gestaltungsprinzip. Sitzungsberichte Leibniz-Sozietät der Wissenschaften, Band 108.

Ujomow, A. I. (1965): Dinge, Eigenschaften und Relationen. Berlin: Akademie-Verlag.

Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften zu Berlin *149 (2022), 27–58*

Alexander Unzicker

Naturkonstanten, wissenschaftliche Revolutionen und Einfachheit in der Physik

Zusammenfassung

Seit Isaac Newton haben viele Physiker die Idee vertreten, wahre Naturgesetze müssten „einfach“ sein. Dennoch wurde der Begriff der Einfachheit selten genau definiert. Analysiert man die Geschichte der fundamentalen Physik bis 1930, erweist sich die Anzahl der Naturkonstanten als ein nützliches Maß für die Komplexität einer Theorie, die im Gegensatz zur Einfachheit steht. Es zeigt sich, dass Paradigmenwechsel oft mit Erklärungen von physikalischen Konstanten einhergehen, wodurch sich deren Gesamtzahl verringert. Es wird also argumentiert, dass wissenschaftliche Revolutionen in der Regel aus folgendem charakteristischen Muster bestehen: 1) eine konzeptionelle Idee, 2) ein mathematischer Formalismus und 3) eine Reduzierung der Anzahl unabhängiger Naturkonstanten. Dies führt zu einem besseren historischen Verständnis von physikalischen Theorien und kann helfen, den aktuellen Stand der fundamentalen Physik zu bewerten.

Abstract

Since Isaac Newton, many physicists have advocated the idea that true laws of nature must be „simple.“ Yet the concept of simplicity has rarely been precisely defined. Analyzing the history of fundamental physics until 1930, the number of constants of nature turns out to be a useful measure of the complexity of a theory, as opposed to simplicity. It turns out that paradigm shifts are often accompanied by explanations of physical constants, thus reducing their total number. Hence, it is argued that scientific revolutions usually display the following characteristic pattern: 1) a conceptual idea, 2) a mathematical formalism, and 3) a reduction in the number of independent constants of nature. This leads to a better historical understanding of physical theories and presumably helps to evaluate the current state of fundamental physics.

1. Einleitung

1.1 Warum Konstanten?

Der antike Philosoph Leukipp behauptete: „Nichts geschieht zufällig, sondern alles aus einem Grunde und mit Notwendigkeit.“ Im gleichen Sinne schrieb Isaac Newton: „Die Wahrheit ist, wenn überhaupt, in der Einfachheit zu finden – nicht in der Vielgestaltigkeit und Vermischung der Dinge.“ Diese Aussagen spiegeln sicherlich eine tiefe Einsicht wider, aber es scheint schwierig, sie in ein formales Argument zu verwandeln. Einstein vertrat eine ähnliche Sichtweise (Rosenthal-Schneider 1988): „Ich möchte ein Naturgesetz aufstellen, das auf nichts anderem beruht als auf dem Glauben an die Einfachheit, d. h. [die] Verständlichkeit der Natur.“ Einstein verknüpfte die Frage der Einfachheit mit numerischen Parametern und fuhr fort: „Es gibt keine willkürlichen Konstanten“ [...] „Ich kann mir keine rationale Theorie vorstellen, in der eine Zahl vorkommt, welche die Laune des Schöpfers ebenso gut hätte anders wählen können.“ Es lohnt sich daher offenbar, physikalische Konstanten aus einer erkenntnistheoretischen Perspektive heraus zu untersuchen.

Die Rolle der Naturkonstanten in der Physik, manchmal auch fundamentale Konstanten genannt, ist nicht ganz klar. Man kann sogar, aus der Sicht der Metrologie, die Verwendung verschiedener Einheiten wie Zoll und Meter problematisieren. Während diese Definitionen offensichtlich willkürlich sind, hängen die Naturkonstanten mit Maßstäben zusammen. Dies wurde bereits im Jahr 1900 deutlich, als Max Planck die nach ihm benannten Längen-, Zeit- und Massenskalen

$$l_{pl}=\sqrt{\frac{Gh}{c^3}},\ t_{pl}=\sqrt{\frac{Gh}{c^5}},\ m_{pl}=\sqrt{\frac{hc}{G}}$$

einführte. Ob diese Skalen eine grundsätzliche Bedeutung haben, wird zwar ausgiebig debattiert, bleibt aber für den Zweck dieser Arbeit tangential. Diese Planck-Einheiten zeigen jedenfalls, dass die physikalischen Einheiten von elementaren Begriffen wie Länge, Zeit und Masse durch Naturkonstanten (h, c, G) ausgedrückt werden können, wobei Willkürlichkeiten wie der Erddurchmesser oder der Kilogrammprototyp vermieden werden. Es ist jedoch zu eng, den Zweck von Konstanten auf die Definition physikalischer Einheiten zu reduzieren. Es gibt viel mehr Konstanten als Einheiten, wie es auch aus der CODATA-Liste der fundamentalen Konstanten ersichtlich ist.

In einer Art semantischer Verwirrung hat die Verbindung zu den Einheiten einige Forscher dazu gebracht, die Bedeutung dieser Konstanten in Frage zu stellen. Dies ist jedoch ein Fehlschluss. Tatsächlich sind die numerischen

Werte, ausgedrückt in Einheiten wie beispielsweise Metern, offensichtlich irrelevant, ihr physikalischer Inhalt ist es nicht. Die Stärke der Schwerkraft, enthalten in dem Wert von G, ist eine wichtige Botschaft der Natur. Dies sollte nicht nur den Experimentatoren klar sein, die seit Henry Cavendishs genialer Messung im Jahr 1798 in mühevoller Arbeit den Wert von G ermitteln. Auch Kosmologen hätten schwerwiegende Probleme, die seit Jahrzehnten bekannte Koinzidenz

$$G = \frac{c^2 R_u}{M_u}$$

(modern „Flachheit" genannt) in ihre Modelle einzubauen, wenn der Wert von G beispielsweise zehnmal größer oder kleiner wäre. Selbst im Fall der Lichtgeschwindigkeit, wo der festgelegte Wert c=299792458 m/s über die Definition der Sekunde auch den Meter bestimmt, bleibt die Existenz der Lichtgeschwindigkeit als solche, die auch eine Grenzgeschwindigkeit für Materie darstellt, eine bemerkenswerte Eigenschaft der Natur.

1.2 Kontroversen über Konstanten

Es ist daher erstaunlich, dass die Unterscheidung zwischen „dimensionsbehafteten" und „dimensionslosen" Konstanten so viel Aufmerksamkeit erfahren hat. Es wurde sogar behauptet, dass nur letztere eine physikalische Bedeutung haben (Duff 2014), obwohl dies viele Theoretiker in Frage stellten (Barrow 2002) und sich etliche Beobachter beispielsweise den Messungen zur Variation von G ($\dot{G}/G$) widmen. Historisch wäre hier anzumerken, dass Kirchhoff und Weber die Beziehung $\varepsilon_0\mu_0=1/c^2$ wohl nie entdeckt hätten, hätten sie ε_0 und μ_0 aufgrund ihrer physikalischen Dimensionen als irrelevant betrachtet. Dieses Beispiel zeigt auch, dass man mit der Konvention, physikalische Konstanten gleich 1 zu setzen, vorsichtig sein sollte. Während dies für theoretische Berechnungen von Nutzen sein mag, führt es doch zu irreführenden Interpretationen. Allein die Tatsache, dass so eine Konvention immer möglich ist, zeigt, dass von diesem Vorgehen keine tiefen Einsichten zu erwarten sind.

Dennoch betrachten viele Physiker Konstanten als bloße Umrechnungsfaktoren, über die es sich nachzusinnen erübrigt. Verschiedentlich wurde sogar behauptet, dass alle existierenden Konstanten eliminiert werden können. Die Bühne wäre dann frei für mathematische Konstruktionen, die man für die Quelle aller weiteren Erkenntnis hält. Eine solche Hoffnung scheint allerdings verfrüht, wie die Analyse der Konstanten zeigt; vielmehr verhilft diese zu neuen methodischen Einsichten. Zumindest historisch hat die Be-

trachtung von Konstanten und ihrer Einheiten Einsichten hervorgebracht, am offensichtlichsten bei der obigen Koinzidenz $\varepsilon_0\mu_0=1/c^2$. Sie führte zur Entdeckung elektromagnetischer Wellen durch Heinrich Hertz im Jahr 1886, wodurch die Maxwellsche Theorie bestätigt wurde. Das in dieser Formel beobachtete Beispiel der Vereinfachung (Reduktion um eine Konstante) kann in der Tat formalisiert und zu einer systematischen Zählung der Naturkonstanten erweitert werden.

Die Prämisse dieser Arbeit ist also, dass physikalische Konstanten sehr wohl etwas über die Natur aussagen und ein nützliches Instrument sind, die Entwicklung der Wissenschaft in den vergangenen Jahrhunderten zu evaluieren. Der Fortschritt im Verständnis war dabei nie linear in der Zeit. Meist kann man erst im Nachhinein beurteilen, wie erfolgreich eine physikalische Theorie war. Falsche Vorstellungen wie das geozentrische Dogma in der Astronomie haben den Fortschritt für lange Zeit behindert, ohne dass sich die intellektuelle Elite dessen bewusst war. Die Untersuchung der Rolle der physikalischen Konstanten in der Geschichte könnte daher entweder Vertrauen in bestehende Paradigmen schaffen oder als frühes Warnsignal dienen, wenn physikalische Theorien in die Irre gehen.

Dieser neuartige Ansatz betont die entscheidende Rolle der Naturkonstanten in bestimmten Schlüsselmomenten der Wissenschaft, obwohl eine vollständige Darstellung der Geschichte der Physik nicht möglich ist. Vielmehr soll der bisher unerforschte Zusammenhang zwischen Konstanten und jenen Erkenntnissen, die zu wissenschaftlichen Revolutionen führten, aufgezeigt werden.

1.3 Eine vorläufige Definition

Ob „Naturkonstanten“ wirklich zeitlich unveränderlich sind und daher ihren Namen überhaupt verdienen, ist Gegenstand aktueller Forschung (Uzan 2010) jedoch für diese Überlegungen nicht entscheidend. Trotz seiner weiten Verbreitung in der Physik scheint der Begriff „Naturkonstante“ nicht genau definiert zu sein. Es wurde versucht, Konstanten nach ihrer Wichtigkeit zu klassifizieren (Levy-Leblond 1977), ohne dass dabei ein Konsens gefunden wurde (Wilczek 2007). Insbesondere wurde diskutiert, ob Konstanten „fundamental“ sind oder welche überhaupt als Naturkonstanten angesehen werden können.

Erfreulicherweise kann man jedoch „Naturkonstante“ einfach definieren: jede quantifizierbare Eigenschaft des Universums, die nicht offensichtlich zufällig ist; jede Messung, die die Frage aufwirft: „warum dieser Wert und nicht ein anderer?“ Offensichtliche Beispiele dafür sind Zahlen wie das Pro-

ton-Elektron-Massenverhältnis 1836,15..., jedoch ist das Konzept nicht auf dimensionslose Größen beschränkt. Der Zahlenwert der Gravitationskonstanten $G = 6{,}674 \cdot 10^{-11}$ $m^3/(s^2\ kg)$ ist willkürlich, aber die Stärke von G, wie oben erläutert, ist es nicht. Der Zahlenwert der Lichtgeschwindigkeit c ist sogar eine reine Definition, die Existenz von c aber keineswegs eine triviale Tatsache. Es ist nicht selbstverständlich, dass die Natur überhaupt eine derartige Grenzgeschwindigkeit vorgibt.

Am Ende dieser Betrachtungen werden sich manche Konstanten als wichtiger erweisen als andere, jedoch ist es für eine systematische Herangehensweise sinnvoll, zunächst alle Daten als „Konstanten" anzusehen. So sind etwa die von Johann Jakob Balmer 1885 betrachteten Spektrallinien des Wasserstoffs „Botschaften" der Natur, die einer Erklärung harren. Eine weniger respektvolle, aber für unsere Zwecke gleichwertige Bezeichnung für eine Naturkonstante ist „freier Parameter". Freie Parameter werden gewöhnlich verwendet, um Beobachtungsdaten zu ordnen, was aber schon ein erster Schritt zu einer Vereinfachung sein kann.

Manchmal gilt das Auftauchen einer neuen Naturkonstante zu Recht als eine wichtige Entdeckung. Und doch ist die Entdeckung einer solchen „Naturkonstante" (oder eines freien Parameters) oft eine Anomalie im Sinne von Thomas Kuhn, die auf ein Problem in der bestehenden Theorie hinweist. Es zeigt sich, dass ein wirklicher Erkenntnisfortschritt fast immer mit der Eliminierung von Konstanten einhergeht.

1.4 Das allgemeine Muster

Betrachten wir nun das dreistufige Muster *Konzeptionelle Idee –Mathematischer Formalismus – Eliminierung von Konstanten* genauer. Das erste Element, die visionäre Idee, wird meist unterschätzt. Sie erfordert mehr intuitives als formales Denken, Kreativität und die Fähigkeit, unter unbedeutenden Details die übergreifende Struktur zu erkennen. Eine solche Idee gilt oft als „vereinigend". Das Paradebeispiel hierfür ist die Vereinigung von himmlischer und irdischer Schwerkraft durch die Newtonsche Theorie, auch wenn die Schlüsselidee wahrscheinlich auf Robert Hooke zurückgeht. Ein solch kühner Gedanke wurde oft nicht richtig erkannt und als „Spekulation" oder „Numerologie" abgetan. Und doch sind derartige Geistesblitze die Saat, ohne die unsere hervorragendsten wissenschaftlichen Theorien nie entstanden wären.

Das zweite Element, die mathematische Formulierung, variiert stark in technischer Schwierigkeit, von trivialen Verknüpfungen physikalischer Größen in einer Gleichung bis zu ausgefeilten Konzepten der Differentialgeo-

metrie oder Funktionalanalysis. Sie erfordert vor allem technische Fertigkeiten, die oft nur von wenigen Geistesgrößen der entsprechenden Epoche beherrscht wurden. Manchmal, wie im Fall der Differentialrechnung oder der Delta-Distributionen, musste die Mathematik sogar erst entwickelt werden. Die mathematische Formulierung einer physikalischen Theorie ist meist der intellektuell anspruchsvollste Teil der wissenschaftlichen Revolution und in der Regel derjenige, der in der Wissenschaftswelt die meiste Anerkennung findet.

Das dritte Element, die Reduzierung der Anzahl der Konstanten, auf die sich die aktuelle Analyse konzentriert, ist die oft übersehene, subtile Konsequenz einer Theorie. Die Anzahl der Konstanten zu reduzieren erfordert oft keine weitere Anstrengung; oft gab dies die konzeptionelle Idee schon vor. Die geringere Anzahl von Konstanten bzw. freien Parametern ist jedoch das, was für die fundamentale Physik auf Dauer zählt. Die Gleichung, welche die überflüssigen Konstanten eliminiert, ist nur ein Aspekt der mathematischen Theorie, enthält aber den Kern der Vereinigung. Im obigen Beispiel verknüpft die Gleichung

$$\varepsilon_0 \mu_0 = \frac{1}{c^2}$$

die elektromagnetischen Größen ε_0 und μ_0 mit der Lichtgeschwindigkeit, aber natürlich wird sie erst durch den gesamten mathematischen Apparat der Maxwellschen Theorie des Elektromagnetismus gerechtfertigt. Nichtsdestotrotz spiegelt die Gleichung die Vereinigung von Elektromagnetismus und Optik wider. In diesem Fall hat sich die Betrachtung der physikalischen Einheiten einer Größe bewährt – auch wenn solche intuitiven Ansätze in der heutigen wissenschaftlichen Tradition weniger geschätzt werden. Dabei ist noch anzumerken, dass die Anzahl der Konstanten *nicht* durch Konventionen wie $c=h=\varepsilon_0=1$ reduziert werden kann; diese sind immer nur eine Folge der eigentlichen Erkenntnis.

1.5 Elemente von wissenschaftlichen Revolutionen

Die Reduktion der Anzahl der Naturkonstanten erlaubt es, den Begriff der Vereinfachung und damit der Einfachheit zu quantifizieren, der nach fast einhelliger Meinung gute physikalische Theorien ausmacht. Albert Einstein postulierte sogar ein Meta-Naturgesetz: *„Die Natur ist so gebaut, dass es logisch möglich ist, so stark festgelegte Gesetze aufzustellen, dass in diesen nur rational vollständig bestimmte Konstanten vorkommen."* Es scheint, dass Einstein im Sinn hatte, die Zahl der unerklärten Konstanten auf null zu reduzieren, sicherlich ein ambitioniertes Ziel.

Bevor man die Geschichte der Physik auf das obige Muster hin untersucht, sind noch mehrere Aspekte zu erwähnen. Eher die Ausnahme als die Regel ist, dass ein einziger Forscher alle drei Schritte einer solchen wissenschaftlichen Revolution vollzieht, da so unterschiedliche Fähigkeiten (kreatives, intuitives Denken gegenüber formalem, mathematischem) selten in einer Person zusammentreffen.

Wissenschaftliche Revolutionen können plötzlich erfolgen oder sich über einen langen Zeitraum erstrecken. So kann die Entwicklung der Atomtheorie im frühen 20. Jahrhundert als eine Vollendung der visionären Ideen der griechischen Philosophen Demokrit (400 v. Chr.) und Leukipp gesehen werden. Oft sind verschiedene wissenschaftliche Revolutionen miteinander verwoben und eine nachfolgende hatte schon begonnen, bevor die vorige abgeschlossen war. In manchen Fällen finden Teilrevolutionen auf einem Gebiet statt, bevor ein komplettes Bild entsteht. Und manchmal führt eine Folge von Revolutionen die Physik auf eine entsprechend höhere Abstraktions- und Verständnisebene.

Manchmal kann die Mathematik geradezu trivial sein, während die Idee es nicht ist, wie im Fall des deutschen Arztes Robert Mayer, der Temperatur und kinetische Energie in Verbindung brachte und damit die Grundlage für die Vereinigung von Mechanik und Thermodynamik schuf.

1.6 Ausnahmen von der Regel

Große Unterschiede zeigen sich darin, wie viele freie Parameter eine Theorie eliminieren kann. Zur Zeit der Entwicklung mögen es vielleicht nur wenige sein, wie jene vier Spektrallinien, aus denen Balmer seine Schlüsse zog. Der Wirkung einer solchen Revolution wird man jedoch mehr gerecht, wenn man das Potenzial der Vereinfachung betrachtet. In der Tat können Tausende von Spektrallinien durch (die Verallgemeinerung von) Balmers Formel mit einer einzigen Rydberg-Konstante R erklärt werden – eine drastische Reduzierung der Anzahl freier Parameter. In diesem speziellen Fall bestand die visionäre Idee aus wenig mehr als der Vermutung, dass sich in den Spektrallinien eine mathematische Struktur verberge; dennoch erforderte es Kühnheit, diesen Gedanken zu verfolgen.

Sehr oft beseitigt eine wissenschaftliche Revolution bestehende Naturkonstanten und führt zu einer neuen Verständnisebene, indem sie erklärt, was bisher als Anomalie erschienen war. Doch gab es Fälle, in denen eine revolutionäre Theorie entwickelt wurde, bevor die beobachtete Anomalie überhaupt auftauchen konnte. Einsteins Spezielle Relativitätstheorie erklärte Phänomene wie die Zeitdilatation und die Massenzunahme vor ihrer jewei-

ligen Entdeckung. Wären Teilchenbeschleuniger vor der Relativitätstheorie gebaut worden, hätte man das anomale Verhalten wohl zunächst durch freie Parameter beschrieben. Die Reduktion der Anzahl der fundamentalen Konstanten war also 1905 nicht sichtbar, weil die unerklärten Zahlen noch keine Zeit hatten, sich zu zeigen.

Im erkenntnistheoretischen Sinne ist nicht jede Entdeckung eine Revolution. Die Naturkonstante h zum Beispiel kann auf eine außergewöhnliche „Karriere" zurückblicken. Ein ganzes Jahrhundert lang hat sie nicht nur zu spannenden Entdeckungen geführt, sondern auch zu bahnbrechender Technik: Laser, Digitalkameras und Computertechnik. Wahrscheinlich ist deshalb ihre methodische Kehrseite – nämlich die Rolle von h als Anomalie – praktisch unbemerkt geblieben. Tatsächlich zeichnete sich das Auftreten von h gerade durch Phänomene aus, die im Rahmen des bestehenden Wissens nicht eingeordnet werden konnten.

Bei der folgenden Diskussion des obigen Musters ist es fast unmöglich, eine chronologische Reihenfolge einzuhalten; die Zusammenhänge zwischen den verschiedenen Revolutionen würden dabei eher verdeckt. Zudem gibt auch wenige Ausnahmen, in denen das Muster *Konzeptionelle Idee – mathematischer Formalismus – weniger Konstanten* zu weit hergeholt wäre, wie z. B. im Fall der Kontinentaldrift. Dass Kontinente sich auf der Erdkruste bewegen, war sicherlich eine kühne Idee von Alfred Wegener, aber es war weder viel Mathematik im Spiel, noch wurde eine Naturkonstante eliminiert. Als Paradigmenwechsel kann allenfalls eine Vereinfachung angesehen werden, die schwer zu quantifizieren ist. Dennoch sollte man nicht vergessen, dass die Bewegung von Kontinenten auf einem kleinen Planeten nicht wirklich eine fundamentale Eigenschaft des Universums ist.

2. Wissenschaftliche Revolutionen

2.1 Die kopernikanische Revolution

2.1.1 Kepler

Das augenfälligste Beispiel für unsere Diskussion ist die kopernikanische Revolution. Der visionäre Gedanke war, dass die Erde nicht der Mittelpunkt des Universums ist, sondern um die Sonne kreist. Dies ging der Entwicklung des Formalismus lange voraus; es ist aber auch klar, dass sich die Idee ohne eine entsprechende mathematische Theorie nie durchgesetzt hätte. Eine genauere Betrachtung lässt partielle „Revolutionen" zu Tage treten. So trug etwa Johannes Kepler einen Teil zur Idee bei, indem er das Vorurteil über-

wand, dass Umlaufbahnen „göttliche“ Kreise sein müssen. Andererseits war Kepler bereits dabei, eine mathematische Theorie der Planetenbewegung zu entwickeln, als er erkannte, dass die Bahn des Mars tatsächlich einer Ellipse entsprach, bei der die Sonne in einem der beiden Brennpunkte stand. Zweifelsohne lag damals in der Beherrschung der Mathematik der Ellipse eine herausragende technische Fähigkeit.

Betrachtet man Keplers Teilrevolution, ist es interessant, quantitativ darzustellen, wie seine Erkenntnisse die Astronomie vereinfachten. Nach der obigen Definition erfordert dies eine Reduzierung der Anzahl freier Parameter. Im voll entwickelten ptolemäischen Weltbild gab es davon viele: den Radius der Umlaufbahn, der den Abstand zum Himmelskörper annähert, einen weiteren Radius des Epizykels, der die retrograde Bewegung beschreibt, den *Äquanten*, welcher Verschiebungen jener kleinen Kreismittelpunkte beschreibt und den *Deferenten*, der für die Ungleichförmigkeit der Bewegung steht. Hätte man das ptolemäische Modell beibehalten, wären zweifelsohne weitere freie Parameter postuliert worden.

Keplers Ellipse ist stattdessen ein Objekt mit nur zwei Parametern: die große und kleine Halbachse a und b. Man könnte argumentieren, dass a und b die Bewegung des Planeten nicht erklären. In der Tat ist das zweite Keplersche Gesetz, das besagt, dass der Planet von der Sonne aus gesehen gleiche Flächen in gleichen Zeiten überstreicht, notwendig, obwohl es die Umlaufzeit T als zusätzlichen Parameter einführt. So würde Keplers Modell immer noch drei Parameter für jeden Planeten erfordern. Hier zeigt sich die Bedeutung des dritten Gesetzes: Die Kuben der Hauptachsen sind proportional zu den Quadraten von T: a^3/T^2=const., eine Formel, die Konstanten eliminiert und die Menge der astronomischen Daten stark reduziert. Aus ihrer jeweiligen Entfernung zur Sonne konnte die Umlaufzeit aller fünf damals bekannten Planeten berechnet werden.

Die Keplerschen Gesetze wurden dann durch Galileo Galileis Beobachtung der Jupitermonde bestätigt. Deren Bahnen folgten ebenfalls dem dritten Keplerschen Gesetz, wenn auch mit einem anderen Quotienten a^3/T^2. Dieser Quotient, auch Keplerkonstante genannt, kann bis heute als charakteristische Zahl eines Planeten, als „Naturkonstante“, angesehen werden. Trotz aller bahnbrechenden Erkenntnisse und der erheblichen Vereinfachung durch Kepler enthielt das Planetensystem immer noch eine Vielzahl von unerklärten Zahlen.

2.1.2 Newton

Die Keplerschen Gesetze und die zusätzlichen Erkenntnisse Newtons sind ein gutes Beispiel für eine Abfolge von Teilrevolutionen, die letztlich ein einheitliches Bild ergeben. Es bedurfte einer weiteren visionären Idee: Die von der Erde auf den Mond ausgeübte Kraft hat denselben Ursprung wie die alltägliche Schwerkraft. Irdische und himmlische Objekte folgen damit dem gleichen Gravitationsgesetz, sicherlich eine kühne Vorstellung im 17. Jahrhundert. Newtons mathematische Theorie der Gravitation war die bei weitem größte intellektuelle Leistung der Menschheit zu dieser Zeit. Nicht nur die Entdeckung des inversen quadratischen Gesetzes, sondern auch die Herleitung der Keplerellipsen als Lösungen dieser speziellen Abstandsabhängigkeit erforderte außerordentliche Fähigkeiten.

Bevor wir die Anzahl der Naturkonstanten betrachten, verdient Erwähnung, dass die Entwicklung der Mechanik allein, ganz ohne Astronomie, als wissenschaftliche Revolution angesehen werden kann. Denn praktisch enthielt jede Flugbahn eines frei fallenden Körpers Daten, die man als „Naturkonstanten" bezeichnen konnte. Newtons Mechanik (mit wichtigen Vorarbeiten von Galilei) führte all dieses scheinbar komplizierte Verhalten auf eine einzige „Konstante" zurück, die Erdbeschleunigung g. Dies stellte eine dramatische Reduktion der von fallenden Körpern erzeugten Daten dar.

Kehrt man zur Astronomie zurück, bestand eine Konsequenz des quadratischen Abstandsgesetzes darin, dass die jeweiligen Keplerkonstanten der Planeten mit ihrer Masse in Beziehung stehen:

$$\frac{a^3}{T^2} = K = \frac{GM}{4\pi^2}$$

Da die Masse eines Himmelskörpers nur eine zufällige Anhäufung von Materie darstellt und als solche nicht erklärt werden muss, enthält diese Formel eine dramatische Reduzierung der Anzahl der Konstanten. Ohne diese Vereinfachung wäre jede Keplerkonstante eine Eigenart der Natur, eine unerklärte Zahl. Die Tatsache, dass die allgemeine Gravitationskonstante G erst 1798 von Cavendish gemessen wurde, ändert nichts an dem bisher Gesagten; sie zeigt lediglich, dass die Vollendung einer wissenschaftlichen Revolution lange dauern kann.

Um die kopernikanische Revolution, die mit der Messung von G abgeschlossen wurde, zu bewerten, darf man aber nicht nur die freien Parameter im mittelalterlichen Epizyklenmodell zählen. Zu berücksichtigen ist vielmehr die potentielle Vereinfachung bei allen modernen Daten. Im Sonnensystem sind Bahnen von mehr als 90.000 Himmelskörpern bekannt. Ent-

sprechend viele freie Parameter wären zu ihrer Beschreibung vonnöten, wäre die moderne Wissenschaft nicht entwickelt worden. Von offensichtlichen Zufälligkeiten abgesehen, werden all diese potenziell unerklärten Zahlen durch eine einzige fundamentale Konstante G zusammengefasst. Daher ist die kopernikanische Revolution nicht nur historisch, sondern auch quantitativ betrachtet, die wohl folgenreichste.

2.2 Kosmologie

Es sollte noch lange dauern, bis sich die Vorstellung vom Kosmos um viele Größenordnungen erweiterte. Edwin Hubbles Entdeckung im Jahr 1923, dass Andromeda tatsächlich eine Galaxie ist, war sicherlich eine wissenschaftliche Revolution. In diesem Fall geht die konzeptionelle Idee auf den deutschen Philosophen Immanuel Kant zurück, der aus der Form des sichtbaren Sternenbandes namens Milchstraße bereits 1789 schloss, dass wir in einem riesigen scheibenförmigen Objekt leben.

Dennoch zeigte die von Harlow Shapley und Heber Curtis 1920 ausgetragene „Große Debatte", dass die Frage nicht geklärt war. Der mathematische Formalismus ist hier fast nicht vorhanden, es sei denn, man beruft sich auf moderne Modelle der Galaxiendynamik, die die Form von Galaxien beschreiben. Tatsächlich haben sie dabei Schwierigkeiten (Sanders 2010; Disney 2008). Die Erkenntnis, dass es sich bei der Leuchterscheinung in Andromeda um einen bekannten Sterntyp mit variabler Helligkeit (Cepheiden) handelte, vereinfachte die Sache jedoch erheblich und vermied eine kompliziertere Beschreibung der Daten durch konkurrierende Hypothesen. Informationstheoretisch ist die Vereinfachung zwar offensichtlich, aber dennoch schwer zu quantifizieren. Der mathematische Formalismus konnte bei dieser Revolution fehlen, weil es sich um den Spezialfall einer binären Frage handelte: Galaxie ja oder nein. Es gab keine konkurrierende mathematische Theorie, die überwunden werden musste. Angesichts der Menge kosmologischer Daten ist es jedoch klar, dass diese konzeptionelle Idee zu einer Vereinfachung führte.

Die kosmische Rotverschiebung, Hubbles zweite große Entdeckung, ist für die moderne Kosmologie grundlegend und stellt ebenfalls eine wissenschaftliche Revolution dar. Auch hier steckt eine offensichtliche Vereinfachung in der Annahme, dass das Licht entfernter Galaxien rotverschoben ist, obwohl es bis heute keine a-priori Erklärung für die scheinbare Expansion des Universums gibt. Der mit dieser Beobachtung verbundene freie Parameter, die Hubble-Konstante H_0, stellt nach wie vor eine Anomalie im Kuhnschen Sinne dar. Während die Rotverschiebung die Beobachtungsda-

ten offensichtlich vereinfacht, kann man die Frage aufwerfen, ob die Konstante H_0 nicht darauf hindeutet, dass die Revolution in der Kosmologie noch nicht abgeschlossen ist.

2.3 Relativität

2.3.1 Allgemeine Relativitätstheorie

Viele Wissenschaftler, die versuchen, kosmologische Beobachtungen mit Einsteins allgemeiner Relativitätstheorie zu verbinden, würden letztere kaum als mathematischen Formalismus für Hubbles Entdeckung betrachten. Da es praktisch keine direkten Tests der allgemeinen Relativitätstheorie auf der kosmologischen Skala gibt,[1] können die aktuellen Modelle kaum zwischen der Newtonschen und der Einsteinschen Theorie unterscheiden, obwohl man letztere als richtig ansieht. Die konzeptionelle Idee der Allgemeinen Relativitätstheorie ist dagegen eher abstrakt, wurde aber von ihrem Begründer klar formuliert: das Äquivalenzprinzip.

Während sich der mathematische Apparat in seiner differentialgeometrischen Formulierung von ungeahnter Schwierigkeit erwies, ist hier eine Vereinfachung in Form einer Eliminierung von Konstanten kaum zu erkennen. Die seit 1859 bekannte und mit der Theorie erklärte Perihelverschiebung des Planeten Merkur von 43 Bogensekunden pro Jahrhundert muss jedoch als eine derartige Botschaft der Natur gesehen werden, auch wenn sie nie als „Konstante“ bezeichnet wurde. Die Vereinfachung durch die allgemeine Relativitätstheorie bestand weiter darin, Anomalien zu erklären, die noch nicht entdeckt waren. Die Ablenkung des Sternenlichts während der Sonnenfinsternis 1919 ist ein berühmtes Beispiel (einer der vier „klassischen Tests“), ebenso wie der langsamere Zeitablauf in Gravitationsfeldern, der 1972 durch das Haefele-Keating-Experiment nachgewiesen wurde. Man kann nur spekulieren, wie viele unerklärliche Zahlen aufgetaucht wären, wäre die Technik ohne die Allgemeine Relativitätstheorie fortgeschritten. Sicherlich hätten die GPS-Entwickler freie Parameter verwendet, um zu quantifizieren, um wieviel Atomuhren in Satelliten etwas schneller laufen als auf der Erde. Zum Glück blieb den Wissenschaftlern dank Einsteins Leistung ein solch mühsamer Weg erspart.

1 Es wurde behauptet, dass die allgemeine Relativitätstheorie die Ausdehnung des Kosmos „vorhersagt“, da die Einsteinschen Gleichungen keine stabilen Lösungen zulassen. Dies bleibt jedoch eine umstrittene Interpretation.

2.3.2 Spezielle Relativitätstheorie

Gleiches gilt für die von Einstein 1905 formulierte spezielle Relativitätstheorie. Die kühne Idee war in diesem Fall die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit in Bezug auf bewegte Beobachter, während die mathematischen Werkzeuge viel weniger anspruchsvoll sind als die der Allgemeinen Relativitätstheorie. Henri Poincaré und Hendrik Antoon Lorentz hatten einige Vorarbeit geleistet, aber es ist bemerkenswert, dass Einstein sowohl in der Speziellen als auch in der Allgemeinen Relativitätstheorie sowohl die konzeptionelle Idee als auch den mathematischen Formalismus entwickelte. Sein Geniestreich war so weit seiner Zeit voraus, dass anomale freie Parameter gar nicht erst entstehen konnten. Die Phänomene der Zeitdilatation, Längenkontraktion und der Massenzunahme werden alle mit der gleichen Formel

$$\frac{t'}{t} = \frac{l'}{l} = \frac{m_0}{m} = \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

beschrieben. Sicherlich hätten diese Phänomene eine Fülle von „Konstanten" hervorgebracht, deren Eliminierung durch einen späteren Einstein eine ungeheure Vereinfachung dargestellt hätte. Die berühmte Formel $E=mc^2$, ebenfalls Teil der speziellen Relativitätstheorie, hatte noch größere Auswirkungen. Alle seit Rutherford durchgeführten Kernreaktionen lassen sich nur mit dieser Beziehung verstehen! Die Freisetzung von Energie aufgrund des Massendefekts, meist als Wellenlänge von Gammastrahlen sichtbar, bestätigte durchweg Einsteins Formel. Würde man wiederum all diese Daten sammeln und als „rohe" Botschaften der Natur betrachten, hätte dies wohl zu einer unglaublich komplizierten „Theorie" von Kernreaktionen geführt. Die Spezielle Relativitätstheorie eliminiert also Tausende von sonst unerklärlichen „Naturkonstanten"; dies ist eine enorme Vereinfachung.

Das bis 1920 entwickelte Bild von Materie ist ein Beispiel für lang andauernde und ineinander verwobene wissenschaftliche Revolutionen. Einsteins $E=mc^2$ stellt in gewisser Weise den Schlusspunkt der Atomistik dar: die Theorie der aus elementaren Bausteinen bestehenden Materie, welche letztlich auf Demokrit zurückgeht. In diesem Fall benötigte die Revolution, die durch jene kühne Idee eingeleitet wurde, mehr als zweitausend Jahre zu ihrer Vollendung. Während die Atomistik als eine große wissenschaftliche Revolution gesehen werden kann, lohnt es sich, die vielen Teilrevolutionen, die zu ihrem Erfolg beitrugen, genauer zu betrachten.

2.4 Atomare Theorie der Materie

Die Chemiker Joseph Proust (Gesetz der bestimmten Proportionen), Antonie Lavoisier und John Dalton waren diejenigen Pioniere, die Atomgewichte quantifiziert haben. Ähnlich wie Johann Jakob Balmer bei den Atomspektren, suchten sie nach kleinen ganzen Zahlen in den Massenverhältnissen und entdeckten dabei Regelmäßigkeiten. Während das Element der Mathematisierung in diesen Erkenntnissen ziemlich primitiv scheint, führte diese Heuristik zu einer offensichtlichen Vereinfachung, indem sie die Ergebnisse in einer sinnvollen Weise ordnete. Obwohl die Molekülhypothese, ein wichtiger Schritt, bereits 1811 von Amedeo Avogadro formuliert worden war, dauerte der Durchbruch bis 1860, als der italienische Chemiker Stanislao Cannizzaro während einer Konferenz in Karlsruhe auf den Unterschied zwischen Atom- und Molekülmasse hinwies.

Lothar Meyer und Dmitri Mendelejew waren aufmerksame Zuhörer und entwickelten in der Folge das Periodensystem der chemischen Elemente. Die visionäre Idee dieser Teilrevolution von 1869 ließ einen Zusammenhang zwischen Atommasse und chemischen Eigenschaften vermuten, während die Einteilung in acht Gruppen – eine primitive Form der Mathematisierung – nur phänomenologisch, aufgrund chemischer Ähnlichkeiten, erfolgte.[2] Die Atommassen der verschiedenen Elemente, zweifelsohne Naturkonstanten in obigem Sinne, waren damit noch nicht erklärt, jedoch war ein wichtiger Schritt in diese Richtung getan. Leider litt die Präzision durch die Laune der Natur, gleiche chemische Elemente unterschiedlicher Atommassen zu erzeugen: die noch nicht entdeckten Isotope.

Bald darauf stellte man fest, dass ein bestimmtes chemisches Element die gleiche Anzahl von Protonen, aber unterschiedlich viele ungeladene Neutronen (die ungefähr die gleiche Masse haben) enthielt.[3] Indem man die Atomkerne so einteilte, schimmerte bereits Demokrits Vision durch: die Massen waren ungefähre Vielfache der atomaren Masseneinheit u, benannt nach dem Pionier John Dalton. Als dann die ersten Kernreaktionen durchgeführt wurden, bestätigte Einsteins Formel $E=mc^2$ die Ergebnisse genau. Die Massen aller bekannten chemischen Elemente erwiesen sich als Vielfache der atomaren Masseneinheit $u=1{,}66055\cdot10^{-27}$ kg, also etwa der Protonenmasse, welche, solange man Massen betrachtet, praktisch die einzige Natur-

2 Erst die 1925 gefundene Schrödinger-Gleichung und ihre Lösungen rechtfertigten diese Einordnung und vervollständigten damit die mathematische Formulierung des Periodensystems. Natürlich ist auch dies eine große Errungenschaft der Quantentheorie.

3 Vor der Entdeckung des Neutrons im Jahr 1932 wurde diese Tatsache durch das Postulieren von Elektronen, die sich im Kern befinden, formuliert.

konstante bleibt. Insgesamt stellen die Ergebnisse der Atomistik eine glänzende Bestätigung von Demokrits Vision dar und bilden einen essentiellen Teil des Menschheitswissens.

2.5 Elektromagnetismus, Optik, Wärme und Strahlung

2.5.1 Elektrische Ladung, Elektrizität und Magnetismus

Bisher wurde die elektrische Ladung der Atomkerne ausgeklammert, die in der Geschichte des Atomismus eine wichtige Rolle spielte. Im Jahr 1923 zeigten die Experimente des amerikanischen Physikers Andrew Millikan, dass in der Natur elektrische Ladung nur als Vielfache einer bestimmten Elementarladung (des Elektrons) auftritt, auch wenn bis heute keine tiefere Erklärung für dieses Mysterium bekannt ist. Soddy erhielt 1921 den Nobelpreis für Chemie für die Einsicht, dass die chemischen Eigenschaften durch die Ladung des Atomkerns bestimmt werden. Vor Soddy hatte dies bereits Niels Bohr erkannt.

Halten wir kurz inne und betrachten den enormen Erkenntnisfortschritt, der durch die kollektiven Bemühungen von Physikern und Chemikern über die Jahrhunderte hinweg erarbeitet wurde: Fast hundert stabile chemische Elemente, beginnend mit Wasserstoff, Helium, Lithium usw., lassen sich durch 1, 2, 3... Protonen im Kern erklären! Auch hier bedarf die Vereinfachung von Naturphänomenen keiner weiteren Erläuterung. Sie spiegelt sich in der Existenz der Elementarladung $e=1{,}602\cdot10^{-19}$ Coulomb wider, einer wichtigen Naturkonstante.

Natürlich wäre all dies ohne vorherige Revolutionen nicht möglich gewesen. Charles-Augustin de Coulomb entwickelte die Theorien der Elektro- und Magnetostatik, die natürlich von der ähnlichen Form des Newtonschen Gravitationsgesetzes inspiriert waren. Dies führte offensichtlich zu einer einheitlichen und vereinfachten Beschreibung der Phänomene, wenn es auch mühsam wäre, diese zu quantifizieren. Eine weitere wichtige Vereinigung gab es zu Beginn des 19. Jahrhunderts mit Elektrizität und Magnetismus. Jahrhunderts. 1820 demonstrierte der dänische Physiker Hans Christian Ørstedt, dass sich eine Magnetnadel senkrecht zu einem durch einen elektrischen Leiter fließenden Strom ausrichtet, obwohl das gleiche Experiment bereits 1802 von Gian Domenico Romagnosi in Italien veröffentlicht worden war. Als der Effekt in Mitteleuropa bekannt wurde, untersuchte vor allem Michael Faraday das Thema systematisch, während es André-Marie Ampère gelang, die entsprechenden mathematischen Gesetze zu formulieren.

Obwohl die ersten Resultate dieser Revolution noch nicht quantitativ ausgedrückt wurden, ist es offensichtlich, dass die Vereinigung der einst ge-

trennten Phänomene der Elektrizität und des Magnetismus die Anzahl der willkürlichen Konstanten reduzierte. In moderner Konvention spiegelt sich dies in der magnetische Feldkonstante μ_0 wider, die keine „echte" Naturkonstante mehr ist, sondern in die Definition des elektrischen Stroms aufgenommen wurde. Entsprechend wurde μ_0 der exakte[4] Wert $4\pi \cdot 10^{-7}$ Vs/Am zugewiesen.

2.5.2 Elektromagnetismus und Optik

Seit der niederländische Physiker Christiaan Huygens Mitte des 17. Jahrhunderts das Phänomen der Beugung entdeckt hatte, ging man davon aus, dass Licht Welleneigenschaften besitzt. In der Tat konnte man seit geraumer Zeit Wellenlängen genau messen. Die Natur des Lichts blieb jedoch unklar, bis James Clark Maxwell um 1864 seine Theorie der Elektrodynamik formulierte. Darin treten die unabhängig messbaren Konstanten ε_0 und μ_0 auf, welche die Stärke der elektrischen und magnetischen Wechselwirkung quantifizieren. Eine überraschende Konsequenz der Maxwellschen Gleichungen war, dass sich elektrische und magnetische Felder auch ohne Ladungen im leeren Raum ausbreiten. Nach der Theorie sollte dies mit einer bestimmten Geschwindigkeit geschehen.

Wilhelm Weber und Rudolf Kohlrausch hatten diese Geschwindigkeit bereits 1855/56 aus ihren Experimenten erschlossen, und wahrscheinlich waren es Weber oder Kirchhoff (1857), auf die die visionäre Idee von Licht als elektromagnetischer Welle zurückgeht. Als Heinrich Hertz 1886 erstmals diese Wellen im Labor erzeugte, stellte er fest, dass die Ausbreitungsgeschwindigkeit tatsächlich die des Lichtes war, was die kühne Hypothese spektakulär bestätigte. Die erwähnte Formel

$$\varepsilon_0 \mu_0 = \frac{1}{c^2},$$

reduziert die Anzahl der Naturkonstanten um eins: Statt drei Konstanten c, ε_0 und μ_0 sind nur noch zwei nötig.[5] Dies ist ein besonders markantes Beispiel dafür, wie sich wissenschaftliche Revolutionen durch Vereinfachung auszeichnen.

4 Bei der Aktualisierung der SI-Einheiten 2019 wurde diese jahrhundertealte Konvention wieder gekippt, was aber für unsere Diskussion hier keine Relevanz hat.

5 Im Hinblick auf die Definition von μ_0 könnte man auch sagen, dass die Anzahl von zwei auf eins reduziert wurde.

2.5.3 Thermodynamik

Im wissenschaftlich hochproduktiven 19. Jahrhundert fanden mehrere Revolutionen parallel statt, die den Boden für spätere Entwicklungen bereiteten. Eine davon beschäftigte sich mit Wärme. Erstaunlicherweise war der deren Ursprung auch lange nach der Erfindung des Thermometers noch unbekannt. Die visionäre Idee, dass Wärme nichts anderes ist als Bewegung auf molekularer Ebene, hatte der deutsche Arzt Robert Julius Mayer 1842 formuliert. Der Mut, der nötig war, einen solchen Gedanken zu entwickeln, wird heute kaum noch gewürdigt, weil die Dinge im Nachhinein leicht einzusehen sind. Es ist bemerkenswert, wie Mayer bei der Entwicklung seiner Theorie mit der Mathematik rang. In der Formel

$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{3}{2}kT\,,$$

die die mittlere kinetische Energie eines Teilchens mit der absoluten Temperatur T in Beziehung setzt, hatte Mayer zunächst den Faktor ½ vergessen. Seine Gedanken wurden später von James Prescott Joule ergänzt. Auch das ideale Gasgesetz,

$$PV = NkT,$$

spiegelt die gleiche Tatsache wider. Erinnern wir uns an die Definition der Vereinfachung durch Reduktion der Anzahl der Konstanten, dann leistet Mayers Formel genau dies. Vorher waren Temperaturmessungen Botschaften der Natur, die unerklärliche Zahlenwerte wie –273,16 Grad Celsius für den absoluten Nullpunkt anzeigten. Erst Mayers Erkenntnis stellte einen Zusammenhang zwischen der (willkürlichen) Temperaturskala und der mikroskopischen kinetischen Energie her. Folglich wird die Boltzmann-Konstante k heute nicht mehr als fundamental angesehen, sondern als Definition der Temperatur. Das ist korrekt, aber genau darin liegt die Leistung von Mayer und Joule: eine Konstante weniger.

2.5.4 Wärme und Strahlung

Ende des 19. Jahrhunderts war die Schwarzkörperstrahlung Gegenstand intensiver Untersuchungen und man bestimmte präzise, wie viel Strahlung ein Körper bei der jeweiligen Temperatur innerhalb eines Wellenlängenbereichs aussendet. Zwei empirische Modelle entstanden: das Rayleigh-Jeans-Gesetz, welches nur große Wellenlängen beschreibt, und das Wiensche Verschiebungsgesetz, ebenfalls mit einem begrenzten Anwendungsbereich. Beide Modelle enthielten jeweils einen freien Parameter, der durch Anpassung der

Daten bestimmt wurde. Die Tatsache, dass alle Materialien elektrische Ladungen enthielten, die sich durch Wärme bewegen, führte Max Planck jedoch zu der visionären Idee, dass das Abstrahlungsverhalten *aller* Körper einem universellen Gesetz folgt.[6] Seine mathematischen Fähigkeiten erlaubten es ihm, die obigen empirischen Gesetze als Grenzfälle einer allgemeineren Formel zu identifizieren, die heute als Plancksches Strahlungsgesetz bekannt ist:

$$I(\lambda)d\lambda = \frac{8\pi hf^3}{c^3} \frac{1}{\frac{hf}{e^{kT}-1}}.$$

Die Emission nimmt mit der Temperatur zu, wobei sich das Maximum zu kleineren Wellenlängen hin verschiebt. Erst später lieferte Planck, der die richtige Formel zunächst erraten hatte, eine formale theoretische Begründung. Was die Anzahl der Konstanten betrifft, ist der Unterschied subtil, aber folgenreich: Anstelle von zwei freien Parametern in den Gesetzen von Wien und Rayleigh-Jeans verwendete Planck nur einen, den er vorsichtig als „Hilfsgröße h ohne physikalische Bedeutung" bezeichnete, heutzutage bekannt als Wirkungsquantum. Nach unserem Kriterium der Einfachheit reduzierte das Plancksche Strahlungsgesetz die Anzahl der Naturkonstanten um eins.

Nebenbei führte das Plancksche Strahlungsgesetz zu einer weiteren Vereinfachung. Die von einem schwarzen Körper emittierte Gesamtstrahlung pro Fläche ist proportional zur vierten Potenz der absoluten Temperatur T. Unabhängig von Plank war dies bereits als Stefan-Boltzmann-Gesetz bekannt: $w=\sigma T^4$. Die Konstante σ („sigma") kann empirisch bestimmt werden und stellt einen klassischen Fall eines freien Parameters dar, also eine „Naturkonstante". Mit dem Planckschen Gesetz wurde es jedoch möglich, σ auszudrücken:

$$\sigma = \frac{2\pi^5 k^4}{15 h^3 c^2}.$$

Erneut hatte sich die Anzahl der Naturkonstanten um eins verringert.

6 Das Plancksche Strahlungsgesetz ist in der Tat eine der wichtigsten Erkenntnisse der modernen Physik, auch wenn es oft fälschlicherweise auf Gase angewendet wird, die keine Schwarzkörperstrahlung aussenden können.

2.6 Die Quantenrevolution

2.6.1 Erkennen der Rolle von h

Die große Bedeutung von h als Naturkonstante wurde jedoch von Einstein erkannt. Zu Beginn des 20. Jahrhunderts hatten die seltsamen Ergebnisse des photoelektrischen Effekts (Emission von Elektronen beim Auftreffen von Licht auf ein Metall) viele Physiker verblüfft. Dies führte Einstein 1905 zu der Formel $E=hf$, die die Energie von „Lichtquanten" beschreibt – eine kühne Annahme, mit der das Quantenzeitalter begann. Als mathematische Formel ist die Gleichung $E=hf$ fast trivial, und es ist nicht unmittelbar ersichtlich, welche Naturkonstanten sie eliminiert. Doch jede andere Interpretation des photoelektrischen Effekts hätte zu schlecht verstandenen Parametern geführt, während Einsteins Idee die Resultate sehr einfach beschreibt. So führte auch hier das Wirkungsquantum h zu einer Reduktion der unerklärten Zahlen in der Natur, abgesehen davon, dass das Konzept der Lichtquanten revolutionäre Folgen hatte. Mit seiner Interpretation hauchte Einstein der „Hilfskonstante" von Max Planck erst Leben ein, was dieser nur widerwillig akzeptierte. Noch 1913 äußerte er öffentlich, Einstein sei „mit seinen Spekulationen über das Ziel hinausgeschossen." Aus der Formel $E=hf$ folgt, dass h die interessante physikalische Einheit Energie pro Frequenz (Nms) hat, die auch als *Wirkung* bezeichnet wird.

Niels Bohr erkannte, dass dies aufgrund der Identität $N=kg\ m/s^2$ auch als $kg\ m^2/s$ geschrieben werden kann, womit h die Einheit eines Drehimpulses hatte.[7] Dies führte ihn zu der visionären Idee, dass h mit dem Drehimpuls eines den Atomkern umkreisenden Elektrons zusammenhing.

2.6.2 Atome als kleine Sonnensysteme

Es gibt jedoch ein noch allgemeineres Konzept: Die Vorstellung, dass die Elektronen den Atomkern umkreisen, so wie die Planeten die Sonne. Die Aussicht, dass das Sonnensystem im Atom eine mikroskopische Parallele findet, übte damals eine enorme Faszination auf die Physiker aus. Während der erste Gedanke auf Wilhelm Weber im 19. Jahrhundert zurückgeht, hatte der japanische Physiker Nagaoka (Assis et al. 2018) um 1904 unabhängig davon die gleiche Idee; schließlich integrierte sie Niels Bohr in ein umfassendes Bild des Atoms. Auch wenn sich dieses Modell in Teilen als unvollständig erwies, war es doch die zentrale konzeptionelle Idee der wissen-

7 Um der historischen Genauigkeit willen muss auch der englische Mathematiker John William Nicholson erwähnt werden, der sich ebenfalls mit dem Drehimpuls beschäftigte. Dies schmälert jedoch nicht die Leistung Bohrs, ein Gesamtbild des Atoms entwickelt zu haben.

schaftlichen Revolution der Atomtheorie. Bohrs Hypothese über den Drehimpuls h ermöglichte konkrete Vorhersagen. Die große Leistung war dabei, zu erklären, warum die Elektronenbahnen um den Kern ganz bestimmte Radien hatten. Während Planeten in jedem beliebigen Abstand von der Sonne zu finden sind (und dieser Abstand nach dem dritten Keplerschen Gesetzes die Umlaufzeit bestimmt), gilt das für Elektronen nicht: Bohr erkannte, dass ihr Bahndrehimpuls immer ein Vielfaches der Konstante $h/2\pi = \hbar$ („h quer“) sein muss. Diese Bahnen sind charakterisiert durch $L = \hbar,\ 2\,\hbar,\ 3\,\hbar$ ... die auch den Energieniveaus bzw. den Schalen entsprechen. Natürlich musste das Bohrsche Modell durch den mathematischen Apparat der Quantentheorie gerechtfertigt werden, die später von Heisenberg und Schrödinger entwickelt wurde.

2.6.3 Johann Jakob Balmer, der Kepler der Atome

So wie Newton sich auf Kepler stützte, hatte auch Bohrs Atommodell einen wichtigen Wegbereiter – den Schweizer Mathematiklehrer Johann Jakob Balmer. Wie Kepler studierte Balmer die Beobachtungen genau und entdeckte einen rätselhaften Zusammenhang, dessen Ursprung er allerdings noch nicht erklären konnte. 1885 untersuchte Balmer das Spektrum des Wasserstoffatoms, eine Serie von Wellenlängen von 656, 486, 434 und 410 Nanometern. Nach unserer technischen Definition stellen diese Werte Naturkonstanten dar. Balmer (1885) stellte fest, dass

$$\frac{410{,}2}{656{,}3} \approx \frac{5}{8} \text{ und } \frac{486{,}1}{656{,}3} \approx \frac{20}{27}.$$

Jahrelanges Grübeln über diese Beziehungen führte ihn schließlich zu den Formeln

$$\frac{1}{656{,}3\,\text{nm}} = R\left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{3^2}\right), \frac{1}{486{,}1\,\text{nm}} = R\left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{4^2}\right), \frac{1}{434{,}0\,\text{nm}} = R\left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{5^2}\right), \frac{1}{410{,}2\,\text{nm}} = R\left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{6^2}\right),$$

wobei er die Konstante $R = 1{,}0973731 \cdot 10^7\,\text{m}^{-1}$ einführte, die später nach dem schwedischen Physiker Rydberg benannt wurde.[8]

Zwei Punkte sind hier zu bemerken. Erstens spiegelt das Auftreten der Quadrate im Nenner tatsächlich die Ähnlichkeit zwischen Newtons Gravitationsgesetz und dem entsprechenden elektrischen Gesetz von Coulomb wi-

8 Um genau zu sein, entdeckte Balmer die für das Wasserstoffatom gültige Konstante R_H, die auch die Bewegung des Kerns berücksichtigt, wie später entdeckt wurde. Es bleibt also ein winziger, aber berechenbarer Unterschied zwischen R_H und R (für schwerere Atome), der für diese methodische Argumentation irrelevant ist.

der, eine Ähnlichkeit, die zu der Idee von Atomen als kleinen Sonnensystemen geführt hatte. Die Art und Weise, wie Balmer zu seinen Schlussfolgerungen kam, ist aber auch methodisch bemerkenswert. Wie Kepler hielt Balmer nach mathematischen Zufällen Ausschau, ohne dass klar war, dass es diese überhaupt gab. So ein Ansatz wird heute oft als „Numerologie" abgetan, aber sein Erfolg beruhte, ebenso wie bei Kepler, genau darauf: eine Beziehung zu finden, die offenkundig stimmte, wie weitere Messungen von Spektrallinien bald bestätigen sollten. Auf diese Weise vereinfachte Balmer die „Botschaften der Natur" dramatisch und ließ ein mathematisches Gerüst entstehen. Wie bei Kepler bestand die visionäre Idee einfach darin, nach solchen mathematischen Mustern zu suchen.

