

Begegnungen 4&

Frank Vogelsang, Almuth M.D. Hattenbach, Thomas Kirchhoff,
Hubert Meisinger (Hg.)

Was die Welt im Innersten zusammenhält

Das Konzept der Materie im interdisziplinären Vergleich

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen
Nationalbibliografie, detaillierte bibliografische Daten sind im Internet unter
<http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Impressum:

Evangelische Akademie im Rheinland
Friedrich-Breuer-Straße 86
53225 Bonn
www.ev-akademie-rheinland.de

Umschlagentwurf und Typografie: art work shop GmbH, Düsseldorf
Titelbild: © picture-alliance/akg-images. Michelangelo Buonarotti
„Die Erschaffung Adams“ (1511/12). Ausschnitt: Hand Gottes und Hand Adams,
bearbeitet. Fresko, Rom, Vatikan, Cappella Sistina (Foto vor der Restaurierung).

Für den Druck bearbeitet von Dorothea A. Zügner, Wachtberg

© 2017 Evangelische Akademie im Rheinland, Bonn
Die Publikation und alle in ihr enthaltenen Beiträge sind urheberrechtlich geschützt.
Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechts ist ohne Zustimmung
des jeweiligen Autors bzw. der jeweiligen Autorin und der Evangelischen Akademie
im Rheinland nicht zulässig.

Druck: Harfe-Verlag und Druckerei GmbH
ISBN 978-3-937621-52-4

Frank Vogelsang, Almuth M.D. Hattenbach, Thomas Kirchhoff, Hubert Meisinger	
Vorwort	5
Brigitte Falkenburg	
Mechanistische Erklärung und ihre Grenzen	7
Ulrich Beuttler	
Fundamentalstruktur, Innenseite und Kreativität der Materie	33
Hans-Jürgen Fischbeck	
Materie als ontologische Kategorie: Dialektischer Materialismus vs. Naturalismus	43
Karen Gloy	
„Daß ich erkenne, was die Welt im Innersten zusammenhält [...]“ Goethe, Faust I, Vers 582f.	53
Thomas Kirchhoff	
Landschaften – materielle oder geistige Einheiten?	75
Elisabeth Loos	
Leben – nur manipulierbare Materie? Der biologische Lebensbegriff und die Synthetische Biologie	91
Andreas Losch	
Abwärts gerichtete Kausalität – wirken so Geist und Materie zusammen?	111
Eberhard Müller	
Vom Licht zur Materie	131
Jan C. Schmidt	
Materie ist nicht primitiv...	149
Zur Naturphilosophie der Selbstorganisation: Systematische und historische Bemerkungen	
Lorns-Olaf Stahlberg	
Higgsfeld und Schöpfergeist	171
Über religiöse Schöpfungsberichte und naturwissenschaftliche Welt-Erzählungen	
Frank Vogelsang	
Bewusstsein und Materie – tertium non datur?	193

Brigitte Falkenburg

Mechanistische Erklärung und ihre Grenzen

Die Erfolgsgeschichte der neuzeitlichen Naturwissenschaften beruht auf der experimentellen Methode und den mathematischen Modellen der Physik Galileis und Newtons. Eng verbunden damit war die Begründung des mechanistischen Weltbilds, in dessen Rahmen man annahm, dass alle materiellen Körper aus mechanischen Korpuskeln oder Atomen bestehen und den Gesetzen der klassischen Mechanik gehorchen. Das mechanistische Denken dominierte die Naturerkenntnis bis zum Ende des 19. Jahrhunderts, doch mit dem Beginn der modernen Atomphysik stellte sich heraus, dass ein mechanistisches Verständnis der Natur im Sinne der klassischen Physik dem Aufbau der Materie und den Wechselwirkungen der subatomaren Teilchen nicht gerecht wird. Die mechanistische Betrachtungsweise der Natur wurde im 20. Jahrhundert jedoch auf die moderne Physik, Chemie und Biologie verallgemeinert, bis hin zur Erforschung neuronaler Mechanismen in der Neurowissenschaft.

Allerdings muss man sich genau ansehen, was „mechanistisch“ dabei heute noch heißt. In der philosophischen Diskussion um die Biologie und die Hirnforschung wird oft nicht hinterfragt, was mechanistische Erklärungen eigentlich sind und welche Tragweite sie haben. Szientisten, die eine vollständige naturwissenschaftliche Welterklärung für möglich halten, unterstellen dabei oft, dass die mechanistischen Erklärungen der Naturwissenschaften von der Physik bis zur kognitiven Neurowissenschaft ein deterministisches Weltbild begründen, in dem es keinen genuinen Platz mehr für den menschlichen Geist und den freien Willen als etwas Irreduzibles gibt. Wie weit reicht aber die mechanistische Begründungsleistung der Naturwissenschaften heute und wo sind ihre Grenzen?¹

1. Mechanismen

Sehen wir uns zunächst an, was man unter einem Mechanismus versteht. Im allgemeinsten Sinne handelt es sich dabei um einen kausalen Wirkungs-

1 Die folgenden Ausführungen beruhen auf Falkenburg 2012a, 2014.

zusammenhang, genauer: um ein System von Elementen, die so zusammenwirken, dass sie einen Prozess zustande bringen oder verursachen.

Definition 1: Ein Mechanismus ist ein System von Elementen, die so zusammenwirken, dass sie einen Prozess zustande bringen oder verursachen.

Der Hintergrund der Rede von Mechanismen ist das mechanistische Weltbild des 18. und 19. Jahrhunderts, nach dem man annahm, dass die Naturprozesse funktionieren wie Maschinen. Das Vorbild dabei war der Vergleich des Sonnensystems oder des Weltenbaus insgesamt mit einer Uhr. Heute liefern die System- und Prozessbeschreibungen der modernen Naturwissenschaften die Grundlage. Dabei gehorchen die wenigsten Mechanismen den Gesetzen der klassischen Mechanik – angefangen mit der Dampfmaschine, deren Wirkungsweise auf der Thermodynamik beruht.

Das simpelste Beispiel für einen Mechanismus ist eine Uhr, als Mechanismus, der die Zeit anzeigt. Das Systemganze ist die Uhr. Die kausalen Komponenten sind die Unruhe und die Zahnräder im Inneren der Uhr; sie greifen so ineinander, dass sie die Uhrzeiger bewegen. Und das Phänomen ist der Zeigerstand, der auf dem Zifferblatt die Uhrzeit anzeigt (Abb. 1.1).

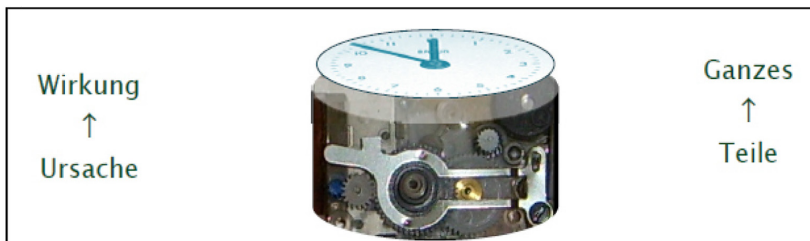


Abb. 1.1: Mechanismus einer Uhr

Die kausalen Vorgänge in einem Mechanismus beruhen immer auch auf thermischen Vorgängen, die irreversibel sind und die die Zeitrichtung festlegen. Das gilt auch schon für die Uhr. Andernfalls hätte der kausale Mechanismus keine intrinsische zeitliche Richtung. Für eine Uhr wäre dies fatal! Dabei verbrauchen alle technischen Mechanismen Energie. Eine mechanische Uhr muss aufgezogen werden, sonst bleibt sie stehen; und ein Wecker wie der hier Gezeigte funktioniert nur mit einer Batterie. Eine Uhr

ist letztlich eine Maschine, die zwei Uhrzeiger bewegt. Maschinen wie der Herd, der Kühlschrank oder die Dampfmaschine leisten Arbeit. Sie ist damit erkaufte, dass Energie verbraucht wird und nach dem 2. Hauptsatz der Thermodynamik die Entropie irreversibel ansteigt. Und jede Maschine hat nur einen beschränkten Wirkungsgrad, d.h. Etliches von der Energie, die sie verbraucht, verpufft in die Umgebung.

Maschinen sind von Menschenhand gebaut. Wie verhält es sich aber mit den Mechanismen in der Natur, zu denen auch das neuronale Geschehen im Gehirn zählt? Ein Beispiel für einen praktisch reibungsfreien natürlichen Mechanismus, der angenähert nach den deterministischen Gesetzen der klassischen Mechanik funktioniert, ist das Sonnensystem (Abb. 1.2).

