

Petzer · Steiner (Hg.)
Synergie

TRAJEKTE

Eine Reihe des Zentrums für
Literatur- und Kulturforschung Berlin

Herausgegeben vom
Zentrum für Literatur- und Kulturforschung

Tatjana Petzer · Stephan Steiner (Hg.)

Synergie

Kultur- und Wissensgeschichte einer Denkfigur

Wilhelm Fink

Gedruckt mit freundlicher Unterstützung der VolkswagenStiftung

Umschlagabbildung:

Igor Sacharow-Ross: ohne Titel, aus dem Zyklus „Syntopie der Orte“
Mischtechnik auf Papier, 1995

Mit freundlicher Genehmigung des Künstlers und David Ertl (Fotograf).

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

Alle Rechte, auch die des auszugsweisen Nachdrucks, der fotomechanischen Wiedergabe und der Übersetzung, vorbehalten. Dies betrifft auch die Vervielfältigung und Übertragung einzelner Textabschnitte, Zeichnungen oder Bilder durch alle Verfahren wie Speicherung und Übertragung auf Papier, Transparente, Filme, Bänder, Platten und andere Medien, soweit es nicht §§ 53 und 54 UrhG ausdrücklich gestatten.

© 2016 Wilhelm Fink, Paderborn
(Wilhelm Fink GmbH & Co. Verlags-KG, Jühenplatz 1, D-33098 Paderborn)

Internet: www.fink.de

Einbandgestaltung: Evelyn Ziegler, München
Printed in Germany
Herstellung: Ferdinand Schöningh GmbH & Co. KG, Paderborn

ISBN 978-3-7705-5896-4

KLAUS MAINZER

Energie und Katalyse

Zu Wilhelm Ostwalds Naturphilosophie¹

Energie und Katalyse sind Schlüsselbegriffe zum Werk von Wilhelm Ostwald.² Seine Naturphilosophie nannte er selber „Energetik“.³ Für seinen Katalysebegriff erhielt er den Chemie-Nobelpreis. Nach ersten Vorlesungen in Leipzig über Naturphilosophie erschien 1908 sein Werk *Grundriss der Naturphilosophie*, in dem er ein modernes Konzept der Naturphilosophie im Rahmen der Naturwissenschaft entwirft. So heißt es bezeichnenderweise in der Einleitung:

Es ist [...] die Naturphilosophie der allgemeinste Teil der Naturwissenschaft. [...] Seit die Wissenschaft besteht, hat es einen gewissen Betrag solcher allgemeinen Gesetze gegeben, die zwar in Form und Ausdruck vielfach geteilt und bezüglich der Grenzen ihrer Geltung vielfach berichtigt worden sind, die aber dennoch ihren wesentlichen Bestand beibehalten haben. [...] Das Netz dieser Beziehungen erweitert und vermannigfaltigt sich unaufhörlich, seine Hauptzüge bleiben bestehen.⁴

Im Folgenden wird dieses Programm geprüft, und Ostwalds allgemeine Gesetze sowie Prinzipien werden mit heutigen Weiterentwicklungen konfrontiert. Dabei zeigt sich, dass seine naturphilosophischen Konzepte von großer Aktualität sind. Ich beginne mit den Prinzipien der Erhaltung der Energie und des Verbrauchs freier Energie, also dem ersten und zweiten Hauptsatz der Thermodynamik, die inzwischen von der Gleichgewichts- zur Nichtgleichgewichts-Thermodynamik weiterentwickelt wurde. Im Anschluss an eine knappe Rekapitulation dieser Entwicklungen beschreibt der Abschnitt „Von der Katalyse zu Autokatalyse und Selbstregulation“ den *Übergang von der Chemie zur Biologie*. Die Abschnitte „Energetik und Selbstregulation des Lebens“, „Energetik und Selbstregulation des Geistes“ sowie „Energetik und Selbstregulation in Technik und Gesellschaft“ beziehen

1 Text überarbeitet nach einem Vortrag, gehalten am 26.11.2004 im Rahmen des Wilhelm-Ostwald-Symposiums 2004 der Berlin-Brandenburgischen, der Sächsischen, der Lettischen und der Estnischen Akademie der Wissenschaften, abgedruckt in: *Mitteilungen der Wilhelm-Ostwald-Gesellschaft zu Großbothen e. V.* 11 (2006) 2, S. 19–36.

2 Vgl. auch Klaus Mainzer: „Wilhelm Ostwald“, in: Jürgen Mittelstraß (Hg.): *Enzyklopädie Philosophie und Wissenschaftstheorie*, Bd. 2, Mannheim: B. I. Wissenschaftsverlag 1984.