Balmers Entdeckung reduzierte die Anzahl der Naturkonstanten drastisch, eine unbestreitbare Vereinfachung. Auch die anderen Spektralserien[9] des Wasserstoffatoms (im Prinzip gilt dies sogar alle Atome) werden durch die Balmersche Formel bzw. ihre Verallgemeinerung beschrieben; die einzige verbleibende Konstante ist R.

2.6.4 Die Vereinfachung in der Quantenphysik

Obwohl Bohr keine tiefere Begründung für das Postulat des Drehimpulses als Vielfaches von $\hbar$ geben konnte, führte sein Modell zu einem spektakulären Erfolg. Beim Sprung von einer äußeren zu einer inneren Schale mussten die Elektronen Energie nach Einsteins Formel $E=hf$ abgeben. Bohr zeigte, dass die „erlaubten" Sprünge genau mit den von Johann Jakob Balmer gefundenen Wellenlängen übereinstimmten. Die Zahlen im Nenner von Balmers Formel gaben dabei einfach die Nummer der Schale an. Somit konnte die Rydberg-Konstante R endlich abgeleitet werden, die Balmer zwar aus den Daten bestimmt, aber nicht erklärt hatte. Kombiniert man das Analogon zum Newtonschen Gravitationsgesetz, das Coulombsche Gesetz, mit dem Bohrschen Postulat für den Drehimpuls, so erhält man die Energieniveaus, die mit der Balmerschen Formel beschrieben werden können, was zu dem Zusammenhang

$$R=\frac{m_e e^4}{8c\ \varepsilon_0^2 h^3}$$

9 Aus heutiger Sicht beschreibt Balmers Formel nur die zweite Schale, da nur diese das für das Auge sichtbare Licht aussendet. Mit der Entdeckung der ultravioletten Spektrallinien der ersten Schale (Lyman-Reihe) und des infraroten Lichts aus den Übergängen der höheren Schalen (Paschen-Reihe etc.) war die Verallgemeinerung der Balmerschen Formel naheliegend.

führt. Das Bohrsche Atommodell ermöglichte es also, die von Balmer gefundene unerklärte Zahl R durch bekannte Naturkonstanten auszudrücken. Auf diese Weise wurde die Anzahl der fundamentalen Konstanten reduziert, und darin liegt *der* erkenntnistheoretische Fortschritt der Atom- und Quantentheorie. Nur eine von mehreren Naturkonstanten erklärt zu haben, mag auf den ersten Blick nicht bedeutsam erscheinen. Rydbergs Konstante R wurde jedoch aus so vielen Einzelmessungen von Atomspektren gewonnen, dass man Bohrs Leistung, die sich auf Balmer gründete, als ähnlich bedeutsam betrachten muss wie das von Kepler und Newton Erreichte – insgesamt eine dramatische Vereinfachung.

2.6.5 Weitere Quantenphänomene

Auch die Entdeckung der Wellennatur der Elektronen war ein entscheidender Schritt zum Verständnis der Atome. Der französische Physiker Louis Victor de Broglie schrieb 1923 in seiner Doktorarbeit erstmals über die Wellennatur von Elementarteilchen. Wenn sich nach Einsteins Quanteninterpretation des Lichts eine Welle gelegentlich wie ein Teilchen verhielt, dann, so de Broglies Überlegung, könne sich auch ein Elektron wie eine Welle benehmen. De Broglie entwickelte ein Modell (Lochak 1983), in dem die Wellenlänge des Elektrons durch

$$\lambda = \frac{h}{mv}$$

gegeben war, wobei m die Masse des Elektrons und v seine Geschwindigkeit ist. Dies wurde durch Beugungsexperimente von Elektronenstrahlen an Kristallen von Davisson und Germer im Jahr 1927 bestätigt. Wie passt diese sicherlich revolutionäre Erkenntnis in das obige Schema der Entdeckungen? Auch hier fand die Vereinfachung statt, bevor unerklärten Zahlen überhaupt auftauchen konnten. Hätte man früher Beugungsexperimente mit Elektronen durchgeführt, so wäre das Ergebnis wohl phänomenologisch beschrieben worden. Das wäre sicherlich in Form von freien Parametern geschehen, die man als Eigenschaften des Elektrons betrachtet hätte. Stattdessen hatte de Broglie mit seiner visionären Idee diese potenziell rätselhaften Zahlen schon im Vorfeld erklärt.

Die Wellennatur der Elektronen löste ein Dilemma des Bohrschen Atommodells. Als elektrisch geladene Teilchen müssten umlaufende Elektronen unweigerlich Energie abstrahlen. Der Energieverlust hätte dazu geführt, dass diese in den Atomkern stürzen würden – eine fatale Inkonsistenz der „kleinen Sonnensysteme“. Betrachtet man jedoch die Elektronen auf einer bestimm-

ten Bahn als stehende Wellen, so wird diese Katastrophe vermieden. Gleichzeitig wird die Quantisierung des Drehimpulses dadurch erklärt, dass nur ganzzahlige Vielfache der Wellenlänge in die Elektronenbahn „passen". Betrachtet man die Entwicklung der Atomphysik als Ganzes, so waren viele miteinander verwobene Durchbrüche nötig, um schließlich zu einem überzeugenden Bild zu gelangen.

2.6.6 Formalismen der Quantenphysik

Es muss allerdings erwähnt werden, dass eine primär mathematische Leistung zu einer konsistenten Form des Atommodells führte. Nur so waren wellenförmige Elektronen überhaupt erst denkbar. Diese entscheidende Begründung geht auf Werner Heisenberg und Erwin Schrödinger zurück, die dazu in den Jahren 1925 und 1926 ganz unterschiedlich herangingen. Die Gleichwertigkeit der Ansätze wurde später von Paul A. M. Dirac gezeigt.

Die mathematisch konsistente Formulierung der wissenschaftlichen Revolution war hier der schwierigste und intellektuell anspruchsvollste Teil, ebenso wie im Fall von Newtons Ableitung der von Kepler gefundenen elliptischen Bahnen. Ohne eine solche Grundlage würde sich eine neue wissenschaftliche Theorie niemals durchsetzen. Dennoch darf die Rolle der konzeptionellen Idee nicht unterschätzt werden. Sie erfordert mehr kreative als technische Fähigkeiten und ist im Fall der Quantentheorie vor allem Einstein und Bohr zuzurechnen.

2.6.7 Weitere Entwicklungen

Fasst man fundamentale Fortschritte zusammen, ist es das Element der Vereinfachung, was letztlich zählt, auch wenn es manchmal als Nebenprodukt brillanter Mathematik erscheinen mag. Die Verdichtung einer Menge unerklärter Zahlen zu einer einzigen Konstante R durch Balmer und die anschließende Berechnung von R durch Bohr sind die zentralen Errungenschaften der Quantenmechanik. Sie sollte die Erklärung zahlreicher späterer Experimente vorwegnehmen, denn dass Quantum h spielte weiterhin eine wichtige Rolle.

Im Jahr 1970 entdeckte der britische Physiker Bryan Josephson überraschende Ströme zwischen verschiedenen Metallen. Die Stärke dieser Ströme in diesen sogenannten Josephson-Kontakten hängt mit h zusammen.[10] 1985 entdeckte der deutsche Physiker Klaus von Klitzing, dass der elektrische Widerstand in einem sogenannten Hall-Sonde immer ein Vielfaches von h/e^2,

10 Beim Anlegen einer Gleichspannung U wird ein Wechselstrom der Frequenz $f=2\,e\,U/h$ beobachtet.

also gequantelt ist. Eine weitere Entdeckung war der fraktionierte Quanten-Hall-Effekt. In all diesen Fällen nahm h freie Parameter vorweg, die verwendet worden wären, wäre h nicht schon bekannt gewesen.

3. Zusammenfassung und Konsequenzen

Wir können die bisherigen Ergebnisse in der folgenden Tabelle zusammenfassen.

Tab. 1: Wissenschaftliche Revolutionen, die zu Vereinfachungen führten

Akteure	Jahr	Visionäre Idee	Formel	Obsolet
Kopernikus, Kepler	1521 1600 1610	Sonne im Zentrum Elliptische Umlaufbahn	Keplersche Gesetze	Epizyklen
Newton	1687	Irdische und himmlische Schwerkraft	$g=\frac{GM}{r^2}$	g, KJ, $\kappa_{M,..}$
Balmer	1885	Mathematik in Atomspektren	$1/\lambda=R\left(\frac{1}{2^2}-\frac{1}{3^2}\right)$	λ1, λ2, ...
Weber, Nagaoka, Bohr	1879 1904 1913	Atome als Sonnensystem h als Drehimpuls	$R=\frac{m_e e^4}{8c\,\varepsilon_0^2 h^3}$	R
Planck	1900	Universelles Strahlungsgesetz	I(σ, λ)=...	Wien, Rayleigh-Jeans, σ
Maxwell, Weber, Ampère	1864	Vereinigung Elektrizität Magnetismus	Maxwellsche Gleichungen	μ_0
Hertz, Weber	1888	Licht als elektromagnetische Welle	$1/c^2 = \varepsilon_0\mu_0$	ε_0
Mayer, Joule	1842	Wärme ist kinetische Energie	$½\,mv^2 = kT$	K
Demokrit Avogadro Dalton Mendelejew Einstein	500 v. Chr. – 1930	Materie aus elementaren Bausteinen	Schrödingergleichung, Periodensystem, etc.	Atommassen
Einstein	1905	Konstante von c	$E=mc^2$, t'/t=...	…
Kant/Hubble	1923	Galaxien als „Welteninseln"	--	

Nach dieser historischen Betrachtung der Konstanten tauchen mehrere Fragen auf. Kann man die Anzahl der Konstanten bestimmen? Wenn ja, wie viele unabhängige Konstanten sind zu beobachten? Gibt es irgendein Maß für die Qualität einer Konstante? Warum ist es sinnvoll, die Zählung der Konstanten um 1930 durchzuführen? Und welche Konsequenzen, abgesehen von historischem Interesse, lassen sich daraus für den Rest der Physik ziehen?

3.1 Zählung der Naturkonstanten

Nach unserer ursprünglichen Definition kann im Prinzip jeder Messwert als Naturkonstante angesehen werden. Eine Reihe von Entdeckungen, ja Revolutionen, führten zu einer enormen Vereinfachung, indem die Anzahl der Naturkonstanten reduziert wurde. Bei dem Versuch, die verbleibenden fundamentalen Konstanten zu zählen, sind einige Entscheidungen zu treffen. Zum Beispiel könnte man entweder die Hubble-Konstante H_0 als „fundamental" betrachten oder das Alter des Universums (etwa $T_u=1/H_0$), oder sogar dessen Radius $R_u=c\,T_u$. Unabhängig vom kosmologischen Modell ändert sich dabei die Anzahl der unabhängigen Konstanten nicht.

Zunächst gilt G als fundamentale Konstante, die die Stärke der Gravitation angibt. Weiter ist die Lichtgeschwindigkeit c eine fundamentale Eigenschaft der Raumzeit, ebenso wie das Plancksche Quantum h. Bei der Betrachtung der Elektrodynamik bleiben nicht mehr viele Konstanten übrig. Da μ_0 die Einheit Ampere des elektrischen Stroms (und damit die elektrische Ladung 1C=1 As) definiert, ist $\varepsilon_0 = 1/c^2\ \mu_0$ auch keine unabhängige Konstante. Somit bleibt als einzige Konstante für die Stärke der elektromagnetischen Wechselwirkung die Elementarladung e. Diese Eigenschaft wird jedoch meist durch eine andere Größe, die sogenannte Feinstrukturkonstante α, ausgedrückt:

$$\alpha = \frac{e^2}{2hc\varepsilon_0} \approx \frac{1}{137}.$$

Diese ist dimensionslos, was die Frage aufwirft: Warum dieser numerische Wert und nicht ein anderer? Dasselbe gilt für das Verhältnis von Protonen- und Elektronenmasse, $m_p/m_e=1836.15\ldots$, eine Zahl, die Paul Dirac jahrelang zu ergründen suchte. Um die Zusammenstellung der Konstanten komplett zu machen, sind noch zwei weitere Aspekte berücksichtigen: Erstens sind kosmologische Messungen grundsätzlich Botschaften der Natur, wenngleich ihre Genauigkeit manchmal zu wünschen übriglässt. Zweitens sind Masse und Ausdehnung der Elementarteilchen ebenso unerklärte Zahlen. Obwohl diesen Größen im gegenwärtigen Paradigma keine große Bedeutung beigemessen wird, müssen sie zweifelsohne als Naturkonstanten gelten. Es ist interessant, hierzu die Sichtweise Einsteins zu hören:

> „Die wirklichen Gesetze sind also viel einschränkender, als die uns bekannten. Zum Beispiel würde es nicht gegen die bisher bekannten Gesetze verstoßen, wenn wir Elektronen von beliebiger Größe oder Eisen von beliebigem spezifischem Gewicht vorfänden. Die Natur aber realisiert nur Elektronen von ganz be-

stimmter Größe und Eisen von ganz bestimmtem, spezifischem Gewicht.“ (Einstein)

Während es bisher keine Evidenz für eine messbare Ausdehnung des Elektrons gibt, ist der Radius des Protons seit den Streuexperimenten von Rutherford bestimmbar und hat den aktuellen Wert $8{,}4\cdot10^{-16}$m (Pohl 2010), während die Protonenmasse, die wir anstelle der atomaren Masseneinheit u betrachten, $1{,}6726\cdot10^{-27}$ kg beträgt. In der Kosmologie ist die direkteste Messung die Hubble-Konstante H_0, obwohl wir ebenso gut die Größenskala $R_u=c/H_0$ als fundamentale Konstante betrachten können. Kosmologische Messungen können sogar die Gesamtmasse des Universums M_u innerhalb des sichtbaren Horizonts bestimmen, die etwa 10^{53} kg beträgt. Der Kosmos verändert sich zwar offenbar, und so müssen diese „Konstanten“ langsam in der Zeit variieren; dennoch stellen sie Botschaften der Natur dar, die prinzipiell erklärt werden müssen.[11] Insgesamt gab es um 1930 also neun unabhängige „Konstanten“: G, c, h, 137, 1836, m_p, r_p, M_u, R_u.

3.2 Qualität von Konstanten

Um Missverständnisse zu vermeiden, sei daran erinnert, dass die physikalischen Einheiten Meter, Sekunde und Kilogramm willkürlich gewählt sind. Daher sind die numerischen Werte der meisten Konstanten unbedeutend. Es wäre jedoch grob irreführend, ihnen deshalb ihre Bedeutung abzusprechen. Ebenso könnte man eine im Dezimalsystem geschriebene Feinstrukturkonstante kritisieren. Während das Dezimalsystem willkürlich ist, ebenso wie die Definitionen von Meter und Sekunde, ist die Existenz von Naturkonstanten erklärungsbedürftig. Die Stärke der Schwerkraft sagt etwas über die Natur aus, ebenso wie die Tatsache, dass es für alle materiellen Körper eine Grenzgeschwindigkeit gibt, die nicht überschritten werden kann, wie willkürlich auch immer die Einheiten sein mögen, in denen dieses Gesetz formuliert wird.

Die Qualität von Fundamentalkonstanten zu beurteilen, ist schwierig. Die Konstanten auf der obigen Liste haben über Jahrhunderte hinweg jedem Versuch, sie zu erklären, widerstanden. Eine Rangliste hinsichtlich der Messgenauigkeit wäre auch wenig zielführend. Sie würde durch die Tatsache verzerrt, dass einige Konstanten durch einen festen Zahlenwert definiert wurden, der bereits die Konsequenzen vergangener wissenschaftlicher Revolutionen enthält. Dennoch würden „elektronisch“ gemessene Konstanten

11 Prinzipiell stellen Halbwertszeiten auch Botschaften der Natur und erklärungsbedürftige Zahlen dar. Allerdings war 1930 noch nicht einmal das Neutron entdeckt.

(wie zum Beispiel α) viel besser abschneiden als die Gravitationskonstante, die in den letzten Jahrzehnten beunruhigende Diskrepanzen aufwies. Noch unsicherer ist der Wert der Hubble-Konstante und die daraus abgeleitete Masse des Universums; beide lassen sich bestenfalls auf eine Größenordnung bestimmen. Aus erkenntnistheoretischer Sicht haben diese Konstanten jedoch den gleichen Stellenwert; die Hubble-Konstante umfasst etwa die Daten von Milliarden von Galaxien.

Als Qualitätsmaß für Konstanten könnte man noch das Potenzial der Vereinfachung betrachten. Wie bereits erwähnt, ist G für Hunderttausende von Himmelskörpern verantwortlich, während h, aber auch α, in einer nahezu unbegrenzten Anzahl von Atomspektren enthalten ist (z. B. in der NIST-Datenbank). Aufgrund der gegenseitigen Abhängigkeiten wäre es dennoch schwer, eine Reihenfolge anzugeben.

3.3 Warum 1930?

Die Situation um 1930 ist insofern von besonderer Bedeutung, weil es in diesem Zeitraum ein Minimum der Anzahl der Konstanten gab. Wichtige Entdeckungen wie das Neutron, das wiederum zur Kernspaltung führte, standen kurz bevor. Es scheinen also, zumindest aus technologischer Sicht, wichtige Erkenntnisse zu fehlen. Was die Theorie betrifft, ist der Zustand der relativen Einfachheit um 1930 jedoch einzigartig und wurde in der Geschichte der Physik nie wieder erreicht. Man könnte argumentieren, dass das in den 1960er Jahren etablierte Konzept der Quarks die Anzahl der freien Parameter stark reduzierte, indem es viele bis dahin entdeckte Elementarteilchen beschrieb. Die Gesamtanzahl der Konstanten ist jedoch nie auf weniger als ein Dutzend gesunken.

Umgekehrt kann man einwenden, ob diese Mindestzahl nicht schon früher erreicht worden ist. Im 19. Jahrhundert war beispielsweise das Wirkungsquantum h noch nicht entdeckt. Allerdings hatte die Spektroskopie bereits mehrere Spektrallinien beobachtet, die allein schon die heutige Anzahl der Konstanten übertrafen. Die frühen 1930er Jahre waren daher eine Ära, in der alle vorliegenden Beobachtungen der Natur durch einen bemerkenswert kleinen Satz von Zahlen beschrieben werden konnten. Auch wenn die kosmologischen Beobachtungen nicht genau waren, hätte man jede Galaxie als eigene quantitative Botschaft der Natur ansehen müssen. Erst Edwin Hubbles Konzept der Rotverschiebung brachte Struktur und Vereinfachung in diese Daten. Daher ist es unerlässlich, die kosmologischen Erkenntnisse in die Zählung der Konstanten mit aufzunehmen, abgesehen davon, dass unser Bild vom Universum ohne eine Vorstellung von seiner

Größe hoffnungslos unvollständig wäre. In aller Bescheidenheit kann man sagen, dass der Mensch um 1930 die äußere Realität in einem Maße erschlossen hatte, das eine ähnliche Erweiterung unwahrscheinlich macht. Das bedeutet jedoch keineswegs, dass die theoretische Beschreibung der Realität in Zukunft nicht völlig umgestoßen werden könnte.

Der weitere Gang der Geschichte ist sicherlich aufschlussreich, jedoch kann das Jahr 1930 als ein Punkt der Reflexion über fundamentale Physik dienen. Nicht zufällig zeigte sich auf der Solvay-Konferenz 1927 zum ersten Mal ein unüberbrückbarer Dissens unter den führenden Physikern über die Frage, wie die bis dahin vorliegenden Beobachtungen zu interpretieren waren. Viele Fragen waren aufgeworfen worden, die bis heute nicht gelöst sind. Die seit 1930 anwachsende Zahl von Konstanten bzw. freien Parametern ist ein zusätzlicher Hinweis darauf, dass diese Periode als ein Wendepunkt der Geschichte betrachtet werden kann.

> „Wir werden als die Generation gelten, die so wesentliche Probleme wie die Eigenenergie des Elektrons ungelöst zurückgelassen hat." (Wolfgang Pauli, Nobelpreisträger 1945)

3.4 Vereinigungen der Physik

Zum allgemeinen Thema Vereinigungen in der Physik drängen sich um diese Zeit ebenfalls einige Beobachtungen auf. In vielen Fällen können wissenschaftliche Revolutionen als eine Vereinigung bestehender Theorien angesehen werden. Dabei haben Visionäre oft einen gemeinsamen Ursprung von Phänomenen vermutet, von denen man vorher glaubte, sie stünden in keinem Zusammenhang. Solche Vereinigungen führen im Übrigen regelmäßig zu einer Eliminierung von Konstanten. Die Tatsache, dass die (mit Gewichten gemessene) lokale Schwerkraft g wie eine (dynamisch gemessene) Beschleunigung wirken kann, kann man als eine Vereinigung von Statik und Dynamik sehen. Die Vereinigung von irdischer und himmlischer Gravitation (erstere inklusive Dynamik) ist in $g=GM/r_e^2$ enthalten, wobei g durch G ausgedrückt wird.

Mechanik und Thermodynamik werden durch die Gleichung

$$\frac{1}{2}mv^2=\frac{3}{2}kT$$

vereinigt, die die Konstante k zu einer Definition der Temperatur herabstuft. Die Vereinigung von Elektrizität und Magnetismus ist in der Definition von μ_0 durch Kräfte, die auf parallele Drähte wirken, enthalten. Elektromagnetismus und Optik werden, wie erwähnt, durch die Formel

$$\varepsilon_0 \mu_0 = \frac{1}{c^2}$$

vereinigt. Das Plancksche Strahlungsgesetz stellte schließlich eine Verbindung zwischen Thermodynamik und Optik her und reduzierte zwei Konstanten auf eine, das Wirkungsquantum h.

Weiter wurde die Dynamik durch Einsteins spezielle Relativitätstheorie mit der Optik verknüpft, während die allgemeine Relativitätstheorie als Vereinigung der Optik (Konstante c!) mit der Gravitation angesehen werden kann. Dann schuf Einsteins Interpretation $E=hf$ das Feld der Quantenphysik, die durch Niels Bohr, der h als Drehimpuls ansah, mit der Atomphysik verknüpft wurde. Zu gleicher Zeit wurde die Atomphysik selbst vervollständigt, indem gezeigt wurde, dass alle Atomgewichte Vielfache der atomaren Masseneinheit u sind, wobei die „Details" durch $E=mc^2$ gelöst wurden. Eine vollständige Vereinigung von Atom- und Kernphysik müsste hingegen wohl die Zahl $m_p/m_e = 1836\ldots$ berechnen.

Man könnte nun argumentieren, dass die Quantenelektrodynamik, wie der Name schon sagt, eine Vereinigung von Elektrodynamik und Quantenphysik ist. Sie hat sicherlich zur Vereinfachung geführt, indem sie sowohl das anomale magnetische Moment des Elektrons als auch die Lamb-Verschiebung im Spektrum des Wasserstoffs erklärt. Allerdings erklärt sie nicht den Wert der Feinstrukturkonstante α, obwohl sie diese ausgiebig nutzt. Eine vollständige Vereinigung würde sicherlich eine Berechnung von α erfordern, oder anders formuliert: Wenn es einer Theorie gelingt, α zu berechnen, wäre Quantenelektrodynamik sicher ein passender Name dafür.

Eine solche Berechnung wäre zweifellos eine Revolution und würde die oben genannte Anzahl von Konstanten um eine reduzieren. Leider gibt es nur wenige konzeptionelle Ideen, wie man das Problem angehen könnte, obwohl Richard Feynman vor mehr als dreißig Jahren angemahnt hatte, „alle guten theoretischen Physiker hängen diese Zahl an ihre Wand und zerbrechen sich den Kopf darüber."

Ein weiterer Gelehrter, der sich über grundlegende Probleme hinsichtlich der bestehenden Konstanten Gedanken machte, war Paul Dirac. Er wies 1937 als erster auf eine mögliche Verbindung zwischen der Physik des Kosmos und der Physik der Atome hin, die sogenannte Hypothese der großen Zahlen (Dirac 1937, 1938). Diracs Gedanken stehen heute nicht im Mittelpunkt der Aufmerksamkeit, könnten aber aus erkenntnistheoretischer Sicht der Ausgangspunkt für eine zukünftige Vereinigung sein. Weitere mögliche Vereinigungen werden diskutiert in Unzicker (2019). Auch das nach

dem Wiener Philosophen Ernst Mach benannte Machsche Prinzip ist eine solche mögliche visionäre Idee: Während Mach ursprünglich nur die qualitative Aussage traf, dass entfernte Massen im Universum der Ursprung der Trägheit und damit der Gravitation sein könnten, wurde dies später in Bezug auf G, c und die Masse und Größe des Universums bestätigt: Es gilt näherungsweise

$$G \approx c^2 \frac{R_u}{M_u},$$

auch „Flachheit" genannt, sicher ein bemerkenswerter Zufall.

4. Fazit

Der Leitgedanke dieser Arbeit war, dass die Anzahl der unabhängigen Konstanten etwas über den allgemeinen methodischen Zustand einer empirischen Wissenschaft aussagt. Diese Anzahl der Konstanten kann sinnvoll definiert werden. Es wurde gezeigt, dass wissenschaftliche Revolutionen mit einer Eliminierung von Konstanten einhergingen und um 1930, nach einer außergewöhnlich produktiven Periode der Grundlagenphysik, ein Minimum erreicht wurde. Auch wenn der Begriff „Einfachheit" zunächst subjektiv scheinen mag, ist die Anzahl der Konstanten doch ein sinnvolles Maß für Einfachheit und kann herangezogen werden, um die langfristigen Auswirkungen physikalischer Theorien zu bewerten. Denn es besteht kein Zweifel, dass das intuitive Urteil aller großen Physiker, die sich zu diesem Thema geäußert haben, die Einfachheit gegenüber der Komplexität bevorzugt. Der hier vorgestellte Ansatz ermöglicht eine quantitative Definition und ist damit ein Schritt in Richtung Strenge in der Erkenntnistheorie.

Aus den obigen Überlegungen wird deutlich, dass die Anzahl der Konstanten um 1930, neun, keine grundlegende Bedeutung haben kann. Wenn Fortschritt in der Tat mit Vereinfachung verbunden ist, kann er nur durch eine weitere Reduzierung dieser Zahl erreicht werden. Offensichtlich war Einsteins Ideal eine physikalische Theorie, die ohne alle willkürlichen Konstanten auskommt (Rosenthal-Schneider 1988). Unabhängig davon, ob dieses Ziel realistisch ist, zeigt es, dass die Physik noch einen weiten Weg zu einem endgültigen Verständnis der Realität vor sich hat. Wenn man bedenkt, dass die gesamte Quantenrevolution, die als die wichtigste Entdeckung des 20. Jahrhunderts gilt, im Wesentlichen zur Eliminierung einer Konstante (Rydbergs R) führte, ist klar, dass enorme Anstrengungen, wenn überhaupt, die Physik voranbringen können. Die Frage bleibt, ob dies unter dem derzeitigen Paradigma gelingen wird.

Eine detaillierte Zählung der momentan verwendeten Konstanten würde hier den Rahmen sprengen, sie kann jedoch grob geschätzt werden. Die Anzahl der freien Parameter im Standardmodell der Teilchenphysik wird üblicherweise mit etwa zwanzig angegeben,[12] während das Konkordanzmodell der Kosmologie fast ebenso viele benötigt (Disney 2000). Allerdings sind in diesem Satz nicht alle Teilchenmassen enthalten, deren Einbeziehung die Zahl auf mehr als fünfzig bringen würde; wenn man die Halbwertszeiten berücksichtigt, wahrscheinlich mehr als hundert. Wenn der Wertschätzung der Einfachheit durch die Gründerväter der modernen Physik irgendeine Bedeutung beizumessen ist, dann muss die aktuelle Situation als Krise bezeichnet werden.

Diese Diagnose deckt sich mit dem, was andere Wissenschaftler in den letzten Jahren festgestellt haben, z. B. Lee Smolin (2007) und Sabine Hossenfelder (2020). Beide haben überzeugend argumentiert, dass die Heuristik „Schönheit" ein ungeeignetes Metakriterium ist, um die Korrektheit einer Theorie zu beurteilen oder neue Theorien zu finden. Das Kriterium der Einfachheit, definiert über Naturkonstanten, kann hingegen eine sinnvolle Heuristik sein.

Literatur

Assis, A. K. T/Wiederkehr, K. H./Wolfschmidt G. (2018): Weber's Planeten-Modell des Atoms. Apeiron: Montreal. www.ifi.unicamp.br/~assis/Webers-Planeten-Modell-des-Atoms. pdf.

Balmer, J. J. https://www.baslerstadtbuch.ch/stadtbuch/1985/1985_1815.html.

Barrow, J. (2002): The Constants of Nature; From Alpha to Omega – The Numbers that Encode the Deepest Secrets of the Universe. New York, Pantheon Books.

Disney, M. (2000): The case against cosmology. arXiv.org:astro-ph/000920.

Disney, M. (2008): Galaxies appear simpler than expected, Nature, 455, 1082ff; arXiv:0811. 1554.

Dirac, P. A. M. (1937): The cosmological constants. Nature, 139, 323.

Dirac, P. A. M. (1938): A new basis for cosmology. Proc. Soc. London, 165, 199ff.

Duff M. J. (2014): How fundamental are fundamental constants? arxiv.org/abs/hep-ph/1412. 2040.

Hossenfelder, S. (2020): Lost in Math. New York: Basic Books.

Kirchhoff, G. (1857): On the motion of electricity in wires. Philosophical Magazine, 13, 393–412.

12 Lee Smolin kommentiert: „Die Tatsache, dass es so viele frei spezifizierbare Konstanten in einer angeblich fundamentalen Theorie gibt, ist eine ungeheure Peinlichkeit." (Smolin 2006, S. 13)

Levy-Leblond, J.-M. (1977): On the Conceptual Nature of Physical Constants. Nuovo Cim., Bd. 7(2), 1977, 189.

Lochak G. (1983): de Broglies original concept of Broglie waves. In: Diner S. (ed.): The Wave-Particle Dualism. Heidelberg: Springer, 1ff.

Pohl R./Antognini A./Nez, F./Amaro, F. D./Biraben, F./Cardoso, J. M. R./Covita, D. S./Dax, A./Dhawan, S./Fernandes,L. P. M./Giesen, A./Graf, T./Hänsch, T. W./Indelicato, P./Julien, L./Kao, C. Y./Knowles, P./Le Bigot, E.-O./Liu, Y.-W./Lopes, J. A. W./Ludhova, L./Monteiro, C. M. B./Mulhauser, F./Nebel T./Rabinowitz, P./Dos Santos, J. M. F./Schaller. L. A./ Schuhmann, K./Schwob, C./Taqqu, D./Veloso, J. F. C. A./Kottmann, F. (2010): The size of the proton. Nature, 466, 213–216.

Rosenthal-Schneider, I. (1988): Begegnungen mit Einstein, von Laue und Planck. Wiesbaden: Vieweg, 24–27.

Sanders, R. (2010): The Dark Matter Problem. Cambridge: Cambridge University Press.

Smolin, L. (2007): The Trouble with Physics. Boston: Mariner Books.

Unzicker, A. (2019): Die mathematische Realität. Seattle: Kindle Desktop Publishing.

Uzan J.-P. (2010): The fundamental constants and their variation, arxiv.org/abs/hep-ph/02053 40; Varying constants, Gravitation and Cosmology, arxiv.org/abs/hep-ph/1009.5514.

Wilczek, F. (2007): Fundamental constants, arxiv.org/abs/hep-ph/0708.4361.

Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften zu Berlin *149 (2022), 59–93*

Franz Prüß

Einfachheit in der Pädagogik, insbesondere in der Didaktik

Zusammenfassung

Bildung und Erziehung sind ein komplexes und kompliziertes Prozessgeschehen. Viele Wirkfaktoren und Operationen der Prozessbeteiligten werden über vereinfachende Modellvorstellungen erfasst und für die pädagogische Arbeit nutzbar gemacht. Das Kategoriensystem, das die Struktur- und Funktionselemente der Erziehung bzw. des Unterrichts widerspiegelt, sowie die Prinzipien zur Gestaltung effektiver Strukturen und zur optimalen Realisierung der Funktionen werden dargestellt. Nach Auswertung vielfältiger wissenschaftlicher Erkenntnisse und der Analyse existierender didaktischer Modelle wird eine *strukturelle und funktionale Betrachtung* des pädagogischen Prozesses sowie eine adäquate Abbildung des Prozessgeschehens als *Gesamtmodell* vorgenommen. Dadurch wird die Prozessgestaltung „einfach“, d. h. mit ziemlicher Sicherheit werden durch begrenzte Operationsfolgen in bestimmten Zeiträumen angestrebte Resultate sichtbar, Misserfolge minimiert oder fast ausgeschlossen und sonst notwendige Wiederholungen vermieden. Das dargestellte Modell kann durch weitere wissenschaftliche Erkenntnisse ergänzt, erweitert oder korrigiert werden.

Abstract

Education is a complex and complicated process. Many effective factors and operations of the process participants are captured by simplifying model concepts and made usable for educational work. The system of categories reflecting the structural and functional elements of education or teaching, as well as the principles for designing effective structures and optimally realizing functions are presented. After evaluating a wide range of scientific findings and analyzing existing didactic models, a *structural and functional view* of the pedagogical process is taken, as well as an adequate representation of the process events as an *overall model*. This makes the process design “simple”, i.e., with almost certainty, limited sequences of operations in certain periods of time will reveal intended results, minimize or almost eliminate failures, and avoid otherwise necessary repetitions. The presented model can be supplemented, extended or corrected by further scientific findings.

1. Situation in der Erziehungswissenschaft

Die Allgemeine Didaktik ist eine transdisziplinäre Handlungswissenschaft, die die grundlegenden Kategorien für den Unterricht und unterrichtsähnliche Prozesse erarbeiten und bearbeiten und somit auch die Grundlagen für die Fachdidaktiken bereit stellen muss. Die Bedeutung des Allgemeinen und damit die Funktion der Allgemeinen Didaktik wird gegenwärtig unterschätzt bzw. missachtet. Das hat seine Ursachen.

Die aktuellen

> „…Entwicklungen verweisen also darauf, dass nicht nur die Vertreter der Konkurrenz (gemeint sind die Fachdidaktiker – F.P.) die Allgemeine Didaktik am Ende sehen, sondern dass auch die Vertreter der Allgemeinen Didaktik selbst einen entscheidenden Beitrag zum Ausverkauf der eigenen Disziplin leisten. Dies scheint gerade dann der Fall zu sein, wenn Letztere sich in aller Bescheidenheit vom eigenen Geschäft zu verabschieden scheinen“

und fordern, dass

> „…die Vertreter der Allgemeinen Didaktik in Rückbesinnung auf ihre Ursprünge die Allgemeine Didaktik als widerständige Kraft erneuern! Wichtig wäre es also, dass die Vertreter der Allgemeinen Didaktik wieder Ansprüche stellen, Ansprüche an die eigene Disziplin. Denn die Allgemeine Didaktik ist nach wie vor für die Analyse und Reflexion des ganz eigenen Terrains, des Unterrichts, verantwortlich.“ (Hopmann et al. 2016, S. 33)

Woran liegt es, dass dieser „Notstand“ entstanden ist? (Esslinger-Hinz/Sliwka 2011, S. 176f.) Die Allgemeine Didaktik ist in ihrer zentralen Bedeutung für die Lehrerbildung zurückgedrängt und in ihrer erforderlichen Kooperation mit den Fachdidaktiken nicht befördert, sondern Zufälligkeiten überlassen worden. Auch die Interkulturelle Pädagogik und die erziehungswissenschaftliche Biographieforschung haben sich von der Allgemeinen Didaktik gelöst (vgl. Wegner 2016, S. 9). Außerdem hat

> „…die Ausdifferenzierung von Spezialbereichen der Erziehungswissenschaft potenziell auch zur Folge (hat), dass in der Vielfalt der Bezüge auf das Lehren und Lernen ein Allgemeines als mögliche Basis von Einfachheit nicht mehr auszumachen ist (vgl. Meyer/Prenzel/Hellekamps 2008: 7; Terhart 2008:13).“ (Wegner 2016, S. 9)

Die Fachdidaktiken haben sich zu eigenständigen Disziplinen entwickelt, so dass die Fachdidaktiken andererseits die Allgemeine Didaktik wenig oder teilweise gar nicht mehr zur Kenntnis genommen haben und stattdessen eigene allgemeine Grundlagen erarbeiten (vgl. ebd., S. 10).

Die Fachdidaktiken und auch die Lehr-Lernforschung sehen sich als Konkurrenz zur Allgemeinen Didaktik (vgl. ebd. S. 9). An dieser Stelle kann nicht auf die Reihe weiterer Ursachen eingegangen werden. Festgestellt werden muss aber auch, dass die Allgemeine Didaktik sich nicht hinreichend positioniert hat und ihre Stellung als wissenschaftliche Leitdisziplin für Fragen des Unterrichts nicht behaupten konnte.

Festgestellt werden muss auch, dass die *Allgemeine Didaktik* die einzige Wissenschaftsdisziplin ist, die die *Komplexität* des unterrichtlichen Geschehens in ihrer Gesamtheit im Blick hat und didaktisches Handeln daher umfassend mit begründen können muss. Insofern können die einzelnen Fachdidaktiken die Allgemeine Didaktik nicht ersetzen, vielmehr wird die Allgemeine Didaktik als Leitdisziplin und „Problematisierungsinstanz" (Diederich 1977, S. 24) gebraucht und muss „zumindest eine Koordinierungsfunktion in Sachen Didaktik und Unterrichtsqualitätsqualität" (Wegner 2016, S. 10), aber auch verstärkt in der Lehrerausbildung übernehmen. Die Kritik der Fachdidaktiker an der Allgemeinen Didaktik, sie sei der „Versuch, ‚ohne Wolle zu stricken'" (Hopmann et al. 2016, S. 31f.) macht deutlich, dass sie sich stärker auch der empirischen Forschung zuwenden muss. Eine weitere empirische Fundierung der Allgemeinen Didaktik erweist sich als notwendig, weil die pädagogisch-psychologische Lehr-Lernforschung nicht solche Fragen der Allgemeinbildung, der gesellschaftlichen Ansprüche an Bildung und Erziehung, der allgemeinen und der spezifischen Bildungsziele, der abgestimmten und speziellen Inhalte des Unterrichts und der damit zusammenhängenden Methodenwahl (vgl. ebd.), dem pädagogischen Umgang mit Gruppen im Unterricht u. a. einerseits und in der Fachdidaktik solche Fragen andererseits kaum über Fachgrenzen hinaus betrachtet werden.

Die Allgemeine Didaktik muss *die* zentrale Disziplin sein, die, anders als die Fachdidaktiken, die pädagogisch-psychologisch orientierte Professions- und Professionalisierungsforschung und auch die pädagogisch-psychologische Lehr-Lernforschung, die Gesamtheit der didaktischen Fragestellungen in ihrer *Komplexität und Kompliziertheit* in den Blick nimmt (vgl. Klafki 1994, S. 62; Klingberg 1994, S. 77; Glöckel 2003; Hallitzky/Seibert 2005; Jank/Meyer 2006; Becker 2007a, b, c; Kron 2008; Wegner 2016, S. 14) und diese auch eigenständig untersucht. In der Allgemeinen Didaktik wird das Zusammenhangsdenken für die gesamte Wissenschaftsdisziplin entwickelt. Bildung und Erziehung sind komplexe Systeme, in denen es viele Beziehungen zwischen den einzelnen Strukturelementen gibt, die wiederum nicht losgelöst voneinander existieren. Die einzelne Beziehung scheint einfach zu sein, unterliegt aber Abhängigkeiten von Voraussetzungen und exis-

tierenden und sich verändernden Bedingungen sowie den wirkenden Interdependenzen. Die *Komplexität* in der Bildung und Erziehung ergibt sich aus dem Nebeneinander-Existieren einer Vielzahl von Elementen und Einflussfaktoren, die in wechselseitiger Abhängigkeit bzw. Interdependenz ein System bilden. Um diese Komplexität erfassen zu können, muss man die Systemelemente identifizieren und ihre Beziehungsvielfalt erfassen und darstellen. Die *Kompliziertheit* in der Pädagogik ergibt sich aus den möglichen Varianten der Verknüpfung der Strukturelemente, die, wenn sich die Bedingungen, Voraussetzungen und Einflüsse verändern, auch die Wirkungen verändern. Der mögliche „Verknüpfungsreichtum" der Systemelemente hat zur Folge, dass einerseits Wirkungen nicht absolut vorausgesagt werden können, und andererseits, wenn sich die Bedingungen, Voraussetzungen und Einflüsse verändern, andere als die vorausgedachten Wirkungen entstehen. Rucker (2016) stellt fest und kritisiert:

> „Eine erziehungswissenschaftliche Komplexitätsforschung, die mit einem geklärten Begriff von Komplexität operiert und das Problem der Komplexität in allen Fragen der Theoriebildung berücksichtigt, existiert heute lediglich als Forschungsansatz." (S. 288)

Die Komplexität des Unterrichtens zu erfassen, versucht man in didaktischen Modellen darzustellen. Sie sind Vereinfachungen komplizierter Vorgänge, also „Einfachheit" als wissenschaftlich berechtigte Reduktion. Die „Einfachheit" widerspiegelt sich in der Formulierung von gesetzmäßigen Beziehungen und von Prinzipien. In der praktischen pädagogischen Arbeit gibt es eine weitere Bedeutung von „Einfachheit", nämlich die Notwendigkeit der didaktischen Vereinfachung im Unterricht, um komplizierte Sachverhalte verständlich und aufnahmebereit für Lernende zu machen.

Die Allgemeine Didaktik muss den auszubildenden und praktisch arbeitenden Lehrerinnen und Lehrern grundlegende Orientierungen für die Planung, Gestaltung und die Reflexion von Unterricht und unterrichtsähnlichen Prozessen geben, die über fachdidaktische Betrachtungen hinausgehen und erst eine pädagogische *Gesamtsicht* ermöglichen. „Sollte die Pädagogik das Thema Komplexität weiterhin ignorieren, droht ihr die Gefahr, den Anschluss an die internationale und transdisziplinäre Wissenschaftsentwicklung in diesem Bereich zu verlieren", warnt Rucker (2016, S. 288f.).

Böttcher zeigt in seinem Beitrag „Lehrkräftebildung und Erziehungswissenschaft", „…dass sowohl Bildungspolitik als auch Erziehungswissenschaft, wenn auch ungewollt, massiv zur Deprofessionalisierung des Lehrerberufes beitragen." (Böttcher 2020, S. 13) Was die Erziehungswissenschaft betrifft, (die neben der Soziologie und Psychologie als Bildungswissenschaften be-

zeichnet werden), „…gibt es nur wenige Pflichtelemente, die aber auch nicht inhaltlich und curricular verbindlich formuliert sind. Diese Situation und die Dominanz von Wahlelementen führt zu individualisierten, mithin zufälligen Studienverläufen“ (ebd. S. 14). Böttcher (2020) spricht „von einem Abwärtstrend zur Deprofessionalsierung“ (S. 18) in der Lehrerausbildung, Tenorth (2017) sogar davon: „Es werden inkompetente Lehrer erzeugt“ (S. 6). Hinzu kommen die gegenwärtig vielen Seiteneinsteiger, denen jede didaktische und fachmethodische Ausbildung fehlt und diese auch nicht systematisch und fundiert gelehrt bekommen. In der Lehrerausbildung gibt es eine große Beliebigkeit, die gerade darin besteht, dass „…jedes Institut für Erziehungswissenschaft (oder sogar jede bzw. jeder dort Lehrende) ohne klare Spielregeln agiert und individuelle Entscheidungen hinsichtlich Programmtheorie und Umsetzungen trifft“ (ebd., S. 14/15). Professionelles Handeln ist und muss – wie z. B. bei Ärzten – in hohem Maße standardisiert sein. Das Handeln folgt nach Regeln (wie bei Juristen) oder nach wissenschaftlichen Erkenntnissen (wie bei Medizinern) und wird durch unbeteiligte Professionelle kontrolliert. Im Lehrerberuf ist beides nicht der Fall.

„Professionelles und kompetentes Handeln im Lehrerberuf (setzt) eine umfangreiche Wissensbasis auf der Grundlage von Begriffen und Theorien“ voraus (Kunina-Habenicht/Terhart 2020, S. 40). Deshalb stellt sich die Frage nach dem Grundlegenden, dem Fundamentalen in der Erziehungswissenschaft, die Frage nach Gesetzmäßigkeiten, Gesetzen, Prinzipien, Regeln u. a. Sie müssen notwendigerweise Bestandteil pädagogischer Grundqualifizierung sein. Nur so können Fortschritte in der Professionalisierung des Lehrerberufes und in der weiteren Verfachlichung der pädagogischen Arbeit erreicht werden. In der Erziehungswissenschaft zeigt sich gegenwärtig noch ein weiteres Problem. Man konzentriert sich ausschließlich auf den Begriff „Bildung“ und vernachlässigt oder eliminiert insgesamt den der „Erziehung“. Vogel konstatiert:

> „Geht man von ‚Bildung’ als Prozess des Erwerbs eines anspruchsvollen Mensch-, Welt- und Selbst*verständnisses* aus, bleibt es Aufgabe der Erziehung, für eine angemessene moralische Orientierung zu sorgen; meint man aber die Entwicklung eines Mensch-, Welt- und Selbst*verhältnisses*, wird auch die Haltungsbildung Teil der Bildungsaufgabe, und ein eigener Erziehungsbegriff funktionslos.“ (Vogel 2020, S. 197)

Bedenkt man, dass es in mindestens allen europäischen Fremdsprachen begriffliche Äquivalente für Erziehung, aber nicht für Bildung gibt, ist die begriffliche Ausschließung von Erziehung problematisch. Winkler spricht sogar von der Einsicht der Pädagogik, dass

> „Erziehung durchaus als ein *eigener* Sachverhalt mit *eigener* Logik (hervorgehoben – F. P.) verstanden sein muss. Sie hat ihre eigene Logik und Rationalität, die aber keine Linearität ausspricht, sondern als ein komplexer Zusammenhang von Strukturen und Prozessen zu verdeutlichen ist." (Winkler 2020, S. 172)

In der Erziehung geht es um die Entwicklung von Haltungen und Verhaltensweisen. Und deshalb gibt es eigentlich keine Bildung ohne Erziehung und keine Erziehung ohne Bildung. Anthropologisch und historisch betrachtet war Erziehung stets auf Existenzsicherung und Erhaltung der Art gerichtet und damit ein notwendiges Moment des gesellschaftlichen Reproduktionsprozesses, der wiederum auch Inhalt, Umfang und Vorgehensweise bestimmte. Geht es eben nicht nur um die einfache gesellschaftliche Reproduktion, sondern um die erweiterte und die Nutzung der Kreativität der erkenntnisorientierten Subjekte, dann ist gezielte Bildung gefordert und Vielseitigkeit der Subjekte notwendig. Bildung und Erziehung sind in ablaufenden pädagogischen Prozessen miteinander verwoben, und dennoch können „relativ reine" Bildungsphasen und „relativ reine" Erziehungsphasen im pädagogischen Handeln vollzogen werden. Sie besitzen jeweils besondere Spezifika. „Man muss wissen und die Überzeugung, die Idee, teilen, dass Erziehung erforderlich ist… Erziehung ist verhängt", sagt Winkler (2020), „wir entkommen ihr nicht (Heydorn 1970); es kommt darauf an, sie zu gestalten… Man muss sie zumindest als einen Sachverhalt eigener Art begreifen." (S. 173/174). Aus diesem Grunde hatte ich mich in meiner Habilitationsarbeit 1987 bereits mit der synthetisierend-funktionalen Betrachtung des pädagogischen Prozesses beschäftigt, inwieweit in der Prozessgestaltung didaktische *und* erzieherische Funktionen zu identifizieren sind und wie diese entsprechend im Prozess wissenschaftlicher Bildung und humanistischer Erziehung eingesetzt werden bzw. eingesetzt werden müssten.

Pädagogische Prozesse sind vielschichtiger und vielseitiger Natur und ungeheuer *komplex und kompliziert*. Dementsprechend hat es in der Vergangenheit in der Entwicklung der Pädagogik und Erziehungswissenschaft viele Versuche gegeben, diese Komplexität zu erfassen und zu Komplexitätsreduktionen zu kommen. So sind für die Planung, Gestaltung und Reflexion von Unterricht diverse Konzepte entwickelt und didaktische Modelle entworfen worden. Das geschah aus bildungstheoretischer, lehr-lern-theoretischer und auch aus kommunikationstheoretischer Sicht (vgl. u. a. Kron 2008; Terhart 2008). Es wurden auf der Grundlage einzelner oder mehrerer wissenschaftstheoretischer Positionen solche Modelle entwickelt, die dann aber diese Vielseitigkeit und Vielschichtigkeit nicht adäquat widerspiegeln konnten. Auch die Entwicklung der Fachdidaktiken, die sich in den 1960er

Jahren zunehmend zu eigenständigen wissenschaftlichen Disziplinen entwickelt haben, sowie die Etablierung von Professionalisierungstheorien und Entwicklungstheorien (vgl. Hopmann 2016, S. 30/31) hat nicht dazu geführt, den *ganzheitlichen Erziehungs- und Unterrichtsprozess* in den Blick zu nehmen und wissenschaftlich adäquat in seiner Ganzheit abzubilden. Das aber ist die Aufgabe der Didaktik, und genau das ist es, was die Allgemeine Didaktik leisten muss und aus meiner Sicht auch leisten kann.

2. Besonderheit des Pädagogischen

In der Erziehungswissenschaft haben sich diverse wissenschaftliche Disziplinen derart herausgebildet, je nach dem mit welchem Teilsystem sich beschäftigt wird: historische, vergleichende, systematische Pädagogik u. a. Allein in der Schulpädagogik gibt es nach gegenwärtigen Systematisierungen die Theorie der Schule, die Allgemeine Didaktik und die Curriculumtheorie.

Die Allgemeine Didaktik hat ein außerordentlich breites Untersuchungsspektrum und schließt zwei Erkenntnisstränge ein:

1. Es sollen Erkenntnisse gewonnen werden über die gesellschaftliche Bestimmtheit schulischer Lehr- und Lernprozesse (vgl. Bernhard 1999, S. 653), zu Fragen der demokratischen Gesellschaft und der Befähigung der immer neu nachwachsenden Generation zur erweiterten Reproduktion der Gesellschaft, zur Analyse des institutionalisierten Lehrens und Lernens unter sich verändernden schulischen und gesellschaftlichen Bedingungen (z. B. Zuwanderungen, Inklusion, Ganztagsschule, Digitalisierung u. a.) und zukünftigen Herausforderungen, zur bildungstheoretischen Reflexion des Lehrens und Lernens (z. B. Bestimmung der Allgemeinbildung, der Unterrichtsziele [Bildung und Erziehung], des Inhalts, der Methoden und der Organisation), zur Struktur von Unterricht, zur Prozessgestaltung des Lehrens und Lernens, zu den sozialen Beziehungen zwischen Lehrenden und Lernenden sowie den agierenden Gruppen und letztlich auch Erkenntnisse zur optimalen Gewinnung von Unterrichtsresultaten.
2. Es sollen die wissenschaftlichen Ergebnisse der Forschung dann genutzt werden, um *ein* didaktisches Modell für die Planung, Gestaltung und Reflexion von Unterricht entwerfen und *ständig vervollkommnen* zu können.
   Die Lehrenden müssen als Experten für Unterricht sich an den neuesten Erkenntnissen der Wissenschaften orientieren und eine wissenschafts-

> orientierte Wertevermittlung planen und gleichzeitig offen sein für ein Unterrichtshandeln, das die Lernenden als Subjekte des eigenen Lernprozesses betrachtet und deren Habitus und Reaktionen im Unterricht berücksichtigt sowie auf Gruppen-Entwicklungsprozesse Einfluss nimmt.

Das gewünschte Expertentum können wir nur im Rahmen der Lehrerbildung entwickeln und durch interdisziplinäre Forschungen mit dem Ziel einer transdisziplinären Allgemeinen Didaktik. Es ist nach Reusser notwendig:

> „… einen normativ verankerten, fachübergreifenden, schulpädagogischen und didaktischen Referenzrahmen zur Reflexion und Deutung der pädagogischen Handlungsaufgaben und des strukturellen Rahmens von Bildung sowie der Ziele und der inhalts- und prozessbezogenen Gütekriterien von Wissen und Können" (Reusser 2008, S. 223) zu schaffen.

Die Allgemeine Didaktik muss diesen Referenzrahmen zur Verfügung stellen und lehrbar machen. Dazu muss gezielt und systematisch in die Komplexität des Pädagogischen eingedrungen und müssen Komplexitätsreduktionen vorgenommen werden. Hörz (2010) schreibt: „Jeder Erkenntnisprozess erfordert Vereinfachungen. Sie erfolgen auf verschiedenen Ebenen, der Darstellung, der Kommunikation, der Handlungsorientierung und der Ideologien." (S. 11) Und weiter:

> „Es kann in der Erkenntnis nie darum gehen, alle Seiten zu kennen, sondern die wesentlichen, d. h. diejenigen, die den Charakter einer Erscheinung bestimmen. Wir heben durch das Vordringen in das Wesen einer Erscheinung immer mehr Vereinfachungen auf, ohne sie zu beseitigen." (S. 12)

Wolfgang Ratke (1571–1635), einer der Begründer der Didaktik, stellt schon die Frage: Wie muss gelehrt werden, damit der Schüler schnell, sicher und gründlich lernt?

Damit ist der Absicht Ausdruck verliehen, Erkenntnisse gewinnen zu wollen, die Aussagen treffen können

- zum effektiven und effizienten Lernen,
- zum fundierten und erweiterbaren Lernen,
- zum nachhaltigen Lernen und
- zum anwendungsbereiten Lernen.

Alles Didaktische soll dem Ziel dienen, mit geringem Aufwand und in bestimmten Zeiträumen möglichst hohe Effekte der Persönlichkeitsentwicklung zu erzielen. Schüler besuchen in der Regel ca. 15.000 Unterrichtsstunden, in denen das vorgesehene Bildungsgut vermittelt werden soll. Da es nicht nur

um die Vermittlung des gesellschaftlich Notwendigen, sondern auch um die Aneignung des individuell Möglichen geht, sind in den vergangenen Jahrhunderten Wege gesucht worden, die Übermittlungs- und Aneignungsprozesse zu optimieren und Voraussetzungen zu schaffen, diese Prozesse immer erfolgreicher gestalten zu können. Es bestand seither das Bestreben, einfache Lehr-Lern-Prozesse so zu gestalten, dass bei möglichst geringem Aufwand eine hohe Erfolgsquote erreicht wird und möglichst Misserfolge ausgeschlossen werden.

Allein die Erfahrungstatsache, dass es über Jahrtausende möglich und (wenn auch oft nur scheinbar) erfolgreich war, ein „ungehöriges Kind" mit Schlägen zu züchtigen und „ungeratene Söhne" sogar zu steinigen (vgl. 5. Mose 21, 18–21), beförderte diese unzulässig vereinfachte, d. h. mechanistische Vorstellung von Erziehung, dass bei wachsendem Widerstand des Zöglings die Schlagkraft verstärkt werden müsse, um zum gewünschten Erfolg zu gelangen. Praktische Erfahrungen in Verbindung mit undialektischem Denken führten zu einseitig vereinfachten Vorstellungen vom Wesen der Erziehung. So begriff man:

Erziehung als *Ziehen*	–	Platon (427–347 v. u. Z.),
Erziehung als *Wachsenlassen*	–	Jean Jaques Rousseau (1712–1778),
Erziehung als *Lebenhelfen*	–	Johann Heinrich Pestalozzi (1746–1827),
Erziehung als *Regierung und Zucht*	–	Johann Friedrich Herbart (1776–1841),
Erziehung als *Führung*	–	Peter Petersen (1884–1952),
Erziehung als *Anpassung*	–	Burhuss Frederic Skinner (1904–1990) und Talcott Parsons (1902–1979) (vgl. Kron 2001, S. 196–209).