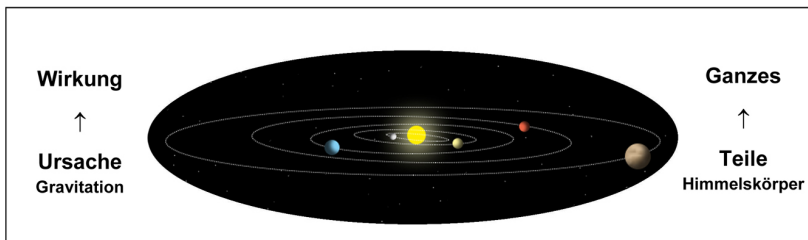


Abb. 1.2: Das Sonnensystem – ein deterministischer Mechanismus

Die Teile des Mechanismus sind die Sonne, Planeten und Monde; sie fungieren nach den Gesetzen der Schwerkraft als kausale Komponenten, die das Systemganze in seiner näherungsweise elliptischen, scheibenförmigen Gestalt hervorbringen. Reibungsfrei ist das System, weil sich die Planeten und die Sonne im Vakuum bewegen; eine Atmosphäre, die Bewegungen abbremsst, gibt es nur in der unmittelbaren Umgebung der Planeten. Das Sonnensystem ist seit Jahrmilliarden stabil und wird es auch noch ein paar Jahrmilliarden lang bleiben. Es inspirierte schon Laplace, der sich eingehend mit der Himmelsmechanik befasste, zur Vorstellung seines allwissenden Dämons, der den deterministischen Weltlauf berechnen könnte. Auch das Sonnensystem ist jedoch in den kosmischen Energiekreislauf eingebunden, der den Gesetzen der Thermodynamik unterliegt. Es entstand bei der Strukturbildung im Universum aus einem glühenden Materiewirbel; und es wird

vergehen, wenn die Stoffe für die Kernfusion in der Sonne aufgebraucht sind.

Das dritte Beispiel für einen physikalischen Mechanismus ist der Aufbau der Materie, etwa eines Minerals, aus Atomen und subatomaren Teilchen (Abb. 1.3). Die kausalen Komponenten sind hier die Atome und ihr Aufbau aus Atomkernen und Elektronen. Die subatomaren Kräfte bestimmen, wie sich die Atomkerne und Elektronen zu Atomen verbinden und einen Festkörper bilden. Dabei legt die Beweglichkeit der Elektronen im Festkörper fest, welche magnetischen und optischen Eigenschaften ein Mineral hat. Auch ein Mineral und die Atome darin sind extrem stabile Gebilde, deren innere Mechanismen reibungsfrei funktionieren – doch auch sie sind den Gesetzen der Thermodynamik unterworfen. Ihre Stabilität hängt von der Temperatur ab. Wenn ein Komet der Sonne zu nah kommt, werden die Mineralien, aus denen er besteht, mit zunehmender Hitze erst flüssig; dann verdampfen sie; und schließlich lösen sich auch noch die Atome in ein Plasma auf.

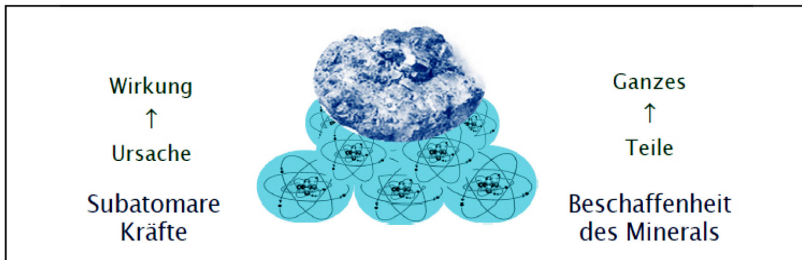


Abb. 1.3: Atomare Mechanismen in einem Mineral

Die Rede von Mechanismen ist heute in Wissenschaft und Technik ubiquitär. Man spricht auch von Mechanismen der physikalischen Signalübertragung, etwa durch Licht oder Funksignale, vom Wirkungsmechanismus der Dampfmaschine, vom elektro- und thermodynamischen Mechanismus der Entstehung eines Gewitters, von astrophysikalischen Mechanismen der Entstehung von kosmischer Strahlung, usw. Beispiele aus der Biologie sind die Mechanismen der Photosynthese, der Reduplikation der DNS oder der Genexpression; sowie Beispiele aus der Neurowissenschaft wie die Mustererkennung und das Lernen durch ein neuronales Netz.

2. Mechanistische Erklärung

Für das Verständnis von mechanistischen Erklärungen ist es wichtig, zwei Typen von Mechanismen zu unterscheiden – einfache, die innerhalb einer Ebene von Objekten und Prozessen wirken (Ein-Level-Mechanismen), und komplexere, die mehrere Ebenen haben (Multi-Level-Mechanismen).

Ein-Level-Mechanismen bewirken die Übertragung einer Wirkung oder eines Signals in einem eindimensionalen kausalen Prozess. Beispiele hierfür sind das Leisten von Arbeit mit einem Hebel oder einem Flaschenzug; die Übertragung eines physikalischen Signals von einem Sender durch Funk (Radiowellen) auf einen Empfänger; oder auch die Übertragung eines chemischen Signals von einer Nervenzelle auf eine andere durch einen Neurotransmitter an einer Synapse (Abb. 2.1).

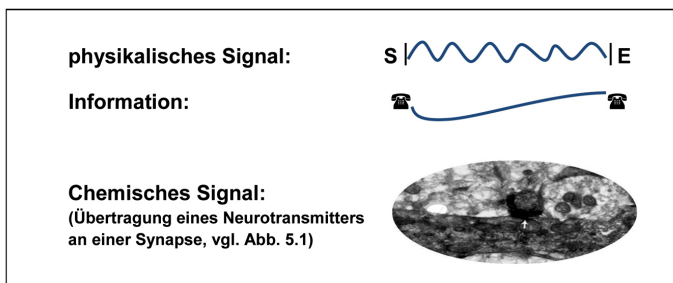


Abb. 2.1: Beispiele für Ein-Level-Mechanismen

Die Elemente des Mechanismus sind dabei: ein Gegenstand, der eine Wirkung ausübt oder ein Signal aussendet; ein physikalischer oder chemischer Prozess der Wirkungsübertragung oder Signalausbreitung; und ein zweiter Gegenstand, auf den die Wirkung übertragen wird oder der das Signal registriert. Die Signalübertragung wird auch oft als Übertragung von Information betrachtet. Hier sollte man allerdings aufpassen: Die physikalische Information, die in Form von physikalischen Signalen von einem Telefon als Sender per Funk auf ein anderes Telefon übertragen wird, stellt in einem völlig anderen Sinne Information dar als die sprachlichen Informationen, die sich die Gesprächspartner beim Telefonieren mitteilen.

Multi-Level-Mechanismen haben mindestens zwei Ebenen. Es handelt sich um zusammengesetzte Systeme, die so gebaut sind und so funktionieren wie Maschinen. Auf der unteren Ebene der System-Bestandteile finden kausale Prozesse statt, die auf der oberen Ebene des Gesamtsystems ein bestimmtes Verhalten oder einen bestimmten Prozess bewirken. Bei ihnen greifen eine Teile-Ganzes-Beziehung und bestimmte kausale Prozesse ineinander. Auf der unteren Ebene sind Ein-Level-Mechanismen am Werk; d.h. die Systembestandteile wirken aufeinander ein; und sie tun dies so, dass auf der oberen Ebene bestimmte Phänomene bewirkt werden. Neben der Uhr (Abb. 1.1) gibt es unzählige weitere technische Beispiele; etwa ein Computer, mit dem man rechnen oder Texte schreiben kann, weil die Schaltplatinen im Innern so konstruiert und programmiert sind, dass er die Zahlen und Texte verarbeitet, die man eingibt.

Das wichtigste physikalische Beispiel ist der subatomare Aufbau der Materie aus Elektronen und Atomkernen (Abb. 1.3); er erklärt viele Eigenschaften der makroskopischen Dinge, insbesondere ihre Farbe, Festigkeit und Oberflächenbeschaffenheit sowie ihre elektrischen, magnetischen und thermischen Eigenschaften. Und das derzeit am meisten diskutierte biologische Beispiel sind die neuronalen Mechanismen, um deren Erklärungsleistung es weiter unten noch gehen wird.

Damit sind wir bei unserem Thema, der mechanistischen Erklärung. Es handelt sich dabei um die Erklärung eines Phänomens, Prozesses oder Verhaltens durch einen Multi-Level-Mechanismus:

Definition 2: Eine mechanistische Erklärung ist die kausale Erklärung eines Phänomens (Prozesses, Verhaltens, ...) durch einen Multi-Level-Mechanismus.