Die unterschiedlichen Formen der Vereinfachung in diesen Ansätzen zur Entwicklung der Erziehungswissenschaft bestehen darin, dass sie die Spezifik und Rolle der Wechselwirkungen zwischen den Strukturelementen nicht hinreichend erkannt hatten, und zwar nicht nur die Rolle des „Objekts der Einwirkung" in jedem einzelnen Falle unzureichend beachtet hatten und die zwischen Erziehern und zu Erziehenden, sondern auch die Wechselwirkungen zwischen *allen Strukturelementen des Prozesses*, also auch der Ziele mit den Inhalten und Methoden sowie Organisationsweisen und Organisationsformen, die wiederum komplex geartet und kompliziert miteinander verknüpft sind. Dennoch sind diese „Bilder" ein Erkenntnisgewinn und Vereinfachungen eines komplizierten Prozesses.

Die Komplexität und Kompliziertheit der Erziehung bedeutet, dass es im Gegenstandsbereich der Erziehungswissenschaft keine reale Einfachheit gibt, sondern nur sehr viele Möglichkeiten, Erkenntnisse und Handlungsorientierungen zu formulieren, die Vereinfachungen darstellen, deren Wert sich im erzieherischen Handeln erweisen muss, d. h.: Um überhaupt etwas Realitätsrelevantes über Erziehung aussagen zu können, sind Vereinfachungen der *strukturellen und funktionalen Zusammenhänge* sowohl hinsichtlich der Erziehung in ihrer ganzheitlichen Dynamik als auch hinsichtlich der einzelnen Strukturelemente und ihrer Verknüpfungen notwendig. Das bedeutet:

1. In der Pädagogik erweist sich das Prinzip der Einfachheit – oder genauer; der Vereinfachung als notwendig, um überhaupt eine Verständigung über vorliegende pädagogische Sachverhalte zu ermöglichen. An dieser Verständigung sind sowohl Theoretiker als auch Praktiker interessiert.
2. Wenn die Erziehungswissenschaft der Praxis dienen soll, wovon wir als Anhänger des Prinzips der Verbindung theoriam cum praxi überzeugt sind, dann bedarf es auch wissenschaftlich begründeter Vereinfachungen bezüglich der Darstellung von

   – Erziehung und ihren transgredienten Grundlagen (siehe http://leibniz sozietaet.de/wp-content/uploads/2017/03/Naumann.pdf, S. 4f.), womit Zusammenhänge zwischen der Erziehung als System und ihrer Umwelt gemeint sind (vgl. auch Hörz 2010, S. 27), und
   – der *Strukturelemente* der Erziehung mit ihren Verknüpfungen im Rahmen des Systems.

In diesem Zusammenhang sind vier Ebenen und damit verbundene Zwecke bedeutsam.

1. Die Ebene der erziehungswissenschaftlichen Forschung, die die Gesetzmäßigkeiten des „Pädagogischen“ erfassen, diese beschreiben und Orientierungen sowie in besonderer Weise Handlungsorientierungen u. a. erarbeiten muss.
2. Die Ebene der Lehrer- und Erzieherausbildung, die eine hochschulpädagogisch vereinfachte Aufbereitung pädagogischer Erkenntnissysteme erfordert.
3. Die Ebene der Bildungspolitik, die sich nicht nur von einzelnen politischen Wunschvorstellungen und/oder ökonomischen Erwartungen der Wirtschaft leiten lassen sollte, sondern für ihre Entscheidungen Ergebnisse wissenschaftlicher Analysen und Studien sowie erprobte Bildungsmodule zur Entscheidungsgrundlage nehmen müsste.

4. Die Ebene der Lehr- und Lernprozesse an den allgemeinbildenden Schulen, die auf die Aneignungsmöglichkeiten der Lernenden Rücksicht nehmen muss, was vor allem bei der Inhaltsauswahl und -anordnung bezüglich der Menge und Struktur zu beachten ist. Zumindest seit Ratke und Komensky gilt das Prinzip der Fasslichkeit als Zweck und Gradmesser der Vereinfachung, die durch Lehrprogrammerprobungen empirisch ermittelt werden sollte, wofür vor allem Fachdidaktiker zuständig sind.

Die Ebene 1 ist diejenige, die die wissenschaftliche Grundlage mit den Forschungsergebnissen ihrer verschiedenen Wissenschaftsdisziplinen bildet, die für die anderen drei Ebenen gezielt genutzt werden bzw. genutzt werden sollten. Die Ebene 2 ist maßgeblich mit der Ebene 1 verbunden, da hier Wissenschaftler tätig sind, die Forschungsprozesse der Ebene 1 leiten und gleichzeitig in der Ausbildung von Pädagogen tätig sind und deren Professionalität entwickeln müssen. Die Ebene 3 steuert die Bildungs- und Schulentwicklung und sollte Entscheidungen auf der Grundlage der Erkenntnisse aus den Ebenen 1 und 4 nutzen. Die Ebene 4 ist die Nutzung der wissenschaftlichen Erkenntnisse in der pädagogischen Praxis. Sie ist für eine effektive und effiziente Gestaltung der Lehr-Lernprozesse und für die intakte entwicklungsfördernde Nutzung der Beziehungen zwischen den personellen Strukturelementen verantwortlich.

In den wissenschaftlichen Reflexionen zu Erziehung und Unterricht spielen seit Ratke und Komensky Überlegungen zur Förderung der Lernaktivitäten von Schülern eine große Rolle, die bereits von Diesterweg im Prinzip der Selbsttätigkeit erfasst und ins öffentliche Bewusstsein gerückt worden sind. Diese Bemühungen waren darauf gerichtet, der in der Erziehungs- und Schulpraxis verbreiteten und mechanistischen Einwirkungspädagogik entgegenzutreten, um zu besseren Unterrichtserfolgen zu gelangen.

Die heute vorliegenden Unterrichtskonzepte und didaktischen Modelle haben immer wieder drei Aspekte in den Vordergrund gerückt, so dass man vom Didaktischen Dreieck spricht (vgl. Abb. 1).

Ziel der Lehr-Lern-Prozesse ist es, gesellschaftlich wichtige und gewollte Inhalte durch Lehrende zu übermitteln und durch Lernende mit größtmöglichem Erfolg anzueignen. Neuerdings werden in der Allgemeinen Didaktik auch Bezüge zur didaktischen Forschung in der DDR hergestellt. So schreibt Meinert Meyer: „Jetzt stelle ich erst einmal dar, warum Lothar Klingbergs dialektische Didaktik aus meiner Sicht ein sehr gutes Modell darstellt, auf dem man Bildungsgangdidaktik und dem zuvor Bildungsgangforschung entwickeln kann.“ (Meyer 2016, S. 64)

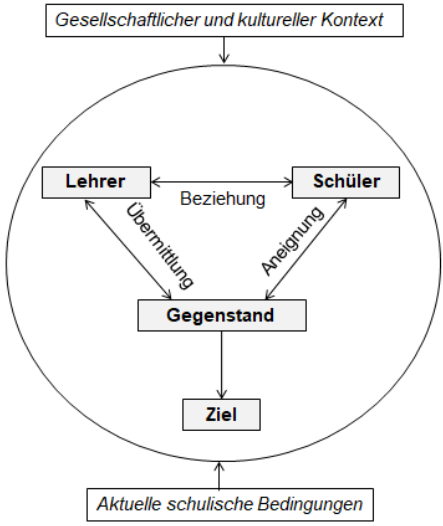


Abb. 1: Didaktisches Dreieck

Quelle: Zusammenfassende Darstellung durch den Autor

Er hebt hervor, dass Klingberg das didaktische Dreieck in ein didaktisches Viereck („Quadrupel“) verwandelt und von den zwei sich kreuzenden Grundrelationen spricht: Lehren und Lernen; Inhalt und Methode.

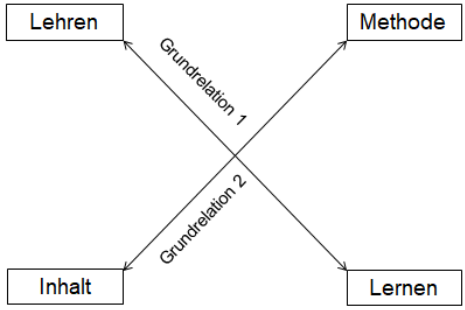


Abb. 2: Didaktisches Viereck

Quelle: Zusammenfassende Darstellung durch den Autor

M. Meyer (2016, S. 66) benennt bei Klingberg diese zwei „Grundrelationen“ und schreibt:

> „Zusammen kennzeichnen sie Unterricht als Prozess. Die Inhalte gibt es nicht ohne Methoden und die Methoden gibt es nicht ohne Inhalte. Klingberg eröffnet so die dialektische Einbindung der Unterrichtsinhalte. Anders formuliert: Die konstitutive dialektische Funktion der Unterrichtsmethode lässt sich ins didaktische Dreieck nicht einbinden, und ‚dialektisch‘ bedeutet hier, dass es die Inhalte nicht ohne Methoden ihrer Erzeugung im Unterrichtsprozess gibt und dass umgekehrt Methoden ohne die Inhalte, die gelernt werden sollen, nicht konzipiert werden können.“

Bei der Bildung und Erziehung handelt es sich um ein komplexes und kompliziertes Prozessgeschehen. Viele Wirkfaktoren und Operationen der Prozessbeteiligten spielen dabei eine große Rolle, die nur über vereinfachende Modellvorstellungen kommunizierbar gemacht werden können.

Bemühungen in diese Richtung lassen sich – zumeist inhaltsbezogen (etwa bezüglich religiöser Unterweisungen) bereits seit Ratke und Komensky finden (vgl. Ratke 1957; Komensky 1962); aber einen wissenschaftlich begründeten Versuch entsprechend dem damaligen Entwicklungsstand der Erkenntnistheorie und Psychologie entwickelte Herbart mit seinen „Stufen des Unterrichts“ für die Didaktik. Bei aller Kritik an dem formalen Charakter der verschiedenen Varianten von Unterrichtsstufentheorien – vor allem auch seiner Nachfolger – erweist sich Herbarts (1922) Ansatz (Klarheit, Assoziation, System, Methode) doch als fruchtbar und anregend, vor allem wenn man die dialektischen Momente in seinen Erklärungen zu der von ihm vorgeschlagenen Unterrichtsstufen- oder Phasenfolge berücksichtigt (vgl. S. 189).

Im Rahmen der dialektisch-materialistischen Unterrichtsforschung der DDR wurde der Herbartsche Grundgedanke kritisch geprüft und in dialektischen Modellvorstellungen aufgehoben, die hier nicht im Einzelnen vorgestellt und erörtert werden können. Es sei nur auf die Bemühungen von Drefenstedt (1969) und Klingberg (1976) verwiesen. Liimets und Naumann (1982) haben diese Bemühungen weitergeführt, indem sie

a) eine konsequente *funktionale* Betrachtungsweise von pädagogischen Prozessen konzipierten (und sich damit von mehr oder weniger mechanischen Stufen und Phasenmodellen verabschiedeten) und
b) die jeweiligen Funktionsmodelle mit entsprechenden Funktionsprinzipien verknüpften (siehe Anhang 1).

Das führte natürlich zu einer hochgradig vereinfachten Prozessbetrachtung, deren Praktikabilität aber in zahlreichen empirischen Untersuchungen – darunter auch Dissertationen – nachgewiesen werden konnte.

Eine *funktionale Betrachtung* des Unterrichtsprozessverlaufs vorgenommen und didaktische Funktionen so bestimmt zu haben, dass sie entsprechend den wissenschaftlich begründeten geplanten Prozess*verläufen* und in Abhängigkeit der konkreten pädagogischen Situation ausgewählt und lernprozessgerecht eingesetzt werden können sowie die Einbringung der statistischen Gesetzeskonzeption in die Pädagogik (vgl. auch Brezinka 1989, S. 172), sind die besonderen Leistungen von Liimets und Naumann. Dadurch ist es möglich geworden, gesetzmäßige Beziehungen zu identifizieren und wissenschaftlich zu begründen, dass entsprechendes pädagogisches Handeln immer eine bestimmte Wirkungs*breite* hat und nicht bei allen Beteiligten zum gleichen Ergebnis führt. Die Stufen- und Phasenmodelle in der Pädagogik sind problematisch, weil „sie nicht der Asynchronie ähnlicher individueller Prozessverläufe Rechnung tragen“ (Naumann 2014b, S. 107). Bestimmte gezielte pädagogische Handlungen und Maßnahmen führen, wenn dem nicht ungewöhnliche innere Faktoren der Persönlichkeit und Störungen in den Schüler-Lehrer-Beziehungen oder äußeren Umständen entgegenstehen, bei den einzelnen Schülern zu Lernerfolgen, aber nicht bei allen in gleicher Weise (vgl. ebd.).

Die Zielorientierung, das Motivieren, das Üben, das Zusammenfassen, das Wiederholen, das Anwenden u. a. zeigen pädagogischen Erfolg bei *allen*, doch die konkrete Wirkung bei jedem Schüler ist von vielen Faktoren abhängig. Deshalb haben die pädagogischen Gesetzmäßigkeiten einen dynamischen, einen stochastischen und einen probabilistischen Aspekt. Das heißt, unter bestimmten Bedingungen treten mit *Notwendigkeit* bestimmte Wirkungen auf (dynamischer A.), unter bestimmten Bedingungen treten bestimmte Wirkungen auf, aber bezogen auf eine bestimmte Gruppe weisen diese eine *statistische Verteilung* auf (stochastischer A.) und hinsichtlich jedes Gruppenmitgliedes lässt sich nur mit einer bestimmten *Wahrscheinlichkeit* eine bestimmte Wirkung angeben. Sie ist bei jedem Schüler unterschiedlich (probabilistischer A.) (vgl. auch Naumann 2014a, b).

In jedem pädagogischen Prozess wirken gesetzmäßige Zusammenhänge. Sie bestehen zwischen:

– Gesellschaft *und* der Bildung und Erziehung,
– Lehrenden (Lehrer/in) *und* Lernenden (Schüler/in),

– Schüler/in *und* Klassengemeinschaft (Gruppe),
– Schüler/in 1, Schüler/in 2 *und* Schüler/in n,
– Leistungseigenschaften *und* Verhaltenseigenschaften bzw.
– Fach- und Methodenkompetenzen *und* Sozial- und Selbstkompetenzen.

Daraus lassen sich Gesetzesformulierungen ableiten, die die theoretische Grundlage für eine handlungsanleitende Pädagogik bilden. Sie sind das Fundament für die Formulierung pädagogischer Prinzipien, hier der Strukturprinzipien, also Orientierungen, die dem pädagogischen Prozess eine funktionstüchtige Struktur verleihen und ein optimales Konstellationsgefüge für Persönlichkeitsentwicklung schaffen (siehe Anhang 2). In der Formulierung dieser gesetzmäßigen Beziehungen zeigt sich Einfachheit als ein Wirkprinzip.

3. Erziehungswirklichkeit: Vielfalt, Gemeinsamkeit, Unterschiedlichkeit, Balancen

Wenn es so ist, dass kein Mensch dem anderen gleicht, alle verschieden sind, dann sind die intrapersonellen Bedingungen und Voraussetzungen auch einmalig. Dennoch ist es so, dass Mädchen und Jungen entsprechend unseren entwicklungspsychologischen Erkenntnissen in den jeweiligen Jahrgängen viele Gemeinsamkeiten aufweisen und deshalb auch gemeinsam unterrichtet werden können. Nimmt man jedoch eine bestimmte Klassenstufe als homogene Gruppe an, so erweist sich diese wiederum als heterogen hinsichtlich der Anlagen und mentalen und psychischen Voraussetzungen. Daraus ergeben sich Konsequenzen für das gemeinsame Arbeiten *mit allen* und den differenzierten Umgang *mit dem Einzelnen*. Darauf soll später eingegangen werden. Neben den intrapersonellen Unterschieden kommen dann weitere Faktoren hinzu, die sich aus der Umgebung der Lernenden, aus den sozialen Beziehungen der Beteiligten zueinander, den Aufgabenstellungen und Anforderungen und Interdependenzen miteinander ergeben.

Aufgrund der Verschiedenartigkeit der beteiligten Subjekte und der wissenschaftlichen Erkenntnisse aus Bildungsprozessen der Individuen und Gruppen sowie dem Umgang mit verschiedenen Jahrgangsstufen sind grundsätzlich in jedem pädagogischen Prozess Balancen zu beachten und ist das Handeln auf einem Kontinuum zu bestimmen, um möglichst effektiv arbeiten zu können. Solche Balancen sind:

– das Maßverhältnis zwischen pädagogischer Führung und Selbsttätigkeit des Heranwachsenden,

– das Maßverhältnis zwischen Nähe und Distanz,
– das Maßverhältnis zwischen Gewähren und Begrenzen,
– das Maßverhältnis zwischen Toleranz und Konsequenz,
– das Maßverhältnis zwischen Normensetzung und Normenproduktion,
– das Maßverhältnis zwischen Unterordnung und Überordnung,
– das Maßverhältnis zwischen Anspannung und Entspannung.

Das „Pädagogische" ist ein vielgestaltiges System, ein komplexes System, in dem es viele einzelne Beziehungen zwischen den Elementen gibt (siehe personelle Strukturelemente: Schüler/in [Klasse, Gruppe] und Lehrer/in [Klassenstufenteam, Kollegium); sachliche Strukturelemente: Ziel, Inhalt, Methode, Organisation, Resultat), die *nicht* losgelöst voneinander existieren (siehe Anhang 3; vgl. auch Meyer, H. 1989, 1995). Diese Strukturelemente zeigen sich auf drei Ebenen: auf der Beziehungsebene, der Übermittlungsebene und der Aneignungsebene. Dabei steht grundsätzlich *jedes* Strukturelement mit *jedem* wechselseitig und untereinander in Verbindung. Damit wird deutlich, dass es nicht nur um ein „didaktisches Dreieck" oder ein „Quadrupel" geht, *sondern* um vielfältige wechselseitige Beziehungen und Abhängigkeiten. Diese aufzudecken und darzustellen ist Aufgabe der Wissenschaft, damit dann praktische pädagogische Prozesse erfolgreich geführt werden können (vgl. auch Hattie 2013 zu den sozialen Beziehungen). Die einzelne Beziehung erweckt den Eindruck der Einfachheit, unterliegt aber den Abhängigkeiten von Voraussetzungen sowie existierenden und sich verändernden Bedingungen. Es gibt auch Abhängigkeiten 1., 2. und weiteren Grades.

Die bisher gewonnenen wissenschaftlichen Erkenntnisse aus dem didaktischen Systemzusammenhang und der Analyse der gesetzmäßigen Beziehungen (siehe Anhang 2) ermöglichen uns die Begründung verschiedener Prinzipienkategorien und die Erarbeitung eines Prinzipiensystems (siehe Anhang 4).

Für das *Schulsystem* gelten:	– Schulpolitische Prinzipien
Für alle *pädagogischen Prozesse* gelten:	– Allgemeine pädagogische Prinzipien – Strukturprinzipien

Für einen ***vollständigen*** *Lehr-Lern-Prozess* gelten:

→ präinteraktive Planung:	– Allgemeines Funktionsprinzip der Planung – Spezielle Funktionsprinzipien der Planung

→ Durchführung (gesamter Unterrichtsverlauf mit interaktiverPlanung, allen Funktionseinheiten (1–4) und der interaktiven Auswertung:	– Allgemeines Funktionsprinzip der Durchführung. – Spezielle Funktionsprinzipien der Durchführung
→ postinteraktive Auswertung:	– Allgemeines Funktionsprinzip der Auswertung – Spezielle Funktionsprinzipien der Auswertung

Auf einzelne Prinzipiengruppen kann an dieser Stelle aus Zeitgründen nicht eingegangen werden. Sie bilden eine Ordnung, die sich auf die Systemgesetze schulischer Lernprozesse (siehe Gesellschaft – Bildung; Lehrende – Lernende usw.) bezieht und eine effektive und effiziente Gestaltung von Bildungs- und Erziehungsprozessen möglich macht (vgl. auch Sandfuchs 2006; Seibert 2006; besonders Naumann 2014b, 2019 u. a.).

4. Didaktische Modelle

Wir unterscheiden in der Allgemeinen Didaktik Unterrichtskonzepte und didaktische Modelle. Die Unterrichtskonzepte (vgl. Jank/Meyer 1997, S. 294) sind Gesamtorientierungen für das didaktische Handeln und haben *einen* unterrichtsmethodischen Schwerpunkt (schülerorientiert, problemorientiert usw.) und weisen einen Zusammenhang von Ziel – Inhalt – Methode aus.

Didaktische Modelle sind umfassender und bilden jeweils den Kern wissenschaftlicher Theoriegebäude zur Analyse und Planung (Konzipierung) didaktischen Handelns in schulischen und nichtschulischen pädagogischen Handlungszusammenhängen, also zur Gestaltung jeglicher Lehr-Lern-Prozesse und oft auch zur Reflexion dieser. Sie sind theoretisch umfassend, enthalten die

- Voraussetzungen,
- Möglichkeiten und
- Grenzen des erfolgreichen Lehrens und Lernens.

Sie benennen die Strukturmomente des Unterrichts und begründen diese auf der Grundlage wissenschaftlicher Erkenntnisse. Ein didaktisches Modell wird

in der Regel in seinem Theoriekern einer wissenschaftstheoretischen Position (manchmal auch mehreren) zugeordnet (vgl. auch Meyer, H. 1989, 1995, 2001).

Folgende Übersicht zeigt eine Auswahl bedeutender Modellbildungen, auf die hier nicht näher eingegangen werden kann, deren Erkenntnisse aber im am Ende des Beitrags vorgestellten Gesamtmodell verarbeitet worden sind:

1. *Bildungstheoretische oder Kritisch-konstruktive Didaktik* (W. Klafki, siehe Jank/Meyer: Didaktische Modelle, S. 131ff.)
2. *Lehrtheoretische Didaktik* (W. Schulz, siehe Jank/Meyer: Didaktische Modelle, S. 181ff.)
3. *Kybernetische Didaktik* (Felix von Cube, siehe Gudjons: Pädagogisches Grundwissen, S. 224ff.)
4. *Lernzielorientierte Didaktik* (Christine Möller, siehe Gudjons: Pädagogisches Grundwissen, S. 225ff.)
5. *Kritisch-kommunikative Didaktik* (Rainer Winkel, siehe Gudjons: Pädagogisches Grundwissen, S. 227ff.)
6. *Dialektisch orientierte Didaktik* (L. Klingberg, siehe Jank/Meyer: Didaktische Modelle, S. 235ff.; Klingberg: Einführung in die Allgemeine Didaktik; Liimets/Naumann: Didaktik)
7. *Stufenmodell* (M. Bönsch: Unterrichtskonzepte, 1986)
8. *Subjektorientierte Didaktik* (A. Holzbrecher, siehe Die Deutsche Schule, 5. Beiheft, 1999, S. 141ff.)
9. *Evolutionäre Didaktik* (A. Scheunpflug, siehe Die Deutsche Sprache, Beiheft, 1999, S. 169ff.)

Wie bereits angemerkt, sind die bisher entwickelten didaktischen Modelle aus bildungstheoretischer, lehr-lern-theoretischer, kommunikationstheoretischer Sicht oder auch als Stufen- und Phasenmodelle entwickelt worden. Der erste, der eine umfassende dialektische Sicht auf den Unterrichtsprozess richtet, ist Lothar Klinkberg. Seine Didaktik ist nach Bönsch „die konsequenteste Didaktik (ist), die gegenwärtig besteht“ (Bönsch 1986, S. 56). Er spricht von den Interdependenzen bei den personellen *und* sachlichen Strukturelementen, bleibt dabei aber noch unvollständig. Sein Kreismodell deutet an, dass der pädagogische Prozess selbst flexibel und ziel- und bedingungsadäquat geführt werden muss. Deshalb folgt der „Hinführung und Vorbereitung“ entweder die „Arbeit am neuen Stoff“ *oder* die „Arbeit am alten Stoff“. Abgeschlossen wird der pädagogische Prozess mit der „Kontrolle und Bewertung“ (Klingberg1986, S. 81).

Liimets und Naumann haben dann ein konsequentes dialektisch orientiertes Modell entwickelt, ein *Funktions*modell, d. h. es werden Funktionseinheiten und didaktische Funktionen und zur Orientierung Funktionsprinzipien entsprechend den wissenschaftlichen Erkenntnissen formuliert, die es dem Pädagogen ermöglichen, prozess- und situationsbezogen *die* didaktische Funktion auszuwählen und zu gestalten, die der pädagogischen Sequenz im Sinne der Zielrealisierung *angemessen* ist. Dabei sind die didaktischen Funktionen voneinander abhängige und miteinander in Wechselwirkung stehende Operationsfolgen der Lehrenden *und* Lernenden (vgl. Liimets/Naumann 1985, S. 88; Naumann 2014, S. 107), die nicht alle in einer Unterrichtsstunde zur Anwendung kommen, aber in einem *vollständigen* Lernprozess (Stoffeinheit, Projekt) gebraucht werden.

Da sich Bildung und Erziehung in jedem pädagogischen Prozess als Einheit vollziehen, hat Prüß 1987 den Versuch unternommen, eine synthetisierend-funktionale Betrachtung des pädagogischen Prozesses auf der Grundlage des von Liimets und Naumann entwickelten Funktionsmodells der Didaktik vorzunehmen und dieses Funktionsmodell durch „erziehungs-didaktische" Funktionen zu ergänzen bzw. zu erweitern (siehe Anhang 5). An die Schule sind gewaltige Anforderungen gestellt. Zum einen ist sie die einzige Institution, die noch von *allen* gemeinsam besucht wird, und zum anderen muss sie mehr sein als eine „reine" Bildungseinrichtung. Daraus ergeben sich dann auch gesellschaftliche Handlungs*notwendigkeiten* und Handlungs*möglichkeiten* hinsichtlich der Kernherausforderungen (Qualifizierung, Verselbständigung, Selbstpositionierung – siehe 15. Kinder- und Jugendbericht – und Demokratiehandeln) an die Schule.

5. Diskussion und Konsequenzen

Ziel muss es sein, ein tieferes Verständnis für zu führende pädagogische Prozesse zu schaffen. Daher die Notwendigkeit, Modelle zu entwickeln, die die Komplexität von Bildung und Erziehung vereinfacht darstellen und gleichzeitig die Möglichkeit bieten, situationsbezogen im *laufenden* pädagogischen Prozess *die* „bildungs-didaktische" oder *die* „erziehungs-didaktische" Funktion auszuwählen, die sachgemäß angewendet werden sollte. Die Analyse der in der Geschichte der Pädagogik gewonnenen Erkenntnisse (siehe Ratke, Diesterweg, Herbart, Trapp, Niemeyer, Pestalozzi, Makarenko u. v. a.) sowie durch theoretisch-wissenschaftliche Arbeit und empirische Forschung produzierten Erkenntnisse (Vielzahl berechtigter, wissenschaftlich begründeter didaktischer Modelle, Detailstudien zu einzelnen Strukturelementen,

Erkenntnisse der Lern- und Entwicklungspsychologie u. a.) ermöglichen uns, das Fundamentale, das wissenschaftlich Gesicherte zu benennen und darzustellen und damit eine Grundlage dafür zu schaffen, dass dieses Erkenntnissystem durch neue Forschungsergebnisse und Erkenntnisse auch *ergänzt und erweitert oder korrigiert* werden kann. Es sollten nicht immer neue und personenbezogene Modelle entwickelt, sondern gemeinsam gesicherte erziehungswissenschaftliche Erkenntnisse bilanziert werden. Nur so kann dann auch ein Ausbildungscurriculum für alle Lehramtsstudierende entwickelt werden, das das Fundamentale der Erziehungswissenschaft enthält und ihnen den *funktionalen* Umgang mit den („bildungs- und erziehungs-“) didaktischen Funktionen ermöglicht, die dann in pädagogischen Situationen (Sequenzen), in Funktionszyklen und im Entwicklungszyklus realisiert werden. Die verschiedenen didaktischen Modelle sind vereinfachte Abbildungen für komplexe und komplizierte pädagogische Prozesse und zugleich Orientierungs- und Handlungsgrundlage für die Gestaltung pädagogischer Abläufe im Unterricht und in unterrichtsähnlichen Bereichen. In diesem Sinne erweist sich ein solches Modell als Widerspiegelung der Komplexität des Lehr-Lern-Prozesses und Einfachheit als Erkenntnisprinzip, in seiner praktischen Anwendung als Gestaltungsprinzip (vgl. Sommerfeld 2010, S. 153–157). Die Synthese erziehungswissenschaftlicher Erkenntnisse zum Unterrichten wird gegenwärtig nicht hinreichend durch die Allgemeine Didaktik zur Verfügung gestellt, sondern den Lehramtsstudierenden selbst „überlassen“.

Die Allgemeine Didaktik ist nach meiner Erkenntnis unverzichtbar. Sie muss vier Aufgaben erfüllen: das Allgemeine der Didaktik (einschließlich der Fachdidaktiken) erforschen und bestimmen, dieses Allgemeine strukturiert in einem wissenschaftlichen Erkenntnissystem darstellen, die Basisaussagen für die Fachdidaktiken liefern und eine nutzbare Synthese für Studierende und praktisch tätige Pädagogen bereitstellen. Der Weg kann nicht sein, einseitige oder auch nur einzelnen wissenschaftstheoretischen Positionen verpflichteten Sichtweisen auf die Erziehungsprozesse zu entwickeln, sondern durch bewusste Anwendung des Prinzips der Transdisziplinarität die Erkenntnisse anderer Wissenschaften gezielt systembezogen zu nutzen und dadurch die Komplexität und Kompliziertheit pädagogischer Prozesse durchschaubar und überschaubar und somit auch nutzbar für die praktische pädagogische Tätigkeit zu machen. Ziel der Allgemeinen Didaktik muss die Erfassung und Strukturierung des Allgemeinen sein und die Bereitstellung eines nutzbaren Modells für effizientes und effektives pädagogisches Handeln.

In der Schule besteht die pädagogische Aufgabe für *alle* Lehrerinnen und Lehrer, auch Haltungen im Unterricht zu entwickeln und Verhaltensweisen herauszubilden, die unseren Grundwerten entsprechen und einer entwickelten Demokratie würdig sind. Der Bildungsauftrag schließt deshalb eine Werteerziehung auf *wissenschaftlicher* Grundlage ein (Kompetenzorientierung). Deshalb sind auch didaktische Funktionen zu identifizieren, die dieser Zielstellung entsprechen. Das sind zum Beispiel das Bezweifeln (Anzweifeln), das Partizipieren, das Setzen und Erarbeiten von Perspektiven, das Übertragen und Übernehmen von Verantwortung, das Gewähren und Begrenzen, das moralische Werten, das Vergewissern u. a.

Das „Bezweifeln" ist ein momentaner Zustand des Lernenden, der dann dazu führt, dass Begründungen gegeben werden müssen, damit das erkennende Subjekt die geäußerte Meinung akzeptieren und sich letztlich dann mit den vorgetragenen Aussagen identifizieren kann. Ausgangspunkt des „Vergewisserns" kann ebenfalls das (Be-)Zweifeln sein, ob eine gewonnene Erkenntnis tatsächlich wahr ist, eine genutzte Methode die zweckmäßigste war, das vorgelegte Werturteil berechtigt oder die aufgestellte Norm wirklich gültig ist. Die Beseitigung der Zweifel durch die verschiedenen Formen des Vergewisserns (Belegen, Beweisen, Widerlegen) bildet erst die Grundlage für die Herausbildung wissenschaftlich begründeter Überzeugungen. Insofern ist das Zweifeln (Bezweifeln) Anlass, um Formen bzw. Verfahren des Vergewisserns einzusetzen, um letztlich die Gewissheit zu erhalten, dass sich etwas so und nicht anders verhält, also jeder Zweifel nach dem gegenwärtigen Erkenntnisstand tatsächlich ausgeschlossen werden kann.

Diese *Erziehung zum Fragen und zum Bezweifeln* zielt darauf, nach der Wahrheit, nach der zweckmäßigsten Methode, nach einem berechtigten Werturteil oder/und nach der Gültigkeit einer Norm zu suchen. Erst dann, wenn alle verfügbaren Informationen gegeben und die verschiedensten Optionen geprüft worden sind und keine neuen Argumente mehr angeführt werden können, kann und wird das Ergebnis von allen anerkannt werden. Das Ziel des Unterrichts ist es also, vorhandene berechtigte oder aufgeworfene Zweifel abzubauen und dem Einzelnen Gewissheit zu verschaffen, dass das Erkannte tatsächlich richtig ist, und das auf der Basis einer wissenschaftlichen Bildung und humanistischen Werteorientierung. Nieke (2020) spricht von einer „Wertorientierten Persönlichkeitsbildung und Bildung des gemeinwesenorientierten Individuums" (S. 363). Fragen der Bildung müssen „…stets erneut vor dem Hintergrund sich verändernder Gesellschaftsbedingungen jeweils neu ausformuliert werden" (Bernhard 2020, S. 1734). So stellt sich bildungstheoretisch die Frage, „…wie eine emanzipative Subjekt-

werdung unterstützt werden kann, indem den Menschen die Mittel zum Begreifen, zum Verstehen und potenziell auch zur handelnden Veränderung ihrer Welt zur Verfügung gestellt werden“ (ebd., S. 1735). In der heutigen Zeit der ungehinderten Verbreitung von „alternativen Fakten“ alias Lügen, der Versuche von Meinungsmanipulation und Aussparung unterschiedlicher Betrachtungsweisen einerseits und den nicht abnehmenden gravierenden Differenzen in der Schülerschaft, der noch nicht bedarfsgerechten Förderung von Kindern und Jugendlichen aus Migrationsfamilien sowie die Notwendigkeit der Verhinderung des Entstehens von Parallelwelten andererseits, wächst die Bedeutung schulischer Bildung und Erziehung auf wissenschaftlicher Grundlage. Das betrifft auch Fragen der weltanschaulichen Bildung und damit die (noch) zur weltanschaulichen Neutralität verpflichtete Schule. Konsequente wissenschaftliche Bildung bedeutet dann auch Erkenntnisvermittlung und Wissenserwerb, Wertevermittlung und Werteaneignung auf der Grundlage neuester wissenschaftlicher Erkenntnisse. Die Basis dafür muss die Erziehungswissenschaft bereitstellen, indem sie die Komplexität von Bildung und Erziehung fassbar macht, d. h. das Wesen, also das Gesetzmäßige zu erkennen, die Beziehungen zwischen den Systemelementen aufzudecken, und dementsprechend Gesetze und Prinzipien formuliert, die dann für die Pädagogen die Handlungsgrundlage für erfolgreiches Handeln darstellen. Das geschieht dann auch mit Hilfe von erarbeiteten Schemata, Konzepten, Modellen und weiteren Hilfsmitteln. Anzustreben wäre ein Gesamtmodell, das wesentliche Beziehungen deutlich macht, Fundamentales darstellt und den wissenschaftlichen Neugewinn forschender Arbeit jeweils *integrierbar* macht. Dieser Entwicklungsstand ist gegenwärtig noch nicht erreicht. Wie am Beispiel der Vielzahl didaktischer Modelle, die durchaus ihre Berechtigung haben, sichtbar wird, fehlt jedoch noch eine „Verdichtung“ zu einem „Modell- Überblick“, das das Gesamtsystem von Bildung und Erziehung darstellt und dann wissenschaftlich begründet erlaubt, entsprechend einem Entwicklungszyklus, einem Funktionszyklus oder einer Phase oder einer Situation die erforderliche pädagogische („bildungs“- oder/und „erziehungs“-didaktische) Funktion auszuwählen und anzuwenden. Was Klingberg mit seinem „Kreismodell“ versucht hat, Flexibilität didaktischer Funktionen im Zusammenhang mit Phasen des Unterrichts der „Arbeit am neuen Stoff“ oder „Arbeit am alten Stoff“ in Verbindung zu bringen, widerspiegelt noch nicht die gesamte Dynamik des pädagogischen Prozesses. Auch alle anderen Modelle (siehe S. 76) sind wissenschaftlich begründete Abbildungen von Prozessverläufen des Unterrichts und berechtigt, sie widerspiegeln jedoch noch nicht die Vielfalt der möglichen Beziehungen zwischen den Struktur-

elementen und sind statisch bzw. phasenorientiert angelegt. Mit der Definition didaktischer Funktionen durch Liimets und Naumann als wesentliche Prozesselemente, die *nicht* automatisch an bestimmte Phasen gebunden sind, *sondern* je nach pädagogischer Situation ausgewählt und sach- und adressatenbezogen eingesetzt werden können, bekommt das System didaktischer Funktionen eine neue Qualität und eine solche Abstraktionsstufe, die es dann dem Nutzer erlaubt, ziel- und bedingungsadäquat sowie situations- und prozessbezogen pädagogische Entscheidungen zu treffen. Es ist ein *Funktionsmodell*, das dem praktisch tätigen Pädagogen, vorausgesetzt er ist professionell akademisch gebildet, als Grundlage für eine erfolgreiche pädagogische Arbeit in verschiedenen Praxisfeldern dienen kann.

Schon Komensky ging es in seinen beiden Hauptwerken „Pampaedia" (Allerziehung) und der „Didactica magna" (Große Unterrichtslehre, 1657) um die sittliche (mores) und die wissenschaftliche (eruditio) Ausbildung: „Allen alles ganz zu lehren" oder „Allen alles in Rücksicht auf das Ganze zu lehren". (https://de.wikipedia.org/wiki/Didactica_magna; eingesehen am 1.10.16) Heute muss die unvoreingenommene Entwicklungsförderung jedes Individuums durch Vermittlung von Wissen und Entfaltung von Können (Kompetenzen) bei *gleichzeitiger* Herausbildung von grundgesetzkonformen Haltungen und Verhaltensweisen im Zentrum der pädagogischen Arbeit stehen. Und das ist eindeutig ein *unteilbarer* Prozess.

Versuche, die Einflussfaktoren auf die Persönlichkeitsentwicklung begrifflich zu fassen, hat es in der Geschichte von Bildung und Erziehung in unterschiedlicher Weise gegeben. Erinnern möchte ich nur an Herbart mit seiner Einteilung: Regierung, Unterricht und Zucht, an aktuelle Einteilungen in formale Bildung, non-formale Bildung und die informelle Bildung bis hin zu Sozialisation, Bildung und Erziehung. Hier wird das ganze Spektrum von Einflussfaktoren auf die Entwicklung der Individuen sichtbar (vgl. auch: Meyer, H. 2001a, b; Naumann 2017). Somit muss die Institution Schule auch die Einheit von Bildung *und* Erziehung realisieren (vgl. auch Kiper 2006 u. a.).

Es ist möglich, nach den vielfältigen wissenschaftlichen Erkenntnissen und der Analyse existierender didaktischer Modelle, *ein* didaktisches Modell zu entwickeln, das die bisherigen wissenschaftlichen Erkenntnisse einschließt und dieses auch *gemeinsam* weiterzuentwickeln (siehe Anhang 6 und 7), wie es in anderen Wissenschaften möglich ist. Ein solches Modell könnte dann auch den Grundfonds zur didaktischen Ausbildung von Lehrern und Erziehern bilden. Damit könnte auch der weiteren Entfachlichung und Entprofessionalisierung der Lehrerausbildung entgegengewirkt und der

Wert erziehungswissenschaftlicher Theoriebildung erhöht werden. Ein solches wissenschaftlich basiertes didaktisches Modell könnte eine Voraussetzung dafür sein, einzelne Lehr-Lern-Prozesse derart zu führen, dass durch die zielgerichtete Auswahl didaktischer Funktionen einerseits ein optimales Verhältnis von Aufwand und Ergebnis und andererseits die situations- und bedingungsabhängige Einheit von Bildung und Erziehung erreicht werden könnte. Dadurch wird die Prozessgestaltung „einfach", d. h. mit ziemlicher Sicherheit werden durch begrenzte Operationsfolgen in bestimmten Zeiträumen angestrebte Resultate sichtbar, Misserfolge minimiert oder fast ausgeschlossen und sonst notwendige Wiederholungen vermieden (vgl. auch Sommerfeld 2010, S. 145ff.; Naumann 2017, S. 24). Einfachheit in der Pädagogik bedeutet also Komplexitätsreduktion durch das Erkennen der gesetzmäßigen Beziehungen im System, die Formulierung von Prinzipien als Grundlage für pädagogisches Handeln und die ziel-, situations- und personenbezogene Nutzung didaktischer Funktionen zur Erreichung eines optimalen Ergebnisses.

Literatur

Becker, G. E. (2007a): Planung von Unterricht. Handlungsorientierte Didaktik, Teil I. Weinheim, Basel: Beltz.

Becker, G. E. (2007b): Durchführung von Unterricht. Handlungsorientierte Didaktik, Teil II. Weinheim, Basel: Beltz.

Becker, G. E. (2007c): Auswertung und Beurteilung von Unterricht. Handlungsorientierte Didaktik, Teil III. Weinheim, Basel: Beltz.

Bernhard, A. (1999): Neuere Grundlagenkritik an der Didaktik. Zeitschrift für Pädagogik, 45 (5), S. 649–666.

Bernhard, A. (2020): Kritische Theorie und Bildung. In: Bollweg, P./Buchna, J./Coelen, Th./ Otto, H.-U. (Hrsg.): Handbuch Ganztagsbildung (2. Auflage, Bd. 1). Wiesbaden: Springer VS, 1729–1743.

Bönsch, M. (1986): Unterrichtskonzepte – Studien zur Allgemeinen Didaktik. Baltmannsweiler: Pädagogischer Verlag Burgbücherei Schneider GmbH.

Böttcher, W. (2020): Lehrkräftebildung und Erziehungswissenschaft. In Erziehungswissenschaft – Universitäre Lehrkräftebildung – Herausforderungen und Profilbildung. Berlin: Verlag Barbara Budrich, 13–26.

Brezinka, W. (1989): Aufklärung über Erziehungstheorien. Beiträge zur Kritik der Pädagogik. München, Basel: Ernst Reinhardt Verlag.

Brezinka, W. (1994): Zur Problematik von Erziehungszielen in pluralistischen Gesellschaften. In: Seibert, N./Serve, H. (Hrsg.): Bildung und Erziehung an der Schwelle zum dritten Jahrtausend. München: PimS, 590–634.

Bundesministerium für Familie, Senioren, Frauen und Jugend (2017): Fünfzehnter Kinder- und Jugendbericht über die Lebenssituation junger Menschen und Leistungen der Kinder- und Jugendhilfe in Deutschland. Berlin. Verfügbar unter https://www.bmfsfj.de/blob/115438/d7ed644e1b7fac4f9266191459903c62/15-kinder-und-jugendbericht-bundestagsdrucksache-data.pdf [09.02.18].

Diederich, J. (1977): Was ist das Allgemeine an der Allgemeinen Didaktik? In: Hendricks, W./Stübing, H. (Hrsg.): Zwischen Theorie und Praxis. Marburger Kolloquium zur Didaktik. Kronberg/Ts: Athenäum Verlag.

Diederich, J. (1988): Didaktisches Denken. Weinheim, München: Juventa-Verlag.

Diesterweg, F. A. W. (1962): Wegweiser zur Bildung für deutsche Lehrer und andere didaktische Schriften. Berlin: Volk und Wissen Volkseigener Verlag.

Drefenstedt, E./Neuner, G. (1969): Lehrplanwerk und Unterrichtsgestaltung. Berlin: Volk und Wissen Verlag.

Esslinger-Hinz, I./Sliwka, A. (2011): Bachelor/Master: Schulpädagogik. Weinheim, Basel: Beltz.

Glöckel, H. (2003): Vom Unterricht. Bad Heilbrunn: Klinkhardt.

Gudjons, H. (2008): Pädagogisches Grundwissen. Bad Heilbrunn: Klinkhardt.

Hallitzky, M./Seibert, N. (2005): Didaktische Konzepte und Modelle. In: Apel, J./Sacher, W. (Hrsg.): Studienbuch Schulpädagogik. Bad Heilbrunn: Klinkhardt, 205–229.

Hattie, J. (2013): Lernen sichtbar machen. Überarbeitete deutschsprachige Ausgabe von „visible learning" besorgt von Wolfgang Beywl und Klaus Zierer. Baltmannsweiler.

Herbart, J. F. (1922): Pädagogische Schriften (in zwei Bänden). Band 1 Friedr. Bartholomäi und E. v. Sallwürk (Hrsg.), Langensalza (7. Auflage): Hermann Beyer & Söhne.

Hörz, H. (2010): Philosophischer Reduktionismus oder wissenschaftlich berechtigte Reduktionen? Zu den erkenntnistheoretischen Grundlagen des Prinzips Einfachheit. In: Sommerfeld, E./Hörz, H./Krause, W. (Hrsg.): Einfachheit als Wirk-, Erkenntnis- und Gestaltungsprinzip. Sitzungsberichte Leibniz-Sozietät der Wissenschaften, Jg. 2010 (108). Berlin: trafo, 11–36. Abrufbar unter: https://leibnizsozietaet.de/wp-content/uploads/2011/05/02_hoerz.pdf

Hopmann, S. in Kooperation mit A. Wegner und M. A. Meyer (2016): „Wozu Allgemeine Didaktik? Versuch einer historisch- vergleichenden Sinnkonstruktion". Allgemeine Didaktik: Praxis, Positionen, Perspektiven, hrsg. von Anke Wegener. Opladen, Berlin, Toronto: Verlag Barbara Budrich, 25-35.

Jank, W./Meyer, H. (2006): Didaktische Modelle. Frankfurt/M.: Cornelsen Verlag Scriptor

Kiper, H. (2006): Lehrziele/Lernziele. In: Arnold, K.-H./Sandfuchs, U./Wiechmann, J. (Hrsg.): Handbuch Unterricht. Bad Heilbrunn: Klinkhardt, 186–195.

Klafki, W. (1994): Zum Verhältnis von Allgemeiner Didaktik und Fachdidaktik – Fünf Thesen. In: Meyer, M./Plöger, W. (Hrsg.): Allgemeine Didaktik, Fachdidaktik und Fachunterricht. Weinheim, Basel: Beltz, 42–64.

Klingberg, L. (1976): Einführung in die Allgemeine Didaktik. Berlin: Volk und Wissen Volkseigener Verlag.

Klingberg, L. (1990): Lehrende und Lernende im Unterricht. Berlin: Volk und Wissen Verlag GmbH.

Klingberg, L. (1994): Fach, Fachdidaktik und Allgemeine Didaktik. In: Meyer, M./Plöger, W. (Hrsg.): Allgemeine Didaktik, Fachdidaktik und Fachunterricht. Weinheim, Basel: Beltz, 65–84.

Komensky, J. A. (1959): Analytische Didaktik und andere pädagogische Schriften. Ausgewählt und eingeleitet von F. Hofmann. Berlin: Volk und Wissen.

Komensky, J. A. (1970): Allgemeine Beratung über die Verbesserung der menschlichen Dinge. Berlin: Volk und Wissen.

Kron, F. (2008): Grundwissen Didaktik (5. überarbeitete Aufl.). München, Basel: Ernst Reinhardt.

Kunina-Habenicht, O./Terhart, E. (2020): Erziehungswissenschaft und Bildungswissenschaften im Lehramtsstudium aus Sicht der empirischen Lehrerbildungsforschung. In: Erziehungswissenschaft. Berlin: Verlag Barbara Budrich.

Liimets, H./Naumann, W. (1982): Didaktik. Eine Unterrichtstheorie für die Mittel- und Oberstufe. Berlin: Volk und Wissen Volkseigener Verlag.

Meyer, M./Prenzel, M./Hellekamps, St. (2008): Editional: Perspektiven der Didaktik. In: Meyer, M./Prenzel, M./Hellekamps, S. (Hrsg.): Perspektiven der Didaktik. Zeitschrift für Erziehungswissenschaft. Sonderheft 9, 7–10.

Meyer, M. (2016): Rückständig oder zukunftsweisend? Reflexionen zum Potenzial der Allgemeinen Didaktik. In: Wegner, A. (Hrsg.): Allgemeine Didaktik: Praxis, Positionen, Perspektiven. Opladen u. a. O.: Verlag Barbara Budrich, 49–86.

Meyer, H. (1989): Unterrichtsmethoden II: Praxisband. Frankfurt/M.: Scriptor.

Meyer, H. (1995): Unterrichtsmethoden I: Theorieband. Frankfurt/M.: Scriptor.

Meyer, H. (2001a): Schulpädagogik, Band I. Berlin: Cornelsen Scriptor.

Meyer, H. (2001b): Schulpädagogik, Band II. Berlin: Cornelsen Scriptor.

Naumann, W. (2014a): Sozialpädagogik – Umriss einer erziehungswissenschaftlichen Disziplin und Prinzipien ihrer praktischen Anwendung. Berlin: Logos Verlag.

Naumann, W. (2014b): Zur Bedeutung der statistischen Gesetzeskonzeption für die Pädagogik. In Sitzungsberichte Leibniz-Sozietät der Wissenschaften, Bd. 118/Jg. 2014, 105–119.

Naumann, W. (2017): Konzeptionelle Überlegungen für eine Allgemeine Erziehungswissenschaft unter besonderer Berücksichtigung der Prinzipien Einfachheit und Transdisziplinarität. Abrufbar unter: http://leibnizsozietaet.de/wp-content/uploads/2017/03/Naumann.pdf.

Naumann, W. (2019): Prinzipien in der Pädagogik – eine Problemsicht. Abrufbar unter: https://leibnizsozietaet.de/wp-content/uploads/2019/03/Naumann.pdf

Nieke, W. (2020): Kompetenzen. In: Bollweg, P./Buchna, J./Coelen, Th./Otto, H.-U. (Hrsg.): Handbuch Ganztagsbildung (2. Auflage, Bd. 1). Wiesbaden: Springer VS, 355–365.

Prüß, F. (1987): Zur Notwendigkeit und Möglichkeit einer synthetisierend-funktionalen Betrachtungsweise des Erziehungsprozesses: untersucht und dargestellt aus der Sicht der Erziehungstheorie. Dissertation B. Erfurt, 270 S.

Prüß, F. (2011): Die Bedeutung der Sprachkritik bei der Gestaltung des Erkenntnisprozesses: Pädagogische Prinzipien und didaktische Funktionen als Grundlage der optimalen Unterrichtsgestaltung. In: Arendt, B./Kiesendahl, J. (Hrsg.): Sprachkritik in der Schule – Theoretische Grundlagen und ihre praktische Relevanz. Göttingen: V&R unipress, 51–69.

Prüß, F. (2014): Verantwortungsübernahme von Kindern und Jugendlichen durch Partizipation – Chancen einer vernetzten pädagogischen Arbeit in der Ganztagsschule. In: Standop, J./Greiling, A./Seefeldt, J. (Hrsg.): Visionen einer guten Schule – Entwürfe für eine zukunftsweisende Entwicklung. Bad Heilbrunn: Verlag Julius Klinkhardt, 124–137.

Prüß, F. (2018): Schule der Zukunft – eine Gemeinschaftsschule. In: Adam, H. (Hrsg.): Kritische Pädagogik, Bd. 4. Berlin: Media Service GmbH, 64–108.

Reusser, K. (2008): Empirisch fundierte Didaktik – didaktisch fundierte Unterrichtsforschung. In: Meyer, M./Prenzel, M./Hellekamps, St. (Hrsg.): Perspektiven der Didaktik. Zeitschrift für Erziehungswissenschaft. Sonderheft 9, 219–237.

Rucker, Th. (2016): Spuren der Komplexität. Pädagogische Rundschau, Jg. 70, 277–294, Frankfurt/M.: Peter Lang.

Sandfuchs, U. (2006): Ebenen, Prinzipien und Situationen der Planung. In: Arnold, K.-H./ Sandfuchs, U./Wiechmann, J. (Hrsg.): Handbuch Unterricht. Bad Heilbrunn: Klinkhardt, 695–701.

Seibert, N. (2006): Unterrichtsprinzipien. In: Arnold, K.-H./ Sandfuchs, U./Wiechmann, J. (Hrsg.): Handbuch Unterricht. Bad Heilbrunn: Klinkhardt, 251–260.

Sommerfeld, E. (2010): Einfachheit – ein Grundprinzip in den unterschiedlichsten Disziplinen? In: Sommerfeld, E./Hörz, H./Krause, W. (Hrsg.): Einfachheit als Wirk-, Erkenntnis- und Gestaltungsprinzip. Sitzungsberichte Leibniz-Sozietät der Wissenschaften, Bd. 108/Jg. 2010, 145–163.

Tenorth, H.-E. (2017): Es werden inkompetente Lehrer erzeugt. Interview mit Heike Schmoll. Frankfurter Allgemeine Zeitung, Nr. 300 vom 28. Dez. 2017, S. 6.

Terhart, E. (2008): Allgemeine Didaktik: Traditionen, Neuanfänge, Herausforderungen. In: Meyer, M./Prenzel,M./Hellekamps, S. (Hrsg.): Perspektiven der Didaktik. Zeitschrift für Erziehungswissenschaft, Sonderheft 9, 13–34.

Vogel, P. (2020): Bildung. In: Bollweg, P./Buchna, J./Coelen Th./Otto, H.-U. (Hrsg.): Handbuch Ganztagsbildung (2. Auflage, Bd. 1). Wiesbaden: Springer VS, 189–202.

Wegner, A. (Hrsg.) (2016): Allgemeine Didaktik: Praxis, Positionen, Perspektiven. Opladen u. a. O.: Verlag Barbara Budrich, 189–202.

Wiater, W. (2006): Didaktische Theoriemodelle und Unterrichtsplanung. In: Arnold, K.-H./ Sandfuchs, U./Wiechmann, J. (Hrsg.): Handbuch Unterricht. Bad Heilbrunn: Klinkhardt, 675–685.

Winkler, M. (2020): Erziehung. Bollweg, P./Buchna, J./Coelen Th./Otto, H.-U. (Hrsg.): Handbuch Ganztagsbildung (2. Auflage, Bd. 1). Wiesbaden: Springer VS, 189–202.

Anhang 1: Didaktisches Funktionsmodell

Funktionen	Funktionseinheiten	Funktionsprinzipien
> Sichern normaler Unterrichtsbedingungen > Zielorientieren und Vermitteln von Orientierungsgrundlagen > Reaktivieren und Motivieren	I. Einführung Aktivierung Organisierung	1. Prinzip der Zielstrebigkeit und Konsequenz 2. Prinzip der empathischen und ermutigenden Kommunikation 3. Prinzip der Förderung von Bewusstheit und Aktivität
> Informieren und Definieren > Erklären und Voraussagen > Werten (logisch, moralisch, ökonomisch, politisch, juristisch, ästhetisch, technologisch, medizinisch usw.) > Begründen und Belegen > Beweisen und Widerlegen > Zweifeln und Vergewissern > Konzipieren und Entwerfen	II. Erstvermittlung Verarbeitung Gestaltung	4. Prinzip der didaktischen Vereinfachung 5. Prinzip der Einheit von Abstraktion und Konkretisierung im Erkenntnisprozess 6. Prinzip der Einheit von Wissenschafts- und Wertorientierung, das zugleich Manipulation und Indoktrination ausschließt 7. Prinzip der Einheit von Imitation und Kreation in Gestaltungsprozessen
> Wiederholen und Üben > Systematisieren/Integrieren > Üben und Anwenden > Ausführen und Vervollkommnen	III. Festigung Meisterung Bewährung	8. Prinzip der wissenschaftlichen Systematik, der praktischen Komplexität bzw. ästhetischen Ganzheit des Unterrichtsinhalts 9. Prinzip der Dauerhaftigkeit und Anwendbarkeit des Gelernten
> Stellen und Lösen von Aufgaben und Problemen > Bewerten bzw. Benoten > Fehleranalyse mit Schlussfolgerungen	IV. Kontrolle (immanente oder explizite Prüfung/Selbstprüfung) Interaktive Auswertung und Postinteraktive Reflexionen	10. Prinzip der Sicherung von Erfolgserlebnissen auf der Basis steigender Anforderungen 11. Prinzip der Einheit von objektiver und persönlichkeitsfördernder Resultatbewertung

Bemerkung: Die lineare *Darstellungsweise* von Funktionen ist zu unterscheiden von der *Anwendungsweise*, bei der sie sich ziel- und situationsabhängig vertauschen, überlagern und durchdringen.

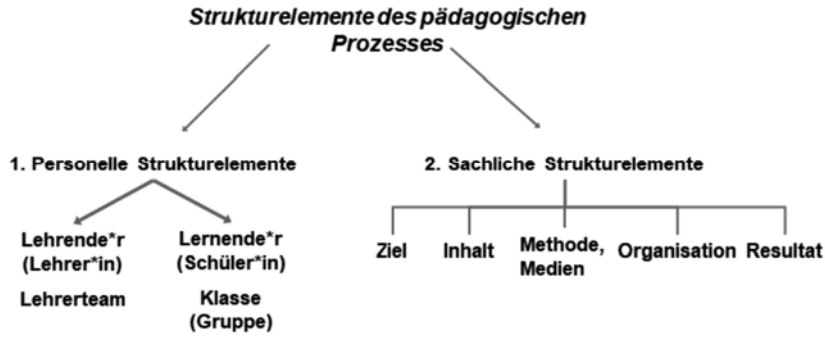
Quelle: Liimets/Naumann 1985: Didaktik – 2. Auflage, S. 104. Überarbeitung und Ergänzung des Modells erfolgte 2020 in: https://leibnizsozietaet.de/wp-content/uploads/2019/03/Naumann.pdf, Anlage 3

Anhang 2: Gesetzmäßigkeiten und Strukturprinzipien in pädagogischen Prozessen

Gesetzmäßige Relation zwischen:	Gesetz der Einheit	Prinzip der dialektischen Einheit
Gesellschaft – Bildung und Erziehung	von Gesellschaftssystem und Bildungssystem	von Unterricht und Lebenswirklichkeit
*Lehrer*in – Schüler*in*	von Erziehung und Selbsterziehung sowie von Lehren und Lernen	von pädagogischer Führung und wachsender Selbsttätigkeit, Selbstbestimmung, Mitverantwortung
*Schüler*in – Klassengemeinschaft (Gruppe)*	von Persönlichkeits- und Gemeinschaftsentwicklung	von Individualisierung und wechselseitiger Bereicherung bzw. Gemeinschaftsbezogenheit
*Schüler*in 1 – Schüler*in 2 – Schüler*in - n*	von Gleichartigem und Unterschiedlichem in der Schülergruppe	von Einheitlichkeit und Differenzierung
Leistungseigenschaften - Verhaltenseigenschaften	Gesetz der Ganzheitlichkeit der Persönlichkeitsentwicklung	von Bildung und Erziehung

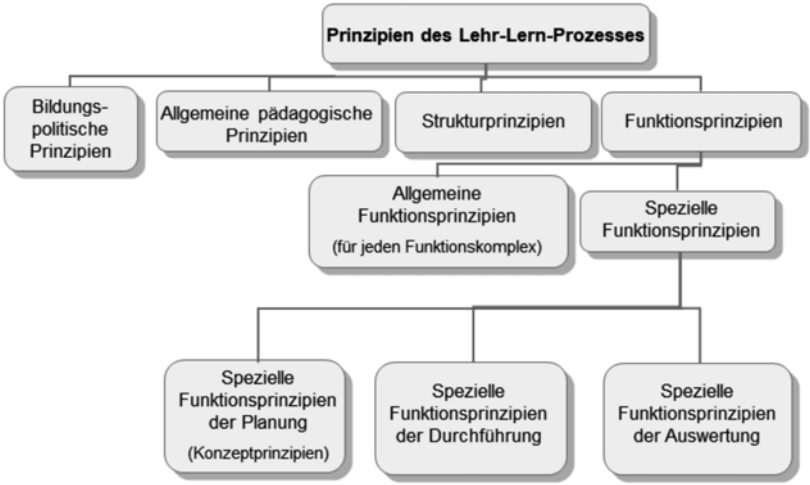
Quelle: Limets/Naumann 1982, S. 90; Ergänzung bzw. Veränderung durch den Autor

Anhang 3: Strukturelemente



Quelle: Zusammenfassende Darstellung durch den Autor

Anhang 4: System pädagogischer Prinzipien



Anhang 5: Synthetisierend-funktionale Betrachtung des pädagogischen Prozesses – „erziehungs"-didaktische Funktionen

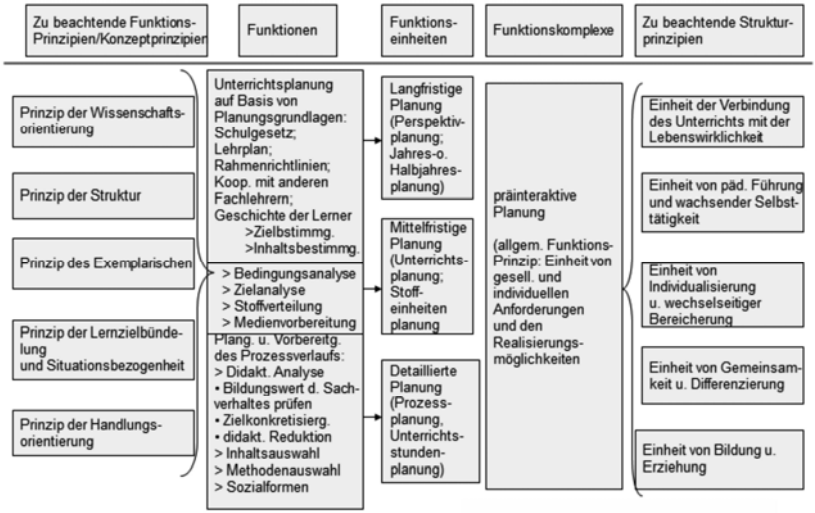
Funktionseinheit	Funktionen
Einführung Aktivierung Organisation	- Sicherung normaler Ausgangsbedingungen im Rahmen der geschaffenen Lebensordnung - Zielorientierung und Motivierung - Setzen und Erarbeiten von Perspektiven - Übertragen und Übernehmen von Verantwortung - Reaktivieren, Besinnen und Entscheiden
Erstaneignung Geistige Verarbeitung Gestaltung	- Instruieren und Demonstrieren - Bezweifeln - Erläutern und Begründen - Gewähren und Engagieren - Begrenzen und Versagen - Werten - Vergewissern
Festigung Meisterung Bewährung	- Wiederholen - Üben und Trainieren - Anwenden - Integrieren - Partizipieren
Kontrolle Bewertung Auswertung	- ziel- und bedingungsgemäßes Verhalten fordern - (positives und negatives) Bewerten - Analysieren und Schlussfolgern

Quelle: Prüß 1987 und aktuelle Überarbeitung

Anhang 6: Lehrer/in und Schüler/in in Lehr-Lern-Prozessen

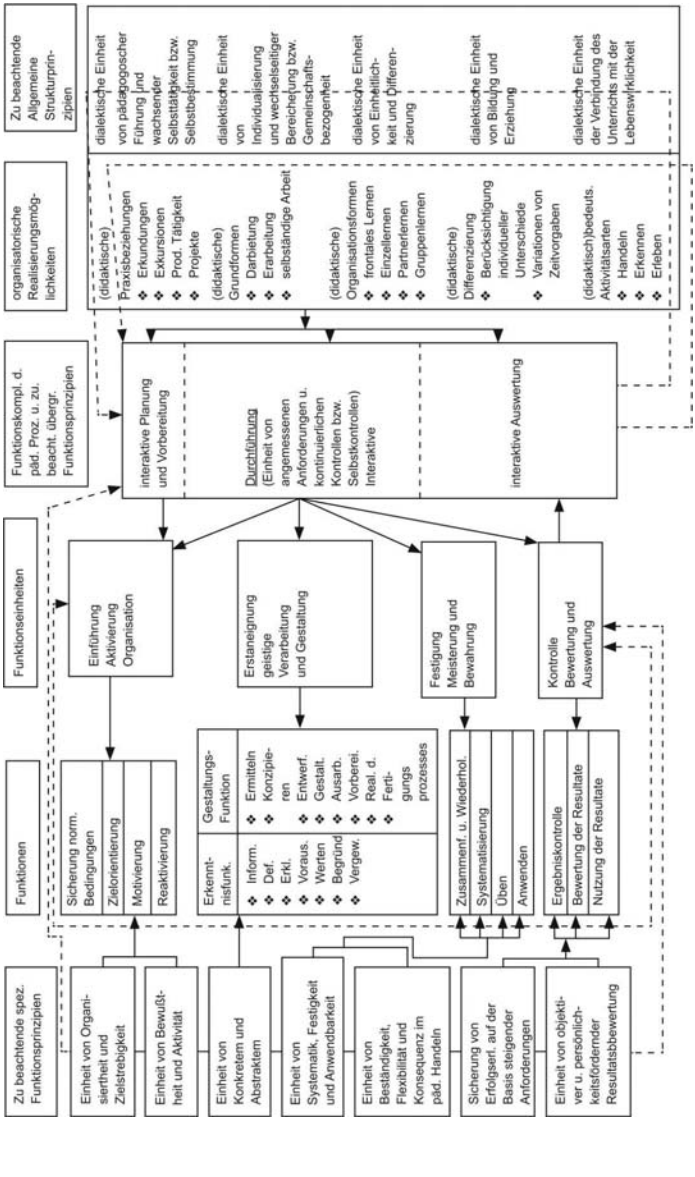
Quelle: Zusammenfassende Darstellung durch den Autor

Anhang 7/Teil I: Funktionsmodell der Gestaltung von Lehr-Lern-Prozessen (Präinteraktive Planung)



Quelle: Zusammenfassende Darstellung durch den Autor

Anhang 7/Teil IIa: Funktionsmodell der Gestaltung von Lehr-Lern-Prozessen (Durchführung)



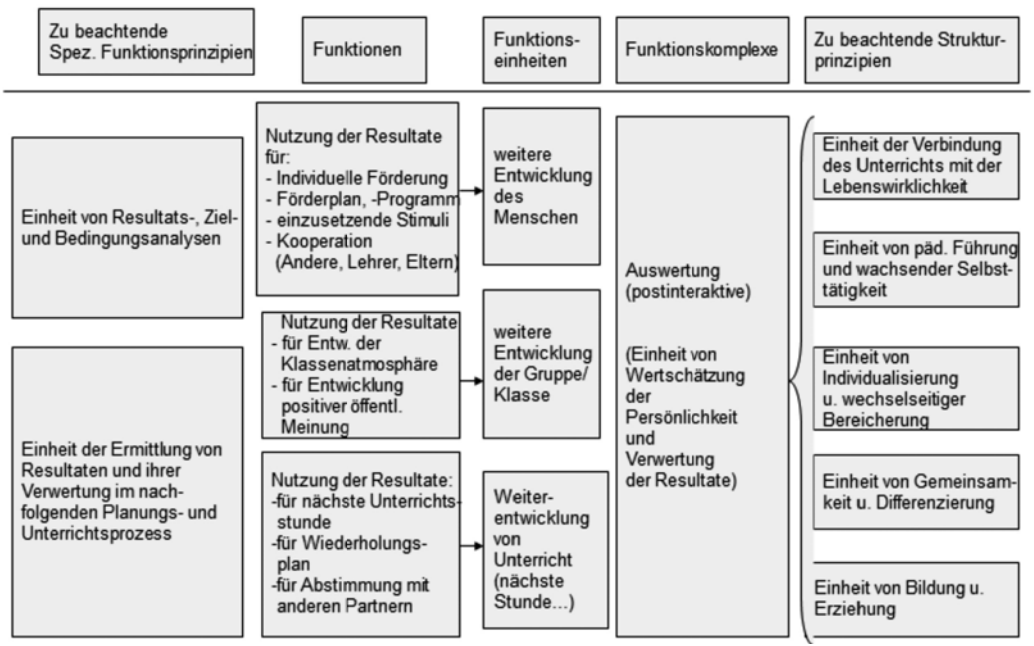
Quelle: Zusammenfassende Darstellung durch den Autor

Anhang 7/Teil IIb: Aktuelle bildungs- und erziehungsdidaktische Funktionen

Funktionseinheit		Funktionen		Funktionsprinzipien
1.	Einführung Aktivierung Organisierung	Sichern normaler Bedingungen Zielorientieren Motivieren Reaktivieren *Setzen/Erarbeiten von Perspektiven* *Übertragen/Übernehmen von Verantwortung*		Einheit von Empathie und angemessener Kommunikation Einheit von Bewusstheit und Aktivität Einheit von Organisiertheit und Zielstrebigkeit
2.	Erstaneignung geistige Verarbeitung Gestaltung	**Erkenntnisfunktion** Informieren *Instruieren* *Demonstrieren* Definieren *Bezweifeln* Begründen *Erläutern* Erklären Voraussagen Werten Vergewissern	**Gestaltungsfunktion** Ermitteln Konzipieren Entwerfen Gestalten Ausarbeiten Vorbereiten Realisieren *Gewähren/Engagieren* *Begrenzen/Versagen*	Prinzip der didaktischen Vereinfachung Einheit von wissensch. Bildung u. humanistischer Werteorientierung Einheit von Konkretem und Abstraktem
3.	Festigung Meisterung Bewährung	Zusammenfassen Wiederholen Systematisieren *Integrieren* Üben/Trainieren Anwenden *Partizipieren*		Einheit von Systematik, Festigkeit und Anwendbarkeit Einheit von Beständigkeit, Flexibilität und Konsequenz im päd.Handeln
4.	Kontrolle Bewertung Auswertung	Aufgaben/Probleme stellen u. lösen *Ziel-/bedingungsgemäßes Verhalten fordern/zeigen* Einschätzen/Bewerten Zensieren *Analysieren* *Schlussfolgern*		Sicherung von Erfolgserlebnissen auf der Basis steigender Anforderungen Einheit von objektiver und persönlichkeitsfördernder Resultatbewertung

Quelle: Zusammenfassung bisheriger wissenschaftlicher Erkenntnisse durch den Autor

Anhang 7/Teil III: Funktionsmodell der Gestaltung von Lehr-Lern-Prozessen (prointeraktive Auswertung)



Quelle: Zusammenfassende Darstellung durch den Autor

Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften zu Berlin *149 (2022), 95–117*

Andreas Meisel

Therapie neurologischer Erkrankungen nach dem Prinzip Einfachheit

„It can scarcely be denied that the supreme goal of all theory is to make the irreducible basic elements as simple and as few as possible without having to surrender the adequate representation of a single datum of experience.“

(Einstein 1934)

Kurzfassung

Die moderne Therapie von Erkrankungen basiert auf dem möglichst genauen Verständnis der den Erkrankungen zugrundeliegenden pathophysiologischen Prozesse auf organismischer, zellulärer und molekularer Ebene. Die sich daraus ableitenden Zielstrukturen werden zur Entwicklung möglichst spezifisch wirkender Medikamente genutzt, um Krankheiten zu heilen oder deren Beschwerden zu lindern. Dieser Ansatz stellt eine nützliche Vereinfachung dar, der nicht nur in der Neurologie eine Vielzahl teils hocheffektiver Therapien ermöglicht hat. Der Prozess der Entwicklung neuer Therapien ist dabei aber vor allem auch heuristischer Natur und folgt dem Ansatz „Versuch und Irrtum". Die Erfolgschancen für eine Therapie sind teilweise selbst in späten Entwicklungsphasen nicht vorhersehbar und daher nur begrenzt planbar und wenig effizient. Von den potentiell wirksamen Therapieansätzen bzw. Substanzen aus den frühen Entwicklungsphasen erreicht nur ein kleiner Bruchteil die Zulassung als Medikament. Zelluläre und tierexperimentelle Krankheitsmodelle haben sich zwar in der Untersuchung pathophysiologischer Mechanismen bewährt, versagen jedoch häufig in der Prädiktion der Wirksamkeit neuer Therapieverfahren beim Menschen. Zudem liegt diesem Ansatz potentiell auch die Gefahr der schädlichen Vereinfachung inne. Trotz umfangreicher vorklinischer und klinischer Testungen von neuen Therapien kommt es immer wieder zu unerwarteten teilweise schwersten Nebenwirkungen auch bei hochspezifischen Wirkmechanismen. So kann das einfache therapeutische Schlüssel-Schloss-Prinzip in hochkomplexen biologischen Systemen wie dem menschlichen Organismus mit partiell redundanten molekularen Signalkas-

kaden in unterschiedlichen Zelltypen neben den gewünschten Wirkungen gleichzeitig auch unerwünschte Nebenwirkungen haben. Der einfache Ansatz, nach dem o. g. Prinzip entwickelte Therapien gezielt gegen Erkrankung bzw. Beschwerden einzusetzen, gerät auch aus einem weiteren Grund konzeptionell an seine Grenzen. Die zunehmenden Möglichkeiten eine Vielzahl von Krankheiten und Beschwerden gezielt zu behandeln, führt immer häufiger dazu, dass viele verschiedene Therapien beim Patienten gleichzeitig eingesetzt werden. Multimorbidität in unserer älter werdenden Gesellschaft führt damit regelhaft zur Polypharmazie, deren Auswirkungen auch im Zeitalter der Evidenz-basierten Medizin wenig verstanden sind. Zwar werden die Therapien jeweils im Rahmen randomisiert-kontrollierter Studien geprüft, multimorbide Patienten werden im Sinne der Vereinfachung jedoch regelhaft ausgeschlossen. Für die klinische Praxis gilt dann die vereinfachende Annahme, dass die Wirksamkeit jeder einzelnen Therapie unabhängig von anderen Therapien und Multimorbidität erhalten und ohne schädliche Folgen bleibt. In dem Beitrag werden Erfolge und Misserfolge sowie Chancen und Risiken dieses Ansatzes nach dem Prinzip Einfachheit beispielhaft dargelegt.

Abstract

Modern treatment is based on the most precise understanding of the pathophysiological processes underlying the diseases at the level of organisms, organs, tissues, cells and molecules. The targets derived from this understanding are exploited to develop drugs that act as precisely as possible to cure diseases or diminish their symptoms. This approach represents a useful simplification that has enabled a large number of therapies, some of them highly effective, not only in neurology. However, the process of developing new therapies is primarily heuristic in nature and follows a „trial and error“ approach. The chances of success for a new treatment approach are usually unpredictable, even in late phases of drug development, and can therefore only be planned to a limited extent making the process inefficient. Of the potentially effective therapeutic approaches or substances from the early phases of drug development, only a small number achieves approval as a drug. Cellular and animal models of disease have proven successful in the study of pathophysiological mechanisms, but often fail in predicting the efficacy of new therapeutic approaches in humans. In addition, there is also a potential risk of harmful oversimplification inherent in this approach. Despite extensive preclinical and clinical testing of new therapies, unexpected side effects, some of them severe, continue to occur even with highly specific mechanisms of action. Thus, in highly complex biological systems such as the human organism with partially redundant molecular signaling cascades in different cell types, the simple therapeutic lock-and-key principle can simultaneously have undesirable side effects in addition to the beneficial effects. The simple approach of using therapies developed according to the above-mentioned principle in a targeted manner against disease or its complaints also reaches its conceptual limits for another reason. The increasing number of options to treat a wide range of

diseases and conditions in a targeted but parallel manner is increasingly leading to a variety of different therapies being used simultaneously in the patients. Multimorbidity in our aging society thus routinely leads to polypharmacy, the effects of which are poorly understood even in the age of evidence-based medicine. Although the therapies are tested in randomized controlled trials, multimorbid patients are systematically excluded in the interest of simplification. In clinical practice, a simplifying assumption is then made that regardless of other therapies and multimorbidity, the efficacy of each therapy is maintained and that there are no adverse consequences. The successes and failures as well as the opportunities and risks associated with this approach to simplicity are exemplified.

Einleitung

Was ist Leben und wie unterscheidet sich das Lebendige vom Unlebendigen gehört zu den zentralen Fragen mit denen sich Menschen in ihren Kulturen seit Jahrtausenden beschäftigt haben. Mit dem genaueren naturwissenschaftlichen Verständnis biologischer Systeme wurde eine immer schärfere Abgrenzung möglich, die zur Dichotomie der klaren Unterteilung in belebte und unbelebte Materie führte. Die Erforschung gemeinsamer Prinzipien biologischer und nichtbiologischer Organisationsformen, insbesondere der Grundprinzipien des Informationsaustauschs, kann jedoch helfen, die scheinbare Komplexität durch eine vergleichsweise einfache universelle Logik besser zu verstehen und nutzbar zu machen (Perez Velazquez 2009). Die wesentlichen Elemente des Informationsaustauschs folgen gemeinsamen Organisationsprinzipien:

1) Diffusion bzw. Dissipation von Energie und Materie sowie Fluktuation führen zu Nichtgleichgewichten und Mustern.
2) Diffusion und Reaktion stehen in Kompetition.
3) Kompetition, Kooperation und Fluktuation sind als Selektion, Reproduktion bzw. Variation Evolutionsprinzipien.
4) Interaktion bzw. Informationstransfer entstehen durch eine Umverteilung von Energie und Materie.
5) Zyklen und Synchronisationen optimieren den Informationsfluss und reduzieren Energieaufwand und Zeitdauer.
6) Rückkopplung *(feedback)* und Vorsteuerung *(feedforward)* sind wesentliche Elemente der Homöostase (Turing 1952; Morowitz/Smith 2007; Perez Velazquez 2009).

Für die Medizin und die ärztliche *Kunst* waren und sind das pathophysiologische Verständnis und damit letztlich die Prinzipien des Informationsaustauschs im Körper von grundlegender Bedeutung. „Was Arzneien nicht heilen, heilt das Messer, was das Messer nicht heilt, heilt (das) Brennen, was aber das Brennen nicht heilt, das muss als unheilbar angesehen werden." (Hippokrates, Lehrsprüche/Aphorismoi VII, 87; aus Meyer-Steineg/Sudhoff 1950). Hippokrates von Kos (460–375 v. Chr.) entwickelte die Viersäfte-Lehre, nach der Krankheiten durch Störungen im Gleichgewicht der Säfte Blut, Schleim sowie gelbe und schwarze Galle entstehen. Sein ärztliches Handeln basierte auf diesem humoralpathologischen Verständnis. Er ordnete diesem Verständnis auch sein hohes ethisches Verantwortungsbewusstsein unter. Damit legte er die auch heute noch in ihren Grundzügen geltenden ethischen Normen ärztlichen Handelns fest.

„Die Vernunft lehrt uns das allgemeine Ziel der Heilung bei jedem Leiden, die Erfahrung die Kräfte des Stoffes." (Galenus von Pergamon; aus Meyer-Steineg/Sudhoff 1950). Galenus von Pergamon (129–199 n. Chr.) verknüpfte die Viersäfte-Lehre der hippokratischen Medizin mit der Vierelemente-Lehre. Luft, Wasser, Erde und Feuer in unterschiedlicher Zusammensetzung bilden die Grundelemente des Seins. Darauf basierend entwickelte er sein therapeutisches System. „Über die Mischung und Wirkung der einfachen Heilmittel" (De simplicium medicamentorum temperamentis et facultatibus) gehört zu seinen Hauptwerken.

> „Nicht der Schmuck von Titeln, Beredsamkeit, Sprachkenntnis und Bücherstudium, sondern die Erkennung der Naturgeheimnisse macht den Arzt. In zwei Stunden täglich werde er praktische und theoretische Medizin nach eigenen Ausarbeitungen lesen, die nicht aus Hippokrates oder Galenos zusammengebettelt sind, sondern von der höchsten Lehrmeisterin Natur in eigener Erfahrung und Handanlegung empfangen! Sind Beweise vonnöten, sollten Experimente und Überlegung, nicht Autoritäten herangezogen werden." (Paracelsus; Paragranum 1529/30; aus Peukert 1991)

Paracelsus (1493–1541) kritisierte die von Autoritäten tradierte hippokratisch-galenische Humoralpathologie, die ohne wissenschaftlichen Erkenntniszuwachs fortgeführt wurde. Sein medizinisches System gründete Paracelsus neben der Alchemie, Astrologie und Mystik auf Erfahrung. Er führte damit den empirischen Ansatz in die Heilkunde (wieder) ein.

> „Wir haben andere Namen, selbst andere Form der Krankheiten, andere Mittel der Heilung, andere Begriffe und Erklärungsarten, als das Alterthum; aber die Heilkunst ist immer noch dieselbe, die Natur dieselbe, und es bedarf noch immer

> derselben Eigenschaften, um ein großer Arzt zu seyn, wie zu Hippocrates Zeiten.“ (Aphorismen eines freien Arztes; Hufeland 1834)

Christoph Wilhelm Hufeland (1762–1836) ging in seinem medizintheoretischen Ansatz von einem Selbsterhaltungsprinzip des Organismus aus.

> „Was heißen denn Simplicia in der Heilkunst, und was heißt das, man soll nur Simplicia geben? Es gibt ja keine wahren Simplicia in der Natur selbst, sind alle schon Composita, oft aus höchst verschiedenartigen Ingredienzien, und eben in dieser Mischung liegt ihre Kraft. – Warum soll nun das, was die Natur hier vorzeichnet, echt auch der Kunst erlaubt seyn? Warum soll sie nicht eben dadurch, selbst durch chemisch widersprechend scheinende Mischung, neue Schöpfungen und dadurch neue Kräfte und Wirkungen auf den lebenden Organismus hervorbringen dürfen?“ (Aphorismen eines freien Arztes; Hufeland 1834)

Hufeland folgte in seinem therapeutischen Ansatz der Unterstützung der Heilkraft der Natur. Er war seit 1801 *erster Arzt* und Direktor an der Charité und ab 1810 ordentlicher Professor für Pathologie und Therapie der neu gegründeten Universität in Berlin. Strukturell setzte er eine Vielzahl von Innovationen durch, neben der Poliklinik, die Armenfürsorge und Pockenimpfung, und forderte u. a. gesetzliche Bestimmungen für Hygiene und eine Sozialversicherung.

Rudolf Virchow verhalf mit seinem 1858 veröffentlichten Hauptwerk „Die Zellularpathologie in ihrer Begründung auf physiologische und pathologische Gewebelehre“ der naturwissenschaftlich geprägten Medizin zum Durchbruch und legte damit den Grundstein für die moderne Medizin. Virchow gelang es auch wesentliche strukturelle einer sozial orientierten Medizin umzusetzen, vor allem auf dem Gebiet der Hygiene.

Diese Beispiele aus der Medizingeschichte zeigen, dass trotz des Bewusstseins für die Komplexität der (menschlichen) Natur, Therapien auf Basis des jeweiligen Verständnisses entwickelt wurden. Damit wurde die Basis für die moderne Medizin und die Grundlage des ärztlichen Handelns gelegt. Das genauere pathophysiologische Verständnis von Krankheiten erlaubt immer effektivere Therapien. Spielt hierbei das Prinzip Einfachheit eine wesentliche Rolle? Um diese Frage zu beantworten, bedarf es einer Definition von Einfachheit im Kontext von Krankheit und Therapie. Krankheit soll hierbei als ein Zustand betrachtet werden, der durch wenige Faktoren sowie Regeln des Zusammenspiels der Faktoren bedingt ist. Die Therapie umfasst Maßnahmen, diese Faktoren und deren Zusammenspiel im Sinne der Ursache einer Erkrankung (kausale Therapie) oder deren Folgen (symptomatische oder supportive Therapie) positiv zu beeinflussen. Dies soll im

Folgenden anhand der Entwicklung einiger Therapien neurologischer Erkrankungen beispielhaft dargelegt werden.

Therapeutische Prinzipien in der Neurologie

Für die Behandlung neurologischer Erkrankung wurden in den letzten Jahrzehnten eine Vielzahl innovativer Therapieansätze entwickelt. Viele Erkrankungen waren zuvor nicht oder nur unzureichend behandelbar. Die Therapie mittels *Rezeptor-Antagonisten* bzw. -*Agonisten* basiert auf dem grundlegenden Verständnis der Interaktion von Nervenzellen. Die Kenntnis von Rezeptor-Strukturen erlaubte die Entwicklung von entsprechenden Antagonisten bzw. Agonisten. Beispielhaft seien hier die Dopamin-Agonisten zur Behandlung der Schüttellähmung (Morbus Parkinson) genannt, einer neurodegenerativen chronisch progredient verlaufenden Erkrankung des Gehirns. Die *tiefe Hirnstimulation* wurde für therapierefraktäre, mit Standard-Medikamenten nicht mehr ausreichend behandelbare Verläufe des Morbus Parkinson entwickelt. Hierbei ist die genaue Kenntnis der betroffenen Hirnstrukturen und neuronalen Netzwerke Voraussetzung. Für die elektrische Stimulation muss die Elektrode neurochirurgisch gezielt in bestimmten Hirnregionen positioniert werden. Die Stimulation erfolgt mit spezifischen Frequenzen durch einen Schrittmacher, ähnlich einem Herzschrittmacher. Das immer bessere Verständnis der Netzwerkstörungen erlaubt eine zunehmende Optimierung der Technik und immer bessere Therapieerfolge (Poewe et al. 2017). *Apharetische Verfahren* werden vor allem zur Behandlung von Autoimmunerkrankungen, die Autoantikörper-vermittelt zu strukturellen bzw. funktionellen Störungen des zentralen oder peripheren Nervensystems führen, eingesetzt. Durch die rasche und effektive Entfernung der Autoantikörper können in der Regel schnelle Verbesserungen erreicht werden. Dies ist vor allem bei schweren Krankheitsverläufen notwendig, z. B. bei einer *krisenhaften* Myasthenia gravis, einer neuromuskulären Erkrankung mit belastungsabhängiger Muskelschwäche und Atemlähmung. Zur Behandlung der Myasthenia gravis müssen wie bei den meisten Autoimmunerkrankungen in der Regel immunsuppressiv wirkende Medikamente eingesetzt werden. Da bei der Myasthenia gravis die Thymusdrüse eine wichtige Rolle spielen kann, hat sich die operative Entfernung der Thymusdrüse *(Thymektomie)* als gesichertes Therapieverfahren zur „chirurgischen" Immunmodulation etabliert. Mit dem *da Vinci*-Robotersystem kann heute dieser Eingriff minimal-invasiv und damit schonend umgesetzt werden (Meisel/Hoffmann 2019; Rückert et al. 2018).

Schlaganfälle entstehen in 85 % aller Fälle durch den Verschluss von Gefäßen, die für die Blutzufuhr des Hirns verantwortlich sind. Die schnellstmögliche Eröffnung dieser Gefäße erhöht die Chance, dass kein struktureller Hirnschaden zurückbleibt. Die endovaskuläre Therapie zur Entfernung von Blutgerinnseln (Thromben) mittels Katheter-Eingriff *(Thrombektomie)* hat sich neben der medikamentösen Therapie (Thrombolyse) als effektives rekanalisierendes Therapieverfahren in der Schlaganfall-Behandlung durchgesetzt. Wichtig für die erfolgreiche Therapieentwicklung war das Grundverständnis der Pathophysiologie des Schlaganfalls. Die infolge des Gefäßverschlusses entstehende Minderdurchblutung (zerebrale Hypoperfusion) nach Schlaganfall führt im Infarktkern zu einem irreversiblen Gewebsverlust. Um diesen Kern herum bildet sich die sogenannte *Penumbra*. Da die Minderperfusion in diesem Bereich weniger ausgeprägt ist kommt es nur zu einem funktionellen Defizit aber zu keinem strukturellen Schaden. Der Umfang von Infarktkern und Penumbra lässt sich mit Hilfe der modernen Bildgebung, der zerebralen Magnetresonanztomographie (MRT) darstellen. Liegt ein Missverhältnis *(Mismatch)* von Perfusions-MRT (reversible Schädigung) zu Diffusions-MRT (irreversible Schädigung) vor, dann kann noch Gewebe gerettet werden, sofern die Rekanalisation rasch und effektive erfolgt (Prabhakaran et al. 2015). Trotz des pathophysiologisch überzeugenden Ansatzes war die mechanische Rekanalisation mittels Thrombektomie der medikamentösen Thrombolyse in zwei großen randomisierten kontrollierten Studien nicht überlegen (Kidwell et al. 2013; Broderick et al. 2013). Diese Ergebnisse ließen bereits grundsätzliche Zweifel an der Wirksamkeit des Therapieverfahrens aufkommen. Bereits zwei Jahre später erschienen dann aber fünf weitere große randomisierte kontrollierte Studien. Alle konnten die hohe Wirksamkeit der Thrombektomie nachweisen (Berhemer et al. 2015; Goyal et al. 2015; Saver et al. 2015; Campbell et al. 2015; Jovin et al. 2015). In diesen fünf Studien wurde mit den sogenannten *Stent Retriever* anstatt der zuvor genutzten *Coil Retriever* bzw. *Aspiration Devices* eine neue Technik der Blutgerinnsel-Entfernung eingesetzt. Für den Erfolg der Thrombektomie war somit ein scheinbar kleines technisches Detail, die Nutzung von Drahtgeflechten anstatt von Drahtringen bzw. Saugkathetern, von entscheidender Bedeutung. Diese technische Innovation erlaubt eine effektive und zugleich komplikationsarme Entfernung der Blutgerinnsel (Prabhakaran et al. 2015) und wurde in der Zwischenzeit weiter optimiert.

Therapeutische Antikörper als Musterbeispiel des Prinzips Einfachheit?

Therapeutische Antikörper haben nicht nur in der Neurologie eine Vielzahl von vormals nicht oder nur unzureichend behandelbaren Erkrankungen einer effektiven Therapie zugänglich gemacht. Am Beispiel therapeutischer Antikörper werden die wesentlichen Schritte der Entwicklung von Medikamenten im Sinne eines *einfachen* Prozesses beschrieben (Box 1).

Box 1: Prozess der Medikamenten-Entwicklung

1. Ursachen und Folgen einer Erkrankung auf organismischer, zellulärer und molekularer Ebene verstehen
2. Zielstrukturen ableiten und validieren
3. Manipulationen der Zielstruktur messbar machen
4. Leitstruktur für ein Arzneimittel *screenen*
5. präklinische Untersuchung des Kandidaten-Medikaments
6. klinische Entwicklung des Kandidaten-Medikaments
7. Überwachung nach Markteinführung

Die erste Antikörpertherapie war die sogenannte Serumtherapie, die vor 130 Jahren durch Emil von Behring entwickelt wurde und zu den therapeutischen *Durchbrüchen* zählt. Die Serumtherapie basierte auf der spezifischen Immunisierung von Tieren mit Krankheitserregern, deren Serum anschließend zur Therapie bei Menschen eingesetzt wurde. Nach erfolglosen Versuchen mit Serum von Schafen gelang es Emil von Behring in Zusammenarbeit mit Kitasato Shibasaburo und Paul Ehrlich sowie mit Hilfe der Farbwerke Hoechst bereits 1894 Serum aus Pferden zu isolieren, das erfolgreich für die Therapie von Diphtherie eingesetzt wurde. Für die erfolgreiche Entwicklung der passiven Immunisierung mit *Antitoxin* zur Therapie der Diphtherie und später Tetanus erhielt von Behring im Jahr 1901 den ersten Nobelpreis für Medizin und Physiologie. Mit der Serumtherapie konnten die damals bei fehlenden Impfstoffen häufig tödlich verlaufenden Erkrankungen erstmals effektiv behandelt werden. Die Entdeckung der Antikörper als Wirkstoff der Serumtherapie wurde durch die Arbeiten von Paul Ehrlich später ermöglicht, der dafür im Jahr 1908 mit dem Nobelpreis ausgezeichnet wurde.

Eine wesentliche Weiterentwicklung in der therapeutischen Nutzung von Antikörpern stellen die aus menschlichem Serum von Blutspendern isolierten Immunglobuline der IgG-Subtypen dar. Immunglobuline der IgG-Subtypen haben eine große Vielfalt von Spezifitäten gegen verschiedene Anti-

gene. Man schätzt, dass IgG-Immunglobuline mehr als 100 Millionen Antigene erkennen können. Die enorme Vielfalt in der Antigen-Spezifität wird durch den variablen Teil der Antikörper-Moleküle gewährleistet. Die Produktion der Antikörper findet im Körper in den Plasmazellen statt. Diese entstehen aus B-Lymphozyten durch Interaktion mit anderen Immunzellen, insbesondere antigenpräsentierenden Zellen und T-Lymphozyten. Die Serum-Halbwertszeit von IgG-Immunglobulinen liegt bei zwei bis drei Wochen. Für die Herstellung einer IgG-Immunglobulin-Charge wird Blut von 3.000 bis 60.000 Spendern verwertet. Mittels Ethanol-Präzipitation gelingt die Aufreinigung der IgG-Immunglobuline, wobei die anderen Subtypen (IgA, IgM, IgE) weitestgehend eliminiert werden. Ein strenges Qualitätsmanagement verhindert die potentiell mögliche Übertragung von Krankheitserregern mit den Immunglobulinen, insbesondere von humanpathogenen Viren, wie Hepatitis-B-Virus oder Humanes Immundefizienz Virus. Spenderauswahl, Virus-Testung und Virus-Inaktivierung werden dazu durchgeführt.

Immunglobuline werden seit ca. 40 Jahren intravenös für die Therapie bei Menschen mit Immundefizienzen sowie zur Behandlung von Autoimmunerkrankungen erfolgreich und sicher eingesetzt (Schwab/Nimmerjahn 2013; Brekke/Sandlie 2003). Während die Wirkung der intravenösen Immunglobuline (IVIG) bei Immundefizienzen im Wesentlichen durch den Ersatz nicht vorhandener IgG-Immunglobuline begründet ist, sind die Wirkmechanismen der IVIG bei Autoimmunerkrankungen komplexer. So werden über den variablen Teil der Antikörper u. a. Zytokine und körpereigene Antikörper neutralisiert, Zellrezeptoren von Immunzellen blockiert und Immunzellen depletiert. Über den konstanten Teil der Antikörper können regulatorische T-Zellen vermehrt und die Funktion verschiedener Immunzellen moduliert werden. Damit können schützende körpereigene Mechanismen gestärkt und schädigende vermindert werden (Schwab/Nimmerjahn 2013).

Der nächste Schritt zur therapeutischen Nutzung von Antikörpern war die Entwicklung von Technologien zur *einfachen* Produktion und Aufreinigung von Antikörpern gegen spezifische Antigene. Der wesentliche Durchbruch für die Entwicklung spezifischer Antikörper basiert auf der Hybridom-Technik. Diese wurde von Georges Köhler und Cesar Milstein Anfang der 1970er Jahre entwickelt. Die Fusion von spezifischen Antikörper-produzierenden Zellen mit speziellen Tumorzellen (Myelom-Zellen) ermöglichte erstmalig die Produktion von *spezifischen* Antikörpern in großem Maßstab. Sie ist auch ein Beispiel dafür, wie lange innovative Technologien häufig brauchen, um in der praktischen Anwendung anzukommen. Der Durchbruch dieser revolutionären Technologie für die medizinische und

insbesondere therapeutische Anwendung benötigte mehr als 20 Jahre. Köhler und Milstein war die Bedeutung ihrer Technologie bewusst. „Such cells can be grown in vitro in massive cultures to provide specific antibody. Such cultures could be valuable for medical and industrial use." (Köhler/Milstein 1975). Diese Arbeit gehört, auch gemessen an der Häufigkeit der Zitierungen, zu den wichtigsten wissenschaftlichen Arbeiten aller Zeiten. In einer entsprechenden Analyse aus dem Jahre 2014 findet sich diese Arbeit auf Platz 97 (Van Noorden et al. 2014). Betrachtet man die Folgearbeiten in der biomedizinischen Forschung, so entfaltete diese grundlegende Arbeit ihre Wirkung erst mit einer Verzögerung von mehr als zehn Jahren. Der erste therapeutische Antikörper wurde zwar bereits im Jahr 1986 als Medikament zugelassen, der richtige Durchbruch kam jedoch erst in den 1990er Jahren. Köhler und Milstein erhielten für diese Arbeit 1984 den Nobelpreis für Medizin und Physiologie.

Auf der Hybridom-Methode basierend wurden verschiedene Technologien entwickelt, mit der spezifische Antikörper für die Diagnostik und Therapie produziert werden können. Am Anfang basierten die therapeutischen Antikörper in ihrer Struktur auf Maus-Aminosäuresequenz (murine Antikörper). Mit zunehmendem technologischen Fortschritt wurden Antikörper auf Basis von Primaten-Aminosäuresequenz, chimäre Antikörper (variabler Anteil aus muriner und konstanter Anteil aus humaner Aminosäuresequenz), humanisierte Antikörper (nur Antigenbindungsstelle aus muriner) und letztlich humane Antikörper (humane Aminosäuresequenz) hergestellt. Damit konnte vor allem die Sicherheit der Therapie verbessert werden (Brekke/ Sandlie 2003). Die Nomenklatur der monoklonalen therapeutischen Antikörper erlaubt Rückschlüsse auf ihre *strukturelle Herkunft* (-omab: murine Antikörper; -imab: Antikörper vom Primaten; -ximab: chimäre Antikörper; -zumab: humanisierte Antikörper; -umab: humane Antikörper).

Die Bedeutung der therapeutischen Antikörper soll im Folgenden verdeutlicht werden. So haben diese zum Beispiel die Therapie der Multiplen Sklerose (MS) revolutioniert. Eine Reihe hochwirksamer monoklonaler Antikörper stehen heute für die MS-Therapie zur Verfügung. Für deren Entwicklung war wiederum das genaue pathophysiologische Verständnis der Erkrankung notwendig. Dieses basiert auf der klinisch-wissenschaftlichen Forschung an MS-Patienten und dem EAE-Krankheitsmodell der MS (Experimentellen Autoimmun-Enzephalitis). Die Multiple Sklerose ist eine Autoimmunerkrankung des zentralen Nervensystems (ZNS). Dabei spielt insbesondere das *lernfähige* adaptive Immunsystem mit den T- und B-Lymphozyten eine entscheidende Rolle. Die Immunmodulation zielt darauf ab,

die proinflammatorische Wirkung von autoreaktiven T- und B-Lymphozyten im ZNS möglichst spezifisch zu verhindern. So zerstört der humanisierte Antikörper Alemtuzumab T- und B-Lymphozyten über die spezifische Bindung des CD52-Glykoprotein auf deren Zelloberfläche. Der humanisierte monoklonale Antikörper Ocrelizumab bindet das B-Lymphozyten-Antigen CD20 und zerstört damit nur B-Zellen. Der humanisierte monoklonale Antikörper Natalizumab verhindert über die selektive Hemmung von α4-Integrin-Adhäsionsmolekülen, die sich an der Oberfläche von Lymphozyten befinden, deren Einwanderung in das ZNS (Reich et al. 2018).

Diese therapeutischen Antikörper wurden in Kenntnis der pathophysiologischen Mechanismen gezielt gegen o. g. Strukturen entwickelt und zunächst in präklinischen Modellen getestet. Danach erfolgt wie für alle Medikamente die klinische Untersuchung in Studien der Phase I, II und III. Dabei steht in Phase I die Erforschung von Pharmakokinetik, Pharmakodynamik und Verträglichkeit zumeist an wenigen gesunden Probanden im Vordergrund. Phase II untersucht den Dosierungsrahmen, Sicherheit und Wirksamkeit. Phase III wird zum Nachweis von Wirksamkeit und Sicherheit durchgeführt. Bei den Studien der Phase II bzw. III handelt es sich um randomisiert Placebo-kontrollierte Studien an Patienten, die in der Regel an hunderten (Phase II) und tausenden Patienten (Phase III) durchgeführt werden. Sofern die Studienergebnisse für eine sichere und effektive Therapie sprechen, werden die Ergebnisse durch regulatorische Behörden (Europäische Arzneimittel-Agentur – EMA; Bundesinstitut für Arzneimittel und Medizinprodukte – BfArM bzw. Paul-Ehrlich-Institut – PEI) geprüft. In der Regel erfolgt bei positivem Ergebnis die Zulassung als Medikament für die in der Studie geprüfte Indikation, d. h. die Krankheit.

Um sich ein Bild zur Wirksamkeit von Therapien zu machen, sind vergleichende Analysen zu den Therapieabbrüchen wegen Nebenwirkungen bzw. fehlender Wirkung aussagekräftig. Wenn man sich die Therapieabbrüche wegen Nebenwirkungen anschaut, dann hat z. B. Alemtuzumab eine vergleichbar hohe Akzeptanz von ca. 90 % wie die Placebo-Therapie. Im Gegensatz zur Placebo-Therapie, deren „Wirkung“ in Bezug auf die Verhinderung von MS-Schüben/Progression über 24 Monate bei kleiner 5 % liegt, ist die Wirkung von Alemtuzumab bei ca. 95 %. Natalizumab liegt hier bei ca. 90 % Wirkung hat aber eine vergleichsweise schlechte Akzeptanz aufgrund von Nebenwirkungen, die in ca. 50 % zu Therapieabbrüchen führt (Tramcere et al. 2015, 2016).

Auch nach der Zulassung werden neue Medikamente hinsichtlich ihrer Wirkung, Verträglichkeit und unerwünschten Nebenwirkungen weiter in-

tensiv untersucht (Phase IV). Auf Basis der nunmehr über mehr als zwei Jahrzehnte entstandenen Studiendaten zur MS-Therapie wurden differenzierte Therapie-Algorithmen für die klinische Praxis entwickelt. Diese umfassen neben den therapeutischen Antikörpern auch andere immunmodulierend wirkende Substanzklassen. Damit hat sich die Prognose sowohl in Bezug auf die Lebenserwartung als auch die Teilhabe am Leben der betroffenen Menschen dramatisch verbessert (Ingwersen et al. 2016).

Ein wichtiger Aspekt in der Nachbeobachtung von Medikamenten ist die Sicherheit. Schwere Nebenwirkungen müssen daher durch die anwendenden Ärztinnen und Ärzte den Behörden gemeldet werden. Daclizumab ist ein humanisierter monoklonaler Antikörper gegen den Interleukin-2-Rezeptor, der u. a. aktivierte sowie regulatorische T-Zellen reduziert. Nach erfolgreicher Prüfung in allen drei Phasen der klinischen Studien erfolgte 2016 die Zulassung zur Behandlung der schubförmigen MS. In der Nachzulassungsphase zeigten sich allerdings schwerste Nebenwirkungen, wenn auch sehr selten. Wir und auch andere konnten dabei das sogenannte DRESS *(Drug Reaction with Eosinophilia and Systemic Symptoms)* Syndrom nach Daclizumab-Therapie beobachten. Dieses zeigte sich bei unserer Patientin als schwerste Meningoenzephalomyelitis, d. h. Entzündung der Hirnhäute, des Hirns und des Rückenmarks. Diese Nebenwirkung zeigt, dass vermeintlich spezifische wirkende Therapeutika trotz erfolgreicher Prüfung in allen drei zulassungsrelevanten Phasen der klinischen Prüfung neben gewünschten Effekten bisher unbekannte schwerste Nebenwirkungen haben können (Scheibe et al. 2018). In der Konsequenz wurde die Zulassung von Daclizumab im Einvernehmen mit dem Hersteller zurückgezogen.

Die wichtigsten und letztlich nicht abschließend geklärten Fragen beziehen sich damit regelhaft auf die Wirkung und Nebenwirkungen der Therapien im langfristigen Krankheitsverlauf chronischer Erkrankungen. Exemplarisch gilt dies auch für die Antikörpertherapie der MS und ist hier vor allem deshalb so wichtig, da die Erkrankung vor allem jüngere Menschen betrifft, die über Jahrzehnte behandelt werden müssen. Zudem verlaufen die verschiedenen MS-Subtypen nicht nur unterschiedlich sondern sprechen auf die Therapien unterschiedlich an. Daher sind vergleichende Untersuchungen der mittlerweile zur Verfügung stehenden Therapieoptionen im Langzeitverlauf notwendig.

Ein weiteres Beispiel für den Einsatz therapeutischer Antikörper kommt aus dem Bereich der vaskulären Medizin. Direkte orale Antikoagulantien werden heute zunehmend zur präventiven Therapie von Schlaganfällen bei Risikopatienten eingesetzt. Insbesondere Patienten mit Vorhofflimmern, einer

im höheren Lebensalter häufigen Herzrhythmusstörung, haben ein hohes Risiko, Blutgerinnsel im Herz zu entwickeln, die nachfolgend Schlaganfälle verursachen können. Die modernen oralen Antikoagulanzien, wie der direkte Thrombin-Inhibitor Dabigatran, haben eine hohe Wirksamkeit in der Verhinderung von Schlaganfällen (Hu et al. 2016; Tummala et al. 2016). Die Kehrseite der *Blutverdünner* ist, dass sie das Risiko für Blutungen erhöhen. Auf Basis der Bewertung von Nutzen (Schlaganfallverhinderung) und Risiko (schwere Blutung) werden diese Medikamente in der Schlaganfallprävention heute als Standard eingesetzt. Sie sind den klassischen Vitamin-K-abhängigen Antikoagulantien überlegen. Ein weiterer Vorteil ist die Verfügbarkeit eines sehr rasch wirksamen spezifischen Antagonisten gegen Dabigatran. Der therapeutische Antikörper Idarucizumab wurde spezifisch für die antagonisierende Bindung an Dabigatran entwickelt (Pollack et al. 2015). Idarucizumab kann die reversible Bindung von Dabigatran an Thrombin aufheben und so die Blutverdünnung im Falle einer schweren Blutung vorübergehend aufheben. Damit kann Idarucizumab die Prognose hinsichtlich bleibender Behinderung und Überleben bei schweren Blutungskomplikationen verbessern (Pollack et al. 2015).

Therapeutische Antikörper werden heute nicht nur bei neurologischen Erkrankungen sondern in vielen Bereichen der Medizin erfolgreich eingesetzt. Ein Beispiel sind die sogenannten Immun-Checkpoint-Inhibitoren (z. B. Ipilimumab gegen CTLA-4, Nivolumab gegen PD-1). Diese werden zur Behandlung verschiedener Krebserkrankungen, wie Hautkrebs (Melanom), erfolgreich eingesetzt. Inhibierende Immunregulatoren (Checkpoint-Moleküle) wie CTLA-4 und PD-1 werden durch diese Inhibitoren blockiert und dadurch das Immunsystem zur Abwehr von Krebszellen aktiviert (Goodman et al. 2016). Allerdings induzieren bzw. triggern diese Medikamente bei einigen Patienten zum Teil schwer verlaufende Autoimmunerkrankungen, die jedes Organ treffen können. Dies ist insofern nicht überraschend, als Autoimmunerkrankungen u. a. durch eine gestörte Immunregulation bedingt sind (Hottinger 2016). So ist bekannt, das CTLA-4 bei der Myasthenia gravis zu den wichtigsten genetischen Suszeptibilitätsfaktoren gehört (Renten et al. 2015). Für den Einsatz dieser scheinbar hochspezifischen Therapeutika müssen zukünftig individuelle Faktoren, die das Therapieansprechen und die Suszeptibilität für Nebenwirkungen vorhersagen können, identifiziert und berücksichtigt werden.

Prozess der Medikamentenentwicklung

Die Entwicklung moderner Therapeutika hat viele Bereiche der Medizin in den letzten Jahrzehnten nachhaltig verändert. Während die Anzahl der jährlich neu zugelassenen Medikamente noch vergleichsweise stabil ist, nehmen die dafür aufgewendeten Kosten seitens der Pharmaindustrie enorm zu. In den Jahren 1992 bis 2011 wurden jährlich ca. zwischen 20 und 40 neue Wirkstoffe zugelassen. Lagen die Kosten im Jahr 1992 für die gesamte Forschung und Entwicklung im Pharmabereich bei 10 Billionen US-Dollar waren es im Jahr 2011 über 50 Billionen US-Dollar. Auf Basis des finanziellen Aufwands wären jährlich 12 bis 20 weitere neue Medikamente zu erwarten gewesen. Das bessere Verständnis der Ursachen dieser Innovationslücke soll helfen, die Medikamentenentwicklung zu optimieren (Posey Norris et al. 2014).

Betrachtet man die Medikamentenentwicklung retrospektiv, das heißt mit wie vielen Substanzen muss die Medikamentenentwicklung starten, um eine Prüfsubstanz erfolgreich durch die Zulassung zu bringen, ergibt sich folgendes Bild. Der Prozess startet auf Basis von Ergebnissen der Grundlagenforschung, insbesondere mit der Identifizierung von Zielstrukturen, den sogenannten *drug targets*. Hierbei handelt es sich um für die Therapie erfolgversprechende Zielstrukturen, wie z. B. Rezeptoren oder Signalmoleküle einer Schadenskaskade. Die Medikamentensuche *(drug discovery)* startet nach Angaben der amerikanischen Zulassungsbehörde FDA (Food and Drug Administration) in der Regel mit mehr als 5.000 verschiedenen Substanzen. In präklinischen Krankheitsmodellen (z. B. Enzymassay, Zellkultur, Tiermodell, Gewebe, humanes Organoid) werden aus den initial noch 5.000 Substanzen durchschnittlich 200 ausgewählt und weiter getestet. Von diesen erreichen durchschnittlich 20 die klinische Phase. Nach der Phase I verbleiben davon noch etwa acht Prüfsubstanzen für die Phase II und davon zwei Prüfsubstanzen für die Phase III. Davon verbleibt eine Substanz, die für die Anwendung beim Menschen zugelassen wird. Für die präklinische Phase der Entwicklung werden drei bis sechs Jahre benötigt, für die klinische Phase sechs bis sieben Jahre. Für den Zulassungsprozess durch die regulatorischen Behörden vergehen weitere sechs bis vierundzwanzig Monate. Die Kosten für die Entwicklung eines Medikaments lagen 2016 bei circa 2,6 Milliarden US-Dollar (www.fda.gov). Eine weitere Datenerhebung kommt hinsichtlich der Erfolgsrate der Medikamentenentwicklung vom Beginn der Phase I bis zur erfolgreichen Zulassung mit ca. 10 % auf ähnliche Ergebnisse. Dabei gelingt der Übergang von Phase I zu Phase II in zwei Drittel der Studien, von denen wiederum ca. ein Drittel die Phase III erreicht. Von diesen Studien

werden nach der Phase III ca. zwei Drittel als Medikament (*new drug application* bzw. *biologics license application*) bei den regulatorischen Behörden (FDA, EMA) für die Zulassung beantragt, dem in ca. 85 % entsprochen wird (Hay et al. 2014). Die Wahrscheinlichkeit für die Zulassung eines Medikaments ist dabei in den verschiedenen Fachdisziplinen unterschiedlich. So liegt die Erfolgswahrscheinlichkeit von Beginn der Phase I bis zur Zulassung in der Indikation Infektionserkrankungen bei 17 %, Autoimmunerkrankungen bei 13 %, neurologische Erkrankungen bei 9 % sowie kardiovaskuläre und onkologische Erkrankungen bei jeweils 7 % (Hay et al. 2014). Die Gründe für das Scheitern von Studien in den Phasen II und III lagen in den Jahren 2008 bis 2015 überwiegend in der fehlenden Effektivität der Prüfsubstanz (ca. 50 %) und in Sicherheitsbedenken (ca. 20 %). Kommerzielle bzw. strategische Gründe begründeten ca. 20 % der Abbrüche von Phase-II- Studien und ca. 10 % von Phase-III-Studien (Harrison et al. 2016). Um die Erfolgswahrscheinlichkeit für die Medikamentenentwicklung zu erhöhen, wurden fünf Punkte als wesentlich identifiziert und als sogenanntes 5R-Gerüst (Box 2) definiert und genutzt (Cook et al. 2014; Morgan et al. 2018).