Das Schema dieser Erklärungen entspricht dem Grundaufbau der obigen Beispiele für Mechanismen (Abb. 1–3). Im einfachsten Fall hat der Mechanismus zwei Ebenen oder Stufen. Auf der oberen Ebene oder höheren Stufe hat man ein Phänomen, das erklärt werden soll; auf der unteren Ebene oder Stufe nimmt man kausale Komponenten an, die das höherstufige Phänomen erklären.

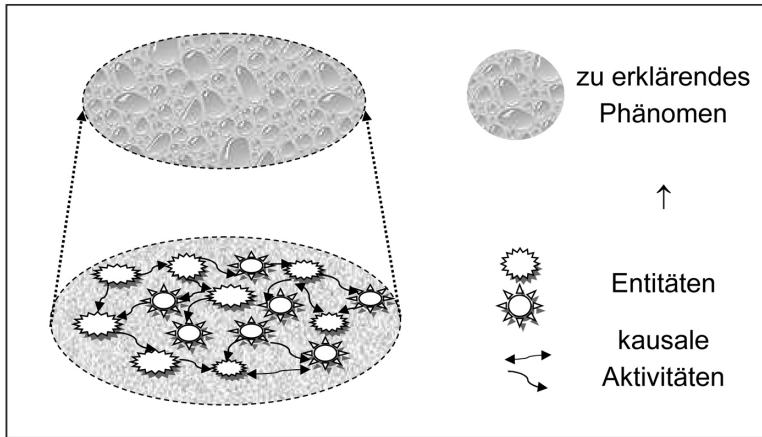


Abb. 2.2: Schema eines Zwei-Level-Mechanismus

Die naturwissenschaftliche Grundlage für mechanistische Erklärungen im weitesten Sinne sind die Physik, Chemie, Biochemie und Informationstheorie.² Wichtig für die Tragweite mechanistischer Erklärungen ist nun, dass die kausalen Prozesse auf der unteren Ebene des Mechanismus, d.h. die Einwirkungen der Systembestandteile aufeinander, oft sehr viel genauer bekannt als die Art und Weise, wie diese Wechselwirkungen der Teile auf das Systemganze „durchschlagen“, d.h. wie sie die zu erklärenden Phänomene *genau* bewirken. Der Grund dafür ist, dass die Komponenten auf der unteren Ebene des Mechanismus durch Ein-Level-Mechanismen verbunden sind, die oft sehr präzise zu erklären sind; während die Art und Weise, wie sie durch ihr Zusammenwirken das höherstufige Phänomen hervorbringen, sämtliche Tücken komplexer Systeme mit sich bringen kann. Dies beginnt schon in der Physik, die zwar viele Eigenschaften der makroskopischen Stoffe und Körper aus dem subatomaren Aufbau der Materie erklären kann, aber längst nicht alle.

² Die Rede von gesellschaftlichen, psychologischen etc. Mechanismen jenseits der Naturwissenschaften und die damit intendierte Erklärungsleistung seien hier ausgeklammert; sie stützen sich aber ebenfalls auf ein Verständnis der mechanistischen Erklärung im Sinne der Definitionen 1 und 2.

Bevor wir zu den Erfolgen und Grenzen der mechanistischen Erklärungen kommen, sei aber ihr Hintergrund erklärt. Die Grundidee hinter jeder mechanistischen Erklärung ist die Annahme, dass sich ein System in kausale Komponenten zerlegen lässt. Diese Annahme beruht auf der Methode der Analysis und Synthesis, die aus der frühen Neuzeit stammt und in den Naturwissenschaften bis heute höchst erfolgreich ist.

3. Analysis und Synthesis

Die Begriffe *Analysis* und *Synthesis* kommen aus dem Griechischen und bedeuten „Zerlegung“ bzw. „Zusammensetzung“. Ein Mechanismus lässt sich aber nicht nur in Komponenten zerlegen und wieder daraus zusammensetzen, sondern die kausalen Wirkungen darin sind ebenfalls zentral für mechanistische Erklärungen. Dieses Zusammenspiel von Zerlegen und Zusammensetzen in bzw. aus Teilen mit den kausalen Wirkungen im Ganzen ist typisch für das naturwissenschaftliche Denken, von den Anfängen der neuzeitlichen Physik bis heute. Die Beschäftigung mit den Analyse- und Erklärungsmethoden der frühen Neuzeit ist also nicht nur historisch interessant. Sie wirft bis heute Licht darauf, wie naturwissenschaftliche Erklärungen zustande kommen, wie sie funktionieren und was ihre Tragweite ist. Heute bezeichnet man die Zerlegungsrichtung, die vom Ganzen zu den Teilen führt, mit *top-down*, und die umgekehrte Richtung der Zusammensetzung des Ganzen aus den Teilen als *bottom-up*. Dabei zielt das *top-down*-Vorgehen der heutigen Physik, Chemie, Biologie oder Neurowissenschaft wie schon die Analysis der frühen Neuzeit darauf, von den Phänomenen auf ihre Ursachen zu schließen; und das *bottom-up*-Vorgehen zielt wie einst die Synthesis auf die kausale Erklärung der Phänomene.

Wie sah dies bei Galileo Galilei (1564–1642) und Isaac Newton (1642–1727) aus? Galilei nannte sein Vorgehen die resolutiv-kompositive Methode (*resolutio* und *compositio* sind die lateinischen Ausdrücke für *Analysis* und *Synthesis*); er praktizierte sie in seinen berühmten Experimenten mit der schiefen Ebene, deren Neigung er veränderte, um die Komponenten der Fallbewegung zu analysieren.³ In Newtons Hauptwerken finden sich wissenschaftstheoretische Überlegungen zu dieser Methode. So

3 Vgl. z.B. Losee 1993.

heißt es im Vorwort von Roger Cotes (1682–1716) zur zweiten Auflage von Newtons *Principia*, die Naturforschung verfare

“[...] nach einer zweifachen Methode, der analytischen und synthetischen. Die Kräfte der Natur und ihre einfachen Gesetze leiten sie aus einigen ausgewählten Erscheinungen, mittelst der Analysis ab, und legen die ersteren, mittels der Synthesis, als Beschaffenheit der übrigen Erscheinungen dar.”⁴

Newton selbst gibt zu Beginn des Dritten Buchs der *Principia* (an dessen Ende sich sein berühmtes Diktum *hypotheses non fingo* bezüglich der unbekanntenen Ursache der Gravitation findet⁵) vier methodologische Regeln an, die nähere Auskunft über die analytische Methode geben. Die ersten beiden Regeln beziehen sich auf die kausale Analyse der Phänomene; sie fordern, nicht mehr Ursachen anzunehmen als zur Erklärung der Phänomene hinreichend sind, sowie gleichartige Wirkungen auf gleichartige Ursachen zurückzuführen. Die dritte ist eine Induktionsregel, nach der es gestattet ist, die empirisch bekannten mechanischen Eigenschaften von Körpern auf *alle* Körper zu verallgemeinern, auch auf die kleinsten Bestandteile der Körper, die Atome, von deren Existenz Newton überzeugt war. Die vierte Regel fordert, empirisch bewährten Hypothesen beizubehalten, solange sie nicht falsifiziert sind, anstatt sich spekulative Alternativen zu ihnen auszudenken (ganz im Sinne des oben erwähnten Diktums *hypotheses non fingo*).⁶ Aus heutiger Sicht beschreiben diese Regeln ein induktives Verfahren für einen Schluss auf die beste Erklärung, das aber weitaus komplexer ist als induktive Schlüsse im Sinne der modernen Logik. Dass Newton dabei wirklich an die traditionelle Methode der Analysis und Synthesis denkt, geht aus seiner *Optik* hervor:

„Diese Analysis besteht darin, dass man aus Experimenten und Beobachtungen durch Induktion allgemeine Schlüsse zieht und gegen diese keine Einwendungen zulässt, die nicht aus Experimenten oder aus anderen gewissen Wahrheiten entnommen sind. Denn Hypothesen werden in der experimentellen Naturforschung nicht betrachtet.“⁷

4 Newton [1687] 1872, 5.

5 Ebd., 511: „Ich habe noch nicht dahin gelangen können, aus den Erscheinungen den Grund dieser Eigenschaften der Schwere abzuleiten, und Hypothesen erdenke ich nicht.“

6 Ebd., 380 f.

7 Newton [1704], 148.

Im Zusammenhang mit unserem Thema der mechanistischen Erklärung ist hier Folgendes wichtig: Die Analysis in Newtons Sinn kombiniert die Zergliederung der Phänomene in Komponenten oder der Körper in ihre Bestandteile (3. Regel) mit der kausalen Analyse (1.-2. Regel). Für die Schlüsse, die man dabei aus den Phänomenen zieht, sind nur die experimentellen Beobachtungen der Prüfstein (4. Regel, siehe auch die eben zitierte Textstelle). Wie Newtons weitere Ausführungen in der *Optik* deutlich machen, zielt die kausale Analyse auf die Auffindung von Kräften und anderen Ursachen; während die Synthesis umgekehrt erweisen soll, dass die so gefundenen Ursachen die Phänomene in der Tat erklären können:

„Auf diese Weise können wir in der Analysis vom Zusammengesetzten zum Einfachen, von den Bewegungen zu den sie erzeugenden Kräften fortschreiten, überhaupt von Wirkungen zu ihren Ursachen, von den besonderen Ursachen zu den allgemeineren, bis der Beweis mit der allgemeinen Ursache endigt. Dies ist die Methode der Analysis: die Synthesis dagegen besteht darin, dass die entdeckten Ursachen als Prinzipien angenommen werden, von denen ausgehend die Erscheinungen erklärt und die Erklärungen bewiesen werden.“⁸

Newton demonstrierte das Zusammenspiel von Analysis und Synthesis in seiner *Optik* an der Zerlegung des weißen Lichts in die Spektralfarben und an der Überlagerung zweier Farbspektren von parallel angeordneten Prismen, die wiederum weißes Licht ergeben (Abb. 3.1). Dagegen zeigt er in den *Principia*, dass die Analyse der Phänomene nach seinen Regeln des Philosophierens dazu führt, dass sich die Fall- und Wurfprozesse mechanischer Körper auf der Erde und die Bewegungen der Himmelskörper aus ein-und-derselben Ursache, der Gravitation, erklären lassen. Die Synthesis ist hier die mathematische Deduktion der Bewegungen aus dem Kraft- und Gravitationsgesetz; wobei ein Diagramm im Anhang zu den *Principia* demonstriert, dass es einen kontinuierlichen Übergang von Galileis Wurfpabel der Kepler-Bahn des Mondes um die Erde gibt (Abb. 3.2.).

8 Ebd.

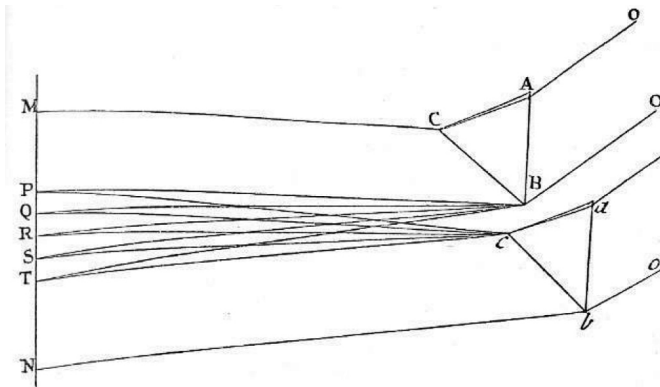


Abb. 3.1: Analysis und Synthesis des Lichts

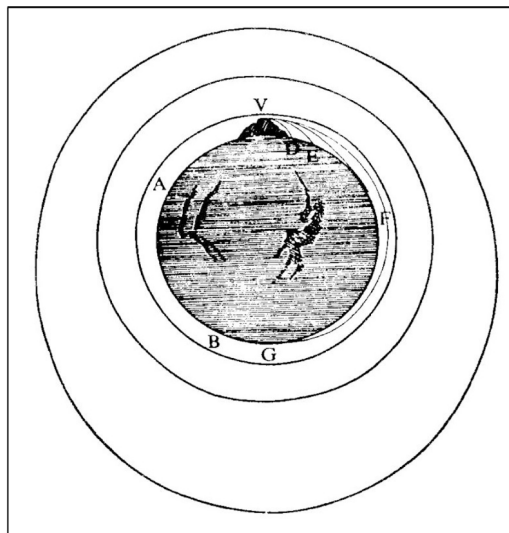


Abb. 3.2: Übergang von der Galilei- zur Kepler-Bewegung

Newtons Schluss auf die beste Erklärung zielt demnach offenbar auf eine *mechanistische Erklärung* im oben erläuterten Sinn. Die Analysis schließt *top-down* von einem höherstufigen Phänomen auf dessen Komponenten und deren Zusammenwirken auf den tieferen Ebenen eines Multi-Level-Mechanismus. Und die Synthesis soll umgekehrt nachweisen, dass sich von den Bestandteilen eines Systems und den Kräften, die zwischen ihnen am Werk sind, *bottom-up* die Eigenschaften und das Verhalten des Systemganzen herleiten lassen.

Definition 3: Die analytisch-synthetische Methode Newtons ist ein zwei-stufiges Verfahren:

(i) Die *Analysis* schließt *top-down* von höherstufigen Phänomenen auf deren Bestandteile und deren kausales Zusammenwirken auf tieferen Ebenen.

(ii) Die *Synthesis* leitet *bottom-up* die Eigenschaften höherstufiger Phänomene aus dem kausalen Zusammenwirken von deren Komponenten her.

Folgerung: Newtons analytisch-synthetische Methode zielt auf mechanistische Erklärung, wie die *top-down* und *bottom-up* Ansätze der heutigen Naturwissenschaften.

Varianten dieser Methode, die ursprünglich aus der antiken Mathematik stammte⁹, waren in der frühen Neuzeit von der Mathematik über die Physik bis hin zur Philosophie weit verbreitet.¹⁰ Ihre Attraktivität bezogen sie aus der quasi-mathematischen Gewissheit, die sie auch außerhalb der Mathematik versprachen. Immanuel Kant (1724–1804) wandte sie in seinen vorkritischen Schriften erfolgreich auf die Prozesse der Strukturbildung im Universum und auf die Begründung einer atomistischen Materietheorie an,¹¹ wollte damit aber auch ein metaphysisches System begründen. Im Fall der Suche nach metaphysischen Begründungen war die Erwartung der

9 Pappus 1589.

10 Vgl. Engfer 1982. René Descartes (1596–1650) verallgemeinerte die Methode in der 2. und 3. Regel seines *Discours de la méthode* (Descartes [1637] 1969). Auch bei Thomas Hobbes (1588-1679) finden sich in *De corpore* Ausführungen zur analytisch-synthetischen Methode, deren Teilschritte er, wie Galilei, als kompositiv und resolutiv bezeichnet (Hobbes [1655] 1997).

11 Kant 1755, 1756.

quasi-mathematischen Gewissheit allerdings trügerisch, wie er später mit seiner Vernunftkritik zeigen wollte.¹²

4. Die Erfolge – und die Grenzen

Ab dem 19. Jahrhundert hatte die analytisch-synthetische Methode in den Wissenschaften weitgehend ausgedient – außer in den mathematischen Naturwissenschaften. Dort hat die Analysis seit Galilei und Newton den Doppelcharakter von Zergliederung der Phänomene und kausaler Analyse, und sie wird in Experimenten durchgeführt. Die Ursachen der Phänomene werden durch Naturgesetze wie das Gravitationsgesetz ausgedrückt, die es erlauben, das Zusammenwirken der Systemkomponenten mathematisch zu beschreiben. Die Synthesis, d.h. die Herleitung der Phänomene aus den kausalen Eigenschaften ihrer Komponenten, nimmt dann die Form von mechanistischen Erklärungen an.

Newtons analytisch-synthetische Methode führte zu einer beispiellosen Erfolgsgeschichte der mechanistischen Erklärungen. Seit dem Ende des 19. Jahrhunderts konnten die schon von Newton postulierten Atome experimentell untersucht werden. Dabei wurde nachgewiesen, dass sie keine Atome im ursprünglichen Wortsinn (*atomos* = das Unteilbare) sind, sondern aus Elektronen und Atomkernen bestehen; die letzteren wiederum aus Protonen und Neutronen; und diese schließlich aus Quarks. Auch das Licht zeigte schließlich den einst von Newton postulierten atomaren Charakter; seit Anfang des 20. Jahrhunderts ist bekannt, dass es aus Lichtquanten (Photonen) besteht. Auf der Basis der Atomphysik wurden sodann die Physik der Moleküle, die physikalische Chemie, die Biochemie und schließlich die Mikrobiologie und Genetik begründet. Um diese Erfolgsgeschichte möglichst fortzuschreiben, lesen alle Physiker, Chemiker, Biologen usw., die sich für die Grundlagen und Methoden ihrer Disziplin interessieren, bis heute genauso gern in den Werken von Galilei und Newton wie in denjenigen von Albert Einstein (1879–1955), Niels Bohr (1885–1962), Werner Heisenberg (1901–1976) oder den Begründern der modernen Genetik.