Box 2: *5R-Gerüst* für die Verbesserung der Medikamenten-Entwicklung

1. *Richtiges* Target: starke Verbindung von Target zur Krankheit; verfügbare und prädiktive Biomarker.
2. *Richtiges* Gewebe: adäquate Bioverfügbarkeit und Gewebeexposition, Definition von pharmakodynamischen Biomarkern, Verständnis der präklinischen und klinischen Pharmakokinetik und Pharmakodynamik
3. *Richtige* Sicherheit: differenzierte und klare Sicherheitsgrenzen, Verständnis sekundärer pharmakologischer Risiken, Verständnis über reaktive Metaboliten, Genotoxizität und Pharmakodynamik sowie Medikamenten-Medikamenten-Interaktionen.
4. *Richtige* Patienten: Identifikation der potentiell am besten auf die Therapie ansprechenden Patientenpopulation, Definition des Risiko-Nutzen-Verhältnis für diese Population.
5. *Richtiges* kommerzielles Potential: Differenziertes Angebot zum Nutzen in Bezug auf den künftigen Therapiestandard, Fokus auf den Marktzugang, Kostenträger und Anbieter, Strategie für personalisierte Gesundheitsfürsorge einschließlich Diagnostik und Biomarker.

(nach Cook et al. 2014)

Biomarker werden zunehmend eingesetzt, um die Erfolgswahrscheinlichkeit in der Medikamentenentwicklung zu erhöhen. In der Regel handelt es sich dabei um aus dem Blut bestimmbare oder bildgebende Biomarker, die als (Surrogat-)parameter für die zugrundeliegenden Mechanismen, den Verlauf bzw. die Schwere der Erkrankung etabliert sind. Biomarker können die Erfolgswahrscheinlichkeit bei jeder Studienphase der klinischen Entwicklung erhöhen, so dass in der Summe die Erfolgswahrscheinlichkeit ausgehend

von Phase I bis zur Medikamentenzulassung von ca. 8 % auf ca. 26 % steigt (BIO Industry Analysis 2016). Zudem wird in klinischen Studien zunehmend der Krankheiten-zentrierte zugunsten des Mechanismus-zentrierten Ansatzes verlassen. Hierbei helfen Biomarker zur Stratifizierung der zu untersuchenden Studien-Population. Zwei Ansätze werden dabei unterschieden. Zum einen werden innerhalb einer Erkrankung Subgruppen mittels Biomarker-Screenings auf das Vorliegen spezifischer Targets unterteilt und unter einem Schirm mittels verschiedener Target-spezifischer Therapieansätze zusammen geprüft (*umbrella trial*). Im sogenannten *basket trial* Ansatz werden Studienteilnehmer mit Hilfe von Biomarkern nach dem Vorliegen eines definierten Therapie-Targets ausgesucht und nicht nach dem Vorliegen einer spezifischen Erkrankung. Bei diesem Ansatz werden somit verschiedene Krankheiten *in einen Korb gelegt*, d. h. Patienten identifiziert, in die Studie eingeschlossen und Placebo-kontrolliert für ein Medikament gegen das vorliegende Target auf Therapieerfolg untersucht (Woodcock et al. 2017).

Komplexität und Einfachheit in der Therapie

Das Problem der potentiell zunehmenden Komplexität in der medizinischen Behandlung mit immer mehr (apparativen) diagnostischen und therapeutischen Möglichkeiten und den damit verbundenen gesundheitlichen bzw. finanziellen Gefahren für die Patienten und die Gesellschaft sind auch im Zeitalter der modernen Medizin schon lange bekannt. Damit verbunden ist der Ruf nach Einfachheit (Semmes 1957).

Exemplarisch soll hier auf die zunehmende Polypharmazie, vor allem im höheren Lebensalter eingegangen werden. Mit zunehmendem Lebensalter nimmt der Anteil der Patienten, die mit einer Vielzahl von Wirkstoffen behandelt werden, kontinuierlich zu. Eine große Studie aus Schottland zeigt, dass beispielsweise die Hälfte aller 65- bis 69-jährigen Patienten mindestens fünf verschiedene Medikamente pro Tag einnimmt. Bei den über 80-Jährigen sind dies bereits mehr als 70 % aller Patienten. In diesem Alter nehmen 25 % der Patienten mehr als zehn verschiedene Medikamente pro Tag ein (Guthrie et al. 2011). Das Risiko von schweren Nebenwirkungen steigt kontinuierlich mit der Anzahl der pro Tag eingenommenen Medikamente. So ist das Risiko bei mehr als zehn verschiedenen Wirkstoffen ca. dreimal so hoch wie bei der Einnahme von ein bis zwei verschiedenen Medikamenten (Cerreta et al. 2012). Dabei nimmt die Polypharmazie im letzten Lebensjahr noch einmal zu. In einer schwedischen Studie mit mehr als einer halben Million Patienten, die älter als 65 Jahre waren, erhöhte sich der Anteil der

Patienten, die mindestens zehn verschiedene Medikamente bekamen, von 30 % auf fast 50 % im Zeitraum von zwölf Monaten bis einem Monat vor dem Tod. Entsprechend stieg die durchschnittliche Anzahl von Medikamenten pro Tag von acht auf zehn (Morin et al. 2017).

Das Alter von Patienten mit kardiovaskulären Erkrankungen war in klinischen Medikamenten-Studien deutlich geringer als in der klinischen Praxis. Während 60 % der Studien-Patienten jünger als 65 Jahre und nur 10 % älter als 75 Jahre waren, sind in der Routineversorgung nur 35 % der Patienten jünger als 65 Jahre und fast 40 % älter als 75 Jahre. Damit bilden diese Studien die Hauptgruppe der Patienten, für die diese Medikamente in der Praxis eingesetzt werden, nicht repräsentativ ab, weder hinsichtlich des Alters noch der Begleiterkrankungen. Dieses Problem haben nicht nur kardiovaskuläre Studien sondern sehr wahrscheinlich die meisten Studien für Erkrankungen des höheren Lebensalters (Stewart et al. 2017). Polypharmazie, insbesondere im höheren Lebensalter, ist also ein häufiges Problem, dass sich auch in der modernen Studienmedizin nur unzureichend abbildet und dessen Bedeutung für die klinische Praxis nur unzureichend verstanden ist. Insbesondere ist der Einfluss Polypharmazie auf die Wirkung und unerwünschten Nebenwirkungen der Medikamente weitgehend unklar.

> „Heißt das, dass wir uns von der Komplexität unterkriegen lassen sollten? Weit gefehlt. Ärzte, die Informationen für Ärzte bereitstellen, und Ärzte selbst, die ihre Patienten informieren, müssen sich mit der Komplexität auseinandersetzen, um eine Botschaft zu vermitteln, die so einfach ist, dass sie die Entscheidungsfindung erleichtert und negative Folgen verhindert. Der Biologe Edward O. Wilson, der von der Komplexitätstheorie nicht überzeugt ist, weist darauf hin, dass die Evolution komplexer adaptiver Systeme auf grundlegenden Vereinfachungen beruht, die ihre Entwicklung bestimmen. In unserer informationsreichen und hochkomplexen Welt werden diejenigen Informationsanbieter und Ärzte erfolgreich sein, die unserer unübersichtlichen Welt einen einfachen Sinn geben und gleichzeitig ihre Unschärfe einfangen.“ (Abbasi 2005)

Auf welcher rationalen Basis kann es uns vor dem Hintergrund komplexer biologischer Systeme und Ursachen von Erkrankungen sowie zunehmender Behandlungsoptionen gelingen, die *richtigen* Entscheidungen zu treffen? Hier sind vor allem die erfolgreiche Implementierung der sogenannten Evidenz-basierten Medizin zu nennen. Diese zielt darauf ab, die zum gegenwärtigen Zeitpunkt vorhandene beste Forschungsevidenz und klinische Expertise mit den Präferenzen und Werten der Patienten zusammenzubringen. Dazu dienen vor allem Ergebnisse von Metaanalysen, die in speziellen Datenbanken (*The Cochrane Collaboration*) zusammengefasst werden. Basie-

rend darauf fassen Leitlinien für die Diagnostik und Therapie der einzelnen Erkrankungen das Wissen prägnant und auf dem neuesten Stand zusammen. Weitere Initiativen, wie z. B. die *Choosing Wisely* Kampagne der ABIM Foundation (American Board of Internal Medicine) klären über unnötige medizinische Behandlungen auf. Die breite Verfügbarkeit neuer Technologien, wie z. B. die nahezu komplette Sequenzierung des Genoms für jeden Menschen bei niedrigen Kosten, ermöglicht zunehmend den breiten Zugang zur Identifikation von genetischen Suszeptibilitätsfaktoren. Damit wird es besser möglich sein, das individuelle Ansprechen auf Therapien bzw. das individuelle Risiko von unerwünschten Nebenwirkungen vorherzusagen. Einen enormen Einfluss wird in Zukunft die digitale Medizin haben. Diese wird u. a. die Verbindung zwischen Therapeuten und Patienten grundsätzlich von einer eher punktuellen zu einer mehr kontinuierlichen Interaktion ermöglichen. Neben einer systematischen Datenerfassung wird damit eine zeitnahe bedarfsgerechte Beratung und Behandlung des Patienten durch den behandelnden Arzt ermöglicht. Die systematische Erfassung relevanter Patientendaten bietet die Möglichkeit umfassender Datenanalysen mit dem Ansatz des *maschinellen Lernens*. Diese Technologien werden ergänzend zu den klassischen Analysemethoden helfen, aus großen Datensätzen, insbesondere Routineversorgungsdaten (*real world data*), wichtige Erkenntnisse zum Nutzen individueller Therapien zu gewinnen. Die Ergebnisse werden auch in digitale Unterstützungssysteme (*medical decision support system*) einfließen. Damit können behandelnde Ärzte bei Entscheidungsfindungen in der Diagnostik und Therapie von Erkrankten unterstützt werden. Den großen Möglichkeiten, die diese Technologien eröffnen, stehen potentielle Gefahren gegenüber, wie systematischer Datenmissbrauch. Dieser muss in der weiteren Entwicklung berücksichtigt werden, d. h. so weit möglich technisch unterbunden und rechtlich hinreichend sanktioniert werden.

Zusammenfassung

Zielgerichtete Therapieansätze auf Basis der Erkenntnis grundlegender Krankheitsmechanismen sind erfolgreich. Betrachtet man die Erfolgsrate von klinischen Studien bis zur Zulassung gilt trotz zunehmender Optimierung aber auch weiterhin das *Prinzip von Versuch und Irrtum*. Dies gilt noch stärker für die präklinische Phase. Bezieht man die für innovative Therapien notwendigen Grundlagenwissenschaften mit ein, spielen auch *Zufälle* für den Erkenntnisfortschritt eine wichtige Rolle. Dies muss u. a. in der Forschungs- und Karriereförderung berücksichtigt werden. Wirksame Therapien haben häufig unerwünschte Nebenwirkungen, wenn auch vergleichs-

weise selten schwere unerwartete Nebenwirkungen. Biomarker werden helfen, zunehmend die Behandlung zu personalisieren und die *richtigen* Patienten auszuwählen, d. h. die Patienten, die auf die Therapie ansprechen und keine relevanten Nebenwirkungen haben. Für die therapeutische Praxis besteht jedoch *konzeptionell* die Gefahr, dass bei einer Krankheits- und vor allem Symptom-orientierten Therapie es zu einer zunehmenden Polypharmazie kommt. Hierbei spielt das hohe Lebensalter vieler Menschen in einer alternden Gesellschaft und die damit verbundene Multimorbidität eine entscheidende Rolle. Die Folge sind vielfältige Medikamenten-Interaktionen, die zusätzliche Risiken für die Patienten bedingen. Diese müssen nicht nur besser erforscht sondern in der Praxis auch konsequent berücksichtigt werden. Ein weithin unterschätztes Problem ist, dass die meisten Studien mit *idealen* Patientenpopulationen durchgeführt werden. Die für die therapeutische Praxis *relevanten* Patientenpopulationen, z. B. hinsichtlich Alter und Komorbiditäten, bilden sich in den klinischen Prüfungen regelhaft nicht hinreichend ab. Damit bleiben Unsicherheiten in Bezug auf die Wirksamkeit und Sicherheit von Medikamenten für die Praxis, die im günstigen Fall durch die Nachbeobachtungsphase reduziert werden können. Für die ärztliche Praxis bleibt es unerlässlich, therapeutische Entscheidungen auf Vereinfachungen basierend aus der Komplexität von Informationen zu extrahieren. Inwieweit diese Vereinfachungen immer zulässig sind, kann nur zukünftige Forschung aufzeigen. Die damit verbundenen Unsicherheiten müssen akzeptiert werden, um handlungsfähig zu bleiben. Die Erfolge der modernen Medizin in der Diagnostik und Therapie einer Vielzahl von Erkrankungen, insbesondere auch in der Neurologie, die bis vor wenigen Jahrzehnten als rein diagnostisches Fach betrachtet wurde, unterstützen diesen Ansatz. Trotz aller Fortschritte im Wissen bleibt aber auch heute noch das ärztliche Wirken, um es in den Worten von Christoph Wilhelm Hufeland zu sagen, *die Kunst das menschliche Leben zu verlängern*. Sie stillt damit ein Bedürfnis, das wohl die meisten von uns haben. Hufeland zitierte dafür treffend Johann Wolfgang von Goethe mit „Süßes Leben! Schöne freundliche Gewohnheit des Daseyns und Wirkens! – Von dir soll ich scheiden?“ (Hufeland 1798).

Literatur

Abbasi, K. (2005): Simplicity and complexity in health care: what medicine can learn from Google and iPod. J R Soc Med. 98(9), 389.

Behring, E./Kitasato, S. (1890): Über das Zustandekommen der Diphtherieimmunität und der Tetanusimmunität bei Thieren. Deutsche Medizinische Wochenschrift 16 (49), 1113–1114.

Berkhemer, OA./Fransen, PS./Beumer, D./van den Berg, LA./Lingsma, HF./Yoo, AJ./Schonewille/WJ./Vos, JA./Nederkoorn, PJ./Wermer, MJ./van Walderveen, MA./Staals, J./Hofmeijer, J./van Oostayen, JA./Lycklama à Nijeholt, GJ./Boiten, J./Brouwer, PA./Emmer, BJ./de Bruijn, SF./van Dijk, LC./Kappelle, LJ./Lo RH./van Dijk, EJ./de Vries, J./de Kort, PL./van Rooij, WJ./van den Berg, JS./van Hasselt, BA./Aerden, LA./Dallinga, RJ./Visser, MC./Bot, JC./Vroomen, PC./Eshghi, O./Schreuder, TH./Heijboer, RJ./Keizer, K./Tielbeek, AV./den Hertog, HM./Gerrits, DG./van den Berg-Vos, RM./Karas, GB./Steyerberg, EW./Flach, HZ./Marquering, HA./Sprengers, ME./Jenniskens, SF./Beenen, LF./van den Berg, R./Koudstaal, PJ./van Zwam, WH./Roos, YB./van der Lugt, A./van Oostenbrugge, RJ./Majoie, CB./Dippel, DW.; MR CLEAN Investigators (2015): A randomized trial of intraarterial treatment for acute ischemic stroke. N Engl J Med. 372(1), 11–20.

Brekke, OH./Sandlie, I. (2003): Therapeutic antibodies for human diseases at the dawn of the twenty-first century. Nat Rev Drug Discov 2(1), 52–62.

Broderick, JP./Palesch, YY./Demchuk, AM./Yeatts, SD./Khatri, P./Hill, MD./Jauch, EC./Jovin, TG./Yan, B./Silver, FL./von Kummer, R./Molina, CA./Demaerschalk, BM./Budzik, R./Clark, WM./Zaidat, OO./Malisch, TW./Goyal, M./Schonewille, WJ./Mazighi, M./Engelter, ST./Anderson, C./Spilker, J./Carrozzella, J./Ryckborst, KJ./Janis, LS./Martin, RH./Foster, LD./Tomsick, TA.; Interventional Management of Stroke (IMS) III Investigators (2013): Endovascular therapy after intravenous t-PA versus t-PA alone for stroke. N Engl J Med 368(10), 893–903.

Campbell, BC./Mitchell, PJ./Kleinig, TJ./Dewey, HM./Churilov, L./Yassi, N./Yan, B./Dowling, RJ./Parsons, MW./Oxley, TJ./Wu, TY./Brooks, M./Simpson, MA./Miteff, F./Levi, CR./Krause, M./Harrington, TJ./Faulder, KC./Steinfort, BS./Priglinger, M./Ang, T./Scroop, R./Barber, PA./McGuinness, B./Wijeratne, T./Phan, TG./Chong, W./Chandra, RV./Bladin, CF./Badve, M./Rice, H./de Villiers, L./Ma, H./Desmond, PM./Donnan, GA./Davis, SM.; EXTEND-IA Investigators (2015): Endovascular therapy for ischemic stroke with perfusion-imaging selection. N Engl J Med 372(11), 1009–1018.

Cerreta, F./Eichler, HG./Rasi, G. (2012): Drug policy for an aging population – the European Medicines Agency's geriatric medicines strategy. N Engl J Med 367(21), 1972–1974.

Cook, D./Brown, D./Alexander, R./March, R./Morgan, P./Satterthwaite, G./Pangalos, MN. (2014): Lessons learned from the fate of AstraZeneca's drug pipeline: a five-dimensional framework. Nat Rev Drug Discov 13(6), 419–431.

Einstein, A. (1934): On the Method of Theoretical Physics. Philosophy of Science, Vol. 1/ No. 2, 163–169.

Goodman, A./Patel, SP./Kurzrock, R. (2017): PD-1-PD-L1 immune-checkpoint blockade in B-cell lymphomas. Nat Rev Clin Oncol 14(4), 203–220.

Goyal, M./Demchuk, AM./Menon, BK./Eesa, M./Rempel, JL./Thornton, J./Roy, D./Jovin, TG./Willinsky, RA./Sapkota, BL./Dowlatshahi, D./Frei, DF./Kamal, NR./Montanera, WJ./Poppe, AY./Ryckborst, KJ./Silver, FL./Shuaib, A./Tampieri, D./Williams, D./Bang, OY./Baxter, BW./Burns, PA./Choe, H./Heo, JH./Holmstedt, CA./Jankowitz, B./Kelly, M./Linares, G./Mandzia, JL./Shankar, J./Sohn, SI./Swartz, RH./Barber, PA./Coutts, SB./Smith, EE./Morrish, WF./Weill, A./Subramaniam, S./Mitha, AP./Wong, JH./Lowerison, MW./Sajobi, TT./Hill, MD.; ESCAPE Trial Investigators (2015): Randomized assessment of rapid endovascular treatment of ischemic stroke. N Engl J Med 372(11), 1019–1030.

Guthrie, B./McCowan, C./Davey, P., Simpson, CR./Dreischulte, T./Barnett, K. (2011): High risk prescribing in primary care patients particularly vulnerable to adverse drug events: cross sectional population database analysis in Scottish general practice. BMJ 342, d3514.

Harrison, RK. (2016): Phase II and phase III failures: 2013–2015. Nat Rev Drug Discov 15(12), 817–818.

Hay, M./Thomas, DW./Craighead, JL./Economides, C./Rosenthal, J. (2014): Clinical development success rates for investigational drugs. Nat Biotechnol 32(1), 40–51.

Hottinger, AF. (2016): Neurologic complications of immune checkpoint inhibitors. Curr Opin Neurol 29(6), 806–812.

Hu, TY./Vaidya, VR./Asirvatham, SJ. (2016): Reversing anticoagulant effects of novel oral anticoagulants: role of ciraparantag, andexanet alfa, and idarucizumab. Vasc Health Risk Manag 12, 35–44.

Hufeland, CW. (1798): Die Kunst das menschliche Leben zu verlängern (2. Auflage). Jena, in der akademischen Buchhandlung und Wien, bey Schaumburg und Compagnie.

Hufeland, CW. (1834): Neue Auswahl kleiner medizinischer Schriften. Berlin: Veit & Comp.

Ingwersen, J./Aktas, O./Hartung, HP. (2016): Advances in and Algorithms for the Treatment of Relapsing-Remitting. Multiple Sclerosis. Neurotherapeutics 13(1), 47–57.

Jovin, TG./Chamorro, A./Cobo, E./de Miquel, MA./Molina, CA./Rovira, A./San Román, L./Serena, J./Abilleira, S./Ribó, M./Millán, M./Urra, X./Cardona, P./López-Cancio, E./Tomasello, A./Castaño, C./Blasco, J./Aj, L./Dorado, L./Quesada, H./Rubiera, M./Hernandez-Pérez, M./Goyal, M./Demchuk, AM./von Kummer, R./Gallofré, M./Dávalos A.; REVASCAT Trial Investigators (2015): Thrombectomy within 8 hours after symptom onset in ischemic stroke. N Engl J Med 372(24), 2296–2306.

Kidwell, CS./Jahan, R./Gornbein, J./Alger, JR./Nenov, V./Ajani, Z./Feng, L./Meyer, BC./Olson, S./Schwamm, LH./Yoo, AJ./Marshal,l RS./Meyers, PM./Yavagal, DR./Wintermark, M./Guzy, J./Starkman, S./Saver, JL.; MR RESCUE Investigators (2013): A trial of imaging selection and endovascular treatment for ischemic stroke. N Engl J Med 368(10), 914–923.

Köhler, G./Milstein, C. (1975): Continuous cultures of fused cells secreting antibody of predefined specificity. Nature 256(5517), 495–497.

Meisel, A./Hoffmann, S. (2019): Myasthenia gravis. Referenz Neurologie. In: Diener, H.-Ch./ Steinmetz, H./Kastrup, O. (Hrsg.): Referenz Neurologie (1. Auflage). Stuttgart: Thieme. doi:10.1055/b-006-163224.

Meyer-Steineg, T./Sudhoff, K. (1950): Geschichte der Medizin im Überblick und Abbildungen (4. Auflage, Hrsg. B. von Hagen). Jena: Gustav-Fischer.

Morgan, P./Brown, DG./Lennard, S./Anderton, MJ./Barrett, JC./Eriksson, U./Fidock, M./Hamrén, B./Johnson, A./March, RE./Matcham, J./Mettetal, J./Nicholls, DJ./Platz, S./Rees, S./ Snowden, MA./Pangalos, MN. (2018): Impact of a five-dimensional framework on R&D productivity at AstraZeneca. Nat Rev Drug Discov 17(3), 167–181.

Morin, L./Vetrano, DL./Rizzuto, D./Calderón-Larrañaga, A./Fastbom, J./Johnell, K. (2017): Choosing Wisely? Measuring the Burden of Medications in Older Adults near the End of Life: Nationwide, Longitudinal Cohort Study. Am J Med 130(8), 927–936.e9.

Morowitz, H./Smith, E. (2007): Energy Flow and the Organizationof Life. Complexity 13, 51–59.

Perez Velazquez, JL. (2009): Finding simplicity in complexity: general principles of biological and nonbiological organization. J Biol Phys 35(3), 209–221.

Poewe, W./Seppi, K./Tanner, CM./Halliday, GM./Brundin, P./Volkmann, J./Schrag, AE./Lang, AE. (2017): Parkinson disease. Nat Rev Dis Primers. 2017 Mar 23;3, 17013.

Pollack, CV Jr./Reilly, PA./Bernstein, R./Dubiel, R./Eikelboom, J./Glund, S./Huisman, MV./Hylek, E./Kam, CW./Kamphuisen, PW./Kreuzer, J./Levy, JH./Sellke, F./Stangier, J./Steiner, T./Wang, B./Weitz, JI. (2015): Design and rationale for RE-VERSE AD: A phase 3 study of idarucizumab, a specific reversal agent for dabigatran. Thromb Haemost 114(1), 198–205.

Pollack, CV Jr./Reilly, PA./Eikelboom, J./Glund, S./Verhamme, P./Bernstein, RA./Dubiel, R./Huisman, MV./Hylek, EM./Kamphuisen, PW./Kreuzer, J./Levy, JH./Sellke, FW./Stangier, J./Steiner, T./Wang, B./Kam, CW./Weitz, JI. (2015): Idarucizumab for Dabigatran Reversal. N Engl J Med 373(6), 511–520.

Posey Norris, SM./Pankevich, DE./Davis, M./Altevogt, BM. (Rapporteurs); Institute of Medicine (2014): Improving and Accelerating Therapeutic Development for Nervous System Disorders: Workshop Summary. Washington/D.C.: The National Academies Press. https://doi.org/10.17226/18494.

Prabhakaran, S./Ruff, I./Bernstein, RA. (2015): Acute stroke intervention: a systematic review. JAMA 313(14), 1451–1462.

Reich, DS./Lucchinetti, CF./Calabresi, PA. (2018): Multiple Sclerosis. N Engl J Med 378(2), 169–180.

Renton, AE./Pliner, HA./Provenzano, C./Evoli, A./Ricciardi, R./Nalls, MA./Marangi, G./Abramzon, Y./Arepalli, S./Chon,g S./Hernandez, DG./Johnson, JO./Bartoccioni, E./Scuderi, F./Maestr,i M./Gibbs, JR./Errichiello, E./Chiò, A./Restagno, G./Sabatelli, M./Macek, M./Scholz, SW./Corse, A./Chaudhry, V./Benatar, M./Barohn, RJ./McVey, A./Pasnoor, M./Dimachkie, MM./Rowin, J./Kissel, J./Freimer, M./Kaminski, HJ./Sanders, DB./Lipscomb, B./Massey, JM./Chopra, M./Howard, JF Jr./Koopman, WJ./Nicolle, MW./Pascuzzi, RM./Pestronk, A./Wulf, C./Florence, J./Blackmore, D./Soloway, A./Siddiqi, Z./Muppidi, S./Wolfe, G./Richman, D./Mezei, MM./Jiwa, T./Oger, J./Drachman, DB./Traynor, BJ. (2015): A genome-wide association study of myasthenia gravis. JAMA Neurol 72(4), 396–404.

Rückert, JC./Swierzy, M./Kohler, S./Meisel, A./Ismail, M. (2018): Thymektomie bei Myasthenia gravis. Aktuelle Neurologie 45(04), 263–270.

Saver, JL./Goyal, M./Bonafe, A./Diener, HC./Levy, EI./Pereira, VM./Albers, GW./Cognard, C./Cohen, DJ./Hacke, W./Jansen, O./Jovin, TG./Mattle, HP./Nogueira, RG./Siddiqui, AH./Yavagal, DR./Baxter, BW./Devlin, TG./Lopes, DK./Reddy, VK./du Mesnil de Rochemont, R./Singer, OC./Jahan, R.; SWIFT PRIME Investigators (2015): Stent-retriever thrombectomy after intravenous t-PA vs. t-PA alone in stroke. N Engl J Med 372(24), 2285–2295.

Scheibe, F./Metz, I./Radbruch, H./Siebert, E./Wolf, S./Köhnlein, M./Harms, L./Meisel, A. (2018): Drug reaction with eosinophilia and systemic symptoms after daclizumab therapy in MS. Neurol Neuroimmunol Neuroinflamm 5(5), e479.

Schwab, I./Nimmerjahn, F. (2013): Intravenous immunoglobulin therapy: how does IgG modulate the immune system? Nat Rev Immunol 13(3), 176–189.

Semmes, RE. (1958): In favor of simplicity: applied to medicine in general and neurosurgery in particular. J Neurosurg 15(1), 1–3.

Stewart, D./Mair, A./Wilson, M./Kardas, P./Lewek, P./Alonso, A./McIntosh, J./MacLure, K; SIMPATHY consortium (2017): Guidance to manage inappropriate polypharmacy in older people: systematic review and future developments. Expert Opin Drug Saf 16(2), 203–213.

Thomas, DW./Burns, J./Audette, J./Carroll, A./Dow-Hygelund, C./Hay M (2016): Clinical Development Success Rates 2006-2015 BIO Industry Analysis, 1–26.

Tramacere, I./Del Giovane, C./Filippini, G. (2016): Immunomodulators and immunosuppressants for relapsing-remitting multiple sclerosis: a network meta-analysis. Association of Immunotherapies With Outcomes in Relapsing-Remitting Multiple Sclerosis. JAMA 315(4), 409–410.

Tramacere, I./Del Giovane. C./Salanti, G./D'Amico, R./Filippini, G. (2015): Cochrane Database Syst Rev. 2015 Sep 18; (9), CD011381. doi: 10.1002/14651858.CD011381.pub2.

Tummala, R./Kavtaradze, A./Gupta, A./Ghosh, RK. (2016): Specific antidotes against direct oral anticoagulants: A comprehensive review of clinical trials data. Int J Cardiol 214, 292–298.

Turing, AM. (1952): The chemical basis of morphogenesis. Philos. Trans R Soc Lond B 237, 37–72.

Van Noorden, R./Maher, B./Nuzzo, R. (2014): The top 100 papers. Nature 514(7524), 550–553.

Woodcock, J./LaVange, LM. (2017): Master Protocols to Study Multiple Therapies, Multiple Diseases, or Both. N Engl J Med 377(1), 62–70.

Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften zu Berlin *149 (2022), 119–186*

Erdmute Sommerfeld

Schaffung von Voraussetzungen für einfache Prozesse: ein Grundprinzip nicht nur in der menschlichen Informationsverarbeitung?

Werner Krause zu seinem 80. Geburtstag gewidmet*

*„Mir kommen die **Wege**, auf denen die Menschen zur Erkenntnis der himmlischen Dinge gelangen, fast ebenso bewunderungswürdig vor, wie die Natur der Dinge selber."*

(Kepler: Astronomia Nova)

Zusammenfassung

Sowohl *experimentelle* Untersuchungen im Rahmen der *Denkpsychologie* als auch Analysen geistiger Leistungen aus *evolutionspsychologischer* Sicht sprechen dafür, dass die *Schaffung von Voraussetzungen für einfache Prozesse* ein *bereichsübergreifendes Prinzip* in der menschlichen Informationsverarbeitung ist. Es ist gekennzeichnet durch ein Bewertungskriterium *„Ökonomie des Lösungsprozesses"* und eine dadurch gesteuerte anforderungsabhängige Bildung von *Makroelementen* auf der Grundlage lösungsrelevanter Information. Als Makroelemente bezeichnen wir Strukturen bzw. Funktionen, die Beziehungen zwischen Elementen einer gegebenen Menge repräsentieren (basierend auf begrifflichen und/oder anschaulichen Merkmalen). Solche Beziehungen bilden unter dem Aspekt der Ökonomie des Lösungsprozesses eine Grundlage für die Hervorhebung der Bedeutung vorhandener lösungsrelevanter Eigenschaften bzw. für eine Herausbildung neuer lösungsrelevanter Eigenschaften. Anhand der Ausbildung ausgezeichneter interner Repräsentationen auf der Basis solcher Makroelemente konnte aufgezeigt werden, *dass* Voraussetzungen für relativ *einfache Prozesse* bzw. sogar für *einfachste Prozesse* der Anforderungsbewältigung *geschaffen* werden, die quantifizierbar sind durch die zur Anforderungsbewältigung erforderliche Anzahl von Operationen bzw. durch die erforderliche Lösungszeit.

* Überarbeitete und erweiterte Fassung des Vortrags im Arbeitskreis „Prinzip Einfachheit" am 28.03.2019.

Im Beitrag werden experimentelle Untersuchungen zu einigen ausgewählten kognitiven Anforderungen charakterisiert und Ergebnisse vorgestellt, die im Rahmen der *Denkpsychologie* zur Schaffung von Voraussetzungen für einfache Prozesse erzielt wurden.

Anknüpfend an diese Ergebnisse wird gefragt, ob auch in *anderen Fachdisziplinen* die Schaffung von Voraussetzungen für einfache Prozesse eine bedeutsame Rolle spielt und wenn ja, ob es dabei entsprechende disziplinübergreifende Merkmale gibt. Aus einer ersten Analyse von Beiträgen aus naturwissenschaftlichen, technikwissenschaftlichen, geisteswissenschaftlichen und sozialwissenschaftlichen Disziplinen resultieren Beispiele, die dafür sprechen, dass eine solche Schaffung von Voraussetzungen für einfache Prozesse ein *disziplinübergreifendes* Prinzip ist und dass dieses Prinzip auch *außerhalb* der *menschlichen* Informationsverarbeitung vorkommt.

Abstract

Experimental investigations in the context of thinking psychology as well as analyses of mental performance from an *evolutionary* psychological point of view suggest that the *creation of preconditions for simple processes* is a cross-domain principle in human information processing. It is characterized by an evaluation criterion *"economy of the solution process"* and a thereby controlled requirement-dependent formation of *macroelements* on the basis of solution-relevant information. We refer to structures or functions that represent relationships between elements of a given set (based on conceptual and/or descriptive features) as macroelements. Such relations, from the point of view of the economy of the solution process, form a basis for highlighting the importance of existing solution-relevant properties or for an emergence of new solution-relevant properties. On the basis of the formation of excellent internal representations on the basis of such macroelements it could be shown *that* preconditions are created for *relatively simple processes* or even for the *simplest processes* of requirement handling, which are quantifiable by the *number* of operations required for requirement handling or by the required solution time.

The paper characterizes experimental studies on some selected cognitive demands and presents results obtained in the context of the *cognitive psychology* on the creation of preconditions for simple processes.

Following on from these results, it is asked whether the creation of prerequisites for simple processes also plays a significant role in *other disciplines* and, if so, whether there are corresponding cross-disciplinary features in this respect. From a first analysis of contributions from natural science, engineering, humanities and social science disciplines, examples emerge that suggest that such a creation of preconditions for simple processes is a *cross-disciplinary principle* and that this principle *also occurs outside human information processing.*

1 Einleitung

In der menschlichen Informationsverarbeitung ist die *Ordnungsbildung im Denken* ein Stück *Weg* zu mehr *Einfachheit im Informationsverarbeitungsprozess*. Denn durch Ordnungsbildung im Denken können – als eine Art Vorverarbeitung – *Voraussetzungen* dafür geschaffen werden, dass der *eigentliche Lösungsprozess möglichst einfach* wird. Experimentelle Ergebnisse bei der Bewältigung unterschiedlicher kognitiver Anforderungen sprechen dafür, dass die Schaffung von Voraussetzungen für einfache Lösungsprozesse ein *Grundprinzip* in der menschlichen Informationsverarbeitung ist.

Ausgangspunkt meines Beitrags ist der Untersuchungsansatz „Ordnungsbildung im Denken" von Werner Krause und der Bezug zur Schaffung von Voraussetzungen für einfache Prozesse.

Das *Anliegen* meines Beitrags besteht zum einen darin, über einige ausgewählte experimentelle Ergebnisse zur Schaffung von Voraussetzungen für einfache Prozesse in der menschlichen Informationsverarbeitung zu informieren. Diese Ergebnisse wurden im Rahmen von Untersuchungen innerhalb der *Denkpsychologie* erzielt. Anknüpfend daran besteht mein Anliegen weiterhin in der *Frage* danach, ob auch in *anderen wissenschaftlichen Disziplinen* außerhalb der Denkpsychologie die Schaffung von Voraussetzungen für einfache Prozesse eine so grundsätzliche Rolle spielt, und wenn ja, ob es dabei disziplinübergreifende Merkmale gibt.

Mit dieser Frage beziehe ich mich neben einigen Aussagen aus der Literatur insbesondere auf Vorträge, die am 8. April 2010 in der ganztägigen Plenarveranstaltung der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften zu Berlin zum Thema „Einfachheit als Wirk-, Erkenntnis- und Gestaltungsprinzip" gehalten wurden, sowie auf Vorträge in den Jahren 2010 bis 2019 im anschließend gegründeten Arbeitskreis „Prinzip Einfachheit". Die meisten Vorträge sowie die eingereichten Diskussionsbeiträge sind in drei thematischen Bänden zum Prinzip Einfachheit publiziert, den Sitzungsberichten der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften, Bd. 108 und Bd. 125/126 (Sommerfeld et al. 2010; Hörz et al. 2016a) sowie in diesem Band.

Dieser Beitrag gliedert sich in zwei Schwerpunkte:

- Ordnungsbildung im Denken und Schaffung von Voraussetzungen für einfache Prozesse
- Schaffung von Voraussetzungen für einfache Prozesse in unterschiedlichen Disziplinen?

2 Ordnungsbildung im Denken und Schaffung von Voraussetzungen für einfache Prozesse

2.1 Untersuchungsansatz von Werner Krause „Ordnungsbildung im Denken“

In seinem Buch „Denken und Gedächtnis aus naturwissenschaftlicher Sicht“ hat Werner Krause seinen Forschungsansatz dokumentiert (Krause 1991, 1994, 2000). Dabei geht es um den experimentellen Nachweis der Ordnungsbildung in Form aufwandsreduzierender Strukturierung von Information. Das Ziel des Ansatzes besteht darin, die *aufwandsreduzierende Strukturierung* von Information als eine *Basiskomponente des Denkens* zu identifizieren.

Untersucht wurden schwerpunktmäßig drei Klassen kognitiver Anforderungen: Inferenzprobleme, geometrische Probleme und Konstruktionsprobleme. Im Rahmen dieses Beitrags wird auf die ersten beiden Anforderungen eingegangen.

2.1.1 Kognitive Anforderung „Inferenzprobleme“

Warum untersucht man in der menschlichen Informationsverarbeitung „Inferenzprobleme“ unter dem Aspekt der Ordnungsbildung?

- Inferenz- oder Schlussprozesse spielen in weiten Bereichen der menschlichen Informationsverarbeitung eine Rolle.
- Inferenzprozesse der menschlichen Informationsverarbeitung stehen häufig im Widerspruch zu denen der formalen Logik.
- Ordnungsbildung ist ein bereichsübergreifendes Prinzip im Denken. Unter dem Aspekt der Ordnungsbildung wird nach der anforderungsabhängigen (Um-)Strukturierung lösungsrelevanter Information gefragt. Ein wesentlicher Schritt zur Beantwortung dieser Frage besteht darin, die anforderungsabhängig ausgebildete interne (mentale) Repräsentation experimentell nachzuweisen. Dazu sind „Inferenzprobleme“ als Anforderungen sehr gut geeignet.

Experimentell untersucht wurden transitive Inferenzprobleme. Die untersuchte Problemklasse betrifft die Klasse der linearen Ordnungsprobleme (vgl. z. B. Bower 1970; Potts 1975; Banks 1977; Pliske/Smith 1979; Groner 1978; Krause 1982, 2000; Sommerfeld 1994a, 2001, 2008; Petrusic 2001; Petrusic et al. 2004).

Für die Lösung eines solchen Problems bekommen die Versuchspersonen (Vpn) in einer *Lernphase* Aussagen der Form *„v_i r v_j“ (i,j=1,...,n)* über Paare *(„v_i, v_j“)* von n Elementen (einer gegebenen Menge), die in einer Ordnungsrelation (d. h. in einer transitiven, irreflexiven, asymmetrischen Relation) *r* stehen, sukzessiv dargeboten. Die Elemente sind z. B. Begriffe oder Bilder (bzw. Bildelemente). Über der Menge der Elemente besteht eine lineare Ordnung bezüglich *r*. Die Vpn erhalten nur Informationen über Elemente, die in dieser Ordnung direkt benachbart sind (dargeboten in einer Zufallsreihenfolge). Die *kognitive Anforderung* besteht in einer anschließenden *Fragenphase* darin, alle möglichen Fragen der Art *„v_k r v_l?“ (k,l= 1,...,n)* nach gegebener und daraus ableitbarer Information beantworten zu können.

Um in der Fragenphase die an sie gestellte kognitive Anforderung bewältigen zu können, müssen die Vpn auf der Grundlage der extern gegebenen Information (über die Menge von Aussagen) eine interne Repräsentation aufbauen, die experimentell zu bestimmen ist. Bei den untersuchten transitiven Inferenzproblemen können die Elemente auf Grund unterschiedlicher Merkmale unterschiedlichen Klassen zugeordnet werden. Auf dieser Basis können von den Vpn unterschiedliche hierarchische Strukturen *intern ausgebildet* werden. Mit solchen unterschiedlichen kognitiven Strukturen können *Voraussetzungen* für mehr oder weniger einfache Lösungsprozesse geschaffen werden.

Der experimentelle Beleg für die Nutzung solcher hierarchischen kognitiven Strukturen zur Anforderungsbewältigung wurde mit Hilfe eines Verfahrens erbracht, das auf der Bestimmung von Anstiegen von Reaktionszeit-Funktionen basiert. Dieses Verfahren wurde von Werner Krause auf der Grundlage des Symbol-Distanz-Effektes (Pliske/Smith 1979) entwickelt (Krause 1985). Es hat den Vorteil, weder von den Absolutwerten der Reaktionszeit noch von subjektiven Urteilen der Versuchspersonen abhängig zu sein. Das Verfahren wird in Krause (2000) beschrieben (vgl. auch Sommerfeld/Krause 2013).

Als *Bewertungskriterium* für die zur Anforderungsbewältigung genutzten kognitiven Strukturen wurde der *kognitive Aufwand* mit den Komponenten „Behaltensaufwand“ und „Prozessaufwand“ zugrunde gelegt. Dabei ist der Behaltensaufwand quantifizierbar durch die *Anzahl* von (zur Anforderungsbewältigung notwendigen) Merkmalen der kognitiven Struktur. Der Prozessaufwand ist quantifizierbar durch die *Anzahl* von (mit Elementarzeiten bewichteten) Operationen, die auf der Basis dieser kognitiven Struktur zur Anforderungsbewältigung erforderlich sind. Eine Systematisierung und

Formalisierung von kognitiven Operationen sowie Modellberechnungen zu den Bewertungen kognitiver Strukturen (interner Repräsentationen) sind in Sommerfeld/Sobik (1986, 1994) und Sommerfeld (1994a, b) detailliert dargestellt (vgl. auch Sommerfeld 2014, 2018).

Weshalb nehmen wir als Maß zur Bewertung der internen Repräsentation den kognitiven Aufwand?

Mit der Frage nach der anforderungsabhängigen (Um-)Strukturierung lösungsrelevanter Information (zur Erzeugung einer internen Repräsentation) ist die Frage verbunden, durch welche Prinzipien dieser Prozess *gesteuert* wird. Dabei sind insbesondere *generelle Wirkprinzipien* von Bedeutung, d. h. Prinzipien, die bereichsübergreifend wirken. Neben Kriterien wie „Erzielung einer hohen Lösungsgüte" und „Verringerung von Unbestimmtheit" spielen Prinzipien der *kognitiven Ökonomie* eine besondere Rolle. Kognitive Ökonomie äußert sich in der Reduktion der Komplexität bzw. Kompliziertheit von kognitiven Strukturen und Prozessen. Prinzipien der kognitiven Ökonomie sind auf der Basis von Prinzipien der Reduktion des kognitiven Aufwandes zum Behalten und zur Verarbeitung von Information quantifizierbar.

Im Rahmen der Untersuchung transitiver Inferenzprobleme haben wir zum einen die Frage nach einer effektiven *Strukturierung neuer Information* gestellt und zum anderen die Frage nach einer anforderungsabhängigen *Umstrukturierung von Wissen*.

Warum untersucht man aufwandsreduzierende Strukturierung neuer Information sowie aufwandsreduzierende Umstrukturierung von Wissen?

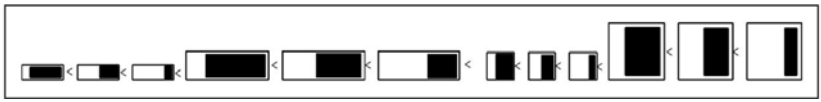
Es interessiert zum einen „Wie und *zu welchem Zweck* wird neue Information anforderungsabhängig strukturiert?" und zum anderen „Wird eingelerntes Wissen auch in der eingelernten Form genutzt oder wird es anforderungsabhängig (kurzfristig im Arbeitsgedächtnis) umstrukturiert?"

2.1.1.1 Aufwandsreduzierende Strukturierung neuer Information

Um auf der Grundlage neuer Information Probleme zu lösen, müssen sich die Vpn in einer für sie unbekannten Situation zurechtfinden.

Das Versuchsmaterial für ein transitives Inferenzproblem mit neuer Information zum experimentellen Nachweis der Ausbildung unterschiedlich bewerteter kognitiver Strukturen im Denkprozess ist in den Abbildungen 1 und 2 dargestellt (Krause et al. 1986; Krause 2000, S. 307).

Das Material besteht aus zwölf Mustern, die durch eine Relation („<„ bedeutet „steht links von") miteinander verbunden sind (vgl. Abb. 1).



<: „steht links von“

Abb. 1: Versuchsmaterial für ein transitives Inferenzproblem mit neuer Information zum experimentellen Nachweis der Ausbildung unterschiedlich bewerteter kognitiver Strukturen im Denkprozess: lineare Ordnung

(Krause 2000, S. 310, Teil von Abb. 8.3)

In einer *Lernphase* erhalten die Vpn nur Informationen über Muster, die in dieser Ordnung direkt benachbart sind. Alle direkt benachbarten Muster werden in einer Zufallsreihenfolge paarweise dargeboten. Ein Beispiel für die vollständige, in einem Lerndurchgang dargebotene Information ist in Abbildung 2 dargestellt (die Musterpaare werden einzeln gezeigt).

Die *kognitive Anforderung* in der Entscheidungsphase besteht in der Beantwortung aller möglichen Fragen nach gegebener und daraus ableitbarer Information.

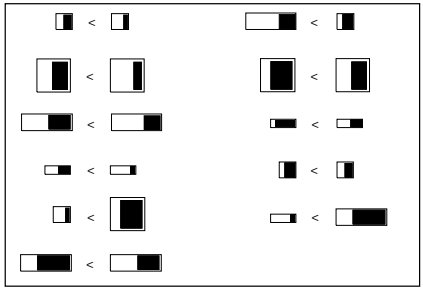
Das Material lässt die Klassifikationen zu, die jeweils unterschiedliche Mustermerkmale berücksichtigen. Die Anzahl der Merkmale, die eine Vp zur Klassenbildung heranzieht, geht in die Bestimmung der Bewertung ein. Die unterste Klasseneinteilung in Abbildung 2 mit Klassengrenzen bei 3 und bei 9 (Drei-Klassen-Struktur) ist durch die kleinste Merkmalsanzahl ausgezeichnet.

Der experimentelle Beleg für die Nutzung solcher hierarchischen kognitiven Strukturen zur Anforderungsbewältigung wurde mit Hilfe des von Werner Krause entwickelten Verfahrens erbracht, das auf der Bestimmung von Anstiegen von RT-Funktionen basiert (Krause 1985; vgl. Abb. 3).

Die *experimentellen Ergebnisse* sprechen dafür, dass nicht die einzelnen extern dargebotenen Aussagen intern gespeichert werden, sondern dass bereits mit der Informationsaufnahme inferiert wird und anforderungsabhängig intern eine lineare Ordnungsstruktur aufgebaut wird. Aus Blickbewegungsuntersuchungen konnte der Aufbauprozess auch nachgewiesen werden (Krause 1982).

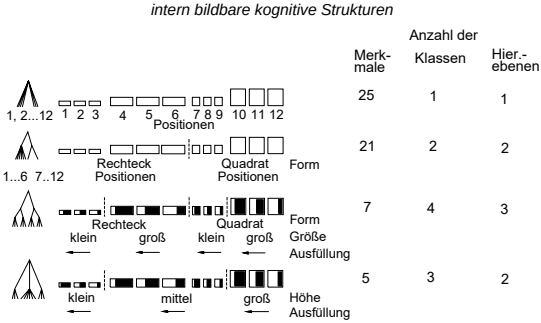
Auf der Basis einer solchen kognitiven (Ordnungs-)Struktur können aufwändige Inferenzprozesse durch einfachere Vergleichsprozesse ersetzt werden. Zusammen mit diesen kognitiven Strukturen wurde eine differentielle

Dargebotene Information in der Lernphase:



Beispiel für die vollständige, in einem Lerndurchgang dargebotene Information in einer Lernphase (die Musterpaare werden einzeln gezeigt)

< : „steht links von“



Beispiele für Fragen in der Entscheidungsphase

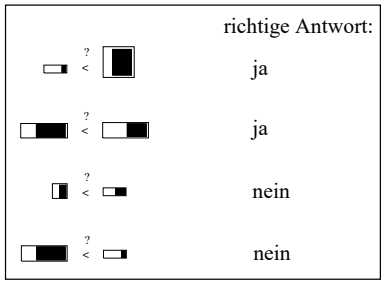


Abb. 2: Versuchsmaterial für ein transitives Inferenzproblem mit neuer Information zum experimentellen Nachweis der Ausbildung unterschiedlich bewerteter kognitiver Strukturen im Denkprozess: Lernphase, intern bildbare kognitive Strukturen, Entscheidungsphase

(Krause 2000, S. 307, Abb. 8.1)

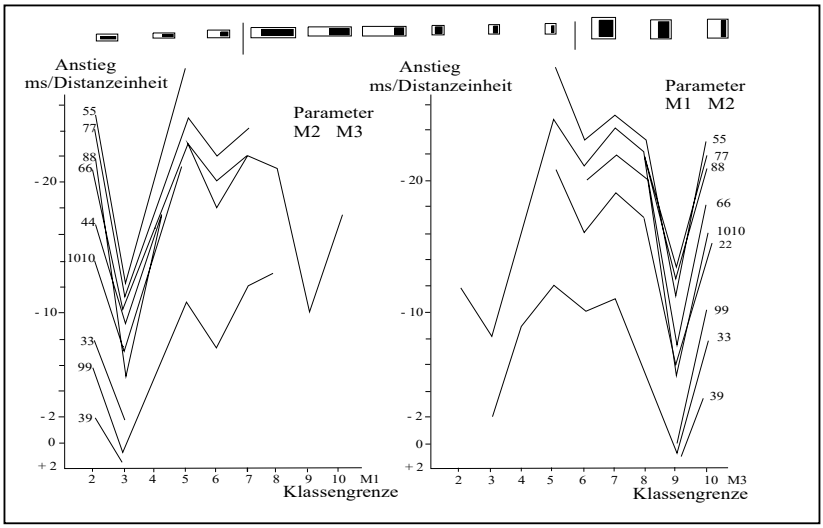


Abb. 3: Bestimmung der Klassengrenzen 3 und 9 der Drei-Klassen-Struktur (Krause 2000, S. 310)

Abhängigkeit experimentell nachgewiesen. Die Ergebnisse zeigen, dass leistungsstarke Vpn bevorzugt hierarchische kognitive Strukturen ausbilden, die entsprechend dem zugrunde gelegten Modellansatz durch einen geringen bis minimalen Behaltensaufwand gekennzeichnet sind (quantifizierbar durch die Anzahl von zur Anforderungsbewältigung notwendigen Merkmalen; Krause et al. 1986; Sommerfeld 1994, 2009; Krause 2000). Mit dem einfacheren Behalten der lösungsrelevanten Information wird auch der gesamte Prozess der Anforderungsbewältigung einfacher – gekennzeichnet durch einen geringen bis minimalen Prozessaufwand (quantifizierbar durch die *Anzahl* von Operationen, die zur Anforderungsbewältigung erforderlich sind).

Zusammenfassend ist für die Verarbeitung neuer Information festzustellen: Die extern dargebotene Information wird anforderungsabhängig so umstrukturiert und intern repräsentiert, dass damit eine *Voraussetzung für einen einfacheren Lösungsprozess geschaffen* wird als ohne diese Umstrukturierung.

2.1.1.2 Aufwandsreduzierende Umstrukturierung von *Wissen*

Die Frage nach einer *anforderungsabhängigen Umstrukturierung von Wissen* stellt sich, wenn man untersucht, ob Langzeitwissen in Abhängigkeit

von der kognitiven Anforderung umstrukturiert wird, wenn dadurch der Lösungsprozess vereinfacht werden kann.

Im Rahmen der Frage nach Kriterien für eine anforderungsabhängige Umstrukturierung von Wissen untersuchten wir Probleme mit Elementen aus der Konstruktionswissenschaft, entworfen von Günter Höhne und Horst Sperlich, TU Ilmenau (Krause et al. 1989). Dabei handelte es sich um konstruktive Elemente zur Aufnahme von Kräften nach dem physikalisch-technischen Prinzip der Berührungsfläche.

Vpn waren Konstruktionsstudenten und junge Konstrukteure der TU Ilmenau. In den Experimenten wurde geprüft, ob die Vpn ihre in der Vorlesung gelehrten hierarchischen Strukturierungen von Mengen konstruktiver Gebilde bei unterschiedlichen Anforderungen gleichermaßen nutzen oder *anforderungsabhängig* umstrukturieren und so bei der Anforderungsbewältigung andere Strukturierungen zu Grunde legen als die eingelernten Strukturen. Dazu wurde das zu lösende Problem nicht als Konstruktionsproblem, sondern als ein – für Konstrukteure untypisches – Inferenzproblem behandelt.

Das Versuchsmaterial bestand aus zwölf konstruktiven Elementepaaren, die durch eine Ordnungsrelation „belastbarer als“ miteinander verbunden sind (skizziert in Abb. 4). Es wurden sowohl Experimente mit zweidimensionaler als auch mit dreidimensionaler Darstellung durchgeführt. Im Rahmen dieses Beitrags betrachten wir die zweidimensionale Darstellung.

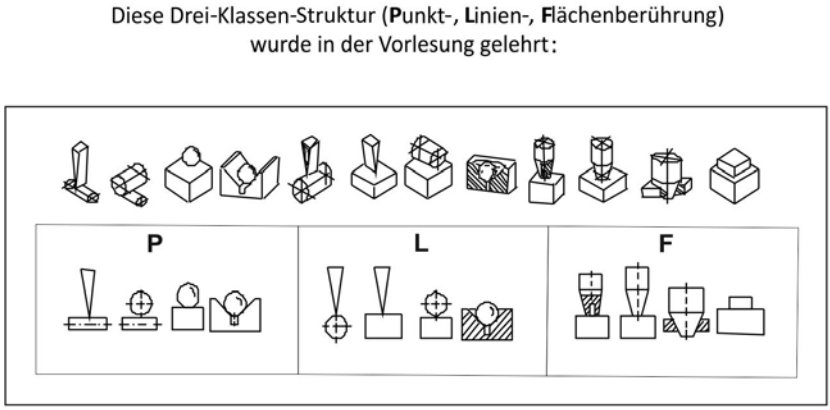


Abb. 4: Versuchsmaterial für ein wissensgestütztes transitives Inferenzproblem

Oben: dreidimensionale Darstellung, *unten:* zweidimensionale Darstellung
(Krause et al. 1989; Krause 2000, S. 108, Abb. 3.9)

Wie bei dem Experiment mit unbekannter Information erhalten die Vpn in der Lernphase nur Informationen über Elementepaare, die in dieser Ordnung direkt benachbart sind. Alle direkt benachbarten Elementepaare werden in einer Zufallsreihenfolge paarweise dargeboten. Die kognitive Anforderung in der Entscheidungsphase besteht auch hier in der Beantwortung aller möglichen Fragen nach gegebener und daraus ableitbarer Information.