12 Kant 1781/1787. Kant hatte die Methode in seiner vorkritischen Philosophie selbst praktiziert, sich dabei aber in gravierende Probleme bezüglich der begrifflichen Grundlagen seiner Metaphysik verstrickt. Vgl. Falkenburg 2000.

Allerdings zeigten sich in der Quantenphysik auch die Grenzen der mechanistischen Erklärung. Die Atome und ihre Bestandteile haben, wie auch das Licht und andere Strahlung (Wärmestrahlung, Röntgenstrahlen, Radioaktivität), einen Doppelcharakter von Wellen- und Teilchennatur, die sie jeweils in Abhängigkeit von den Experimentiermethoden zeigen, mit denen man sie untersucht. Besonders charakteristisch ist dabei der Doppelspaltversuch mit einzelnen Lichtquanten oder auch Elektronen; die einzelnen Quanten erzeugen nach Beugung am einen Doppelspalt teilchentypische Schwärzungspunkte auf einer Fotoplatte, aber im Lauf der Zeit entsteht daraus das wellentypische Interferenzmuster (Abb. 4.1).

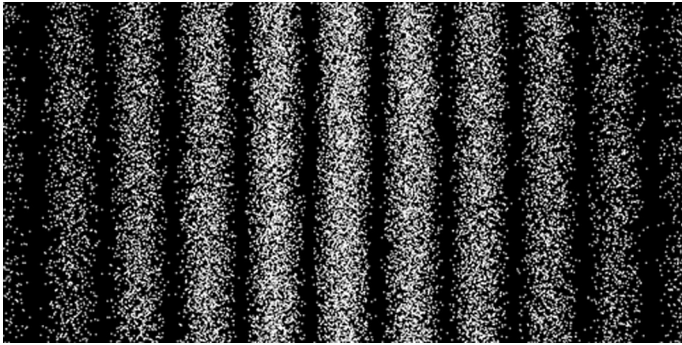


Abb. 4.1: Interferenz v. Photonen oder Elektronen hinter einem Doppelspalt

Newtons Schluss auf die Atome folgte seiner 3. Regel des Philosophierens, nach der man auch den kleinsten Bestandteilen der Körper dieselben Eigenschaften zusprechen soll wie Billardkugeln oder Planeten. Diese Regel lieferte vielleicht die zu Newtons Zeit beste Erklärung für die Beschaffenheit der materiellen Dinge – aber aus heutiger Sicht war sie irreführend: Atome und ihre Bestandteile verhalten sich eben nicht wie makroskopische Körper. Insbesondere kommt ihnen nach der Heisenberg'schen Unschärferelation nicht zugleich ein exakter Ort *und* eine exakte Geschwindigkeit zu, anhand deren ihre Raum-Zeit-Bahn bestimmt wäre; und diese Unbestimmtheit gilt auch für andere Quanteneigenschaften. Bohr war deshalb der Auffassung,

dass bei Quantenphänomenen die experimentelle Analyse und Synthese an ihre Grenzen stoße. Dagegen konnte sich Einstein nie mit dem Verlust der Zuschreibung wohldefinierter Eigenschaften zu einzelnen Teilchen abfinden.¹³ In engem Zusammenhang damit steht, dass die Quantenphysik nicht strikt deterministisch ist, sondern im Allgemeinen nur Wahrscheinlichkeitsaussagen macht. Die philosophische Debatte darüber, wie die Quantenphysik zu verstehen ist, dauert bis heute an.

Die mechanistischen Erklärungen der heutigen Atom-, Kern- und Teilchenphysik haben deshalb kaum noch etwas mit dem Ursprung dieses Erklärungstyps bei Galilei und Newton zu tun. Im Bereich der Quantenphysik sind die Materiebestandteile nicht so wohlsepariert wie Billardkugeln oder die Himmelskörper, sondern verschränkt. Dennoch gibt die Quantenphysik sehr präzise Auskunft darüber, wie die Masse, Ladung und andere Größen eines Atoms aus den Eigenschaften seiner Bestandteile sowie der inneren Wechselwirkungen herrühren.¹⁴

Andere Grenzen der mechanistischen Erklärung zeigen sich bei der Beschreibung komplexer Systeme, etwa bei den Phasenübergängen der Festkörperphysik. Philip W. Anderson (geb. 1923) ist bei Philosophen für seinen Aufsatz *More is Different*¹⁵ berühmt, in dem er hervorhebt, dass komplexe Systeme viele nicht-reduzierbare Eigenschaften haben. In einem einführenden Lehrbuch der Festkörperphysik, das u.a. darstellt, wie die Quantenphysik die magnetischen Eigenschaften der Festkörper erklärt, heißt es zu Beginn: „*We do not know why there are solids.*“¹⁶

Die mechanistischen Erklärungen der Biologie zeigen, dass die Zellphysiologie auf biochemischen Vorgängen innerhalb der Zellen beruhen, und dass das Erbmaterial im Zellkern in der DNS in Form von Proteinen als ihren Bausteinen kodiert ist – das ist der „genetische Code“. Bei allen Erfolgen stößt die mechanistische Erklärung aber in der Biologie auch an grundsätzliche

13 Beide Positionen werden in Bohrs Darstellung der Bohr-Einstein-Debatte deutlich gemacht: Bohr 1949.

14 Für diese Größen gelten präzise, experimentell überprüfbare Summenregeln, die auch die Bindungsenergie der Protonen und Neutronen sowie einen Anteil von quantisierten Strahlungsfeldern einschließen. Vgl. Falkenburg 2007, Kap. 6, und Falkenburg 2012b.

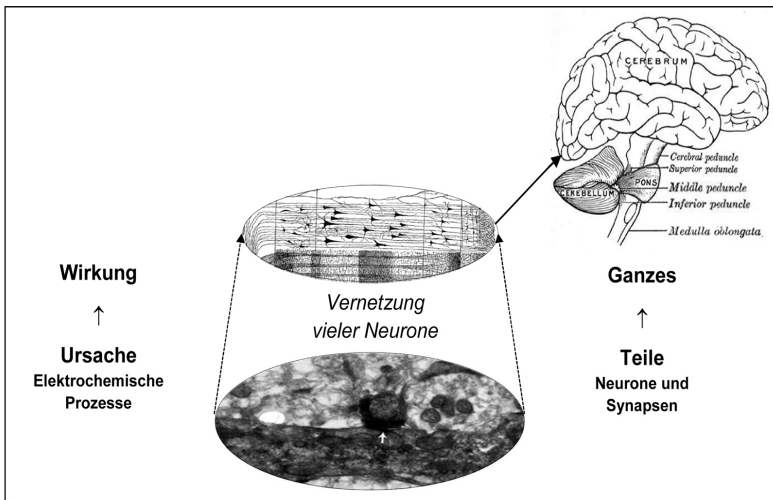
15 Anderson 1972.

16 Anderson 1997, 3.

Grenzen. Dies zeigt sich besonders bei der Erklärung neurobiologischer Phänomene durch neuronale Mechanismen.

5. Was erklären neuronale Mechanismen?

Ein neuronaler Mechanismus ist das neurobiologische Pendant zu den obigen Beispielen aus der Physik. Die Teile des Mechanismus sind hier Neurone (Abb. 5.1, untere Ebene), das Ganze ist ein neuronales Netz (Abb. 5.1, obere Ebene) – das hochkomplexe Geflecht der Neurone in der Hirnrinde (Abb. 5.1, rechts oben). Die Hirnrinde ist die Grundlage der kognitiven Leistungen und der bewussten Prozesse, die unser Gehirn zustande bringt. Sie besteht aus Schichten und Säulen von Neuronen, die millionenfach vernetzt sind. Die neurophysiologische Grundlage des Gehirngeschehens sind elektrochemische Vorgänge. Wie jedes biologische System verbraucht das Gehirn dabei Energie, mit der es der Stoffwechsel in Form von viel Sauerstoff und Zucker versorgt.



Ab. 5.1: Neuronales Netz, unten: Teil eines Neurons mit Synapse (Pfeil)

Die kausalen Aktivitäten im neuronalen Mechanismus liegen in elektrochemischen Vorgängen, die sich in und zwischen den Nervenzellen der Hirnrinde abspielen. Die Neurone haben lange Fortsätze, die Axonen, in denen sich elektrische Signale fortpflanzen, und sie verzweigen sich in Dendriten, die an andere Nervenzellen andocken können. Die Verbindungsstellen zwischen Axonen und Dendriten sind die Synapsen; dort erfolgt die Signalübertragung durch chemische Substanzen, die Neurotransmitter.

Die Signalübertragung in den Axonen und über die Synapsen in die Dendriten eines benachbarten Neurons ist ein Ein-Level-Mechanismus (Abb. 2.1). Im Axon funktioniert die Signalfortpflanzung wie in einem elektrischen Schaltkreis, weil die Zellwand der Nervenzelle die elektrochemischen Eigenschaften einer Batterie hat (Schaltkreis-Modell von Hodgkin und Huxley), und sie wird durch die Gesetze der Elektrodynamik beschrieben, ist also näherungsweise deterministisch. An den Synapsen sind nur Wahrscheinlichkeitsgesetze am Werk. Die chemische Signalübertragung an den Synapsen hat oft nur einen Wirkungsgrad von 10–20%, funktioniert also kaum besser als die gute alte, inzwischen ausrangierte Glühbirne. Es müssen *vieler* Neurone durch einen Neurotransmitter stimuliert werden, damit genügend davon feuern und sich ein Signal im Gehirn ausbreitet. Das Signal breitet sich demnach innerhalb des Neurons annähernd deterministisch aus, kommt aber nur mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit über die Synapse hinweg im anderen Neuron an. Dies sei hier hervorgehoben, um zu betonen, dass heutige mechanistische Erklärungen, wie auch in der Quantenphysik, meistens nicht deterministisch sind.

Auch für die Signalübertragung an den Synapsen gibt es ein Modell, nämlich die Vernetzung von *vielen* Schaltkreisen zu einem künstlichen neuronalen Netz mit vielen Knotenpunkten – zum parallel rechnenden Computer. Die Schaltkreise im Computer verarbeiten Information, die in Nullen und Einsen kodiert ist (0=kein Signal; 1=Signal); und ein Computerprogramm legt fest, wie dies geschieht. Im Parallelrechner (Abb. 5.2) ist die Informationsverarbeitung vielfach vernetzt und rückgekoppelt, nach dem Vorbild der Neurone und ihrer Vernetzung im Gehirn.

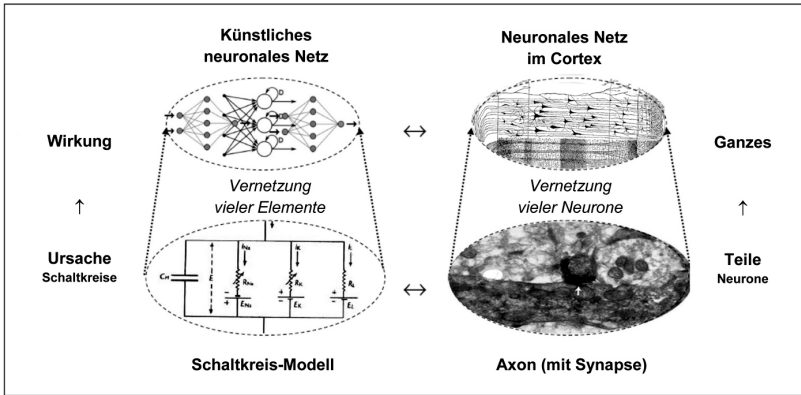


Abb. 5.2: Parallelrechner (links) und natürliches neuronales Netz (rechts)

Auf den Rückkopplungsprozessen in einem künstlichen neuronalen Netz beruhen die Fähigkeiten von Robotern. Wenn man den Parallelrechner mit Sensoren (z.B. Fotozellen zur Abbildung der Umgebung) ausstattet, kann man ihn dafür programmieren, die registrierte Information auszuwerten. Die Informationsverarbeitung im Roboter schließt dann einen Mechanismus zur Selbststeuerung ein. So arbeitet z.B. ein Robot-Staubsauger, wie es ihn jetzt überall zu kaufen gibt: Er scannt seine Umgebung ab und berechnet nach den Scan-Ergebnissen, entlang welcher Bahn er am besten weitersaugt. Sein neuronales Netz funktioniert nicht deterministisch, sondern nach Wahrscheinlichkeitsgesetzen, wie das natürliche Vorbild. Es simuliert den begrenzten Wirkungsgrad an den Netzknoten, indem es die Signale nicht immer weiterleitet, sondern nur mit relativen Häufigkeiten, die es per Zufallsgenerator variiert. Der Rechenalgorithmus läuft dabei auf ein statistisches Näherungsverfahren hinaus. Wenn sich das Netz „festfährt“, d.h. auf Hindernisse stößt und in Bezug auf die Rechenergebnisse auf der Stelle tritt, generiert es Zufallszahlen für die relativen Häufigkeiten und fängt mit der Berechnung von vorne an. So bekommt der Robot-Staubsauger mit seinen rotierenden Borsten nach einigem Hin-und-Her sogar die Möbelfüße und Zimmerecken halbwegs sauber.

6. Die Analogie zwischen Gehirn und Computer

Ursprünglich war das natürliche neuronale Netz im Gehirn das Vorbild, nach dem man künstliche neuronale Netz bzw. parallel arbeitende Computer mit Rückkopplungsmechanismen konstruiert und programmiert hat. Die Informatiker sprechen jedoch davon, dass ein künstliches neuronales Netz *lernt*, wenn es die über Sensoren aufgenommene Information aus der Umgebung auswertet und sich entsprechend umprogrammiert. Der Schritt von diesem Sprachgebrauch zur Annahme, dass das Gehirn funktioniert wie ein parallel rechnender Computer, d.h. wie ein künstliches neuronales Netz hoher Komplexität, ist klein. Die Information, die so ein Computer verarbeitet, wird dann mit kognitiven Leistungen des Gehirns verglichen – von zielgerichteten Bewegungen über Lernen und Erinnerung bis hin zu den Bewusstseinsinhalten.

Bei diesem Vergleich handelt es sich um eine Analogie: Der Computer verhält sich zur Information, die er verarbeitet, ungefähr so wie das Gehirn zu seinen kognitiven Leistungen.

Computer : Information \approx Gehirn : kognitive Leistungen

Das Zeichen \approx deutet das „ungefähr“ an; es handelt sich um keine Gleichsetzung. Jede Analogie hinkt – die eine mehr, die andere weniger. Die Hirnforscher wissen natürlich, dass das Gehirn kein Computer *ist*. Es ist millionenfach komplexer als jeder noch so leistungsfähige Parallelrechner, und es besteht nicht aus gleichartigen, industriell gefertigten elektrischen Schaltkreisen, sondern aus lebendigen, äußerst vielgestaltigen Neuronen, die sich bei der Gehirntätigkeit immer wieder verändern. Das Computer-Modell der kognitiven Gehirnleistungen gilt darum in der Hirnforschung nur als Idealisierung.

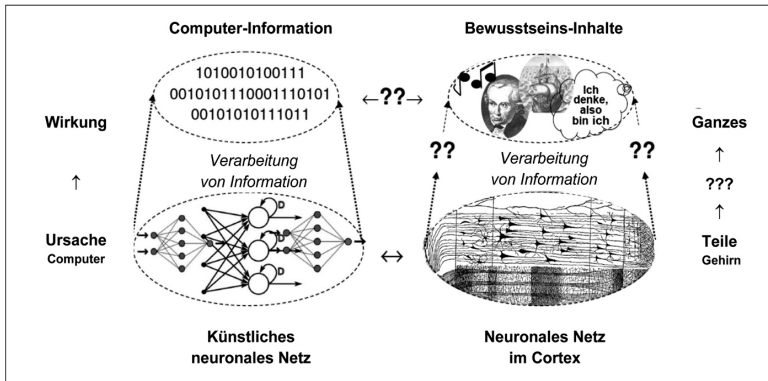


Abb. 6.1: Die Analogie zwischen dem Gehirn und Computer

Dabei denken die meisten Hirnforscher aber, dass der Mechanismus der Informationsverarbeitung in beiden Fällen *grundsätzlich* derselbe ist; diese heuristische Annahme treibt seit Jahrzehnten die Forschung in der kognitiven Neurowissenschaft voran. Und sie übertragen diesen Vergleich dann von grundlegenden kognitiven Fähigkeiten wie Lernen, Mustererkennung, Bewegungssteuerung und Erinnerung, über die auch primitive Organismen verfügen, auf das Bewusstsein und unsere bewussten Entscheidungen.