Die experimentellen Ergebnisse zeigen, dass zur Bewältigung der charakterisierten Anforderung von den meisten Vpn *nicht* die in der Vorlesung gelehrte Drei-Klassen-Struktur genutzt wird, sondern eine Zwei-Klassen-Struktur (skizziert in Abb. 5), auf deren Grundlage (relativ zeitaufwändige) Umcodierungsprozesse entfallen können. (Krause et al. 1989; Sommerfeld 1994; Krause 2000). Konkret bedeutet das, dass durch Nutzung dieser hierarchischen (Zwei-Klassen-)Struktur der *Prozess zur Anforderungsbewältigung vereinfacht* werden kann – so dass eine geringere Anzahl von Operationen erforderlich ist als durch Nutzung der Wissensstruktur, die auf den in der Konstruktions-Vorlesung gelehrten drei Belastbarkeits-Klassen basiert (vgl. Abb. 5).

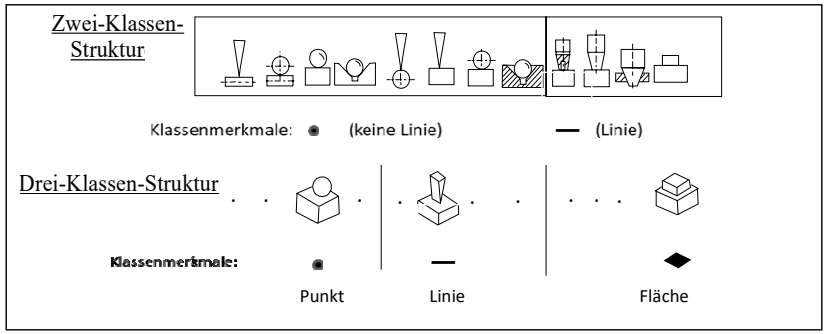


Abb. 5: Klassenmerkmale, die für die Entscheidungsfindung bei dem untersuchten wissensgestützten transitiven Inferenzproblem eine Rolle spielen (bei der Zwei-Klassen-Struktur und der Drei-Klassen-Struktur)

Zu beachten ist, dass durch die anforderungsabhängige Umstrukturierung des Langzeitwissens zusätzliche Information (im Arbeitsgedächtnis) behalten werden muss. Daher sind die so ausgebildeten kognitiven Strukturen zwar durch einen relativ geringen, jedoch nicht durch einen minimalen Behaltensaufwand gekennzeichnet. Das bedeutet, dass von den Vpn eine „überschau-

bare“ Erhöhung des Behaltensaufwandes der internen Repräsentation in Kauf genommen wird, *wenn dadurch der Lösungsprozess vereinfacht werden kann* (eine „überschaubare“ Erhöhung des Behaltensaufwandes in dem Sinne, dass die Vp in der Lage ist, die Information noch im Arbeitsgedächtnis zu behalten). Zudem muss berücksichtigt werden, dass Konstrukteure bezüglich der Transformation zwischen einer zweidimensionalen und einer dreidimensionalen Darstellung und dem Behalten dieser Darstellungen hochgeübt sind, sodass der zusätzliche Behaltensaufwand kaum ins Gewicht fallen dürfte.

Zusammenfassend ist für die Lösung der untersuchten Inferenzprobleme festzustellen:

Sowohl bei der Verarbeitung neuer Information als auch bei der Verarbeitung vorhandenen Langzeitwissens ist es entscheidend, dass anforderungsabhängig dann umstrukturiert wird, wenn dadurch einfachere Lösungsprozesse möglich werden als ohne diese Umstrukturierung. Das bedeutet, dass trotz spezifischer Unterschiede zwischen den erzeugten kognitiven Strukturen das *gleiche Prinzip* zugrunde liegt: die *Schaffung von Voraussetzungen für einfache Lösungsprozesse.*

Nachdem für unterschiedliche kognitive Inferenzanforderungen experimentell belegt werden konnte, *dass* interne Repräsentationen aufgebaut werden, die eine Prozessvereinfachung erlauben, fragen wir nun weiter: „*Wie* kommt es zu solchen ausgezeichneten internen Repräsentationen?“

Sowohl bei der anforderungsabhängigen Strukturierung neuer Information als auch bei der anforderungsabhängigen Umstrukturierung von Wissen haben wir es mit einer anforderungsabhängigen Bildung von *Makroelementen* auf der Grundlage lösungsrelevanter Information zu tun – hier in Form anforderungsabhängiger Klassenbildung als Basis für hierarchische Strukturbildung. Auf der Grundlage solcher Makroelemente werden hierarchische kognitive Ordnungsstrukturen erzeugt, durch deren Nutzung der Lösungsprozess vereinfacht werden kann. Die experimentellen Ergebnisse zeigen, dass sich als *Bewertungs- und Steuerkriterium* die *kognitive Ökonomie* des Prozesses der Anforderungsbewältigung erweist – formalisierbar auf der Basis des kognitiven Aufwandes und quantifizierbar durch dessen Reduktion.

Die hier untersuchten Verkürzungsprozesse (vgl. Klix 1992) sind auch mit einem Modalitätswechsel verbunden. Wie Krause, Seifert und Sommerfeld (1987) gezeigt haben, bilden einzelne Versuchspersonen beim Lösen von Inferenzproblemen eine bildhaft-anschauliche Repräsentation mit euklidischer Metrik aus. Das veranlasste die Forschergruppe um Werner Krause

in Jena, den Einfluss der Multimodalität auf die Wirkung des Prinzips Einfachheit zu untersuchen. Dazu mussten solche Anforderungen gewählt werden, die beide Modalitäten (Bildmanipulation / Formelmanipulation: Kreis / Kreisgleichung) zulassen. Die Wahl fiel nach einem Vorschlag von Heinrich (1997) auf geometrische Probleme. Wir fassen hier die Ergebnisse zusammen, um zu zeigen, dass das Prinzip zur Schaffung von Voraussetzungen für einfache Prozesse auch bei der Bewältigung anderer Anforderungen eine Rolle spielt.

2.1.2 Kognitive Anforderung „Geometrische Probleme"

Werner Krause untersuchte in Zusammenarbeit mit Gundula Seidel, Bärbel Schack und Frank Heinrich die Lösung geometrischer Probleme bei mathematisch Hochbegabten im Vergleich zu Normalbegabten (Krause et al. 2001; Krause/Seidel 2004; Krause et al. 2004). Im Vortrag von Werner Krause zum Thema *„Entropiereduktion im Denken"*, den er 2016 im Plenum der Leibniz-Sozietät gehalten hat und der in Leibniz Online 25 publiziert ist, wurden die Untersuchungen und Ergebnisse dazu detailliert dargestellt (Krause 2017a, b).

Im Folgenden ein Beispiel:

„Gegeben ist ein Quadrat mit der Diagonalen d = 5 cm. Verdopple die Fläche des Quadrates. Wie lang ist die Seite des neuen Quadrates?" (Krause et al. 2003a, b).

In Abbildung 6 a und b sind zwei Lösungsmöglichkeiten skizziert: eine begriffliche Berechnungsvariante und eine (einfachere) bildhafte Variante.

Experimentell konnte nachgewiesen werden, dass mathematisch Hochbegabte eine *Doppelrepräsentation* ausbilden, d. h. eine interne Repräsentation in zwei unterschiedlichen Modalitäten: bildhaft und begrifflich (Krause et al. 2003a, b). Damit wird die Möglichkeit geschaffen, diejenige Modalität auszuwählen, die eine *Voraussetzung* für einen *aufwandsärmeren Lösungsprozess* darstellt. Dieser Prozess ist durch eine kürzere Lösungszeit gekennzeichnet. Interessant ist, dass der aufwandsärmere Prozess der mathematisch Hochbegabten mit einer Entropiereduktion verbunden ist, die sich in einer höheren Ordnung der Sequenzen von EEG-Kohärenz-Mikrozuständen im Prozess äußert. Dieser Befund der höheren Entropiereduktion bei mathematisch Hochbegabten ist von Li Zhang und ihren Mitarbeitern an der Southeast Universität in Nanjing (China) bestätigt worden (Krause/Li Zhang 2018). In Krause (2017) sind diese Mikrozustände sowie die auf dieser Grundlage erzielten Ergebnisse detailliert beschrieben.

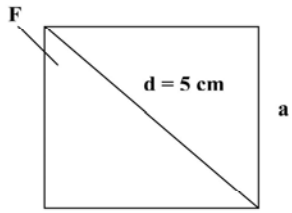
Die untere Skizze dient hier nur dem besseren Verständnis des Problems.	**Rechnerische Lösungsstrategie:**
 **F´= 2F** **a´: gesuchte Seitenlänge**	$F = a^2$ $d^2 = a^2 + a^2$ $d^2 = 2a^2$ und $a^2 = d^2/2$ $\longrightarrow F = d^2/2$ $F' = 2F$ $F' = 2\ d^2/2$ $F' = d^2$ $\longrightarrow a' = \sqrt{d^2}$ $a' = d$ $\longrightarrow a' = 5$ cm

Abb. 6a: Rechnerische Lösungsstrategie

Bei der Schaffung von Voraussetzungen für einfache Prozesse zur Lösung geometrischer Probleme wurden Makroelemente in Form von Klassen geometrischer Teilfiguren gebildet und zur Lösung genutzt. Im Beispiel, das in Abbildung 6 a und b dargestellt ist, waren das Dreiecke.

Entscheidend ist auch bei dieser kognitiven Anforderung, dass solche internen Repräsentationen ausgebildet wurden, die einfache (oder sogar einfachste) Lösungsprozesse ermöglichen. Als Steuerkriterium spielte auch hier die kognitive Ökonomie des Lösungsprozesses eine Rolle. Die Ausbildung einer solchen Doppelrepräsentation stellt ein Beispiel dafür dar, dass kognitive Strukturen, die als Voraussetzungen für einfache Lösungsprozesse ausgebildet werden, durchaus selbst relativ umfangreich sein können. Im Vordergrund steht nicht die Ausbildung möglichst einfacher kognitiver Strukturen, sondern entscheidend ist die Ausbildung kognitiver Strukturen, die *einfache Prozesse ermöglichen*.

Im Rahmen von Elementaranalysen der menschlichen Informationsverarbeitung wurde für weitere kognitive Anforderungen die anforderungsabhängige und personenspezifische Schaffung von Voraussetzungen für einfache Lösungsprozesse experimentell nachgewiesen, z. B. für analoge Schlussprozesse (Klix 1992, S. 438–446).

Bildhafte Lösungsstrategie:

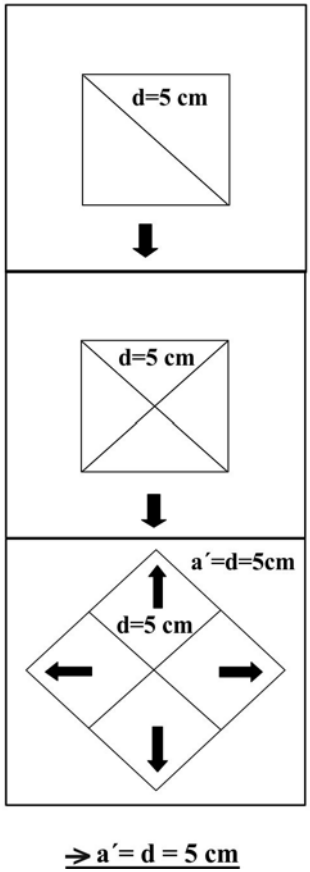


Abb. 6b: Bildhafte Lösungsstrategie

(Krause et al. 2003a, b; Heinrich 1997; Krause et al. 2003a)
Mit freundlicher Genehmigung des Friedrich-Verlages Seelze.

In Tabelle 1 sind die in diesem Beitrag beschriebenen experimentellen Untersuchungen zur menschlichen Informationsverarbeitung und dabei erzielte Ergebnisse zur Schaffung von Voraussetzungen für einfache Lösungsprozesse in einer Übersicht dargestellt.

Tab. 1: Beispiele aus *experimentellen* Analysen geistiger Leistungen zur Schaffung von Voraussetzungen für einfache Prozesse der Anforderungsbewältigung (experimentell belegt)

Schaffung von Voraussetzungen für einfache Prozesse D: Disziplin D1: Teilgebiet/ Teilaspekt D11: Beispiel D111: Anforderung bzw. Ziel	*Bewertungs- und/oder Steuer-kriterium:* *Ökonomie (des Prozesses der Anforderungs-bewältigung)*	*auf dem Weg zur Schaffung von Voraussetzungen für einfache Prozesse:* *anforderungs-abhängige **Bildung von Makroelementen** (auf der Basis lösungsrelevanter Information)*	*angestrebte bzw. geschaffene Voraussetzungen für einfache Prozesse:* *ausgezeichnete Systeme (aus **Strukturen** bzw. **Funktionen** und dazugehörigen **Regeln**)*	*einfache Prozesse, die auf Grund der Voraussetzungen ermöglicht werden sollen bzw. ermöglicht werden:* *(quantifizierbar z.B. durch eine **geringe Anzahl** notwendiger Operationen bzw. durch eine kurze Lösungszeit)*
D: Psychologie D1: Menschliche Informationsverarbeitung D11: Problemlösung auf der Grundlage *neuer* Information D111: Lösung eines Inferenzproblems (Krause et al. 1986)	Kognitive Ökonomie des Prozesses zur Lösung eines Inferenzproblems auf der Basis neuer Information	Bildung von Makroelementen in Form von Teilstrukturen: auf der Basis lösungsrelvanter Klassenmerkmale, die sich aus Beziehungen zwischen den gegebenen Elementen ergeben	ausgezeichnete interne Repräsentation: hierarchische kognitive Struktur, gebildet durch die Makroelemente und gekennzeichnet durch einen geringen oder sogar minimalen Behaltensaufwand (mit dazugehörigen Vergleichs-Regeln)	Lösungsprozess mit geringer (bzw. minimaler) Anzahl notwendiger kognitiver Operationen
D: Psychologie D1: Menschliche Informationsverarbeitung D11: Problemlösung auf der Grundlage von *Langzeitwissen* D111: Lösung eines Inferenzproblems (Krause et al. 1989)	Kognitive Ökonomie des Prozesses zur Lösung eines Inferenzproblems auf der Basis von Langzeitwissen	Bildung von Makroelementen in Form von Teilstrukturen: auf der Basis lösungsrelevanter Klassenmerkmale, die sich aus Beziehungen zwischen den gegebenen Elementen ergeben	ausgezeichnete interne Repräsentation: hierarchische kognitive Struktur, gebildet durch die Makroelemente und gekennzeichnet durch einen geringen oder sogar minimalen Prozessaufwand (mit dazugehörigen Vergleichs-Regeln)	Lösungsprozess mit geringer (bzw. minimaler) Anzahl notwendiger kognitiver Operationen
D: Psychologie D1: Menschliche Informationsverarbeitung D11: Lösungsverhalten *Mathematisch Hochbegabter* D111: Lösung eines geometrischen Problems (Krause et al. 2003a)	Kognitive Ökonomie des Prozesses zur Lösung eines geometrischen Problems	Bildung von Makroelementen in Form von begrifflichen *und* bildhaften internen Repräsentationen lösungsrelevanter Information (Bestandteile einer Doppelrepräsentation)	ausgezeichnete interne Repräsentation in der Modalität, die den aufwandsärmeren Lösungsprozess gestattet (im Beispiel von Abb. 6 ist das eine bildhafte Repräsentation) und dazugehörige Regeln	Lösungsprozess mit kürzerer Lösungszeit als bei Normalbegabten (verbunden mit einer höheren Entropiereduktion gegenüber Normalbegabten)

2.2 Schaffung von Voraussetzungen für einfache Prozesse: ein bereichsübergreifendes Prinzip in der menschlichen Informationsverarbeitung

Unter dem Aspekt der Schaffung von Voraussetzungen für einfache Prozesse der Anforderungsbewältigung wollen wir nun von den *experimentellen* Analysen geistiger Leistungen einen Bezug herstellen zu den Analysen geistiger Leistungen aus *evolutionspsychologischer* Sicht von Friedhart Klix.

Betrachtet man historische Entwicklungen, die *Denkfortschritte* in der Menschheit betreffen, so stellt Friedhart Klix in seinen Analysen zur historischen Durchsetzungskraft von Schrift- und Zahlensystemen in seinem Buch „Die Natur des Verstandes“ fest:

> „Als allgemeine Regel schält sich heraus, daß jene kognitiven Strukturbildungen die durchsetzungskräftigeren sind, die die gleiche Anforderung mit geringerem geistigen Aufwand zu lösen vermögen.“ (Klix 1992, S. 451)

Im Rahmen dieses Beitrags betrachten wir dazu kurz die Entwicklung von Zahlsystemen. Dazu schreibt Friedhart Klix in seinem Buch „Erwachendes Denken“ (vgl. Abb. 7):

> „Ein Zahlsystem ist bestimmt durch die Bündelung (z. B. Fünfer-, Zehner-,…, -Systeme sind ausgearbeitet worden) und durch das Stellensystem in der Zahldarstellung. Beide Repräsentationsweisen sind erforderlich für die Darstellung (und kognitive Beherrschbarkeit) beliebig großer Mengen.“ (Klix 1993, S. 280)

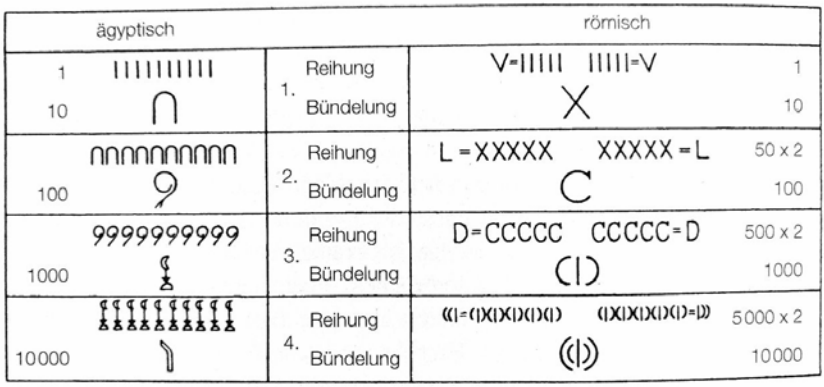


Abb. 7: Ägyptische und römische Zahldarstellung*

(Klix 1993, S. 288, Abb. 6.3)

Die Bildung von Makroelementen in Form von Teilstrukturen auf der Basis von Bündelung und Reihung führte somit zur Entwicklung von *Zahl-Repräsentationen*, die durch Bündelung und durch das Stellensystem in der Zahldarstellung bestimmt sind. Damit wurde eine *Voraussetzung für einfachere Berechnungsprozesse* geschaffen – auch bei wachsender Komplexität der Anforderung. Bei der Schaffung dieser Voraussetzung spielte als Steuerkriterium die Ökonomie des Prozesses der Anforderungsbewältigung eine grundlegende Rolle. Das spiegelt sich darin wider, dass die dadurch ermöglichten Berechnungsprozesse sich durch eine geringere Anzahl von Operationen auszeichnen als Berechnungsprozesse auf der Grundlage von Zahldarstellungen ohne die geschaffene Voraussetzung.

In Tabelle 2 sind – analog zu Tabelle 1 – die beschriebenen Aspekte, die zur Schaffung von Voraussetzungen für einfache Berechnungsprozesse dienten, in einer Übersicht dargestellt.

Stellen wir die Frage: „Was ist den anforderungsabhängig intern ausgebildeten Repräsentationen bei den untersuchten Problemen zur menschlichen Informationsverarbeitung gemeinsam?“

In den charakterisierten Untersuchungen zur menschlichen Informationsverarbeitung hat sich insgesamt gezeigt, dass sowohl *experimentelle* Analysen bei der Bewältigung unterschiedlicher kognitiver Anforderungen als auch Analysen geistiger Leistungen aus *evolutionspsychologischer* Sicht dafür sprechen, dass die *Schaffung von Voraussetzungen für einfache Prozesse* ein *Grundprinzip* in der menschlichen Informationsverarbeitung ist. Als solche Voraussetzungen werden ausgezeichnete interne Repräsentationen (begrifflich oder/und bildhaft) ausgebildet. Dabei spielt das Bewertungs- und Steuerkriterium *„kognitive Ökonomie des Lösungsprozesses“* eine entscheidende Rolle und es werden anforderungsabhängig *Makroelemente* auf der Grundlage lösungsrelevanter Information gebildet. Bei allen untersuchten Anforderungen handelte es sich dabei um die Bildung von Strukturen auf der Basis von Beziehungen zwischen Elementen und einer damit verbundenen Hervorhebung der Bedeutung vorhandener lösungsrelevanter Eigenschaften bzw. Herausbildung neuer lösungsrelevanter Eigenschaften. Das steht in Beziehung zur Forderung in Fuchs-Kittowski (2010), dass es bei Vereinfachung als Methode darum geht, wesentliche (gesetzmäßige) Zusammenhänge hervortreten lassen.

Auf diese Weise können kognitive Systeme geschaffen werden, auf deren Grundlage einfachere Lösungsprozesse möglich sind als ohne diese Systeme. So kann mit der Ausbildung ausgezeichneter interner Repräsentationen ein Stück *„Weg“* zu einfachen oder sogar zu *einfachsten Prozessen* im menschlichen Informationsverarbeitungsprozess aufgezeigt werden.

Tab. 2: Beispiel aus Analysen geistiger Leistungen aus *evolutionspsychologischer* Sicht zur Schaffung von Voraussetzungen für einfache Prozesse der Anforderungsbewältigung (empirisch belegt)

Schaffung von Voraussetzungen für einfache Prozesse	*Bewertungs- und/oder Steuer-kriterium:*	*auf dem Weg zur Schaffung von Voraussetzungen für einfache Prozesse:*	*angestrebte bzw. geschaffene Voraussetzungen für einfache Prozesse:*	*einfache Prozesse, die auf Grund der Voraussetzungen ermöglicht werden sollen bzw. ermöglicht werden:*
D: Disziplin D1: Teilgebiet/ Teilaspekt D11: Beispiel D111: Anforderung Bzw. Ziel	*Ökonomie (des Prozesses der Anforderungs-bewältigung)*	*anforderungs-abhängige Bildung von Makroelementen (auf der Basis lösungsrelevanter Information)*	*ausgezeichnete Systeme (aus Strukturen bzw. Funktionen und dazugehörigen Regeln)*	*(quantifizierbar z.B. durch eine geringe Anzahl notwendiger Operationen bzw. durch eine kurze Lösungszeit)*
D: Evolutions-psychologie D1: Historische Ent-wicklungen, die Denkfortschritte in der Menschheit betreffen D11: „Entwicklung von Zahlsystemen“ D111: erfolgreiche Be-rechnungen (in großen Mengen) (Klix 1993)	Kognitive Ökonomie von Rechen-prozessen (in großen Mengen)	Bildung von Makroelementen in Form von Teilstrukturen auf der Basis von Bündelung und Reihung	ausgezeichnete Zahl-Repräsentationen (bestimmt durch Bündelung und Stellensystem) und dazugehörige Rechenregeln	Prozesse mit geringer (oder möglicherweise minimaler?) Anzahl notwendiger Rechenoperationen (in großen Mengen)

Zu beachten ist dabei folgendes: Die Realisierung des Prinzips *„Schaffung von Voraussetzungen für einfache Prozesse“* bezieht sich immer auf ein bestimmtes Ziel bzw. auf eine bestimmte Anforderung und ist situations- und personenabhängig. Das bedeutet somit aber auch, dass dabei Fehler gemacht werden können oder dass eine Realisierung zu einem bestimmten Zeitpunkt (noch) nicht möglich war bzw. ist (z. B. situationsbedingt oder aus Mangel an Wissen). In Dörner (1989, S. 275–309) werden solche Einflussfaktoren analysiert und Möglichkeiten diskutiert, sie als Fehlerbedingungen weitestgehend auszuschalten.

Bei der Frage nach der Bedeutung eines solchen Prinzips für die Bewältigung unterschiedlicher Anforderungen geht es somit insbesondere um die

Frage nach dem *Bestreben* bzw. dem Motiv, Voraussetzungen für einfache Prozesse zu schaffen, und nicht vorrangig um die Frage, ob dieses Bestreben fehlerfrei umgesetzt wurde bzw. wird. Das schmälert jedoch keinesfalls die Bedeutung gerade solcher Fälle, in denen *empirische Belege* dafür vorliegen oder erbracht werden können, dass Voraussetzungen für einfache Prozesse geschaffen wurden. Nur auf dieser Basis können wissenschaftlich fundierte Aussagen gemacht werden.

Wir betrachten die Frage nach der Schaffung von Voraussetzungen für einfache Prozesse nun mit Bezug zur Fragestellung des Arbeitskreises „Prinzip Einfachheit". Die Fragestellung wurde in den Sitzungsberichten der Leibniz-Sozietät, Bd. 108 (2010) und Bd. 125/126 (2016) charakterisiert und aus der Sicht unterschiedlicher Fachdisziplinen diskutiert.

2.3 Bezug zur Fragestellung des Arbeitskreises „Prinzip Einfachheit"

Die allgemeine Fragestellung lautet: „Ist Einfachheit ein universelles Prinzip in der Natur – und möglicherweise auch in der Gesellschaft?"

Diese allgemeine Frage können wir nicht beantworten, denn dazu müssten alle Wissenschaftsdisziplinen betrachtet werden. In unserem Arbeitskreis können wir die Frage nach dem Prinzip Einfachheit nur für ausgewählte Disziplinen stellen.

Damit lautet die allgemeine Fragestellung bezogen auf unsere Vorgehensweise: „Ist das Prinzip Einfachheit in allen zu betrachtenden wissenschaftlichen Disziplinen nachweisbar?"

Basierend darauf lassen sich spezifische Fragestellungen ableiten (Sommerfeld et al. 2010; Hörz et al. 2016a).

In einem ersten Schwerpunkt wird nach den *Erscheinungsformen* des Prinzips „Einfachheit" in den unterschiedlichen Disziplinen gefragt.

Um zur Beantwortung dieser Frage beitragen zu können, sind sowohl die inhaltliche und formale Definition von *Einfachheitskriterien* erforderlich als auch die Suche nach empirischen Belegen in den Disziplinen.

Inhaltliche und formale Charakterisierungen bzw. Definitionen von *Einfachheitskriterien* und dazugehörigen *Maßen* wurden in unterschiedlichen Beiträgen vorgestellt und diskutiert (vgl. z. B. Schimming 2010; Dill 2010; Krause 2010; Fleischer 2016; März 2016; Ebeling 2016; Bernhardt 2016). Darauf wurde im zweiten thematischen Band (Hörz et al. 2016b) Bezug genommen. Wie aus einer Reihe von Beiträgen hervorgeht, spielt dabei das Kriterium *„Anzahl"* eine herausragende Rolle (z. B. Anzahl von Merkmalen, Variablen, Operationen). Zur Frage, ob und wenn ja, wie sich in den

unterschiedlichen Disziplinen das Prinzip Einfachheit in einfachen Strukturen, Prozessen, Funktionen oder Gesetzen widerspiegelt, die etwas über das Wesen eines (u. U. sehr komplexen) Systems aussagen, wurde in der Mehrzahl der Beiträge ein Bezug hergestellt (für prinzipielle Aussagen dazu vgl. z. B. Hörz 2010; Kolditz 2010; Hörz et al. 2016b).

Schwerpunkt *dieses* Beitrags ist jedoch nicht die Frage nach den *Erscheinungsformen* des Prinzips Einfachheit sondern die Frage nach *Voraussetzungen für einfache Prozesse* – verbunden mit der Frage danach, ob die *Schaffung solcher Voraussetzungen ein bereichs- und disziplinübergreifendes Prinzip* ist.

3 Schaffung von Voraussetzungen für einfache Prozesse: ein disziplinübergreifendes Prinzip?

In Kapitel 1 wurden Beispiele aus *experimentellen Analysen* geistiger Leistungen zur Schaffung von Voraussetzungen für einfache Prozesse der Anforderungsbewältigung beschrieben, die *experimentell belegt* worden sind. Anknüpfend daran wurde auf ein Beispiel aus Analysen geistiger Leistungen aus *evolutionspsychologischer* Sicht Bezug hingewiesen, das *empirisch belegt* ist.

Anknüpfend an diese im Rahmen der *Kognitiven Psychologie* zur menschlichen Informationsverarbeitung erzielten Ergebnisse haben wir gefragt, ob auch in *anderen Fachdisziplinen* die Schaffung von Voraussetzungen für einfache Prozesse eine wichtige Rolle spielt und wenn ja, ob es dabei disziplinübergreifende Merkmale gibt.

Ein Versuch, etwas zur Beantwortung dieser Fragen beizutragen, basiert auf dem Bezug zu einigen Beispielen aus der Literatur und einer *ersten Analyse* der Publikationen zu den Vorträgen, die in der der Plenarveranstaltung am 8. April 2010 und anschließend im Arbeitskreis „Prinzip Einfachheit“ (in den Jahren 2010 bis 2019) zu unterschiedlichen Disziplinen gehalten wurden.

Zwanzig Mitglieder aus beiden Klassen der Leibniz-Sozietät – der Klasse Natur- und Technikwissenschaften und der Klasse Sozial- und Geisteswissenschaften – sowie vier Gäste haben zur Frage nach Beziehungen zwischen ihrem Forschungsgebiet und dem Prinzip Einfachheit referiert. Unter diesem Aspekt wurden Vorträge zu den folgenden wissenschaftlichen Disziplinen gehalten und in einem interdisziplinär zusammengesetzten Kreis aus Mitgliedern und Gästen der Leibniz-Sozietät diskutiert: Philosophie, Psychologie, Biochemie, Mathematik, Kompetenzforschung, Technikphilosophie,

Literatur und Kunst, Meteorologie, Evolution, Ethik, Rechtswissenschaft, Chemie, Molekularbiologie, Astronomie, Translatologie, Pädagogik/Erziehungswissenschaft, Physik, Medizin. Fast alle Vorträge sowie die zur Thematik eingereichten Diskussionsbeiträge sind in drei thematischen Bänden zum Prinzip Einfachheit in den Sitzungsberichten der Leibniz-Sozietät publiziert, in Band 108, Band 125/126 und in diesem Band.

Konkret ging es bei dieser *ersten Analyse* der Publikationen zu unterschiedlichen Fachdisziplinen um folgendes:

Wir haben in den unterschiedlichen Disziplinen danach gefragt, ob *Voraussetzungen für einfache Prozesse angestrebt und/oder geschaffen* wurden bzw. werden.

Wenn ja, spielen dabei solche disziplinübergreifenden Merkmale eine Rolle wie sie bei den in Kapitel 1 geschilderten Experimenten zur menschlichen Informationsverarbeitung experimentell nachgewiesen werden konnten? Konkret betrifft das die Suche nach Antworten auf folgende Fragen:

- Sprechen empirische Belege und/oder fachwissenschaftliche Aussagen dafür, dass der Schaffung solcher Voraussetzungen *als Bewertungs- und/oder Steuerkriterium* die *Ökonomie des Prozesses der Anforderungsbewältigung* zu Grunde liegt?
- Ist der *Weg* zur Schaffung von Voraussetzungen für einfache Prozesse durch eine anforderungsabhängige *Bildung von Makroelementen* auf der Grundlage lösungsrelevanter Information gekennzeichnet? Wenn ja, welcher Art sind diese Makroelemente?
- Werden die angestrebten bzw. geschaffenen Voraussetzungen für einfache Prozesse auf der Basis der Makroelemente gebildet? Wenn ja, sind das *ausgezeichnete Systeme aus Strukturen bzw. Funktionen und Regeln*?
- Sind die einfachen Prozesse, die auf Grund der Voraussetzungen ermöglicht werden sollen bzw. ermöglicht werden, jeweils auf der Basis einer (bestimmten) *Anzahl quantifizierbar* – z. B. durch eine geringere Anzahl von Operationen oder Zeitabschnitten (kürzere Lösungszeit) als ohne die geschaffene Voraussetzung?

Ein Ergebnis dieser ersten Analyse unterschiedlicher Fachdisziplinen sind Beispiele, die *dafür sprechen*, dass die Schaffung von Voraussetzungen für einfache Prozesse zur Anforderungsbewältigung ein *disziplinübergreifendes* Prinzip ist und dass dieses Prinzip auch *außerhalb* der *menschlichen* Informationsverarbeitung vorkommt. Fundierte Aussagen darüber, ob diese Beispiele empirisch belegt sind, widerlegt werden können oder noch zu über-

prüfen sind, können nur von den entsprechenden Fachwissenschaftlern gemacht werden.

Mit Bezug zur Charakterisierung von Einfachheit als Wirkprinzip, Erkenntnisprinzip und Gestaltungsprinzip in Hörz (2010) wird im Folgenden eine Auswahl der Ergebnisse dieser ersten Analyse unter dem Aspekt der Schaffung von Voraussetzungen für einfache Prozesse dargestellt.

3.1 Schaffung von Voraussetzungen für einfache Prozesse: ein Wirkprinzip

Nachdem wir aus den Analysen geistiger Leistungen aus *evolutionspsychologischer* Sicht von Friedhart Klix ein Beispiel ausgewählt hatten, das belegt, dass sich Voraussetzungen für einfache Prozesse in der objektiven Realität *mit* Einbeziehung des Menschen entwickelt haben, bringen wir nun ein Beispiel dafür, dass sich Voraussetzungen für einfache Prozesse in der objektiven Realität auch *ohne* Einbeziehung des Menschen entwickelt haben.

Dazu betrachten wir aus der **Evolution** die *Adaptive Radiation* (Herausbildung spezifischer Anpassungen an vorhandene Umweltverhältnisse) und als (Muster-)Beispiel dafür die *„Darwin-Finken"* auf Galapagos (Wikipedia 2021a).

Um eine jeweils erfolgreiche Nahrungsaufnahme realisieren zu können, wurden auf der Basis ernährungsrelevanter Merkmale Makroelemente in Form von funktionellen (Teilen von) Schnäbeln gebildet. Es zeigt sich, dass mit der Entwicklung einer der jeweiligen Ernährungstechnik angepassten Schnabelstruktur der Finken (vgl. Abb. 8) eine *Voraussetzung* geschaffen wurde für einen *einfacheren Prozess der Nahrungsaufnahme* als bei einer nicht angepassten Schnabelstruktur (quantifizierbar durch eine geringere Anzahl lebenswichtiger Operationen). So können die verschiedenen Finkenarten auf einem Territorium zusammenleben, ohne dass das Futter für eine Art knapp wird.

In seinem Beitrag „Ist Evolution vom Einfachen zum Komplexen gerichtet? Über Werte und Emergenz" schreibt Werner Ebeling (2016, S. 75): „Das wichtigste neue Konzept in der Theorie von Wettbewerb und Selektion ist somit offenbar der Überlebens-Wert bzw. die Fitness im Sinne von Darwin."

Die „Darwin-Finken" sind ein Beispiel für die Schaffung von Voraussetzungen für einfache Prozesse *außerhalb* der *menschlichen* Informationsverarbeitung.

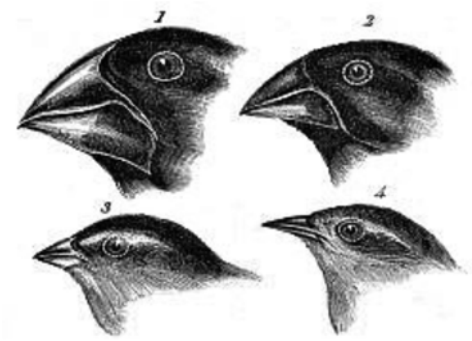


Abb. 8: Verschiedene Schnabelformen bei Darwinfinken
(Abgerufen am 16.06.2021 von https://de.wikipedia.org/wiki/Darwinfinken)

Unter dem Aspekt, dass außerhalb der menschlichen Informationsverarbeitung Voraussetzungen für einfache Prozesse geschaffen werden, sind weiterhin Untersuchungen zur *Strukturbildung von Lebewesen* im Rahmen der **molekularen Genetik** interessant, wie sie in Fritz (2019a, b) dargestellt werden. Darin wird auf die Notwendigkeit einer *Informationsverarbeitung* bereits während des Prozesses der Strukturbildung lebender Systeme hingewiesen. So schreibt Hans-Joachim Fritz in seinem Artikel „Informationsgesteuerte Synthese – eine Blockbuster-‚Erfindung' der Evolution": „Leben, so wie wir es kennen, setzt zwingend informationsgesteuerte Synthese von Makromolekülen voraus..." (Fritz 2019b, S. 167).

Ein solcher Prozess basiert auf der Fähigkeit biologischer Zellen, miteinander zu kommunizieren. Grundlage des Syntheseprozesses ist das Prinzip der differentiellen Genexpression. Dabei werden basierend auf einer *schrittweisen* Ausnutzung von Information proteinische Biokatalysatoren, d. h. aufgabenspezifisch geformte biologische Makromoleküle, erzeugt. Das ist jeweils abhängig vom Entwicklungszustand der Zelle, von Signalen aus umgebenden Zellen und von Signalen aus der Umwelt. Fritz spricht von einer „Zufütterung von Information wie bei einer numerisch gesteuerten Werkzeugmaschine" (Fritz 2019b, S. 179).

Die so aufgabenspezifisch geformten Makromoleküle bilden die Basis für ein *dynamisches System* zur *Steuerung* der Strukturbildung lebender Systeme. Das wird sukzessive gebildet aus hochselektiven und äußerst effizienten, den Prozess beschleunigenden Katalysatoren. Mit einem solchen

System wird eine Voraussetzung für *schnelle* zelluläre Stoffwechselprozesse geschaffen. Fritz begründet die Notwendigkeit einer informationsgesteuerten Strukturbildung lebender Systeme und demonstriert einen solchen Prozess am Beispiel des Darmbakteriums Escheria coli (Fritz 2019a, S. 158–162; 2019b, S. 168–182). Zum Untersuchungsobjekt schreibt er:

> „… das den menschlichen Darm besiedelnde Bakterium Escheria coli („E. coli") ist von allen Organismen überhaupt im feinsten Detail verstanden. Dadurch wird dieser bescheidene Organismus ein speziell geeignetes Objekt für die anstehende Betrachtung: die allgemeinen Schlüsse sind jedoch auf alle Lebewesen übertragbar." (Fritz 2019b, S. 168)

Die informationsgesteuerte Strukturbildung von Lebewesen ist ein weiteres Beispiel für die Schaffung von Voraussetzungen für einfache Prozesse *außerhalb* der *menschlichen* Informationsverarbeitung. Dennoch erlauben einzelne Beispiele noch keine Generalisierung. Beide Beispiele sprechen jedoch dafür, dass der Schaffung solcher Voraussetzungen die *Ökonomie des Prozesses der Anforderungsbewältigung als Bewertungs- und/oder Steuerkriterium* zu Grunde liegt. Interessant sind in diesem Zusammenhang Aussagen von Werner Ebeling (2016, S. 71–72) zur Bedeutung des Wertes:

> „Folgen wir Eigen (1971), so kommt es bei der frühen Evolution von Biosequenzen nicht auf formale Eigenschaften der Sequenzen, sondern auf den Wert der Information im Kontext der Zelle an. Damit kommt der Begriff des Wertes als emergente Eigenschaft von Sequenz und zellulärer Umgebung ins Spiel (…). Auch in den Lebenswissenschaften gehören Werte zu den zentralen Konzepten, insbesondere in der Darwinschen Theorie der Evolution, in der ‚Fitness' und Selektionswerte die zentrale Rolle spielen wie auch in der Eigenschen Theorie der Evolution von Biomolekülen (Eigen 1971; Ebeling/Feistel 1982, 1986, 1994; Feistel 1990; Feistel/Ebeling 1990, 2011)."

Mit Bezug zu den von Herbert Hörz charakterisierten Wirkprinzipien I und II (Hörz 2010) sprechen die bisher betrachteten Beispiele dafür, dass im Wirkprinzip I (Einfachheit im Sinne effektiver Strukturen und Prozesse in der Natur) und in der informationellen Komponente des Wirkprinzips II (Einfachheit im Sinne effektiver Strukturen und Prozesse in der menschlichen Informationsverarbeitung) analoge Prinzipien zur Schaffung von Voraussetzungen für einfache Prozesse zur Anforderungsbewältigung eine Rolle spielen.

Im Anhang 1 sind wesentliche Aspekte der charakterisierten Beispiele zur Schaffung von Voraussetzungen für einfache Prozesse als Wirkprinzip noch einmal in einer Übersicht zusammenfassend dargestellt.

3.2 *Schaffung von Voraussetzungen für einfache Prozesse: ein Erkenntnisprinzip*

Die **Philosophie** spielt eine grundlegende Rolle sowohl bei der Erforschung von Erkenntnisprozessen als auch beim Bestreben, Voraussetzungen für effektive Erkenntnisprozesse zu definieren und anforderungsabhängig zu schaffen. Dabei kommt der Sprache eine besondere Bedeutung zu (vgl. Hörz 2010; Schimming in diesem Band). Mit Bezug zum Prinzip Einfachheit betont Herbert Hörz in seinem Beitrag „Philosophischer Reduktionismus oder wissenschaftlich berechtigte Reduktionen? Zu den erkenntnistheoretischen Grundlagen des Prinzips Einfachheit" die Bedeutung der Sprache als Mittel zur gedanklichen Repräsentation, aber auch als Kommunikationsmittel sowie als Handlungsorientierung.

Im Rahmen dieses Beitrags betrachten wir im Folgenden kurz drei Beispiele aus der Philosophie für das Bestreben, zielabhängig Voraussetzungen für möglichst einfache Erkenntnisprozesse zu schaffen – in dem Sinne, dass in diesen Prozessen eine geringere Anzahl von Operationen bis zur Zielerreichung erforderlich ist als ohne die jeweils geschaffene Voraussetzung.

Ein Beispiel ist das *Dialektische Denken.* Dabei wird angestrebt, mit ausgezeichneten dialektischen Denkstrukturen – basierend auf der Bildung von Makroelementen in Form von These und Antithese – Voraussetzungen zu schaffen für Prozesse mit möglichst wenig Umwegen oder sogar Misserfolgen bis zum Erkennen von inneren Gegensätzen und Aufdecken von Alternativen.

Ein weiteres Beispiel betrifft das *2+1-Prinzip* zur Erforschung komplexer Systeme von Herbert Hörz. Es beinhaltet eine Bildung von (mindestens) einem Makroelement der Art „System und Elemente" oder „System und Umwelt" (mit jeweils zwei Integrationsebenen) sowie die Bildung eines Makroelementes in Form einer Hintergrundtheorie (Hörz 2010, S. 27–34). Eine zielabhängige Kombination aus einem solchen Makroelement mit zwei Integrationsebenen und der entsprechenden Hintergrundtheorie dient der Schaffung von Voraussetzungen für Prozesse zur Erforschung des Wesens komplexer Systeme mit möglichst wenig Misserfolgen bzw. Umwegen – und auf diese Weise mit einer möglichst geringen Anzahl von notwendigen Operationen bis zur Zielerreichung (quantifizierbar z. B. in der Anzahl von Zeiteinheiten).

Ein drittes Beispiel betrifft das *Mengersche Prisma* (Eichhorn 2010, S. 127–130). Dabei werden Makroelemente durch Aufsplittung einer Menge von Bedeutungen eines Begriffs gebildet (Bedeutungen, die in einem Erklä-

rungs- oder Argumentationsverbund auftreten, aber untereinander ganz unterschiedlichen Inhalts sind, z. B. Bedeutungen des Begriffs „Klasse“). Mit der Auswahl einer lösungsrelevanten Bedeutungsstruktur des entsprechenden Begriffes kann eine Voraussetzung geschaffen werden für Prozesse mit möglichst geringer Anzahl von Operationen zur Erzeugung wissenschaftlich berechtigter Vereinfachungen (Hörz 2010) – z. B. durch anschließende Anwendung von Ockhams Rasiermesser (Eichhorn 2010).

Das Mengersche Prisma stellt wiederum ein Beispiel dafür dar, dass Strukturen, die als Voraussetzungen für einfache Erkenntnisprozesse gebildet werden, durchaus selbst mehr oder weniger umfangreich sein können. Im Vordergrund steht dabei nicht die Ausbildung möglichst einfacher Strukturen, sondern entscheidend ist die Ausbildung solcher Strukturen, die möglichst *einfache Prozesse ermöglichen*.

In seinem Diskussionsbeitrag „Anmerkungen zur Einfachheit aus der Perspektive eines Linguisten“ weist Wolfdietrich Hartung (2010, S. 116–117) darauf hin, dass für werdende wie heranwachsende Menschen die Sprache der wichtigste Weg ist, sich einen Zugang zu der Welt zu schaffen, in der sie leben. Dazu betont er: „Und das ist, bei aller Beschränktheit, kein reduzierender, sondern ein unaufhörlich erweiternder Prozess. Der dem Denken fortan sprachlich zur Verfügung stehende Teil der Welt wird immer größer.“

John Erpenbeck charakterisiert in seinem Artikel „Vereinfachung durch Komplexität. Persönlichkeitseigenschaften und Kompetenzen“ im Rahmen der **Kompetenzforschung** einen komplexen Modellansatz zur Kompetenzmessung (Erpenbeck 2010). Er legt dabei das Motto zugrunde „Durch komplexe Erfassung zu einem einfachen Verständnis“. Der entwickelte komplexe Modellansatz stellt eine Voraussetzung für die Vereinfachung des Erkennens von Führungskompetenzen dar.

Auf dem Weg zur Schaffung einer solchen Voraussetzung werden Makroelemente aus Ratingurteilen unterschiedlicher Personen gebildet – jeweils über eine spezifische Kompetenz einer bestimmten Person (für Kompetenzen aus einer gegebenen Menge). Die Ratings basieren auf einem Schluss von der Performanz auf Fähigkeiten, die auch künftig ein erfolgreiches, selbstorganisiertes Handeln der Person in offenen Problemsituationen ermöglichen. Ein ausgezeichnetes Kompetenzmodell, das auf der Menge der gebildeten Makroelemente basiert, bildet dann eine Voraussetzung für Prozesse, die nur wenige (oder vielleicht sogar gar keine) Fehleinschätzungen bei der Erkennung von Führungskompetenzen beinhalten, d. h. für Prozesse

mit einer relativ geringen *Anzahl* von (notwendigen) Operationen bis zur Erkennung von Führungspersönlichkeiten.

Das ist wiederum ein Beispiel für den Fall, dass (in einer Art Vorbereitung) in die Schaffung von Voraussetzungen durchaus viel Arbeit investiert wird, wenn dadurch der eigentliche Prozess zur Zielerreichung vereinfacht werden kann.

Die **Mathematik** spielt eine wichtige Rolle zur Schaffung von Voraussetzungen für möglichst einfache Prozesse, um das Wesen von (strukturellen und funktionalen) Systemen zu erkennen.

In ihrem Artikel „Gewisse Einfachheit auf den komplizierten Wegen zur höchsten Gewissheit" schreibt Roswitha März:

> „Mathematisierung eines natürlichen Phänomens schließt ein, dass es gelingt, wesentliche Charakteristika formal mit mathematischen Mitteln zu beschreiben und aus dieser Beschreibung neue Erkenntnisse zum objektiven Vorgang abzuleiten." (März 2016, S. 58).

Das betrifft sowohl die Formalisierung von Gesetzmäßigkeiten in Natur und Gesellschaft als auch die Erforschung mathematischer Zusammenhänge. Werden mathematische Methoden zielgerichtet und situationsabhängig zur mathematischen Modellierung von Strukturen und Prozessen eingesetzt, so können somit Voraussetzungen dafür geschaffen werden, dass Prozesse vereinfacht werden, die zur Erkenntnis wesentlicher Zusammenhänge führen.

Für unsere Betrachtung wählen wir als ein Beispiel für die Approximation eines mathematischen Gegenstandes durch einen anderen die Interpolation von Funktionen aus (März 2016, S. 65): „Gegeben sind die Stützstellen $t_1, \ldots, t_n$ und die berechneten oder gemessenen Werte $y_1, \ldots, y_n$. Gesucht ist eine Funktion f recht einfacher Funktionen, die an den Stützstellen die vorgegebenen Werte annimmt, das heißt, $f(t_1) = y_1, \ldots, f(t_n) = y_n$." Es besteht die Forderung nach einer guten Anpassung an den (vermuteten) echten Funktionsverlauf – mit dem Ziel, wesentliche formale Charakteristika des (vermuteten) echten Funktionsverlaufs zu erkennen.

Roswitha März weist auf die Möglichkeit der Interpolation sowohl durch die Lagrange-Formel mit den Lagrange-Polynomen hin als auch auf die Möglichkeit der Interpolation auf der Basis der kubischen Spline-Funktion. Zur Lagrange-Formel schreibt sie: „Im Allgemeinen hat das Interpolationspolynom sehr unangenehme Eigenschaften: Es fluktuiert erheblich und liefert auch für glatte Funktionen nicht einmal punktweise konvergente Approximationen." Zur Spline-Funktion betont sie: „Eine weniger elegante, kom-

plizierter zu konstruierende, aber am Ende wesentlich bessere Interpolationsfunktion ist etwa seit 1950 im Gebrauch, die natürliche interpolierende kubische Spline-Funktion“ (März 2011, S. 8).

Zur Entwicklung dieser Spline-Funktion werden Makroelemente gebildet in Form von Segmenten von Polynomen höchstens dritten Grades auf den n Teilintervallen, die an den Stützstellen zweimal stetig differenzierbar zusammengefügt sind. Das führt zur natürlichen interpolierenden kubischen Spline-Interpolierenden. Sie ist keine geschlossene Formel, sondern eine zusammengesetzte Funktion, zu berechnen aus einem Gleichungssystem, das aus den Makroelementen resultiert. Mit dieser Interpolationsfunktion ist eine Voraussetzung geschaffen worden für Prozesse mit relativ geringer *Anzahl* von Operationen bis zur Erkennung wesentlicher formaler Charakteristika des (vermuteten) *echten* Funktionsverlaufs – auch bei wachsender Anzahl von Stützstellen, ohne Fluktuationen, wie sie z. B. bei Lagrange-Interpolationspolynomen auftreten können.

Zu beachten ist jedoch, dass die Schaffung von Voraussetzungen für einfache Erkennungsprozesse ziel- und situationsabhängig ist. So ist für entsprechende spezielle Fälle zur Erkennung des (vermuteten) echten Funktionsverlaufs der Lösungsansatz auf der Grundlage der Lagrange-Formel mit den Lagrange-Polynomen durchaus geeignet (vgl. März 2016, S. 66).

Die Interpolation auf der Basis der kubischen Spline-Funktion ist ebenfalls ein Beispiel dafür, dass in einer Art Vorverarbeitung ein Mehraufwand in Kauf genommen wird, wenn dadurch eine *Voraussetzung für einen einfacheren Prozess* zur Erreichung des Ziels (hier der Erkennung des (vermuteten) echten Funktionsverlaufs) geschaffen werden kann.

In der Geschichte der **Physik** spielt die Schaffung von Voraussetzungen für die Vereinfachung von Prozessen zur Entdeckung physikalischer Gesetzmäßigkeiten eine wichtige Rolle.

Betrachten wir dazu Vereinigungen bestehender Theorien zu einer neuen Theorie, wie sie Alexander Unzicker unter dem Aspekt einer damit einhergehenden Verringerung von Naturkonstanten charakterisiert (Unzicker 2015; Unzicker in diesem Band). In seinem Artikel „Naturkonstanten, wissenschaftliche Revolutionen und Einfachheit in der **Physik**“ schreibt er:

> „In vielen Fällen können wissenschaftliche Revolutionen als eine Vereinigung bestehender Theorien angesehen werden. Dabei haben Visionäre oft einen gemeinsamen Ursprung von Phänomenen vermutet, von denen man vorher glaubte, sie stünden in keinem Zusammenhang. Solche Vereinigungen führen im Übrigen regelmäßig zu einer Eliminierung von Konstanten.“ (Unzicker in diesem Band)

Mit einer solchen Vereinigung kann in der Regel eine Voraussetzung geschaffen werden für einen einfacheren Prozess der Beschreibung und Erkenntnis von physikalischen Gesetzmäßigkeiten. Auf dem Weg zur Schaffung einer solchen Voraussetzung wird (z. B. zur Erklärung beobachteter Phänomene) nach Beziehungen zwischen Teilgebieten der Physik gesucht (z. B. zwischen Elektrizität und Magnetismus). Wird dabei eine Verbindung zwischen Naturkonstanten entdeckt, so stellt das eine Grundlage dar für die Bildung eines Makroelementes als Funktion einer Naturkonstanten von einer oder mehreren anderen Naturkonstanten.

Ein ausgezeichnetes System aus funktionalen Abhängigkeiten zwischen Naturkonstanten – gebildet aus einem oder mehreren Makroelementen – führt zur Verringerung der *Anzahl* von Naturkonstanten und stellt damit eine Voraussetzung dar für Prozesse *mit* einer *geringeren Anzahl von Operationen* zur Beschreibung und Erkenntnis physikalischer Gesetzmäßigkeiten als ohne die geschaffene Voraussetzung.

In seinem Beitrag „Einfachheit in der **Chemie**? – „Lasst, die ihr eintretet, alle Hoffnung fahren!“ – Oder doch nicht ganz?“ schreibt Dietmar Linke u. a.:

> „Die Chemie ist insofern ‚einfach’, als es mit Motivation und Ausdauer möglich ist, ihre wesentlichen Grundlagen und Zusammenhänge zu erkennen und anzuwenden. Das betrifft zum Beispiel
>
> – als Einstieg in die stoffliche Vielfalt der Welt das Periodensystem der Elemente mit den implizit enthaltenen Eigenschafts-Variationen,
> – ihre Nomenklatur, besonders bei nicht allzu komplizierten Verbindungen,
> – ihre Neigung, durch geeignete Modelle die Strukturen und Symmetriemerkmale von Molekülen und Kristallgittern möglichst anschaulich wiederzugeben, auch Mess-Ergebnisse zu Eigenschaftsänderungen, Reaktionsverläufen möglichst übersichtlich graphisch darzustellen.“ (Linke 2016, S. 143)

Auf den dritten Punkt soll im Folgenden kurz im Rahmen unserer Fragestellung Bezug genommen werden.

Bei der Schaffung von Voraussetzungen für die Ermittlung der Strukturen der Stoffe ist sowohl die Entwicklung von Makroelementen in Form von Messdaten von Bedeutung als auch in Form von bildhaft-anschaulichen Darstellungen – oft auch in Verbindung mit Computerprogrammen, die am Bildschirm Molekülstrukturen und Kristallgitter in beliebigen Richtungen zeigen.

Auf der Basis der kombinierten Nutzung solcher Makroelemente könnten ausgezeichnete Systeme gebildet werden, die gute Voraussetzungen für möglichst einfache Erkenntnisprozesse darstellen. Einfach in dem Sinne, dass zur Ermittlung der oft komplizierten Strukturen der Stoffe nur Prozesse

mit einer geringeren Anzahl von Operationen erforderlich sind als ohne die jeweils geschaffene Voraussetzung.

In seinem Beitrag „‚Nicht so exakt wie möglich, sondern so genau wie nötig!' Das Einfachheitsprinzip in den Technikwissenschaften" macht Gerhard Banse folgende Aussage zur *Systemanalyse* in den **Technikwissenschaften** mit Bezug zu den Naturwissenschaften:

> „Eine wesentliche Differenz besteht indes darin, dass sich die Naturwissenschaften (theoretisch, aber auch praktisch) ideale Bedingungen ‚schaffen' (‚idealer Körper', ‚ideale Temperatur', ‚idealer Kreisprozess'), während die Technikwissenschaften von realen Situationen und Gegebenheiten ausgehen müssen." (Banse 2010, S. 98)

Um in Technikwissenschaften überhaupt geeignete Voraussetzungen für erfolgreiche Erkenntnis- oder Gestaltungsprozesse schaffen zu können, sind in der Regel bereichsübergreifende Vereinfachungen in einer Vorbereitungsphase sehr hilfreich. Bereits dafür ist das oben genannte Prinzip „Nicht so exakt wie möglich, sondern so genau wie nötig!" eine wichtige Grundlage.

Dazu schreibt Gerhard Banse weiter:

> „Das (…) erkennende wie gestaltende Handeln ist vor allem aus Gründen der Übersichtlichkeit, Darstellbarkeit, Berechenbarkeit, (technischen) Durchführ- und Machbarkeit, Beherrsch- und Nutzbarkeit an ‚Einfachheit' in unterschiedlicher Form (Komplexitätsreduktion, Vereinfachung, Idealisierung, Isolierung, …) gebunden. Ein gutes Beispiel dafür ist die sogenannte ‚Neun-Felder-Matrix' der Allgemeinen Technologie, die die Vielfalt bzw. Vielzahl technischer Sachsysteme und Abläufe auf eine ‚Mindestzahl' reduziert hat." (Banse 2010, S. 99)

Banse weist auf zwei Varianten dieser „Neun-Felder-Matrix" der Allgemeinen Technologie hin (Wolffgramm 1978 bzw. Ropohl 1979, zitiert in Banse 2010, S. 99). Die Matrizen beruhen auf der Bildung lösungsrelevanter Makroelemente in Form von Kombinationen aus „Art des Arbeitsgegenstandes" und „Art der Veränderung" (nach Wolfgramm) bzw. in Form von Kombinationen aus „Output" und „Funktion" (nach Ropohl).

Beide Neun-Felder-Matrizen der Allgemeinen Technologie wurden unter dem Gesichtspunkt entwickelt, dass die daran anknüpfenden Prozesse zur Erkenntnis (bzw. zur Gestaltung) technischer Gesetzmäßigkeiten effektiv sind. Für konkrete Anforderungen wird damit angestrebt, Voraussetzungen zu schaffen für Prozesse, in denen für eine erfolgreiche Systemanalyse (bzw. Systemsynthese) möglichst eine nicht allzu große Anzahl von Prozessschritten erforderlich ist.

In der **Meteorologie** ist die Schaffung von Voraussetzungen für möglichst einfache Prozesse zum Erkennen des anthropogenen Anteils des Klimawandels von großer Bedeutung.

So schreibt Karl-Heinz Bernhardt in seinem Artikel „Komplexität und Einfachheit im Klimasystem der Erde“:

> „Auf der Suche nach weiteren Elementen der Einfachheit im Klimasystem und bei dem Versuch der Aufstellung von Szenarien des künftigen Klimawandels oder womöglich sogar der Einflussnahme auf die weitere Klimaentwicklung bleibt schließlich noch die Schaffung von Voraussetzungen für Einfachheit durch die Definition geeigneter abgeleiteter, nicht notwendig selbst einfacher Parameter (…) übrig. Solche Kenngrößen des globalen Klimawandels sind der Strahlungsantrieb (radiative forcing) und die Klimasensitivität (climate sensitivity).“ (Bernhardt 2016, S. 43)

Ein ausgezeichnetes System aus Funktionen natürlicher und anthropogener Einflussfaktoren auf den Klimawandel könnte so eine Voraussetzung darstellen für Prozesse mit möglichst geringer Anzahl von Operationen zur Erkennung des anthropogenen Anteils des zukünftigen Klimawandels. Auf dem Weg zur Schaffung solcher Voraussetzungen spielt die Bildung von Makroelementen durch Definition von Funktionen eine Rolle, die geeignete Kenngrößen des globalen Klimawandels darstellen (wie die oben zitierten Beispiele „Strahlungsantrieb“ und „Klimasensitivität“) – auch als Basis für eine mögliche Einflussnahme auf die Klimaentwicklung im Erdsystem.

Stellen wir nun den Bezug zur Geschichte der **Kosmologie** her, speziell zum Bestreben, Voraussetzungen für möglichst einfache Prozesse der Vorhersage künftiger Planetenpositionen zu schaffen.

Ein Beispiel betrifft die antike Epizykeltheorie der Planetenbewegung im geozentrischen Modell von Ptolemäus. Die Entwicklung dieses Modells basiert auf Makroelementen der folgenden Art:

- „Kreisbahndogma“: alle Bewegungen von Himmelskörpern sind auf gleichförmig durchlaufene reine Kreisbewegungen zurückzuführen,
- „Epizykel“: Kreisbahnen von Himmelskörpern, deren Mittelpunkte ebenfalls gleichförmig auf einem kreisförmigen Deferenten (Trägerkreis) umlaufen.

Von Ptolemäus wurde zusätzlich ein sogenannter „Ausgleichspunkt“ eingeführt, wodurch er die Erde aus dem geometrischen Zentrum der Welt herausgenommen hatte (vgl. Herrmann 2016, S. 177).

Im Rahmen der *damaligen* (!) Beobachtungsgenauigkeit wurde mit diesem Modell eine Voraussetzung geschaffen für Prozesse mit einer geringeren Anzahl von Operationen für eine *zutreffende* Vorhersage über künftige Planetenpositionen als ohne die geschaffene Voraussetzung.

Mit Blick auf die Geschichte der Kosmologie wird hier jedoch besonders die Situationsabhängigkeit der Schaffung von Voraussetzungen für einfache Prozesse deutlich: Mit wachsender Genauigkeit der Beobachtungen wurden die Vorhersagen auf der Basis dieses Modells unzuverlässiger. Dazu schreibt Dieter B. Herrmann in seinem Beitrag „Sind die Standardmodelle der Kosmologie und Elementarteilchenphysik falsch, weil sie zu kompliziert sind? Anmerkungen aus wissenschaftshistorischer Sicht“:

> „Die inzwischen vergangenen langen Zeiträume und die verbesserten und genaueren Beobachtungen ließen vielmehr in der Renaissance keine hinreichende Übereinstimmung mit den Ptolemaiosschen Prognosen mehr erkennen.“ (Herrmann 2016, S. 177)
>
> „Soweit handelt es sich durchaus um den bekannten Weg der Wissenschaft, deren Modelle immer nur bestimmte Aspekte der Realität unter bestimmten Bedingungen widerspiegeln und in einem ständigen Prozess von Experimenten, Theorien und Meinungsstreit immer weiter vervollkommnet werden müssen.“ (Ebd., S. 173)

Erst mit dem heliozentrischen Weltbild von Kopernikus in Verbindung mit den Keplerschen Gesetzen bekam die Vorhersage eine neue Qualität. Damit wurde eine wesentliche Voraussetzung dafür geschaffen, dass die Prozesse für eine *genaue* Vorhersage über künftige Planetenpositionen einfacher wurden.

Im Anhang 2 sind wesentliche Aspekte zu den charakterisierten Beispielen zur Schaffung von Voraussetzungen für einfache Prozesse als Erkenntnisprinzip noch einmal in einer Übersicht zusammenfassend dargestellt.

3.3 Schaffung von Voraussetzungen für einfache Prozesse: ein Gestaltungsprinzip

Wie für Erkenntnisprozesse hat die **Philosophie** auch für Gestaltungsprozesse eine besondere Bedeutung – sowohl bei ihrer Erforschung als auch beim Bestreben, Voraussetzungen für effektive Gestaltungsprozesse zu definieren und anforderungsabhängig zu schaffen. Dabei spielt die Sprache als Mittel der Kommunikation sowie als Handlungsorientierung eine besondere Rolle (Hörz 2010).

Ein diesbezügliches Beispiel für die Schaffung von Voraussetzungen für eine effektive Kommunikation ist das *„Prinzip des geringsten Aufwandes"* nach *George K. Zipf* (vgl. Hörz 2010), das als Steuerprinzip zu Grunde liegt. Auf dem Weg zur Schaffung solcher Voraussetzungen werden durch Kürzung von häufig verwendeten Wörtern in ihrer Lautsubstanz Makroelemente in Form von Klassen häufig und selten verwendeter Wörter gebildet. Ein System aus sprachlichen Teilstrukturen, basierend auf solchen Makroelementen, stellt dann eine Voraussetzung dar für Kommunikationsprozesse mit einer geringeren Anzahl von Operationen als ohne diese Voraussetzung – quantifizierbar auf der Basis der Anzahl der Laute, die für das Verständnis erforderlich sind. Es wäre interessant zu prüfen, ob die auf der Basis semantischer Relationen entwickelten Kommandosprachen in der Arbeitspsychologie mit diesem Prinzip kompatibel sind.

Ein anderes Beispiel betrifft die Sprache als Mittel der *Kommunikation mit einem „Gegner".* Dabei geht es um Rechthaberei, mit dem Ziel, unbedachte Äußerungen des Gegners zu erwirken (Hinweis auf Schopenhauer in Hörz 2010, S. 12). Auf dem Weg zur Schaffung von Voraussetzungen dafür werden Makroelemente gebildet, indem gezielte sprachliche Erweiterungen in den Kommunikationsprozess eingefügt werden, die inhaltlich gar nicht zur Debatte standen.

Ein System, basierend auf solchen Makroelementen aus spezifischen sprachlichen Teilstrukturen, die den Gegner reizen, bis er Unbedachtes sagt, stellt dann eine Voraussetzung dafür dar, dass für Prozesse der Kommunikation bis zu dem Zeitpunkt, an dem der Gegner aufgibt, eine geringere Anzahl von Operationen erforderlich ist ohne diese Voraussetzung – quantifizierbar z. B. auf der Basis der Anzahl von Zeiteinheiten.

In ihrem Beitrag „Ist Feminismus Reduktionismus?" schreibt Helga E. Hörz: „Bei der Ausarbeitung von UNO-Dokumenten war Einfachheit als Wirk-, Erkenntnis- und Gestaltungsprinzip insofern zu erkennen, als sonst das angestrebte Ziel nicht realisierbar gewesen wäre." (Hörz, H. E. 2016, S. 89)

Ein bedeutsames Beispiel aus der **Ethik** betrifft die *UNO-Konvention* „Über die Beseitigung aller Formen der Diskriminierung der Frau", an deren Ausarbeitung Helga E. Hörz aktiv beteiligt war. Diese UNO-Konvention stellt eine wesentliche Grundlage für die Ausgestaltung der Gleichberechtigung der Frau in unterschiedlichen Ländern dar.

Das Anliegen der UNO-Konvention besteht darin, Voraussetzungen dafür zu schaffen, dass die Ausgestaltung der Gleichberechtigung unter den

jeweiligen konkreten Bedingungen gelingt und der Prozess dahin durch möglichst wenig Misserfolge gekennzeichnet ist.

Auf dem Weg zur Schaffung solcher Voraussetzungen wurden aus relevanten Begriffen wie „Diskriminierung der Frau" und damit zusammenhängenden Beziehungen und Aktionen auf der Basis der Abstraktion von den lokalen und regionalen Bedingungen Makroelemente (Teilstrukturen) gebildet. Aus solchen Makroelementen wurde die UNO-Konvention als eine Rahmenstruktur zur übergreifenden Orientierung für die Umsetzung in nationales Recht geschaffen. Sie dient als eine Voraussetzung dafür, dass Prozesse zur Ausgestaltung der Gleichberechtigung der Frau unter den jeweiligen konkreten Bedingungen schneller zum Erfolg führen als ohne diese Voraussetzung.

Ein weiteres Beispiel aus der Ethik betrifft das *„Gender-Mainstreaming"* als Rahmenstruktur zur Gesetzesgestaltung (Hörz, H. E. 2016, S. 93). Damit sollen Grundlagen dafür geschaffen werden, dass eine Ungleichbehandlung bereits während des Prozesses der Gestaltung von Gesetzen verhindert wird. Als ein Bewertungs- und Steuerkriterium spielt somit die Ökonomie des Prozesses zur Gestaltung von Gesetzen unter Einbeziehung einer Geschlechterperspektive eine Rolle. Auf dem Weg zur Entwicklung einer solchen Rahmenstruktur als Voraussetzung für einen effektiven Prozess werden Makroelemente in Form von Teilstrukturen gebildet, die auf dem Menschen als biosoziale Einheit basieren.

Damit soll das *„Gender-Mainstreaming"* als eine Voraussetzung dafür dienen, dass Prozesse zur Gestaltung von Gesetzen ohne Ungleichbehandlung möglichst durch eine geringere Anzahl von Misserfolgen gekennzeichnet sind als ohne diese Voraussetzung.

In den **Kunst- und Literaturwissenschaften** spielen die Sprache und die bildhafte Darstellung als *Mittel der Kommunikation zwischen Künstler und Rezipienten* eine entscheidende Rolle. Betrachten wir hier als intendierten Rezipienten die aufstrebende bürgerliche Gesellschaft, ein Beispiel, das von Hans-Otto Dill in seinem Beitrag „Einfachheit vs. Komplexität in Literatur, Kunst und Wissenschaft" charakterisiert wird (Dill 2010, S. 115).

Auf dem Weg zur Schaffung von Voraussetzungen für eine diesbezügliche effektive Kommunikation werden Makroelemente in Form sprachlicher und bildhafter Teilstrukturen gebildet, die auf bürgerliche Belehrung, Aufklärung, Nützlichkeit und Sparsamkeit orientiert sind. Auf der Basis solcher Makroelemente wird eine Rahmenstruktur zum Verstehen von Kunstwerken geschaffen, die auf Methoden der Aufklärung und Klassik als literarisch-künstlerischer Ausdruck der aufstrebenden bürgerlichen Gesellschaft basiert.

Die auf diese Art und Weise entwickelte Rahmenstruktur kann als Voraussetzung dafür dienen, dass in dem Prozess bis zu dem Zeitpunkt des Verstehens des Kunstwerkes durch den Rezipienten eine geringere Anzahl von Operationen erforderlich ist als ohne diese Voraussetzung (quantifizierbar z. B. durch eine geringere Anzahl von Misserfolgen und/oder durch eine kürzere Zeit des Verstehensprozesses).

Wir wenden uns nun einem aktuellen Teilgebiet der **Translatologie** zu, der *mediativen interkulturellen Kommunikation*.

In ihrem Beitrag „Das Sensitivitätsmodell Prof. Vester® – ein einfaches Programm zur Lösung komplexer Probleme (mit Anwendungsbeispielen aus der Translatologie)“ charakterisieren Heidemarie Salevsky und Ina Müller die *Erzeugung brauchbarer Abstracts* mit Hilfe des „Sensitivitätsmodells Prof. Vester®“ (Salevsky/Müller 2016, S. 187–208).

Ein wesentliches Ziel besteht dabei darin, Abstracts zu erzeugen, die robust sind gegenüber Störungen und gekennzeichnet durch Vermeidung von Strategiefehlern. Dafür wurde eine Rahmenstruktur zur Gestaltung von Übersetzungsprozessen entwickelt, die auf der Aufdeckung der Dynamik des Prozesses mit Hilfe des „Sensitivitätsmodells Prof. Vester®“ basiert (Vester 1999, 2000, 2013, zitiert in Salevsky/Müller 2016). Auf dem Weg dahin spielt die Bildung von Makroelementen in Form funktioneller Teilstrukturen eine Rolle, die auf der Ermittlung wesentlicher Einflussparameter im Übersetzungsprozess und auf experimentell nachgewiesenen Wechselwirkungen zwischen den Parametern basieren.

Die auf diese Art und Weise entwickelte Rahmenstruktur stellt eine Voraussetzung dafür dar, dass Prozesse zur Erzeugung *brauchbarer* Abstracts durch eine geringere Anzahl von Misserfolgen gekennzeichnet sind als ohne diese Voraussetzung.

Sowohl die Untersuchung von Lehr- und Lernprozessen als auch ihre Gestaltung sind Gegenstand der **Pädagogik**. Dabei ist das Bestreben, Voraussetzungen für effektive Lehr-Lern-Prozesse zu erforschen und anforderungsabhängig zu schaffen, von grundlegender Bedeutung. In Prüß (in diesem Band) werden dazu Modellansätze sowie Analysen und Ergebnisse dargestellt.

Einen Schwerpunkt zur Schaffung solcher Voraussetzungen bildet die Erarbeitung und Anwendung des von Werner Naumann und Franz Prüß entwickelten *„Allgemeinen Pädagogischen Funktionsmodells“* der Erziehung, das den Systemgesetzen von Lehr-Lern-Prozessen entspricht (Naumann

2017, 2019; Prüß in diesem Band). Auf dem Weg zur Entwicklung dieses Modells wurden und werden Gesetzmäßigkeiten von Lehr-Lern-Prozessen erforscht und basierend darauf Makroelemente in Form von Prinzipienkategorien zur Gestaltung von Lehr-Lern-Prozessen gebildet.

Dazu schreibt Franz Prüß in seinem Artikel „Einfachheit in der Pädagogik, insbesondere in der Didaktik“:

> „Die bisher gewonnenen wissenschaftlichen Erkenntnisse aus dem didaktischen Systemzusammenhang und der Analyse der gesetzmäßigen Beziehungen ermöglichen uns die Begründung verschiedener Prinzipienkategorien und die Erarbeitung eines Prinzipiensystems… Die Prinzipienkategorien bilden eine Ordnung, die sich auf die Systemgesetze schulischer Lernprozesse (siehe Gesellschaft – Bildung; Lehrende – Lernende usw.) bezieht und eine effektive und effiziente Gestaltung von Bildungs- und Erziehungsprozessen möglich macht.“ (Prüß in diesem Band)

In seinem Beitrag „Konzeptionelle Überlegungen für eine Allgemeine Erziehungswissenschaft unter besonderer Berücksichtigung der Prinzipien Einfachheit und Transdisziplinarität“ schreibt Werner Naumann:

> „Stellen wir den Bezug zu den Voraussetzungen für Einfachheit her sowie zur Bedeutung der (oftmals nicht einfachen) Schaffung solcher Voraussetzungen (…), so erweisen sich Entwicklung und Anwendung des allgemeinen Funktionsmodells der Erziehung (…), das den Systemgesetzen von Lehr-Lern-Prozessen entspricht, als Grundvoraussetzungen dafür, dass der eigentliche Prozess (hier ein erfolgreicher Lehr-Lern-Prozess) möglichst einfach wird. ‚Einfach’ ist dabei definierbar im Sinne eines geringen (ziel-, situations- und personenbezogenen) Aufwandes in einer bestimmten Zeitspanne – quantifizierbar durch eine geringe Anzahl von Misserfolgen und dadurch u. U. erforderlichen Wiederholungen.“ (Naumann 2017, S. 24)

Dazu betont Franz Prüß (in diesem Band) weiter:

> „Nach Auswertung vielfältiger wissenschaftlicher Erkenntnisse und der Analyse existierender didaktischer Modelle wird eine strukturelle und funktionale Betrachtung des pädagogischen Prozesses sowie eine adäquate Abbildung des Prozessgeschehens als Gesamtmodell vorgenommen. Dadurch wird die Prozessgestaltung ‚einfach’, d. h. mit ziemlicher Sicherheit werden durch begrenzte Operationsfolgen in bestimmten Zeiträumen angestrebte Resultate sichtbar, Misserfolge minimiert oder fast ausgeschlossen und sonst notwendige Wiederholungen vermieden.“

Der Weg zu einem solchen wissenschaftlich fundierten Modell ist aufwändig und nicht einfach. Das ist wiederum ein Beispiel dafür, dass durchaus

viel Arbeit in eine Vorbereitungsphase investiert wird (bzw. investiert werden muss), wenn dadurch Voraussetzungen dafür geschaffen werden können, dass der eigentliche Prozess zur Zielerreichung vereinfacht werden kann.

Das gilt auch für die **Medizin**. Eine gut aufgeklärte Kausalkette sowie die Berücksichtigung einer Funktion von Risiko und Nutzensabwägung sind in der Medizin wesentliche Voraussetzungen für die Gestaltung von erfolgreichen Therapieprozessen. Unter diesem Aspekt nehmen wir Bezug zu Untersuchungen, wie sie von Andreas Meisel in seinem Beitrag „Therapie neurologischer Erkrankungen nach dem Prinzip Einfachheit" insbesondere mit Bezug zur **Neurologie** charakterisiert werden (Meisel in diesem Band). Dazu schreibt er:

> „Die moderne Therapie von Erkrankungen basiert auf dem möglichst genauen Verständnis der den Erkrankungen zugrundeliegenden pathophysiologischen Prozesse auf organismischer, zellulärer und molekularer Ebene. Die sich daraus ableitenden Zielstrukturen werden zur Entwicklung möglichst spezifisch wirkender Medikamente genutzt, um Krankheiten zu heilen oder deren Beschwerden zu lindern."

Dabei verweist der Autor auch auf Rudolf Virchow, der mit seinem 1858 veröffentlichten Hauptwerk „Die Zellularpathologie in ihrer Begründung auf physiologische und pathologische Gewebelehre" der naturwissenschaftlich geprägten Medizin zum Durchbruch verhalf und damit den Grundstein für die moderne Medizin legte.

Ein solches Bestreben zur Schaffung von Voraussetzungen für erfolgreiche Therapien ist kennzeichnend für ganz unterschiedliche Erkrankungen. Das betrifft z.B. die Begründung und Entwicklung der Methode der tiefen Hirnstimulation, die, wie Meisel schreibt, für therapierefraktäre, mit Standard-Medikamenten nicht mehr ausreichend behandelbare Verläufe des Morbus Parkinson entwickelt wurde. Ein weiteres Beispiel betrifft die Entwicklung von Medikamenten für die Antikörpertherapie. Dazu schreibt Meisel: „Therapeutische Antikörper haben nicht nur in der Neurologie eine Vielzahl von vormals nicht oder nur unzureichend behandelbaren Erkrankungen einer effektiven Therapie zugänglich gemacht."

Auf dem Weg zur Schaffung möglichst effektiver, erfolgreicher Therapieprozesse werden jeweils Makroelemente auf der Grundlage lösungsrelevanter Information gebildet – in Form von funktionellen (Teil-)Zielstrukturen, die – wie oben zitiert – auf einem möglichst genauen Verständnis der

den Erkrankungen zugrundeliegenden pathophysiologischen Prozesse auf organismischer, zellulärer und molekularer Ebene beruhen. Basierend darauf wird eine Art Rahmenstruktur angestrebt, um damit eine Voraussetzung für Therapieprozesse zu schaffen, die durch möglichst wenig Misserfolge und Nebenwirkungen gekennzeichnet sind und in einem bestimmten (bestmöglichen) Zeitraum zum Erfolg führen.

Aus Sicht der **Molekularbiologie** und **Medizin** stellt Charles Coutelle zum Thema „Das verführerisch-einfache Konzept der Gentherapie" kurz dar, welchen langen und schwierigen Weg dieses Konzept zu gehen hatte und noch zu gehen hat, um das vorgegebene Ziel einer auf Gentransfer beruhenden Behandlung menschlicher Erkrankungen zu erreichen (Coutelle 2016, S. 151–170). Dazu schreibt er u. a. in seinem Beitrag „Die verführerische Illusion ‚einfacher' Konzepte. Kritische Betrachtungen zum Prinzip Einfachheit anhand von Beispielen aus Molekularbiologie und Medizin": „Viele vorhersehbare und noch mehr unerwartete Probleme mussten überwunden werden, um mit harter und systematischer Arbeit zu ersten eindeutigen Erfolgen der Gentherapie zu kommen." (Coutelle 2016, S. 168).

Als wesentliche Ursachen für einen so langen und schwierigen Weg zum Erfolg werden Mängel im grundlegenden Wissen auf den unterschiedlichen Ebenen des Gentransfers angesehen. Das ist wiederum ein Beispiel dafür, dass durchaus viel Arbeit in eine Vorbereitungsphase investiert wird bzw. werden muss, um überhaupt Voraussetzungen dafür schaffen zu können, dass der eigentliche Prozess zur Zielerreichung vereinfacht werden kann.

Es gibt verschiedene Forschungs- und Entwicklungsansätze dafür, Voraussetzungen für Therapieprozesse zu schaffen, die durch (sehr) wenige (oder möglichst gar keine) Misserfolge gekennzeichnet sind. Coutelle weist darauf hin, dass Viren als Transportvektoren für den Gentransfer sehr effektiv sind. So besteht z. B. eine Vorgehensweise darin, ein natürlich vorkommendes pathogenes Virus zu einem therapeutischen Virus umzugestalten. Das kann realisiert werden durch Ausscheiden pathogener DNA-Sequenzen und Einfügen therapeutischer DNA-Sequenzen und geeigneter Promotoren. Ein Promotor ist eine Nukleotid-Sequenz auf der DNA, die die regulierte Expression eines Gens ermöglicht. Wir haben es hier zu tun mit Makroelementen in Form von pathogenen DNA-Sequenzen eines natürlich vorkommenden pathogenen Virus sowie mit Makroelementen in Form von therapeutischen DNA-Sequenzen.

Wird ein geeignetes therapeutisches Virus auf dieser Grundlage erzeugt und in die Zelle eingeführt, so soll (bzw. kann) damit eine Voraussetzung

geschaffen werden für einen möglichst einfachen erfolgreichen Therapieprozess: „Einfach“ im Sinne eines geringen Aufwandes in einem bestimmten Zeitraum – quantifizierbar z. B. durch eine (relativ) geringe Anzahl von Misserfolgen und damit möglicherweise durch eine (relativ) geringe Anzahl von notwendigen Prozessschritten bis zum Erfolg. Das wiederum kann eine Grundlage dafür sein, dass unter Umständen keine oder nur eine geringe Anzahl von (Entwicklungen und/oder) Anwendungen weiterer Therapieformen erforderlich ist.

Ein Beispiel aus der **Biochemie** für die Schaffung von Voraussetzungen für möglichst einfache Diagnoseprozesse ist die Polymerasekettenreaktion (PCR). Das ist eine Methode, um Erbsubstanz (DNA) in vitro zu vervielfältigen. Die PCR zählt heute zu den wichtigsten Methoden der modernen Molekularbiologie, und viele wissenschaftliche Fortschritte auf diesem Gebiet (z. B. im Rahmen des Humangenomprojekts) wären ohne diese Methode nicht möglich gewesen. (Wikipedia 2021b).

In ihrem Beitrag „Einfachheit biochemischer Komplexität – ein Widerspruch?“ schreibt Sabine Müller:

> „Die Polymerasekettenreaktion (*P*olymerase *C*hain *R*eaction, PCR) hat die Biochemie revolutioniert. Kleinste Mengen von DNA lassen sich mit dieser Methode schnell und zuverlässig anreichern, was eine Grundvoraussetzung beispielsweise für die Kriminal- und Medizinische Diagnostik, sowie für die molekularbiologische Forschung ist. Das Prinzip der PCR ist überaus einfach (…): ein doppelsträngiges Stück DNA wird durch Wärmezufuhr denaturiert (in die Einzelstränge aufgetrennt), an jeden Einzelstrang werden kurze terminale Primer angelagert, die dann durch eine DNA-Polymerase entsprechend der Matrize zum vollständigen DNA-Strang aufgefüllt werden. Dann beginnt der Prozess von vorn, durch iterative Zyklen von Denaturierung, Primeranlagerung und Synthese wird eine exponentielle Vermehrung der ursprünglichen DNA-Menge erreicht.“ (Müller 2010, S. 62)

Dazu kurz die Erläuterung einiger Grundbegriffe:

- Polymerasen: in allen Lebewesen vorkommende Enzyme, die die Polymerisation von Nukleotiden, die Grundbausteine der Nukleinsäure, katalysieren.
- DNA-Polymerasen: Enzyme, die als Polymerase die Synthese von DNA aus Desoxyribonukleotiden katalysieren. DNA-Polymerasen spielen eine Schlüsselrolle bei der DNA-Replikation (Wikipedia 2021c).
- Primer: zwei kurze einzelsträngige DNA-Stücke (meistens um die 18–30 Nukleotide lang), die komplementär zu der DNA-Sequenz vor und

> nach dem DNA-Stück sind, das man kopieren möchte. Komplementär bedeutet, dass die Primer genau zu einem bestimmten Abschnitt der DNA passen. Dazu muss also die Sequenz vor und nach dem DNA-Stück, welches kopiert wird, schon bekannt sein (Wikipedia 2021d).

Die durch Denaturierung, Primeranlagerung und DNA-Synthese gebildeten Makroelemente bilden die Grundlage für ein Diagnostisches System (einen Test) zum Nachweis eines bestimmten Abschnitts der DNA. Mit dem durch die exponentielle Vermehrung der ursprünglichen DNA-Menge gebildeten System wird eine Voraussetzung für Diagnostik-Prozesse geschaffen, die durch relativ wenige Falschaussagen gekennzeichnet und damit quantifizierbar sind durch eine relativ geringe Anzahl von Operationen bis zum Nachweis eines ganz bestimmten Abschnitts der DNA.

Ein Schwerpunkt in den **Rechtswissenschaften** bestand und besteht in dem Bestreben, eine Rechtsordnung so zu gestalten, dass sie eine Voraussetzung für möglichst einfache Entscheidungsprozesse innerhalb dieser Rechtsordnung darstellt – einfach in dem Sinne, dass möglichst „alle als rechtmäßig zu charakterisierenden Gerichtsurteile und Verwaltungsentscheidungen über Recht und Unrecht abgeleitet werden können." (Klenner 2016, S. 113)". In seinem Beitrag „Einfachheit in der Jurisprudenz?" weist Hermann Klenner jedoch auf folgendes hin: „Unter allen Bedingungen unumstößlich richtige gemeinsame Nenner – die Voraussetzung von wirklicher Einfachheit – gibt es selten, und wenn, dann kurzzeitig, als Kompromiss oder als Täuschung und Selbsttäuschung" (Klenner 2016, S. 100).

Es gab unterschiedliche Modellvorstellungen und Bestrebungen, in Form eines abgeschlossenen Systems lückenloser Regeln eine Rechtsordnung zu konstruieren. Hermann Klenner charakterisiert dazu z. B. Grundideen zu der vom römischen Kaiser Justinian initiierten „wirkungsreichsten Gesetzgebung der Weltgeschichte", sowie Überlegungen und Aktivitäten von Friedrich II. und auch von Leibniz (Klenner 2016, S. 107–114). Zur Gesetzessammlung von Justinian schreibt Klenner:

> „Als allererstes Recht war nämlich das der Römer mittels Gedankenarbeit praktizierender Juristen aus einer Summe von Rechtsnormen zu einer Gesamtheit von Rechtsnormen verarbeitet worden, zu einem System, und zwar zu einem in sich geschlossenen System." (Klenner 2016, S. 108)

Die Rechtsnormen haben den Charakter von Makroelementen, deren Zusammenstellung und Verknüpfung zu einem entsprechenden System der

Schaffung von Voraussetzungen für möglichst einfache Entscheidungsprozesse innerhalb dieses Systems dienen soll.

Ausdruck für das Bestreben zur Konstruktion einer so funktionierenden Rechtsordnung ist auch die Aussage Friedrich II. in seinem Akademievortrag von 1749 „Über die Gründe, Gesetze einzuführen oder abzuschaffen“:

> „Ein vollkommenes Gesetz wäre das Meisterstück des menschlichen Verstandes im Bereich der Regierungskunst. Man müsste darin so genaue und angemessene Bestimmungen finden, dass ein nach ihnen regierter Staat einem Uhrwerke gliche. Die einzelnen Bestimmungen müssten so klar und genau sein, dass jeder Streit um die Auslegung ausgeschlossen wäre.“ (Volz 1913, zitiert in Klenner 2016, S. 109)

„Klar und genau, folglich kein Streit mehr möglich, ob etwas richtig oder falsch ist, mit einem Wort: einfach!“ (Klenner 2016, S. 109). Dazu stellt Hermann Klenner weiter fest:

> „Selbst ein eindeutig scheinender Gesetzeswortlaut bietet bloß eine Bandbreite rechtlich zulässigen Argumentierens und Entscheidens. Im besten Fall sind Gesetze korrekte Momentaufnahmen einer sich schließlich weder in ihrer Makro- und Mikrostruktur noch in ihrer künftigen Entwicklung vollständig reflektierbaren Wirklichkeit. Sogar an banalen Beispielen lässt sich demonstrieren, dass das Recht einer Gesellschaft zu keinem abgeschlossenen System lückenloser Regeln dergestalt perfektioniert werden kann, dass die Gerichte, um zu stringenten Urteilen zu gelangen, sich damit begnügen könnten, ausschließlich deduktivlogisch zu operieren.“ (Klenner 2016, S. 114)

Ein entscheidender Aspekt bei der Konstruktion einer Rechtsordnung ist weiterhin die Abhängigkeit vom Adressatenkreis – ein Beispiel dafür, dass die Schaffung von Voraussetzungen für einfache Lösungsprozesse ziel-, personen- und situationsabhängig ist:

> „Die Kodifikation eines ganzen Rechtszweiges macht die Arbeit für Juristen einfacher, Laien hingegen erschwert sie das Verständnis des sie betreffenden Rechts; so hat die Einbeziehung der Europäischen Verbraucherrichtlinien in das neue Zivilgesetzbuch Ungarns von 2013 der Kodifikationsidee auf Kosten des Transparenzgebots den Vorzug gegeben, also für die einen Einfachheit, für die anderen Kompliziertheit gebracht.“ (Klenner 2016, S. 103)

Es zeigt sich, dass das *Bestreben*, Voraussetzungen für einfache oder sogar einfachste Entscheidungsprozesse innerhalb einer Rechtsordnung zu schaffen, in den Rechtswissenschaften zwar eine grundlegende Rolle spielt, solche Voraussetzungen im Allgemeinen jedoch aus objektiven Gründen nicht im angestrebten Sinne geschaffen werden konnten bzw. können.

Im Anhang 3 sind wesentliche Aspekte der charakterisierten Beispiele zur Schaffung von Voraussetzungen für einfache Prozesse als Gestaltungsprinzip noch einmal in einer Übersicht zusammenfassend dargestellt.

4 Fazit

Wir nehmen noch einmal Bezug zum Ausgangspunkt dieses Beitrags:
*„Mir kommen die **Wege**, auf denen die Menschen zur Erkenntnis der (...) Dinge gelangen, fast ebenso bewunderungswürdig vor, wie die Natur der Dinge selber* (Kepler)."
Ein Stück eines solchen Weges kann in der Schaffung von Voraussetzungen für einfache Prozesse der Anforderungsbewältigung bestehen. Die charakterisierten Analysen zur *Schaffung von Voraussetzungen für einfache Prozesse* haben insgesamt ergeben:

- Sowohl *experimentelle* Untersuchungen im Rahmen der *Denkpsychologie* als auch Analysen geistiger Leistungen aus *evolutionspsychologischer* Sicht sprechen dafür, dass die Schaffung von Voraussetzungen für einfache Prozesse der Anforderungsbewältigung ein *Grundprinzip* in der *menschlichen Informationsverarbeitung* ist. Es ist gekennzeichnet durch ein Bewertungs- und Steuerkriterium „*Ökonomie des Lösungsprozesses"* und die Bildung von *Makroelementen* auf der Grundlage lösungsrelevanter Information. Bei allen untersuchten Anforderungen handelte es sich dabei um die anforderungsabhängige Bildung von Strukturen auf der Basis von Beziehungen zwischen gegebenen Elementen und einer damit verbundenen Hervorhebung der Bedeutung vorhandener lösungsrelevanter Eigenschaften bzw. Herausbildung neuer lösungsrelevanter Eigenschaften. Anhand der Ausbildung ausgezeichneter interner Repräsentationen auf der Basis solcher Makroelemente konnte bereichsübergreifend aufgezeigt werden, *dass* Voraussetzungen für relativ *einfache Prozesse* bzw. sogar für *einfachste Prozesse* der Anforderungsbewältigung *geschaffen* werden. Das ist quantifizierbar durch die zur Anforderungsbewältigung erforderliche (bewichtete) *Anzahl* von Operationen bzw. durch die erforderliche Lösungszeit.
- Mit der „Adaptiven Radiation" und der „Strukturbildung von Lebewesen auf der Basis einer informationsgesteuerten Synthese von Makromolekülen" werden Beispiele dafür aufgezeigt, dass eine solche Schaffung von Voraussetzungen für einfache Prozesse auch *außerhalb* der *menschlichen* Informationsverarbeitung vorkommt.

- Aus einer ersten Analyse von Beiträgen zu Beziehungen zwischen dem *Prinzip Einfachheit und den Disziplinen bzw. Teildisziplinen „Evolution", „Philosophie", „Technikphilosophie", „Ethik", „Rechtswissenschaft", „Kompetenzforschung", „Psychologie", „Mathematik", „Physik", „Chemie", „Meteorologie", „Kosmologie", „Medizin", „Molekularbiologie", „Biochemie", „Translatologie", „Pädagogik", „Literatur und Kunst"* resultieren weitere Beispiele, die dafür sprechen, dass Voraussetzungen für einfache Prozesse der Anforderungsbewältigung geschaffen werden. Die Beispiele sprechen dafür, dass die *Schaffung von Voraussetzungen für einfache Prozesse* ein *disziplinübergreifendes Prinzip* ist und dass dabei Merkmale der Art eine Rolle spielen, wie sie in den geschilderten Experimenten zur menschlichen Informationsverarbeitung im Rahmen der *Denkpsychologie* experimentell nachgewiesen werden konnten (Steuer- und/ oder Bewertungskriterium „Ökonomie des Lösungsprozesses", Bildung von Makroelementen auf der Basis lösungsrelevanter Information). Dennoch erlauben diese Beispiele noch keine Generalisierung. Fundierte Aussagen darüber, ob die Beispiele empirisch belegt sind, widerlegt werden können oder noch zu überprüfen sind, können nur von den entsprechenden Fachwissenschaftlern gemacht werden.

Literatur

Banks, W. P. (1977): Encoding and processing of symbolic information in comparative judgements. In: Bower, G. H. (ed.): The Psychology of Learning and Motivation, Vol. 11. New York: Academic Press, 101–106.

Banse, G. (2010): „Nicht so exakt wie möglich, sondern so genau wie nötig!" Das Einfachheitsprinzip in den Technikwissenschaften. Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften, Bd. 108. Berlin: trafo Verlag, 93–104. https://leibnizsozietaet.de/wp-content/uploads/2012/11/07_banse.pdf

Bernhardt, K.-H. (2016): Komplexität und Einfachheit im Klimasystem der Erde. Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften, Bd. 125/126. Berlin: trafo Verlag, 25–47. https://leibnizsozietaet.de/wp-content/uploads/2016/01/K-H.-Bernhardt.pdf

Bower, G. H. (1970): Analysis of mnemonic device. American Scientist, Vol. 58, 496–510.

Coutelle, Ch. (2016): Die verführerische Illusion „einfacher" Konzepte. Kritische Betrachtungen zum Prinzip Einfachheit anhand von Beispielen aus Molekularbiologie und Medizin. Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften, Bd. 125/126. Berlin: trafo Verlag, 151–170. https://leibnizsozietaet.de/wp-content/uploads/2016/01/Ch.-Coutelle.pdf

Dill, H.-O. (2010): Einfachheit vs. Komplexität in Literatur, Kunst und Wissenschaft. Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften, Bd. 108. Berlin: trafo Verlag, 105–119. https://leibnizsozietaet.de/wp-content/uploads/2012/11/08_dill.pdf

Dörner, D. (1989): Die Logik des Misslingens. Reinbek: Rowohlt Verlag.

Ebeling, W. (2016): Ist Evolution vom Einfachen zum Komplexen gerichtet? Über Werte und Emergenz. Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften, Bd. 125/126. Berlin: trafo Verlag, 69–80. https://leibnizsozietaet.de/wp-content/uploads/2016/01/W.-Ebeling. pdf

Eichhorn, W. (2010): Ockhams Rasiermesser und Karl Mengers Gegenstück. Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften, Bd. 108. Berlin: trafo Verlag, 127–130. https://leibnizsozietaet.de/wp-content/uploads/2012/11/10_eichhorn.pdf

Erpenbeck, J. (2010): Vereinfachung durch Komplexität. Persönlichkeitseigenschaften und Kompetenzen. Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften, Bd. 108. Berlin: trafo Verlag, 79–91. https://leibnizsozietaet.de/wp-content/uploads/2012/11/06_erpenbeck.pdf

Fleischer, L.-G. (2016): Relationale Klassifikation elementarer Organisationsmerkmale emergenter dynamischer Systeme – ein Essay. Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften, Bd. 125/126. Berlin: trafo Verlag, 209–244. https://leibnizsozietaet.de/wp-content/uploads/2016/01/L.-G.-Fleischer.pdf

Fritz, H.-J. (2019a): Informationstheoretische Metaphern im Vokabular der Molekularen Genetik. In: Fritz, H.-J./Schaback, R. (Hrsg.): Die Natur der Information. Göttingen: Universitätsverlag, 143–165.

Fritz, H.-J. (2019b): Informationsgesteuerte Synthese – eine Blockbuster-‚Erfindung' der Evolution. In: Fritz, H.-J./Schaback, R. (Hrsg.): Die Natur der Information. Göttingen: Universitätsverlag, 167–182.

Fuchs-Kittowski, K. (2010): Zur Diskussion über Vereinfachung und Reduktion als Methode. Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften, Bd. 108. Berlin: trafo Verlag, 131–134. https://leibnizsozietaet.de/wp-content/uploads/2012/11/11_fuchs-kittowski.pdf

Groner, R. (1978): Hypothesen im Denkprozess. Bern: Huber.

Hartung, W. (2010): Anmerkungen zur Einfachheit aus der Perspektive eines Linguisten. Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften, Bd. 108. Berlin: trafo Verlag, 135–141. https://leibnizsozietaet.de/wp-content/uploads/2012/11/12_hartung.pdf

Heinrich, F. (1997): Diskussionsmaterial zur Untersuchung der Doppelrepräsentationshypothese und Bemerkungen dazu aus mathematikdidaktischer Sicht (unveröffentlicht).

Herrmann, D.-B. (2016): Sind die Standardmodelle der Kosmologie und Elementarteilchenphysik falsch, weil sie zu kompliziert sind? Anmerkungen aus wissenschaftshistorischer Sicht. Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften, Bd. 125/126. Berlin: trafo Verlag, 171–186. https://leibnizsozietaet.de/wp-content/uploads/2016/01/D.-B.-Herrmann.pdf

Hörz, H. (2010): Philosophischer Reduktionismus oder wissenschaftlich berechtigte Reduktionen? Zu den erkenntnistheoretischen Grundlagen des Prinzips Einfachheit. Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften, Bd. 108. Berlin: trafo Verlag, 11–36. https://leibnizsozietaet.de/wp-content/uploads/2011/05/02_hoerz.pdf

Hörz, H. E. (2016): Ist Feminismus Reduktionismus? Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften, Bd. 125/126. Berlin: trafo Verlag, 81–98 https://leibnizsozietaet.de/wp-content/uploads/2016/01/H.-E.-Hörz.pdf

Hörz, H./Krause, W./Sommerfeld, E. (Hrsg.) (2016a): Einfachheit als Wirk-, Erkenntnis- und Gestaltungsprinzip (II). Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät, Bd. 125/126. Berlin: trafo

Verlag. https://leibnizsozietaet.de/wp-content/uploads/2012/10/Band-125-126-Gesamtdatei-neu.pdf

Hörz, H./Krause, W./Sommerfeld, E. (2016b): Sind komplexe Systeme einfach? Bilanz des Arbeitskreises „Prinzip Einfachheit. Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften, Bd. 125/126. Berlin: trafo Verlag, 7–24. https://leibnizsozietaet.de/wp-content/uploads/2016/01/H.H%C3%B6rz-W.Krause-E.Sommerfeld.pdf

Klenner, H. (2016): Einfachheit in der Jurisprudenz? Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften, Bd. 125/126. Berlin: trafo Verlag, 99–121. https://leibnizsozietaet.de/wp-content/uploads/2016/01/H.-Klenner.pdf

Klix, F. (1992): Die Natur des Verstandes. Göttingen, Toronto: Hogrefe.

Klix, F. (1993): Erwachendes Denken. Heidelberg u. a. O.: Spektrum.

Kolditz, L. (2010): Diskussionsbemerkung in der Plenarveranstaltung „Einfachheit als Wirk-, Erkenntnis- und Gestaltungsprinzip“. Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften, Bd. 108. Berlin: trafo Verlag, 143. https://leibnizsozietaet.de/wp-content/uploads/2011/05/14_kolditz.pdf

Krause, W. (1982): Eye Fixation and Three-Term Series Problems, Or: Is There Evidence For Task-independent Information Units? In: Groner, R./Fraisse, P. (eds.): Cognition and Eye Movements. Berlin: Deutscher Verlag der Wissenschaften, 122–138.

Krause, W. (1985): Komponentenanalyse des Symbol-Distanz-Effektes mit Hilfe von Augenbewegungsmessungen. Zeitschrift für Psychologie, 3, 259–272.

Krause, W. (1991): Ordnungsbildung im Denken und kognitiver Aufwand. Zeitschrift für Psychologie (Suppl.), 11, 404–421.

Krause, W. (1994): Ordnungsbildung als Invarianzleistung mentaler Repräsentationen: Zur aufwandsreduzierenden Strukturierung von Wissen und Prozeduren. Zeitschrift für Psychologie, 202, 1–19.

Krause, W. (2000): Denken und Gedächtnis aus naturwissenschaftlicher Sicht. Göttingen, Toronto: Hogrefe.

Krause, W. (2010): Einfachheit und menschliche Informationsverarbeitung?. Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften, Bd. 108. Berlin: trafo Verlag, 37–55. https://leibnizsozietaet.de/wp-content/uploads/2012/11/03_krause.pdf

Krause, W. (2017a): Entropiereduktion im Denken. Leibniz Online 25/ 2017. https://leibnizsozietaet.de/wp-content/uploads/2017/01/WKrause-1.pdf

Krause, W. (2017b): Processing of Information in Microstates. Leibniz Online 25/2017. https://leibnizsozietaet.de/wp-content/uploads/2017/01/WKrause-2.pdf

Krause, W./Seifert, R./Sommerfeld, E. (1986): Effective cognitive structures in simple problem solving. In: Klix, F./Hagendorf,H. (eds.): Human Memory and Cognitive Capabilities. Mechanisms and Performances. Amsterdam: North Holland, 1001–1016.

Krause, W./Seifert, R./Sommerfeld, E. (1987): Ausbildung und Transformation kognitiver Strukturen im Problemlösen. ZKI-Informationen 2/87. Berlin: AdW der DDR.

Krause, W./Sommerfeld, E./Höhne, G./Sperlich, H. (1989): Aufwandsminimierende Umstrukturierung von Wissensstrukturen der Konstruktion im menschlichen Gedächtnis. Wissenschaftliche Zeitschrift der TH Ilmenau, 89, 51–54.

Krause, W./Seidel, G./Schack, B. (2001): Ordnungsbildung. Zeitschrift für Psychologie, 209, 376–401.

Krause, W./Seidel, G./Heinrich, F. (2003a): Über das Wechselspiel zwischen Rechnen und bildhafter Vorstellung beim Lösen mathematischer Probleme. Der Mathematikunterricht, 6, 50–62.

Krause, W./Seidel, G./Heinrich, F. (2003b): Entropy reduction in mathematical giftedness. In: Lindemann, U. (ed.): Human Behaviour in Design. Berlin u. a. O.: Springer, 63–71.

Krause, W./Seidel, G. (2004): Biologische Grundlagen des Verstandes. Höhere Ordnung – kürzere Zeiten: allgemeinpsychologische und differentielle Untersuchungen zur Entropiereduktion. In: Krause, B./Krause, W. (Hrsg.): Psychologie im Kontext der Naturwissenschaften. Festschrift für Friedhart Klix zum 75. Geburtstag. Abhandlungen der Leibniz-Sozietät, Bd. 12. Berlin: trafo Verlag, 189–214.

Krause, W./Seidel, G./Heinrich, F. (2004): Multimodalität im Denken am Beispiel mathematischer Anforderungen. Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften, Bd. 64. Berlin: trafo Verlag, 135–152. http://leibnizsozietaet.de/wp-content/uploads/2012/11/11_krause. pdf

Krause, W./Zhang, Li. (2018): Entropiereduktion im Denken in China. Wissenschaftliche Mitteilung. Klassensitzung der Klasse Naturwissenschaften der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften zu Berlin, am 14. Februar 2018. (https://leibnizsozietaet.de/wp-content/uploads/2018/02/Entropiereduktion-text-5.2.2018-mit-Li-Zhang.docx.pdf, 24.03.2021).

Linke, D. (2016): Einfachheit in der Chemie? – „Lasst, die ihr eintretet, alle Hoffnung fahren!" – Oder doch nicht ganz?. Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften, Bd. 125/126. Berlin: trafo Verlag, 123–149. https://leibnizsozietaet.de/wp-content/uploads/2016/01/D.-Linke-korr.pdf

März, R. (2011): Schöne Einfachheit als (VER)FÜHRUNG in der Mathematik. Leibniz Online 09/2011. http://www.leibniz-sozietaet.de/journal/archive/09_11/maerz.pdf

März, R. (2016): Gewisse Einfachheit auf den komplizierten Wegen zur höchsten Gewissheit. Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften, Bd. 125/126. Berlin: trafo Verlag, 49–67. https://leibnizsozietaet.de/wp-content/uploads/2016/01/R.-M%C3%A4rz.pdf

Müller, S. (2010): Einfachheit biochemischer Komplexität – ein Widerspruch? Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften, Bd. 108. Berlin: trafo Verlag, 57–65. https://leibnizsozietaet.de/wp-content/uploads/2012/11/04_mueller_s.pdf

Naumann, W. (2017): Konzeptionelle Überlegungen für eine Allgemeine Erziehungswissenschaft unter besonderer Berücksichtigung der Prinzipien Einfachheit und Transdisziplinarität. Leibniz Online 27/2017. https://leibnizsozietaet.de/wp-content/uploads/2017/03/Naumann.pdf

Naumann, W. (2019) Prinzipien in der Pädagogik – eine Problemsicht. Leibniz Online 36/2019. https://leibnizsozietaet.de/wp-content/uploads/2019/03/Naumann.pdf

Petrusic, W. M. (2001): Contextual effects and associative processes in comparative judgements with perceptual and symbolic stimuli. In: Sommerfeld, E./Kompass, R./Lachmann, Th. (eds.): Fechner Day 2001: The 200th Birthday of Gustav Theodor Fechner. Proceedings of the Seventeenth Annual Meeting of the International Society for Psychophysics. Lengerich, Berlin: Pabst Science Publishers, 75–80.

Petrusic, W. M./Harrison, D. H./Baranski, J. V. (2004): Long term memory for elementary visual percepts: Memory psychophysics of context and acquisition effects. Perception and psychophysics, 66, 430–445.

Pliske, R. M./Smith, K. M. (1979): Semantic categorization in a linear order problem. Memory and Cognition, 7, 297–302.

Potts, G. R. (1975): Bringing order to cognitive structures. In: Restle, F./Shiffrin, R. M./Castellan, N. J./Lindman, H. R./Pisoni, D. B. (eds.): Cognitive Theory, Vol. 1. New York: Wiley, 247–270.

Salevsky, H./Müller, I. (2016): Das Sensitivitätsmodell Prof. Vester® – ein einfaches Programm zur Lösung komplexer Probleme (mit Anwendungsbeispielen aus der Translatologie). Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften, Bd. 125/126. Berlin: trafo Verlag, 187–208. https://leibnizsozietaet.de/wp-content/uploads/2016/01/H.-Salevsky-I.-Müller.pdf

Schimming, R. (2010): Optimierung von Erkenntnis: Einfachheit, Einheitlichkeit, Anschaulichkeit. Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften, Bd. 108. Berlin: trafo Verlag, 67–77. https://leibnizsozietaet.de/wp-content/uploads/2012/11/05_schimming.pdf

Sommerfeld, E. (1994a): Kognitive Strukturen. Münster, New York: Waxmann.

Sommerfeld, E. (1994b): Mentale Repräsentationen – mathematische Modellierung ihrer Ausbildung und Transformation. Zeitschrift für Psychologie, 202, 233–251.

Sommerfeld, E. (2001): Comparison processes in memory: Performance measures and synchronous brain activity. In: Sommerfeld, E./Kompass, R./Lachmann, Th. (eds.): Fechner Day 2001: The 200th Birthday of Gustav Theodor Fechner. Proceedings of the Seventeenth Annual Meeting of the International Society for Psychophysics. Lengerich, Berlin: Pabst Science Publishers, 81–86.

Sommerfeld, E. (2008): Memory Psychophysics – an interdisciplinary approach. In: Plath, J. P./Haß, E.-Ch. (eds.): Vernetzte Wissenschaften – Crosslinks in Natural and Social Sciences. Berlin: Logos, 205–241.

Sommerfeld, E. (2009): Aufklärung von Basisprozessen menschlicher Informationsverarbeitung. Ein systematischer Zugang durch Elementaranalyse von Denkprozessen bei der Lösung von Ordnungsproblemen? Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften, Bd. 101. Berlin: trafo Verlag, 93–110. https://leibnizsozietaet.de/wp-content/uploads/2012/11/12_sommerfeldt.pdf. Ausführliche Fassung in Leibniz Online 6/2009. www.leibnizsozietaet.de/wp-content/uploads/2012/11/05-Sommerfeld_2009_04_281.pdf

Sommerfeld, E. (2010): Einfachheit – ein Grundprinzip in den unterschiedlichsten Disziplinen? Anregungen zur interdisziplinären Diskussion. Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften, Bd. 108. Berlin: trafo Verlag, 145–163. https://leibnizsozietaet.de/wp-content/uploads/2011/05/15_sommerfeld.pdf

Sommerfeld, E. (2014): Strukturelle Information: Repräsentation Interpretation, Reduktion. Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften, Bd. 118. Berlin: trafo Verlag, 91–104. https://leibnizsozietaet.de/wp-content/uploads/2014/02/10_sommerfeld.pdf

Sommerfeld, E. (2018): Die Klix-Operationen und -Prozeduren: anforderungsinvariant und mathematisch exakt. In: Krause, W./Sommerfeld, E. (Hrsg.): Friedhart Klix: Naturwissenschaftler, Psychologe, Vordenker. Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften, Bd. 135. Berlin: trafo Verlag, 75–97. https://leibnizsozietaet.de/wp-content/uploads/2018/08/09-Erdmute-Sommerfeld.pdf

Sommerfeld, E./Hörz, H./Krause, W. (Hrsg.) (2010): Einfachheit als Wirk-, Erkenntnis- und Gestaltungsprinzip (I), Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften, Bd. 108.

Berlin: trafo Verlag. https://leibnizsozietaet.de/wp-content/uploads/2012/10/Gesamtband-SB-108-2010.pdf

Sommerfeld, E./Krause, W. (2013): „Objektiv, aber speziell“: Psychologie als Naturwissenschaft. Leibniz Online 15/2013. www.leibnizsozietaet.de/wp-content/uploads/2013/11/sommerfeld_krause-3.pdf

Sommerfeld, E./Sobik, F. (1986): Graph theoretical models for transformation and comparison of cognitive structures. In: Klix, F./Hagendorf, H. (eds.): Human Memory and Cognitive Capabilities. Mechanisms and Performances. Amsterdam: North Holland, 1017–1024.

Sommerfeld, E./Sobik, F. (1994): Operations on cognitive structures – their modelling on the basis of graph theory. In: Albert, D. (ed.): Knowledge Structures. Berlin u. a. O.: Springer, 146–190.

Unzicker, A. (2015): Einsteins verlorener Schlüssel. Leipzig: Amazon Distribution GmbH.

Wikipedia (2021a): Abgerufen am 5.7.2021 von https://de.wikipedia.org/wiki/Darwinfinken

Wikipedia (2021b): Abgerufen am 5.7.2021 von (https://de.wikipedia.org/wiki/Polymerase-Kettenreaktion

Wikipedia (2021c): Abgerufen am 5.7.2021 von https://de.wikipedia.org/wiki/DNA-Polymerasen

Wikipedia (2021d): Abgerufen am 5.7.2021 von https://www.simplyscience.ch/teens-liesnach-archiv/articles/dna-kopieren-mit-der-polymerase-kettenreaktion-pcr.html

Anhang

Beispiele, die dafür sprechen, dass die Schaffung von Voraussetzungen für einfache Prozesse ein *disziplinübergreifendes* Prinzip ist und dass dieses Prinzip auch *außerhalb* der *menschlichen* Informationsverarbeitung vorkommt (empirisch belegt oder (noch) zu überprüfen).