An dieser Stelle müssen wir fragen: Was ist eigentlich das Modell, was die Wirklichkeit? Ist das Gehirn ein biologisches Vorbild für den Bau von parallel rechnenden Hochleistungs-Computern und Robotern, denen man Sensoren und interne Mechanismen der Selbststeuerung einbaut? Oder ist umgekehrt der Computer das Vorbild dafür, das Bewusstsein zu verstehen – auch wenn wir gar nicht wissen, wie tragfähig das Computer-Modell der Information für das Verstehen der wahren „Mechanismen“ ist, nach denen das Gehirn Bewusstsein und unsere bewussten Entscheidungen generiert? Von Informatikern und auch Hirnforschern wird die Analogie gern in *beiden* Richtungen gelesen. Dies suggeriert dann, dass das neuronale Geschehen mentale Phänomene wie Lernen, Mustererkennung oder Erinnerung, bis hin zum Bewusstsein, *ungefähr* so hervorbringt wie ein Computer die Informationen, die er uns als Rechenergebnisse ausspuckt. Dabei fungiert der

Informationsbegriff in der Hirnforschung als eine semantische Brücke, die eine drastische Erklärungslücke überspannt. Niemand weiß, wie die vernetzten und feuernenden Neuronen im Cortex es bewirken, dass wir etwas erleben, verstehen, planen und entscheiden können (Abb. 6.2).

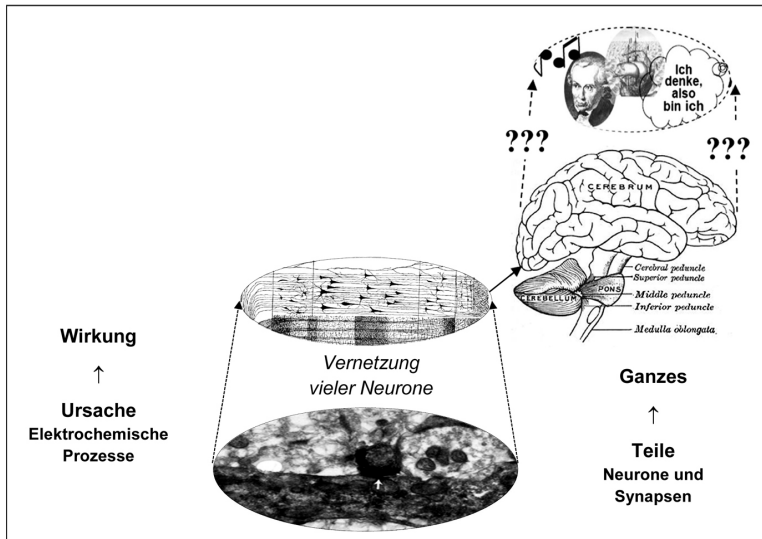


Abb. 6.2: Wie bringt das neuronale Netz im Cortex Bewusstsein hervor?

Dennoch verwechselt man die Informationsverarbeitung im künstlichen neuronalen Netz gern mit der Informationsverarbeitung, die dazu führt, dass *wir etwas verstehen*. Die Bedeutungen, die wir verstehen, werden dabei der Computer-Information gleichgesetzt; ohne zu berücksichtigen, dass ein Computer nur Information verarbeitet, weil er von Menschen zu diesem Zweck programmiert wird. Eine mechanistische Erklärung für das Bewusstsein liefert die Analogie jedoch *nicht*.

Der kausale Mechanismus, d.h. die kausale Aktivität der Komponenten, die das Phänomen „Information“ hervorbringt, ist nur auf der Computer-Seite der Analogie bekannt, aber *nicht* auf der Gehirn-Seite. Diese Analogie ist nicht verlässlicher als der Atomismus des 17. Jahrhunderts, der sich auf Analogieschlüsse wie Newtons 3. Regel des Philosophierens stützte.

Newton war überzeugt davon, dass die Materie aus Atomen besteht. Seine Grundlage war dabei die Annahme, die Natur sei im Kleinen genauso strukturiert wie im Großen. Grundsätzlich lagen er und andere Atomisten der frühen Neuzeit richtig mit der Vermutung, dass es Atome gibt; doch seit der Quantentheorie wissen wir, wie sehr sie sich über die Beschaffenheit der Atome irrten. Dieser Analogieschluss und das klassische Atommodell, zu dem er führte, waren ein gutes, fruchtbares, aber falsches Modell der materiellen Wirklichkeit. Die Geschichte der Atomphysik zeigt: Analogien können zu falschen Modellen führen, die nützlich für den Gang der Forschung sind. Aber sobald man es besser weiß, werden sie über den Haufen geworfen. Warum sollte es der Informations-Analogie für kognitive Leistungen besser ergehen? Für Fähigkeiten wie Lernen, Mustererkennung, gezielte Bewegung oder Erinnerung hat sie sicher ihre Berechtigung. Sie auf komplexere menschliche kognitive Leistungen und gar das Bewusstsein zu übertragen ist aber problematisch. Sie erklärt nicht unsere bewussten Fähigkeiten, bei denen unser Gehirn nicht reproduktiv arbeitet, sondern für die das Bewusstsein als aktive Planungsinstanz eine zentrale Rolle spielt.

Der Neurophilosoph William Bechtel (geb. 1951) hebt deshalb in seinem Buch *Mental Mechanisms* hervor, dass der informationstheoretische Ansatz heuristischen Wert für die Entschlüsselung der Beziehungen zwischen Gehirn und Bewusstsein hat. Danach wird das mentale Geschehen, d.h. die Bewusstseinsinhalte, mit der oberen Ebene eines Mechanismus identifiziert, der dazu dient die kausalen Komponenten herauszufinden, die auf der unteren, neuronalen Ebene damit korreliert sind – und umgekehrt.¹⁷

Jedoch gibt es eine grundsätzliche Grenze, auf die das Vorhaben stößt, menschliches Bewusstsein durch neuronale Mechanismen zu erklären. Die besprochenen physikalischen und die neuronalen Mechanismen erklären ein Ganzes aus seinen Teilen heraus, aus den kausalen Aktivitäten seiner Komponenten. Die Teile-Ganzes-Beziehung ist dabei für die physikalischen Mechanismen (Abb. 1.1–3) so zentral wie für die natürlichen und die künstlichen neuronale Netze (Abb. 5.1–2).

17 „One of the virtues of viewing identity as a heuristic claim is that it can guide not only the elaboration of the two perspectives which are linked by the identity claim, but it can use each to revise the other.” Bechtel 2008, 71.

Anders ist es beim Aufstieg zum Bewusstsein (Abb. 6.1–2). Hier versagt das mechanistische Erklärungsmodell, und nur der Analogieschluss mit dem doppeldeutigen Informationsbegriff bleibt. Weder das Gehirn noch die vernetzten Neurone im Cortex verhalten sich zum Bewusstsein und unseren bewussten kognitiven Fähigkeiten wie die Teile zu einem Ganzen oder wie ein Ganzes zu seinen Teilen. Das mechanistische Erklärungsmodell der Naturwissenschaften wird aus diesem Grund der Eigenart des Bewusstseins nicht gerecht; und unseren Fähigkeiten, etwas zu erleben, zu verstehen, zu planen und zu entscheiden, auch nicht.

7. Fazit

Die analytisch-synthetische Methode Galileis und Newtons, die Newton in seinen Hauptwerken erläutert hat, führte zu einer beispiellosen Erfolgsgeschichte der mechanistischen Erklärungen in den neuzeitlichen Naturwissenschaften. Grenzen zeigen sich in der Quantenphysik, bei der Erklärung der Eigenschaften komplexer Systeme und in der kognitiven Neurowissenschaft. In der Quantenphysik sind die Komponenten eines Multi-Level-Mechanismus nicht mehr wohlsepariert, sondern verschränkt. In komplexen Systemen kommen irreduzible, emergente Eigenschaften auf der Ebene des Systemganzen ins Spiel, deren mechanistische Erklärung Schwierigkeiten macht. Und in der kognitiven Neurowissenschaft ist die prinzipielle Hürde für mechanistische Erklärungen, dass zwischen der neuronalen Grundlage unserer kognitiven Leistungen und unserem bewussten Erleben keine Teile-Ganzes-Beziehung besteht. Der mechanistische Ansatz hat hier allenfalls eine heuristische Funktion für die Zuordnung von kognitiven Leistungen zu ihrer neuronalen Basis, und umgekehrt.