Anhang 1: Schaffung von Voraussetzungen für einfache Prozesse als Wirkprinzip: Beispiele aus der **Evolution** und der **organismischen Strukturbildung***

Schaffung von Voraussetzungen für einfache Prozesse / D: Disziplin, D1: Teilgebiet/ Teilaspekt, D11: Beispiel, D111: Anforderung Bzw. Ziel	*Bewertungs- und/oder Steuer-kriterium:* *Ökonomie (des Prozesses der Anforderungs-bewältigung)*	*auf dem Weg zur Schaffung von Voraussetzungen für einfache Prozesse:* *anforderungs-abhängige Bildung von Makroelementen (auf der Basis lösungsrelevanter Information)*	*angestrebte bzw. geschaffene Voraussetzungen für einfache Prozesse:* *ausgezeichnete Systeme (aus Strukturen bzw. Funktionen und dazugehörigen Regeln)*	*einfache Prozesse, die auf Grund der Voraussetzungen ermöglicht werden sollen bzw. ermöglicht werden:* *(quantifizierbar z.B. durch eine geringe Anzahl notwendiger Operationen bzw. durch eine kurze Lösungszeit)*
D: Evolution, D1: Adaptive Radiation, D11: „Darwin-Finken“, D111: erfolgreiche Nahrungsaufnahme Wikipedia (2021a)	Ökonomie von Prozessen der Nahrungs-aufnahme	Bildung von lösungsrelevanten Makroelementen in Form von funktionellen (Teilen von) Schnabelstrukturen auf der Basis ernährungsrele-vanter Merkmale	System aus ausgezeichneten Schnabelstrukturen (der jeweiligen Ernährungstechnik angepasst) und dazugehörigen Regeln der Nahrungsaufnahme	Prozesse mit relativ geringer (oder möglicherweise minimaler?) Anzahl überlebens-wichtiger Operationen der Nahrungsaufnahme
D: Molekulare Genetik, D1: Strukturbildung von lebenden Systemen, D11: Vervielfältigung des Bakteriums E. Coli (Fritz, 2019b), D111: erfolgreiche innere Organisation und äußere Gestaltung	Ökonomie des Struktur-bildungs-prozesses eines lebenden Systems	Bildung von individuell aufgabenspezifisch geformten biologischen Makromolekülen (proteinischen Biokatalysatoren) durch schrittweise informations-gesteuerte Synthese („… Zufütterung von Information wie bei einer numerisch gesteuerten Werkzeug-maschine“, Fritz, 2019b, S. 179)	*Dynamisches* System zur Steuerung der organismischen Strukturbildung – bestehend aus hoch-selektiven, den Prozess beschleunigenden Biokatalysatoren, bei ständiger Zufuhr von Energie (um dem Streben zum energieärmsten Zustand entgegenzuwirken)	Prozesse mit relativ geringer (oder möglicherweise minimaler?) Anzahl von notwendigen Operationen zur Strukturbildung eines lebenden Systems

* Weitere Erläuterungen im Text.

Anhang 2a: Schaffung von Voraussetzungen für einfache Prozesse als Erkenntnisprinzip: Beispiele aus der **Philosophie***

Schaffung von Voraussetzungen für einfache Prozesse / D: Disziplin, D1: Teilgebiet/ Teilaspekt, D11: Beispiel, D111: Anforderung bzw. Ziel	*Bewertungs- und/oder Steuer-kriterium:* *Ökonomie (des Prozesses der Anforderungs-bewältigung)*	*auf dem Weg zur Schaffung von Voraussetzungen für einfache Prozesse:* *anforderungs-abhängige Bildung von Makroelementen (auf der Basis lösungsrelevanter Information)*	*angestrebte bzw. geschaffene Voraussetzungen für einfache Prozesse:* *ausgezeichnete Systeme (aus Strukturen bzw. Funktionen und dazugehörigen Regeln)*	*einfache Prozesse, die auf Grund der Voraussetzungen ermöglicht werden sollen bzw. ermöglicht werden:* *(quantifizierbar z.B. durch eine geringe Anzahl notwendiger Operationen bzw. durch eine kurze Lösungszeit)*
D: Philosophie D1: Sprache als Mittel des Erkenntnis-gewinns (Hörz, H. 2010) D11: Dialektisches Denken D111: Erkennen von inneren Gegen-sätzen und Auf-decken von Alter-nativen	Ökonomie des Erkenntnis-prozesses	Bildung von lösungsrelevanten Makroelementen aus These und Antithese	ausgezeichnete dialektische Denkstruktur(en) – basierend auf den gebildeten Makroelementen	Prozesse des Erkenntnisgewinns mit relativ geringer Anzahl notwendiger Operationen (z.B. quantifizierbar in Anzahl von Zeiteinheiten)
D: Philosophie: D1: Erforschung kom-plexer Systeme D11: 2+1-Prinzip (Hörz, H. 2010) D111: Erkenntnisgewinn	Ökonomie des (Beschreibungs- und) Erkenntnis-prozesses	zielabhängige Bil-dung (mindestens) eines der beiden folgenden lösungs-relevanten Makro-elemente (mit jeweils zwei Integra-tionsebenen): – „System und Elemente“ – „System und Umwelt“ und Bildung eines Makroelementes in Form einer Hintergrundtheorie	ausgezeichnete Kombination aus einem Makroelement mit zwei Integrationsebenen und der entsprechenden Hintergrundtheorie	Prozesse des Erkenntnisgewinns mit relativ geringer Anzahl notwendiger Operationen (z.B. quantifizierbar in Anzahl von Zeiteinheiten)

* Weitere Erläuterungen im Text.

Anhang 2b: Schaffung von Voraussetzungen für einfache Prozesse als Erkenntnisprinzip: Beispiele aus der **Philosophie***

Schaffung von Voraussetzungen für einfache Prozesse	*Bewertungs- und/oder Steuer-kriterium:*	*auf dem Weg zur Schaffung von Voraussetzungen für einfache Prozesse:*	*angestrebte bzw. geschaffene Voraussetzungen für einfache Prozesse:*	*einfache Prozesse, die auf Grund der Voraussetzungen ermöglicht werden sollen bzw. ermöglicht werden:*
D: Disziplin D1: Teilgebiet/ Teilaspekt D11: Beispiel D111: Anforderung bzw. Ziel	*Ökonomie (des Prozesses der Anforderungs-bewältigung)*	*anforderungs-abhängige Bildung von Makroelementen (auf der Basis lösungsrelevanter Information)*	*ausgezeichnete Systeme (aus Strukturen bzw. Funktionen und dazugehörigen Regeln)*	*(quantifizierbar z.B. durch eine geringe Anzahl notwendiger Operationen bzw. durch eine kurze Lösungszeit)*
D: Philosophie: D1: Modellbildung und -nutzung D11: Mengersches Prisma (Eichhorn 2010) D111: Erkenntnisgewinn	Ökonomie des (Beschreibungs- und) Erkenntnis-prozesses	Bildung von lösungsrelevanten Makroelementen durch Aufsplittung einer Menge von Bedeutungen eines Begriffs (Bedeutungen, die in einem Erklärungs- oder Argumentations-verbund auftreten, aber untereinander ganz unterschiedlichen Inhalts sind, z.B. Bedeutungen des Begriffs „Klasse“)	ausgezeichnete Bedeutungsstruktur eines Begriffes - basierend auf einem (anforderungs- bzw. zielabhängig) ausgewählten Makroelement	Prozesse mit relativ geringer Anzahl notwendiger Operationen zur Erzeugung wissenschaftlich berechtigter Vereinfachungen (Hörz, 2010) - z.B. durch Anwendung von Ockhams Rasiermesser

* Weitere Erläuterungen im Text.

Anhang 2c: Schaffung von Voraussetzungen für einfache Prozesse als Erkenntnisprinzip: Beispiele aus der **Kompetenzforschung***

Schaffung von Voraussetzungen für einfache Prozesse	*Bewertungs- und/oder Steuer-kriterium:*	*auf dem Weg zur Schaffung von Voraussetzungen für einfache Prozesse:*	*angestrebte bzw. geschaffene Voraussetzungen für einfache Prozesse:*	*einfache Prozesse, die auf Grund der Voraussetzungen ermöglicht werden sollen bzw. ermöglicht werden:*
D: Disziplin D1: Teilgebiet/ Teilaspekt D11: Beispiel D111: Anforderung bzw. Ziel	*Ökonomie (des Prozesses der Anforderungs-bewältigung)*	*anforderungs-abhängige Bildung von Makroelementen (auf der Basis lösungsrelevanter Information)*	*ausgezeichnete Systeme (aus Strukturen bzw. Funktionen und dazugehörigen Regeln)*	*(quantifizierbar z.B. durch eine geringe Anzahl notwendiger Operationen bzw. durch eine kurze Lösungszeit)*
D: Kompetenzfor-schung D1: Führungskräfte-diagnostik (und Führungskräfte-entwicklung) D11: „Durch komplexe Erfassung zu einem einfachen Verständnis“ (Erpenbeck, 2010) D111: Erkenntnis von Kompetenzen	Ökonomie des Prozesses des Erkennens von Führungs-kompetenzen	Bildung von lösungsrelevanten Makroelementen aus Ratingurteilen unterschiedlicher Personen - jeweils über eine spezifische Kompetenz einer bestimmten Person (für Kompetenzen aus einer gegebenen Menge). Die Ratings basieren auf einem Schluss von der Performanz auf Fähigkeiten, die auch künftig ein erfolgreiches, selbstorganisiertes Handeln der Person in offenen Problemsituationen ermöglichen.	ausgezeichnete Struktur eines Kompetenzmodells - basierend auf der Menge der gebildeten Makroelemente - im Zusammenhang mit Regeln zur Erkennung von Führungs-kompetenzen	Prozesse mit relativ geringer Anzahl notwendiger Operationen bis zur Erkennung von Führungs-persönlichkeiten

* Weitere Erläuterungen im Text.

Anhang 2d: Schaffung von Voraussetzungen für einfache Prozesse als Erkenntnisprinzip: ein Beispiel aus der **Mathematik***

Schaffung von Voraussetzungen für einfache Prozesse / D: Disziplin, D1: Teilgebiet/ Teilaspekt, D11: Beispiel, D111: Anforderung bzw. Ziel	*Bewertungs- und/oder Steuer-kriterium:*	*auf dem Weg zur Schaffung von Voraussetzungen für einfache Prozesse:*	*angestrebte bzw. geschaffene Voraussetzungen für einfache Prozesse:*	*einfache Prozesse, die auf Grund der Voraussetzungen ermöglicht werden sollen bzw. ermöglicht werden:*
	Ökonomie (des Prozesses der Anforderungs-bewältigung)	*anforderungs-abhängige Bildung von Makroelementen (auf der Basis lösungsrelevanter Information)*	*ausgezeichnete Systeme (aus Strukturen bzw. Funktionen und dazugehörigen Regeln)*	*(quantifizierbar z.B. durch eine geringe Anzahl notwendiger Operationen bzw. durch eine kurze Lösungszeit)*
D: Mathematik (März 2011, 2016) D1: Approximation eines mathematischen Gegenstandes durch einen anderen D11: Interpolation von Funktionen (gegeben: n Stützstellen $t_1, \ldots, t_n$ mit den berechneten oder gemessenen Werten $y_1, \ldots, y_n$) D111: Erkennung wesentlicher formaler Charakteristika des (vermuteten) *echten* Funktionsverlaufs (durch gute Anpassung an den Verlauf)	Ökonomie des Prozesses der Erkennung wesentlicher formaler Charakteristika des (vermuteten) echten Funktionsverlaufs	Bildung von lösungsrelevanten Makroelementen in Form von Segmenten von Polynomen höchstens dritten Grades auf den n Teilintervallen (die an den Stützstellen zweimal stetig differenzierbar zusammengefügt sind)	ausgezeichnete Interpolationsfunktion f (mit $f(t_1) = y_1, \ldots, f(t_n) = y_n$): die natürliche interpolierende kubische Spline-Interpolierende: keine geschlossene Formel, sondern eine zusammengesetzte Funktion, zu berechnen aus einem Gleichungssystem, das aus den Makroelementen resultiert	Prozesse mit relativ geringer Anzahl notwendiger Operationen bis zur Erkennung wesentlicher formaler Charakteristika des (vermuteten) *echten* Funktionsverlaufs – auch bei wachsender Anzahl von Stützstellen (!) (ohne Fluktuationen, wie sie z.B. bei Lagrange-Interpolations-polynomen auftreten können)

* Weitere Erläuterungen im Text.

Anhang 2e: Schaffung von Voraussetzungen für einfache Prozesse als Erkenntnisprinzip: ein Beispiel aus der **Physik***

Schaffung von Voraussetzungen für einfache Prozesse / D: Disziplin, D1: Teilgebiet/ Teilaspekt, D11: Beispiel, D111: Anforderung bzw. Ziel	*Bewertungs- und/oder Steuer-kriterium:*	*auf dem Weg zur Schaffung von Voraussetzungen für einfache Prozesse:*	*angestrebte bzw. geschaffene Voraussetzungen für einfache Prozesse:*	*einfache Prozesse, die auf Grund der Voraussetzungen ermöglicht werden sollen bzw. ermöglicht werden:*
	Ökonomie (des Prozesses der Anforderungs-bewältigung)	*anforderungs-abhängige Bildung von Makroelementen (auf der Basis lösungsrelevanter Information)*	*ausgezeichnete Systeme (aus Strukturen bzw. Funktionen und dazugehörigen Regeln)*	*(quantifizierbar z.B. durch eine geringe Anzahl notwendiger Operationen bzw. durch eine kurze Lösungszeit)*
D: Physik/Geschichte der Physik D1: wissenschaftliche Revolutionen als Vereinigung bestehender Theorien (Unzicker in diesem Band) D11: Vereinigung von Elektrizität und Magnetismus D111: Beschreibung und Erkenntnis physikalischer Gesetzmäßigkeiten	Ökonomie des Prozesses der Beschreibung und der Erkenntnis physikalischer Gesetzmäßigkeiten	Bildung von lösungsrelevanten Makroelementen in Form von funktionalen Abhängigkeiten zwischen Naturkonstanten: durch Suche nach Beziehungen zwischen Teilgebieten der Physik (im Beispiel zwischen Elektrizität und Magnetismus) und (basierend darauf) Entdeckung von funktionalen Abhängigkeiten zwischen Naturkonstanten	ausgezeichnetes System aus funktionalen Abhängigkeiten zwischen Naturkonstanten (auf der Basis gebildeter Makroelemente) im Beispiel: Maxwellsche Gleichungen	Prozesse mit geringerer Anzahl notwendiger Operationen zur Beschreibung und Erkenntnis physikalischer Gesetzmäßigkeiten (im Beispiel: des Elektromagnetismus) als ohne die geschaffene Voraussetzung – basierend auf einer geringeren Anzahl von Naturkonstanten als ohne die geschaffene Voraussetzung (im Beispiel „Vereinigung von Elektrizität und Magnetismus zu Elektromagnetismus“ verringert sich die Menge der Naturkonstanten um die magnetische Feldkonstante μ_0)

* Weitere Erläuterungen im Text.

Anhang 2f: Schaffung von Voraussetzungen für einfache Prozesse als Erkenntnisprinzip: ein Beispiel aus der **Chemie***

Schaffung von Voraussetzungen für einfache Prozesse / D: Disziplin, D1: Teilgebiet/ Teilaspekt, D11: Beispiel, D111: Anforderung bzw. Ziel	*Bewertungs- und/oder Steuer-kriterium:* *Ökonomie (des Prozesses der Anforderungs-bewältigung)*	*auf dem Weg zur Schaffung von Voraussetzungen für einfache Prozesse:* *anforderungs-abhängige Bildung von Makroelementen (auf der Basis lösungsrelevanter Information)*	*angestrebte bzw. geschaffene Voraussetzungen für einfache Prozesse:* *ausgezeichnete Systeme (aus Strukturen bzw. Funktionen und dazugehörigen Regeln)*	*einfache Prozesse, die auf Grund der Voraussetzungen ermöglicht werden sollen bzw. ermöglicht werden:* *(quantifizierbar z.B. durch eine geringe Anzahl notwendiger Operationen bzw. durch eine kurze Lösungszeit)*
D: Chemie D1: Geschichte der Chemie (Linke 2016) D11: Ermittlung der oft komplizierten Strukturen der Stoffe D111: Erkenntnis chemischer Gesetzmäßigkeiten	Ökonomie des Prozesses der Erkenntnis chemischer Gesetzmäßigkeiten	Bildung von lösungsrelevanten Makroelementen in Form von – anschaulichen Modellen von Strukturen und Symmetriemerkmalen (z.B. bei Kristallgittern) - auch immer mehr in Verbindung mit Computerprogrammen, die am Bildschirm Molekülstrukturen und Kristallgitter in beliebigen Richtungen zeigen – Messergebnissen zu Eigenschaftsveränderungen – graphischen Darstellungen von Reaktionsverläufen	ausgezeichnetes System – bestehend aus einer Kombination von Messdaten und anschaulichen Modellen und Graphiken (auf der Basis der gebildeten Makroelemente)	Prozesse mit geringerer Anzahl notwendiger Operationen zur Erkenntnis chemischer Gesetzmäßigkeiten als ohne die geschaffene Voraussetzung

* Weitere Erläuterungen im Text.

Anhang 2g: Schaffung von Voraussetzungen für einfache Prozesse als Erkenntnisprinzip: Beispiele aus den **Technikwissenschaften***

Schaffung von Voraussetzungen für einfache Prozesse / D: Disziplin, D1: Teilgebiet/ Teilaspekt, D11: Beispiel, D111: Anforderung bzw. Ziel	*Bewertungs- und/oder Steuer-kriterium:* *Ökonomie (des Prozesses der Anforderungs-bewältigung)*	*auf dem Weg zur Schaffung von Voraussetzungen für einfache Prozesse:* *anforderungs-abhängige **Bildung von Makroelementen** (auf der Basis lösungsrelevanter Information)*	*angestrebte bzw. geschaffene Voraussetzungen für einfache Prozesse:* *ausgezeichnete Systeme (aus **Strukturen** bzw. **Funktionen** und dazugehörigen **Regeln**)*	***einfache Prozesse**, die auf Grund der Voraussetzungen ermöglicht werden sollen bzw. ermöglicht werden:* *(quantifizierbar z.B. durch eine **geringe Anzahl** notwendiger Operationen bzw. durch eine kurze Lösungszeit)*
D: Technikwissen-schaften D1: Systemanalyse (ausgehend von realen Situationen) D11: „Neun-Felder-Ma-trix“ der Allgemei-nen Technologie (Banse 2010, S. 99–100) D111: Erkenntnis tech-nischer Gesetz-mäßigkeiten	Ökonomie des Prozesses der Erkenntnis technischer Gesetzmäßig-keiten	Bildung von lösungsrelevanten Makroelementen durch Reduzierung der Vielfalt bzw. Vielzahl technischer Sachsysteme und Abläufe auf eine „Mindestanzahl“ in Form von Kombinationen – aus „Art des Arbeitsgegen-standes“ und „Art der Verän-derung“ (nach Wolfgramm) bzw. – aus “Output“ und „Funktion“ (nach Ropohl) (Banse 2010)	*„Neun-Felder-Matrix“ der Allgemeinen Technologie* als Grundlage für Prozesse zur Erkenntnis technischer Gesetzmäßigkeiten (basierend auf den entsprechenden Makroelementen): (Variante 1: Neun-Felder-Matrix I – System der technologischen Vorgänge (Quelle: nach Wolffgramm 1978, S. 35, zitiert in Banse 2010) Variante 2: Neun-Felder-Matrix II – Klassifikation technischer Sachsysteme nach Funktionsklasse und vorherrschendem Output (Quelle: nach Ropohl 1979, S. 178, zitiert in Banse 2010)	Prozesse mit geringerer Anzahl notwendiger Operationen bis zur Erkenntnis technischer Gesetzmäßigkeiten als ohne eine solche Voraussetzung

* Weitere Erläuterungen im Text.

Anhang 2h: Schaffung von Voraussetzungen für einfache Prozesse als Erkenntnisprinzip: Beispiele aus den **Biowissenschaften***

Schaffung von Voraussetzungen für einfache Prozesse D: Disziplin D1: Teilgebiet/ Teilaspekt D11: Beispiel D111: Anforderung bzw. Ziel	*Bewertungs- und/oder Steuer-kriterium:* *Ökonomie (des Prozesses der Anforderungs-bewältigung)*	*auf dem Weg zur Schaffung von Voraussetzungen für einfache Prozesse:* *anforderungs-abhängige **Bildung von Makroelementen** (auf der Basis lösungsrelevanter Information)*	*angestrebte bzw. geschaffene Voraussetzungen für einfache Prozesse:* *ausgezeichnete Systeme (aus **Strukturen** bzw. **Funktionen** und dazugehörigen **Regeln**)*	***einfache Prozesse**, die auf Grund der Voraussetzungen ermöglicht werden sollen bzw. ermöglicht werden:* *(quantifizierbar z.B. durch eine **geringe Anzahl** notwendiger Operationen bzw. durch eine kurze Lösungszeit)*
D: Biowissenschaften D1: Untersuchung biologischer Phänomene mit Hilfe der Elektronenmikroskopie D11: Wegrechnen von Artefakten (Breitenbach, 2007, zitiert in Banse 2010) (ein Beispiel, *„das in den Technikwissenschaften durchaus viele Analoga hat“* (Banse 2010, S. 102) D111: Erkennung der tatsächlichen biologischen Strukturen	Ökonomie des Prozesses der Erkenntnis der *tatsächlichen* biologischen Strukturen	Bestimmung von lösungsrelevanten Makroelementen durch Erkennen von Artefakten bei der Elektronen-mikroskopie	ausgezeichnetes Modell auf der Basis der Makroelemente: *Wegrechnen* der erkannten Artefakte (analog zur technischen Beseitigung von durch Lichtbeugung erzeugten farbigen Ringen bei frühen Mikroskopen)	Prozesse mit geringerer Anzahl notwendiger Operationen zur Erkennung der *tatsächlichen* biologischen Strukturen als ohne die geschaffene Voraussetzung

* Weitere Erläuterungen im Text.

Anhang 2i: Schaffung von Voraussetzungen für einfache Prozesse als Erkenntnisprinzip: Beispiele aus der **Meteorologie***

Schaffung von Voraussetzungen für einfache Prozesse / D: Disziplin, D1: Teilgebiet/ Teilaspekt, D11: Beispiel, D111: Anforderung bzw. Ziel	*Bewertungs- und/oder Steuer-kriterium:* *Ökonomie (des Prozesses der Anforderungs-bewältigung)*	*auf dem Weg zur Schaffung von Voraussetzungen für einfache Prozesse:* *anforderungs-abhängige Bildung von Makroelementen (auf der Basis lösungsrelevanter Information)*	*angestrebte bzw. geschaffene Voraussetzungen für einfache Prozesse:* *ausgezeichnete Systeme (aus Strukturen bzw. Funktionen und dazugehörigen Regeln)*	*einfache Prozesse, die auf Grund der Voraussetzungen ermöglicht werden sollen bzw. ermöglicht werden:* *(quantifizierbar z.B. durch eine geringe Anzahl notwendiger Operationen bzw. durch eine kurze Lösungszeit)*
D: Meteorologie D1: Klimawandel D11: Aufstellung von Szenarien des künftigen Klima-wandels D111: Erkenntnisse zum anthropogenen An-teil des Klimawan-dels (auch als Basis für eine mögliche Ein-flussnahme auf die Klimaentwicklung im Erdsystem) (Bernhardt 2016, S. 43)	Ökonomie des Prozesses der (Beschreibung und) Erkenntnis von Gesetzmäßig-keiten des Klimawandels	Bildung von lösungsrelevanten Makroelementen durch Ableitung von Funktionen, die geeignete Kenngrößen des globalen Klimawandels darstellen. Beispiele: „Strahlungsantrieb“ „Klimasensitivität“	ausgezeichnetes System aus Funktionen natürlicher und anthropogener Einflussfaktoren auf den Klimawandel (auf der Basis gebildeter Makroelemente)	Prozesse mit möglichst geringer Anzahl notwendiger Operationen zur Erkennung des anthropogenen Anteils des zukünftigen Klimawandels

* Weitere Erläuterungen im Text.

Anhang 2j: Schaffung von Voraussetzungen für einfache Prozesse als Erkenntnisprinzip: Beispiele aus der **Kosmologie***

Schaffung von Voraussetzungen für einfache Prozesse D: Disziplin D1: Teilgebiet/ Teilaspekt D11: Beispiel D111: Anforderung bzw. Ziel	*Bewertungs- und/oder Steuer-kriterium:* *Ökonomie (des Prozesses der Anforderungs-bewältigung)*	*auf dem Weg zur Schaffung von Voraussetzungen für einfache Prozesse:* *anforderungs-abhängige Bildung von Makroelementen (auf der Basis lösungsrelevanter Information)*	*angestrebte bzw. geschaffene Voraussetzungen für einfache Prozesse:* *ausgezeichnete Systeme (aus Strukturen bzw. Funktionen und dazugehörigen Regeln)*	*einfache Prozesse, die auf Grund der Voraussetzungen ermöglicht werden sollen bzw. ermöglicht werden:* *(quantifizierbar z.B. durch eine geringe Anzahl notwendiger Operationen bzw. durch eine kurze Lösungszeit)*
D: Kosmologie D1: Erkennung der wesentlichen Grundlagen und Zusammenhänge der Bewegung der Himmelskörper D11: antike Epizykeltheorie der Planetenbewegung nach Ptolemäus (mit „Ausgleichspunkt“ (!) (vgl. Herrmann 2016, S. 175) D111: Erkenntnis und zutreffende Vorhersagen über künftige Planetenpositionen	Ökonomie des Prozesses der Erkenntnis und Vorhersage über künftige Planeten-positionen	Entwicklung von lösungsrelevanten Makroelementen in Form von Bestandteilen der Epizykeltheorie: – „Kreisbahn-dogma“: alle Bewegungen von Himmelskörpern sind auf gleichförmig durchlaufene reine Kreisbewegungen zurückzuführen – „Epizykel“: Kreisbahnen von Himmelskörpern, deren Mittelpunkte ebenfalls gleichförmig auf einem kreisförmigen Deferenten (Trägerkreis) umlaufen	ausgezeichnetes Modell auf der Basis der gebildeten Makroelemente und einem von Ptolemäus zusätzlich eingeführten „Ausgleichspunkt“, (wodurch er die Erde aus dem geometrischen Zentrum der Welt herausgenommen hatte (vgl. Herrmann 2016, S. 177)	im Rahmen der *damaligen* (!) Beobachtungs-genauigkeit: Prozesse mit geringerer Anzahl notwendiger Operationen zur Erkenntnis und Vorhersage über künftige Planetenpositionen als ohne die geschaffene Voraussetzung

* Weitere Erläuterungen im Text.

Anhang 3a: Schaffung von Voraussetzungen für einfache Prozesse als Gestaltungsprinzip: Beispiele aus der **Philosophie***

Schaffung von Voraussetzungen für einfache Prozesse / D: Disziplin, D1: Teilgebiet/ Teilaspekt, D11: Beispiel, D111: Anforderung bzw. Ziel	*Bewertungs- und/oder Steuer-kriterium:* *Ökonomie (des Prozesses der Anforderungs-bewältigung)*	*auf dem Weg zur Schaffung von Voraussetzungen für einfache Prozesse:* *anforderungs-abhängige **Bildung von Makroelementen** (auf der Basis lösungsrelevanter Information)*	*angestrebte bzw. geschaffene Voraussetzungen für einfache Prozesse:* *ausgezeichnete Systeme (aus **Strukturen** bzw. **Funktionen** und dazugehörigen **Regeln**)*	***einfache Prozesse**, die auf Grund der Voraussetzungen ermöglicht werden sollen bzw. ermöglicht werden:* *(quantifizierbar z.B. durch eine **geringe Anzahl** notwendiger Operationen bzw. durch eine kurze Lösungszeit)*
D: Philosophie/ Linguistik D1: Sprache als Mittel der Kommunikation D11: „Prinzip des geringsten Aufwandes" nach George K. Zipf (vgl. Hörz 2010) D111: effektive Kommunikation	Ökonomie des Kommunikationsprozesses	Bildung von lösungsrelevanten Makroelementen in Form von Klassen häufig und selten verwendeter Wörter: durch Kürzung von häufig verwendeten Wörtern in ihrer Lautsubstanz (während bei seltenen Wörtern größere Längen toleriert werden)	System aus spezifischen sprachlichen Teilstrukturen (basierend auf den Makroelementen) bestehend aus Klassen von häufig und selten verwendeten Wörtern	Prozesse der Kommunikation mit geringerer Anzahl notwendiger Operationen als ohne diese Voraussetzung (quantifizierbar z.B. auf der Basis der Anzahl der verwendeten Laute)
D: Philosophie D1: Sprache als Mittel der Kommunikation mit einem „Gegner" D11: „Rechthaberei" (Hörz 2010) D111: Erwirken unbedachter Äußerungen des Gegners	Ökonomie des Kommunikationsprozesses	Bildung von lösungsrelevanten Makroelementen durch Einfügung gezielter sprachlicher Erweiterungen, die inhaltlich gar nicht zur Debatte standen, in den Kommunikationsprozess (Bezug zu Schopenhauer!)	System aus spezifischen sprachlichen Teilstrukturen (basierend auf den Makroelementen), die den Gegner reizen, bis er Unbedachtes sagt	Prozesse der Kommunikation mit geringerer Anzahl notwendiger Operationen bis zu dem Zeitpunkt, an dem der Gegner aufgibt als ohne diese Voraussetzung (quantifizierbar z.B. in Anzahl von Zeiteinheiten)

* Weitere Erläuterungen im Text.

Anhang 3b: Schaffung von Voraussetzungen für einfache Prozesse als Gestaltungsprinzip: Beispiele aus der **Ethik***

Schaffung von Voraussetzungen für einfache Prozesse	*Bewertungs- und/oder Steuer-kriterium:*	*auf dem Weg zur Schaffung von Voraussetzungen für einfache Prozesse:*	*angestrebte bzw. geschaffene Voraussetzungen für einfache Prozesse:*	*einfache Prozesse, die auf Grund der Voraussetzungen ermöglicht werden sollen bzw. ermöglicht werden:*
D: Disziplin D1: Teilgebiet/ Teilaspekt D11: Beispiel D111: Anforderung bzw. Ziel	*Ökonomie (des Prozesses der Anforderungs-bewältigung)*	*anforderungs-abhängige Bildung von Makroelementen (auf der Basis lösungsrelevanter Information)*	*ausgezeichnete Systeme (aus Strukturen bzw. Funktionen und dazugehörigen Regeln)*	*(quantifizierbar z.B. durch eine geringe Anzahl notwendiger Operationen bzw. durch eine kurze Lösungszeit)*
D: Philosophie D1: Ethik D11: Gleichberechtigung der Frau D111: Ausgestaltung der Gleichberechtigung der Frau in unterschiedlichen Ländern (Hörz, H.E. 2016)	Ökonomie des Prozesses zur Ausgestaltung der Gleich-berechtigung der Frau	Bildung von lösungsrelevanten Makroelementen in Form von funktionellen Teil-strukturen aus relevanten Begriffen wie „Diskriminierung der Frau“ und damit zusammenhängenden Beziehungen und Aktionen (auf der Basis der Abstraktion von den lokalen und regionalen Bedingungen)	Rahmenstruktur zur übergreifenden Orientierung für die Umsetzung in nationales Recht (basierend auf den Makroelementen): *UNO-Konvention „Über die Beseitigung aller Formen der Diskriminierung der Frau“*	Prozesse zur Ausgestaltung der Gleich-berechtigung der Frau unter den jeweiligen konkreten Bedingungen mit möglichst geringer Anzahl von Misserfolgen – und damit u. U. relativ geringer Anzahl von notwendigen Wiederholungen der Versuche
D: Philosophie D1: Ethik D11: Gestaltung von Gesetzen D111: Verhinderung des Entstehens von Ungleichbehandlung (Hörz, H. E. 2016)	Ökonomie des Prozesses zur Gestaltung von Gesetzen unter Einbeziehung einer Geschlechter-perspektive	Bildung von lösungsrelevanten Makroelementen in Form von funktionellen Teilstrukturen - basierend auf dem Menschen als biopsychosoziale Einheit	Rahmenstruktur zur Gesetzesgestaltung bei Verhinderung des Entstehens von Ungleichbehandlung (basierend auf den Makroelementen): *„Gender-Mainstreaming“*	Prozesse zur Gestaltung von Gesetzen ohne Ungleichbehandlung mit möglichst geringer Anzahl von Misserfolgen – und damit u. U. relativ geringer Anzahl von notwendigen Wiederholungen der Gesetzes-gestaltung

* Weitere Erläuterungen im Text.

Anhang 3c: Schaffung von Voraussetzungen für einfache Prozesse als Gestaltungsprinzip: Beispiele aus der **Kunst-** und **Literaturwissenschaft** sowie aus der **Translatologie***

Schaffung von Voraussetzungen für einfache Prozesse / D: Disziplin, D1: Teilgebiet/ Teilaspekt, D11: Beispiel, D111: Anforderung bzw. Ziel	*Bewertungs- und/oder Steuer-kriterium:* *Ökonomie (des Prozesses der Anforderungs-bewältigung)*	*auf dem Weg zur Schaffung von Voraussetzungen für einfache Prozesse:* *anforderungs-abhängige Bildung von Makroelementen (auf der Basis lösungsrelevanter Information)*	*angestrebte bzw. geschaffene Voraussetzungen für einfache Prozesse:* *ausgezeichnete Systeme (aus Strukturen bzw. Funktionen und dazugehörigen Regeln)*	*einfache Prozesse, die auf Grund der Voraussetzungen ermöglicht werden sollen bzw. ermöglicht werden:* *(quantifizierbar z.B. durch eine geringe Anzahl notwendiger Operationen bzw. durch eine kurze Lösungszeit)*
D: Kunst- und Literaturwissenschaft D1: Sprache als Mittel der Kommunikation zwischen Künstler und Rezipienten D11: intendierter Rezipient: aufstrebende bürgerliche Gesellschaft D111: Verstehen des Kunstwerkes (Dill 2010)	Ökonomie des Verstehens-prozesses	Bestimmung von lösungsrelevanten Makroelementen in Form sprachlicher und bildhafter Teilstrukturen „auf bürgerliche Belehrung, Aufklärung, Nützlichkeit und Sparsamkeit orientiert“ (vgl. Dill 2010)	Rahmenstruktur zum Verstehen von Kunstwerken (basierend auf den Makroelementen) – begründet durch Methoden der Aufklärung und Klassik als literarisch-künstlerischer Ausdruck der aufstrebenden bürgerlichen Gesellschaft	Prozesse mit geringerer Anzahl notwendiger Operationen bis zu dem Zeitpunkt des Verstehens des Kunstwerkes durch den Rezipienten als ohne diese Voraussetzung (quantifizierbar z.B. in Anzahl von Zeiteinheiten)
D: Translatologie D1: mediative interkulturelle Kommunikation D11: Abstract-Übersetzung D111: Erzeugung *brauchbarer* Abstracts (Salevsky/Müller 2016)	Ökonomie des Übersetzungs-prozesses	Bildung von lösungsrelevanten Makroelementen in Form funktioneller Teilstrukturen durch Ermittlung wesentlicher Einflussparameter im Übersetzungs-prozess sowie experimentell nachgewiesener Wechselwirkungen zwischen den Parametern	Rahmenstruktur zur Gestaltung von Übersetzungsprozessen (basierend auf den Makroelementen) durch Aufdeckung der Dynamik des Prozesses mit Hilfe des „*Sensitivitätsmodells Prof. Vester®*“	Übersetzungsprozesse mit geringerer Anzahl notwendiger Operationen bis zur Erzeugung *brauchbarer* Abstracts (robust gegenüber Störungen und gekennzeichnet durch Vermeidung von Strategiefehlern) als ohne diese Voraussetzung

* Weitere Erläuterungen im Text.

Anhang 3d: Schaffung von Voraussetzungen für einfache Prozesse als Gestaltungsprinzip: Beispiele aus der **Pädagogik** und aus der **Medizin***

Schaffung von Voraussetzungen für einfache Prozesse	*Bewertungs- und/oder Steuer-kriterium:*	*auf dem Weg zur Schaffung von Voraussetzungen für einfache Prozesse:*	*angestrebte bzw. geschaffene Voraussetzungen für einfache Prozesse:*	*einfache Prozesse, die auf Grund der Voraussetzungen ermöglicht werden sollen bzw. ermöglicht werden:*
D: Disziplin D1: Teilgebiet/ Teilaspekt D11: Beispiel D111: Anforderung bzw. Ziel	*Ökonomie (des Prozesses der Anforderungs-bewältigung)*	*anforderungs-abhängige Bildung von Makroelementen (auf der Basis lösungsrelevanter Information)*	*ausgezeichnete Systeme (aus Strukturen bzw. Funktionen und dazugehörigen Regeln)*	*(quantifizierbar z.B. durch eine geringe Anzahl notwendiger Operationen bzw. durch eine kurze Lösungszeit)*
D: Pädagogik/Didaktik D1: Lehr-Lern-Prozess D11: „Allgemeines Pädagogisches Funktionsmodell der Erziehung“ (Prüß/ Franz 2021; Naumann/Werner 2016, 2019) D111: erfolgreicher Lehr-Lern-Prozess	Ökonomie des Lehr-Lern-Prozesses	Definition von lösungsrelevanten Makroelementen in Form von Prinzipienkategorien zur Gestaltung von Lehr-Lern-Prozessen – resultierend aus einer strukturellen und funktionalen Betrachtung des pädagogischen Prozesses	Rahmenstruktur zur Gestaltung von Lehr-Lern-Prozessen (basierend auf den Makroelementen): *„Allgemeines Pädagogisches Funktionsmodell der Erziehung“*, das den Systemgesetzen von Lehr-Lern-Prozessen entspricht	Lehr-Lern-Prozesse mit geringerer Anzahl notwendiger Operationen bis zum Erfolg (gekennzeichnet durch relativ wenig Misserfolge und damit relativ wenig erforderliche Wiederholungen bzw. Änderungen von Teilprozessen) als ohne diese Voraussetzung
D: Medizin D1: Neurologie D11: Entwicklung von Medikamenten für die Antikörpertherapie (Meisel in diesem Band) D111: erfolgreicher Therapieprozess	Ökonomie des Therapie-prozesses	Bestimmung von lösungsrelevanten Makroelementen in Form von funktionellen Teilstrukturen – auf der Basis eines möglichst genauen Verständnisses der den Erkrankungen zugrundeliegenden pathopsychologischen Prozesse auf organismischer, zellulärer und molekularer Ebene	Rahmenstruktur zur Gestaltung von Therapie-prozessen (basierend auf den Makroelementen): Begründet durch eine gut aufgeklärte Kausalkette und unter Berücksichtigung einer Funktion von Risiko und Nutzensabwägung (Schritte zur Konkretisierung für das Beispiel der Medikamentenentwicklung: in Box 1 in Meisel in diesem Band)	Therapieprozesse mit geringerer Anzahl notwendiger Operationen bis zum Erfolg (gekennzeichnet durch relativ wenig Misserfolge und Nebenwirkungen und damit relativ wenig erforderliche Anwendungen weiterer Therapieformen) als ohne diese Voraussetzung

* Weitere Erläuterungen im Text.

Anhang 3e: Schaffung von Voraussetzungen für einfache Prozesse als Gestaltungsprinzip: Beispiel aus der **Molekularbiologie** und **Medizin***

Schaffung von Voraussetzungen für einfache Prozesse / D: Disziplin, D1: Teilgebiet/ Teilaspekt, D11: Beispiel, D111: Anforderung bzw. Ziel	*Bewertungs- und/oder Steuer-kriterium:* *Ökonomie (des Prozesses der Anforderungs-bewältigung)*	*auf dem Weg zur Schaffung von Voraussetzungen für einfache Prozesse:* *anforderungs-abhängige Bildung von Makroelementen (auf der Basis lösungsrelevanter Information)*	*angestrebte bzw. geschaffene Voraussetzungen für einfache Prozesse:* *ausgezeichnete Systeme (aus Strukturen bzw. Funktionen und dazugehörigen Regeln)*	*einfache Prozesse, die auf Grund der Voraussetzungen ermöglicht werden sollen bzw. ermöglicht werden:* *(quantifizierbar z.B. durch eine geringe Anzahl notwendiger Operationen bzw. durch eine kurze Lösungszeit)*
D: Molekularbiologie und Medizin (Coutelle 2016) D1: Gentherapie (eine auf Gentransfer beruhende Behandlung menschlicher Erkrankungen) D11: Reduktion und Modifikation eines (natürlich vorkommenden) pathogenen Virus – als Basis für eine therapeutische Genexpression D111: erfolgreicher Therapieprozess	Ökonomie des Therapieprozesses	Bildung von lösungsrelevanten Makroelementen in Form von – pathogenen DNA-Sequenzen eines natürlich vorkommenden pathogenen Virus und – therapeutischen DNA-Sequenzen	Therapeutisches Virus (basierend auf den Makroelementen): neu gestaltet durch Manipulation des entsprechenden pathogenen Virusgenoms mittels – Reduktion: Ausscheiden pathogener DNA-Sequenzen und – Modifikation: Einfügen therapeutischer DNA-Sequenzen und geeigneter Promotoren	Therapie-Prozesse mit möglichst geringer Anzahl notwendiger Operationen bis zum Erfolg (gekennzeichnet durch relativ wenig Misserfolge und Nebenwirkungen und damit relativ wenig erforderliche Anwendungen weiterer Therapieformen)

* Weitere Erläuterungen im Text.

Anhang 3f: Schaffung von Voraussetzungen für einfache Prozesse als Gestaltungsprinzip: Beispiele aus der **Biochemie***

Schaffung von Voraussetzungen für einfache Prozesse / D: Disziplin, D1: Teilgebiet/ Teilaspekt, D11: Beispiel, D111: Anforderung bzw. Ziel	*Bewertungs- und/oder Steuer-kriterium:*	*auf dem Weg zur Schaffung von Voraussetzungen für einfache Prozesse:*	*angestrebte bzw. geschaffene Voraussetzungen für einfache Prozesse:*	*einfache Prozesse, die auf Grund der Voraussetzungen ermöglicht werden sollen bzw. ermöglicht werden:*
	Ökonomie (des Prozesses der Anforderungs-bewältigung)	*anforderungs-abhängige Bildung von Makroelementen (auf der Basis lösungsrelevanter Information)*	*ausgezeichnete Systeme (aus Strukturen bzw. Funktionen und dazugehörigen Regeln)*	*(quantifizierbar z.B. durch eine geringe Anzahl notwendiger Operationen bzw. durch eine kurze Lösungszeit)*
D: Biochemie (Müller 2010) D1: Kriminal- und Medizinische Diagnostik D11: Polymerasekettenreaktion (PCR) D111: erfolgreicher Diagnostikprozess	Ökonomie des Diagnostik–prozesses	Bildung von lösungsrelevanten Makroelementen durch: – Denaturierung: Auftrennung eines doppelsträngigen Stückes DNA (durch Wärmezufuhr) in die Einzelstränge – Primeranlagerung: an jeden Einzelstrang werden kurze terminale Primer angelagert – DNA-Synthese: durch eine DNA-Polymerase werden die Primer entsprechend der DNA-Matrize zum vollständigen DNA-Strang aufgefüllt	Diagnostisches System (PCR-Test) (basierend auf den Makroelementen): durch iterative Zyklen von Denaturierung, Primeranlagerung und DNA-Synthese wird eine exponentielle Vermehrung der ursprünglichen DNA-Menge erreicht.	Diagnostikprozesse mit möglichst geringer Anzahl notwendiger Operationen bis zum Nachweis eines bestimmten Abschnitts der DNA (gekennzeichnet durch relativ wenig Falschaussagen)

* Weitere Erläuterungen im Text.

Anhang 3g: Schaffung von Voraussetzungen für einfache Prozesse als Gestaltungsprinzip: Beispiel aus den **Rechtswissenschaften** für Voraussetzungen, die zwar angestrebt wurden bzw. werden, im Allgemeinen jedoch aus objektiven Gründen nicht im angestrebten Sinne geschaffen werden konnten bzw. können*

Schaffung von Voraussetzungen für einfache Prozesse	*Bewertungs- und/oder Steuer-kriterium:*	*auf dem Weg zur Schaffung von Voraussetzungen für einfache Prozesse:*	*angestrebte bzw. geschaffene Voraussetzungen für einfache Prozesse:*	*einfache Prozesse, die auf Grund der Voraussetzungen ermöglicht werden sollen bzw. ermöglicht werden:*
D: Disziplin D1: Teilgebiet/ Teilaspekt D11: Beispiel D111: Anforderung bzw. Ziel	*Ökonomie (des Prozesses der Anforderungs-bewältigung)*	*anforderungs-abhängige Bildung von Makroelementen (auf der Basis lösungsrelevanter Information)*	*ausgezeichnete Systeme (aus Strukturen bzw. Funktionen und dazugehörigen Regeln)*	*(quantifizierbar z.B. durch eine geringe Anzahl notwendiger Operationen bzw. durch eine kurze Lösungszeit)*
D: Rechtswissen-schaften D1: Verhältnis von Ge-setz und Gericht (Klenner 2016) D11: Gesetzessamm-lung des römischen Kaisers Justinian D111: erfolgreicher Ent-scheidungsprozess innerhalb einer Rechtsordnung	Ökonomie von Entscheidungs-prozessen innerhalb einer Rechtsordnung	Bestimmung von lösungsrelevanten Makroelementen in Form von Rechtsnormen	Rechtsordnung: konstruiert aus einer Menge von Rechtsnormen zu einer Gesamtheit von Rechtsnormen (basierend auf der Menge der Makroelemente)	Entscheidungsprozesse innerhalb dieser Rechtsordnung mit minimaler Anzahl von Operationen bis zum Erfolg: Ableitung aller als rechtmäßig zu charakterisierenden Gerichtsurteile und Verwaltungs-entscheidungen über Recht und Unrecht

* Weitere Erläuterungen im Text.

Autorin und Autoren

Prof. Dr. Herbert Hörz
Hirtschulzstraße 13
12621 Berlin
herbert.hoerz@t-online.de

Prof. Dr. Werner Krause
Anna-Siemsen-Str. 40
07745 Jena
urwe.krause@t-online.de

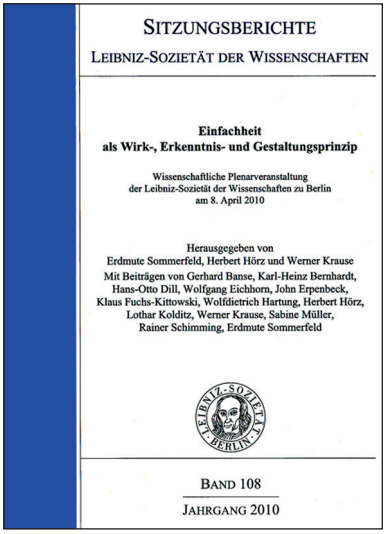
Prof. Dr. Andreas Meisel
Klinik für Neurologie mit experimenteller Neurologie
Charité Universitätsmedizin Berlin
Charitéplatz 1
10117 Berlin
Andreas.meisel@charite.de

Prof. Dr. Franz Prüß
Seidelstrasse 5
18273 Güstrow
franz@pruess.eu
pruess@uni-greifswald.de

Prof. Dr. Rainer Schimming
Paul-Engelhard-Str. 71 a
14469 Potsdam
rschimming@t-online.de

Prof. Dr. Erdmute Sommerfeld
Chausseestr. 175
15712 Königs Wusterhausen
erdmute.sommerfeld@t-online.de

Dr. Alexander Unzicker
Pestalozzi-Gymnasium München
Eduard-Schmidt-Str. 1
81549 München
aunzicker@web.de



Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät, Band 108 (2011)

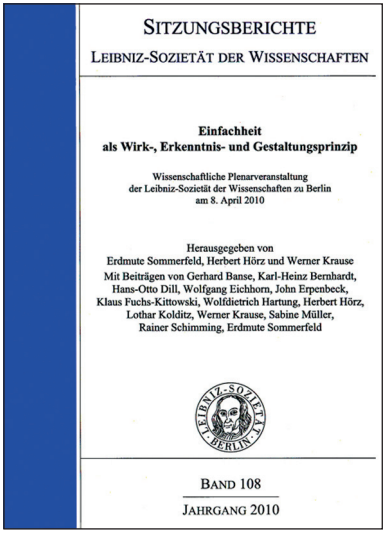
Einfachheit als Wirk-, Erkenntnis und Gestaltungsprinzip

2011, 166 S., ISBN 978-3-89626-953-9, 19,80 EUR

Inhalt des Bandes

- Vorwort
- *Erdmute Sommerfeld:* Einführung
- *Herbert Hörz:* Philosophischer Reduktionismus oder wissenschaftlich berechtigte Reduktionen? Zu den erkenntnistheoretischen Grundlagen des Prinzips Einfachheit
- *Werner Krause:* Einfachheit und menschliche Informationsverarbeitung?
- *Sabine Müller:* Einfachheit biochemischer Komplexität – ein Widerspruch?
- *Rainer Schimming:* Optimierung von Erkenntnis: Einfachheit, Einheitlichkeit, Anschaulichkeit
- *John Erpenbeck:* Vereinfachung durch Komplexität. Persönlichkeitseigenschaften und Kompetenzen
- *Gerhard Banse:* „Nicht so exakt wie möglich, sondern so genau wie nötig!“ Das Einfachheitsprinzip in den Technikwissenschaften
- *Hans-Otto Dill:* Einfachheit vs. Komplexität in Literatur, Kunst und Wissenschaft -
- *Wolfgang Eichhorn:* Ockhams Rasiermesser und Karl Mengers Gegenstück
- *Klaus Fuchs-Kittowski:* Zur Diskussion über Vereinfachung und Reduktion als Methode ,
- *Wolfdietrich Hartung:* Anmerkungen zur Einfachheit aus der Perspektive eines Linguisten
- *Lothar Kolditz:* Diskussionsbemerkung in der Plenarveranstaltung „Einfachheit als Wirk-, Erkenntnis- und Gestaltungsprinzip“
- *Erdmute Sommerfeld:* Einfachheit – ein Grundprinzip in den unterschiedlichsten Disziplinen? Anregungen zur interdisziplinären Diskussion
- Abschließende Bemerkungen des Vizepräsidenten *Gerhard Banse*

Bestellungten über jede guten Buchhandlung oder direkt beim Verlag
trafo Wissenschaftsverlag, Finkenstraße 8, 12621 Berlin
http://www.trafoberlin.de Mail: Info@trafoberlin.de
http://www.trafoberlin.de/reihe_leibniz.html



Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät, Band 108 (2011)

Einfachheit als Wirk-, Erkenntnis und Gestaltungsprinzip

2011, 166 S., ISBN 978-3-89626-953-9, 19,80 EUR

Inhalt des Bandes

- Vorwort
- *Erdmute Sommerfeld:* Einführung
- *Herbert Hörz:* Philosophischer Reduktionismus oder wissenschaftlich berechtigte Reduktionen? Zu den erkenntnistheoretischen Grundlagen des Prinzips Einfachheit
- *Werner Krause:* Einfachheit und menschliche Informationsverarbeitung?
- *Sabine Müller:* Einfachheit biochemischer Komplexität – ein Widerspruch?
- *Rainer Schimming:* Optimierung von Erkenntnis: Einfachheit, Einheitlichkeit, Anschaulichkeit
- *John Erpenbeck:* Vereinfachung durch Komplexität. Persönlichkeitseigenschaften und Kompetenzen
- *Gerhard Banse:* „Nicht so exakt wie möglich, sondern so genau wie nötig!“ Das Einfachheitsprinzip in den Technikwissenschaften
- *Hans-Otto Dill:* Einfachheit vs. Komplexität in Literatur, Kunst und Wissenschaft -
- *Wolfgang Eichhorn:* Ockhams Rasiermesser und Karl Mengers Gegenstück
- *Klaus Fuchs-Kittowski:* Zur Diskussion über Vereinfachung und Reduktion als Methode ,
- *Wolfdietrich Hartung:* Anmerkungen zur Einfachheit aus der Perspektive eines Linguisten
- *Lothar Kolditz:* Diskussionsbemerkung in der Plenarveranstaltung „Einfachheit als Wirk-, Erkenntnis- und Gestaltungsprinzip“
- *Erdmute Sommerfeld:* Einfachheit – ein Grundprinzip in den unterschiedlichsten Disziplinen? Anregungen zur interdisziplinären Diskussion
- Abschließende Bemerkungen des Vizepräsidenten *Gerhard Banse*

Bestellungten über jede guten Buchhandlung oder direkt beim Verlag
trafo Wissenschaftsverlag, Finkenstraße 8, 12621 Berlin
http://www.trafoberlin.de Mail: Info@trafoberlin.de
http://www.trafoberlin.de/reihe_leibniz.html

Gerhard Banse

Technik – Technologie – Technikwissenschaften. Beiträge zur Technikphilosophie

2021, 486 S., zahlr. Tab. u. Abb.
ISBN 978-3-86464-233-3, 44,80 EUR
http://www.trafoberlin.de/978-3-86464-233-3.html

Über Technik wurde zu allen Zeiten – wenn auch in unterschiedlich starkem Maße – philosophisch reflektiert, denn: Technikphilosophie war und ist herausgefordert, den sich verändernden technischen „Kontexten" zu entsprechen. Unter „Technikphilosophie" werden hier all jene kognitiven, methodologischen und normativen Überlegungen subsumiert, die sich auf Technik, technisches Handeln, Technikwissenschaften, technische Entwicklung und die Beziehungen zwischen Technik und Gesellschaft beziehen. Der spezifische Anspruch ist mit Stichworten wie Welterklärung, Lebens- und Entscheidungshilfe sowie Orientierungswissen verbunden, was sich sowohl auf die Voraussetzungen und die Nutzung als auch um die Folgen und Wirkungen technischer und technikwissenschaftlicher Entwicklungen bezieht.
Die in diesem Band vereinten Überlegungen verstehen sich als angemessener Beitrag zu den vorstehend genannten Herausforderungen. Sie sind in den zurückliegenden gut zwei Jahrzehnten insbesondere im Zusammenhang mit Aktivitäten (Vorträge und Projekte) innerhalb der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften zu Berlin und im Rahmen des International Network on Cultural Diversity and New Media (CultMedia) entstanden publiziert worden. Beide Institutionen boten (und bieten!) stets Gelegenheiten, konzeptionelle technikphilosophische Denkansätze vorzustellen, zu diskutieren und weiterzuführen. Ausgewählt wurden 22 Beiträge, die den Schwerpunkten

- Technik und Technikwissenschaften,
- Allgemeine Technologie,
- Technik und Kultur,
- Neue Medien und kulturelle Diversität sowie
- Risiko und (Un-)Sicherheit

zugeordnet wurden. Jede der fünf Gruppen enthält mindestens eine Grundidee als Beitrag zut weiteren konzeptionellen Grundlegung der Technikphilosophie. Diese wird sowohl entfaltet als auch aufgegriffen und weiterentwickelt, variiert oder auf andere Bereiche übertragen bzw. in andere Zusammenhänge gestellt: So lässt sich auch die „Ideen-" oder „Konzept-Genese" bzw. „-Transformation" nachvollziehen.

ISSN 0947-5850
ISBN 978-3-86464-226-5