Literatur:

- Anderson, Philip W., 1972: More Is Different. *Science, New Series*, Vol. 177, 393–396.
- Anderson, Philip W., 1997: *Concepts in Solids*. World Scientific, Singapore.
- Bechtel, William, 2007: *Mental Mechanisms: Philosophical Perspectives on Cognitive Neuroscience*. London: Routledge.
- Bohr, Niels, 1949: Discussion with Einstein on Epistemological Problems of Atomic Physics. In: Schilpp, P.A. (ed.) 1949: *Albert Einstein: Philosoph - Scientist*. Library of Living Philosophers. Evanston, Illinois. 1949, 115–150. (Dt.: *Albert Einstein als Philosoph und Naturforscher*. Stuttgart: Kohlhammer 1955)
- Craver, Carl F. (2007): *Explaining the Brain. Mechanisms and the Mosaic Unity of Neuroscience*. Oxford: Clarendon Press.
- Descartes, René, [1637] 1969: *Discours de la Méthode/ Von der Methode des richtigen Vernunftgebrauchs und der wissenschaftlichen Forschung*. Französisch - Deutsch. Übers. u. hrsg. von Lüdger Gäbe. Hamburg: Meiner.
- Engfer, Hans Jürgen, 1982: *Philosophie als Analysis*, Stuttgart-Bad Cannstatt: Frommann-Holzboog.
- Falkenburg, Brigitte, 2000: *Kants Kosmologie. Die wissenschaftliche Revolution der Naturphilosophie im 18. Jahrhundert*. Frankfurt am Main: Klostermann.
- Falkenburg, Brigitte, 2007: *Particle Metaphysics. A Critical Account of Subatomic Reality*. Heidelberg: Springer.
- Falkenburg, Brigitte 2012a: *Mythos Determinismus. Wieviel erklärt uns die Hirnforschung?* Heidelberg: Springer.
- Falkenburg, Brigitte: 2012b: *Was sind subatomare Teilchen?* In: Esfeld, M. (Hg.) *Philosophie der Physik*, Frankfurt am Main: Suhrkamp, 158–184.
- Falkenburg, Brigitte 2014: *Neuronale Mechanismen und ihre Grenzen*. In: H. Fink & R. Rosenzweig (Hrsg.), *Bewusstsein - Selbst - Ich*. Münster: mentis.
- Hobbes, Thomas [1655] 1997: *De Corpore. Elemente der Philosophie. Erste Abtheilung: Der Körper*. Übers. u. hrsg. v. Karl Schuhmann. Hamburg: Meiner.
- Kant, Immanuel, 1755: *Allgemeine Naturgeschichte und Theorie des Himmels*. In: *Werke in sechs Bänden*. Hg. von W. Weischedel, Bd. 1. Nachdruck, Darmstadt: Wiss. Buchgesellschaft, 1983.
- Kant, Immanuel, 1756: *Monadologia physica*. Lat.-dt. In: *Werke in sechs Bänden*. Hg. von W. Weischedel, Bd. 1. Nachdruck, Darmstadt: Wiss. Buchgesellschaft, 1983.
- Kant, Immanuel, 1781/1787: *Kritik der reinen Vernunft*. Auflage A (1781) und B (1787). Riga: Hartknoch.
- Losee, John, 1993: *A Historical Introduction to the Philosophy of Science*. 3rd ed. Oxford: Oxford University Press.
- Newton, Isaac [1687] 1872: *Principia*. Dt.: *Mathematische Principien der Naturlehre*. Übers. Und hg. von J. Ph. Wolfers. Berlin: Robert Oppenheim.

- Newton, Isaac, 1729: *Principia. Sir Isaac Newton's Mathematical Principles of Natural Philosophy and his System of the World. Vol. I: The Motion of Bodies. Vol. II: The System of the World.* Mott's translation revised by Cajori. Berkeley: Univ. of California Press 1934, 1962.
- Newton, Isaac [1704] 1898: *Sir Isaac Newton's Optik oder Abhandlung über Spiegelungen, Brechungen, Beugungen und Farben des Lichts. II. und III. Buch.* Übersetzt u. herausgegeben von William Abendroth. Leipzig: Wilhelm Engelmann.
- Newton, Isaac, 1730: *Opticks or Treatise of the Reflections, Refractions, Inflections & Colours of Light.* Based on the fourth edition: London 1730. New York: Dover 1952, 1979.
- Pappus von Alexandria 1589: *Pappi Alexandrini Mathematicae Collectiones.* Engl. Ausgabe: Pappus of Alexandria, Book 7 of the Collection. Part 1. Edited with Translation and Commentary by Alexander Jones. New York 1986.

Abbildungsnachweis:

- Abbildung 1.1: Mechanismus einer Uhr, aus: Brigitte Falkenburg, *Das Dilemma von Determinismus und Freiheit. Was bedeutet die Hirnforschung für die menschliche Existenz?*, S. 9 http://ifpp.fk14.tu-dortmund.de/cms/ifpp/Medienpool/falkenburg_media/DeterminismusFreiheitMAPFRE.pdf, (Abruf am 12.5.2017)
- Abb. 1.2: Das Sonnensystem – ein deterministischer Mechanismus, Abbildung: <https://astrokramkiste.de/images/planeten/bahnebenen.png> (Abruf am 12.5.2017)
- Abb. 1.3: Atomare Mechanismen in einem Mineral, aus: Brigitte Falkenburg, *Das Dilemma von Determinismus und Freiheit. Was bedeutet die Hirnforschung für die menschliche Existenz?*, S. 10 http://ifpp.fk14.tu-dortmund.de/cms/ifpp/Medienpool/falkenburg_media/DeterminismusFreiheitMAPFRE.pdf (Abruf am 12.5.2017)
- Abb. 2.1: Beispiele für Ein-Level- Mechanismen, Originalabbildung für diesen Aufsatz (unter Verwendung einer Abbildung aus: Staiger, Jochen F., et al. (2009), *Local Circuits Targeting Parvalbumin-Containing Interneurons in Layer IV of Rat Barrel Cortex.* In: *Brain Structure and Function* Vol. 214, 1–13)
- Abb. 2.2: Schema eines Zwei-Level-Mechanismus, aus: Brigitte Falkenburg, *Mythos Determinismus.* Heidelberg: Springer 2012.
- Abb. 3.1: Analysis und Synthesis des Lichts, aus: Newton, Isaac, 1730: *Opticks or Treatise of the Reflections, Refractions, Inflections & Colours of Light.* Based on the fourth edition: London 1730. Zeitgenössische Editionen: New York: Dover 1952, 1979. Abbildung aus: <https://www.gutenberg.org/files/33504/33504-h/33504-h.htm> (Ausgabe 1730)
- Abb. 3.2: Übergang von der Galilei- zur Kepler-Bewegung, aus: Newton, Isaac, 1729: *Principia. Sir Isaac Newton's Mathematical Principles of Natural Philosophy and his System of the World. Vol. I: The Motion of Bodies. Vol. II: The System of the World.* Mott's translation rev. by Cajori. Berkeley: Univ. of California Press 1934, 1962.

- Abb. 4.1: Interferenz von Photonen oder Elektronen hinter einem Doppelspalt, Bildnachweis: Jasper Olbrich, CC BY-SA 3.0. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Elektronenbeugung_Doppelspalt_gerendert.png?uselang=de, (Abruf am 12.5.2017)
- Abb. 5.1: Neuronales Netz; unten: Teil eines Neurons mit Synapse (Pfeil), aus: Brigitte Falkenburg, *Mythos Determinismus*. Heidelberg: Springer 2012 (unter Verwendung von Abbildungen aus: Gray, Henry (1918), *Anatomy of the Human Body*. Philadelphia: Lea & Febiger 1918, Bartleby.com, 2000. www.bartleby.com/107/ [Aufruf: 5.8.2011], und: Staiger, Jochen F., et al. (2009), Local Circuits Targeting Parvalbumin-Containing Interneurons in Layer IV of Rat Barrel Cortex. In: *Brain Structure and Function* Vol. 214, 1–13.)
- Abb. 5.2: Parallelrechner (links) und natürliches neuronales Netz (rechts), aus: Brigitte Falkenburg, *Mythos Determinismus*. Heidelberg: Springer 2012. Verwendete Abb.: Siehe Abb. 5.1.
- Abb. 6.1: Die Analogie zwischen dem Gehirn und Computer, aus: Brigitte Falkenburg, *Mythos Determinismus*. Heidelberg: Springer 2012. Verwendete Abb.: Siehe Abb. 5.1.
- Abb. 6.2: Wie bringt das neuronale Netz im Cortex Bewusstsein hervor? Aus: Brigitte Falkenburg, *Mythos Determinismus*. Heidelberg: Springer 2012. Verwendete Abb.: Siehe Abb. 5.1.