3 Wilhelm Ostwald: „Studien zur Energetik“, in: *Berichte über die Verhandlungen der Sächsischen Akademie der Wissenschaften zu Leipzig* 43 (1891), S. 271–288, repr. in: *Zeitschrift für physikalische Chemie* 9 (1892), S. 563–578. Ders. „Studien zur Energetik. 2. Grundlinien der allgemeinen Energetik“, in: *Berichte über die Verhandlungen der Sächsischen Akademie der Wissenschaften zu Leipzig* 44 (1892), S. 211–237, repr. in: *Zeitschrift für physikalische Chemie* 10 (1892), S. 363–386.

4 Wilhelm Ostwald: *Grundriss der Naturphilosophie*, Leipzig: Reclam 1908, S. 9, 15.

diese bis heute einflussreiche Wende auf gegenwärtige Debatten der Life-Sciences, der Gehirn- und Kognitionsforschung sowie schließlich auf Fragen des Verhältnisses von Technik und Gesellschaft. Ostwalds Energetik besitzt dabei als methodisches Forschungsprogramm bis heute wissenschaftstheoretische Bedeutung. Sein Konzept der Selbstregulation und Selbstorganisation ist für die heutige Debatte um Synergetik und nichtlineare Dynamik komplexer Systeme von aktueller Bedeutung. Weltanschaulich-ideologische Auseinandersetzungen um die Energetik erweisen sich hingegen als zeitbedingt.

Erhaltung der Energie – Erster Hauptsatz der Thermodynamik

In der Tradition von Ernst Mach spürt Wilhelm Ostwald in seinem Werk *Die Energie*⁵ zunächst den historischen Wurzeln des Energiebegriffs nach. Am Anfang seiner Rekonstruktion stehen Archimedes und dessen Hebelgesetz. Im Gleichgewicht sind die Produkte aus den Gewichten und den zugehörigen Hebellängen gleich, die Ostwald als Arbeit interpretiert. Im Prinzip der virtuellen Verschiebungen wird der Arbeitsbegriff in Gleichgewichtssystemen für einfache Maschinen wie Flaschenzüge und Rollensysteme verallgemeinert. Bei Johann Bernoulli wird der Energiebegriff dann erstmals für Gleichgewichtssysteme verwendet. Ostwald zitiert aus einem Brief Bernoullis von 1717 an den Mathematiker Pierre de Varignon:

Bei jedem Gleichgewicht beliebiger Kräfte, wie sie auch angebracht seien und nach welchen Winkeln sie mittelbar oder unmittelbar aneinander wirken mögen, ist stets die Summe der positiven Energien gleich der positiv genommenen Summe der negativen Energien. Energie ist dabei das Produkt der Kraft in dem in Richtung der Kraft durchmessenen Weg.⁶

In diesem Zusammenhang wird auch das Perpetuum mobile diskutiert. Ostwald erinnert an den niederländischen Physiker Simon Stevin, der bereits herausstellt: Arbeit kann nicht aus Nichts entstehen! In einem Titelbild erläutert Stevin diesen Grundgedanken anschaulich an einer Versuchsanordnung: Eine Kette aus gleich großen schweren Kugeln in gleichen Abständen wird über zwei zueinander geneigte schiefe Ebenen gelegt. Obwohl über der längeren Seite der weniger geneigten Ebene mehr Kugeln liegen, setzt sich die Kette nach dieser Seite nicht von selber in Bewegung. Selbst nach einem Anstoß setzt sie die Bewegung in diese Richtung nicht unbegrenzt fort, obwohl geometrisch immer dieselbe Kugelformation über den schiefen Ebenen vorliegt.⁷ Gottfried Wilhelm Leibniz formuliert erstmals den Erhaltungssatz der Energie am Beispiel des Fallgesetzes. Danach ist die potentielle Energie der Arbeit, um ein Gewicht auf eine bestimmte Fallhöhe zu

⁵ Wilhelm Ostwald: *Die Energie*, Leipzig: Johann Ambrosius Barth 1908.

⁶ Zit. nach ebd., S. 16.

⁷ Simone Stevino [Simon Stevin]: *Hypomnemata mathematica*, übers. von Wie. Sn. [Willebrord van Roijen Snell], Lugduni Batavorum [Leiden]: Ex officinâ Ioannes Patii, Academiæ Typografi 1605–08. Verfügbar unter: <http://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k1095532> (Stand März 2015).

heben, gleich der kinetischen Energie („lebendige Kraft“), in die potentielle Energie beim freien Fall umgewandelt wird.⁸

Grundlegend für Ostwald wird vor allem Julius Robert Mayer, der erstmals (ähnlich wie sein Zeitgenosse James Prescott Joule) mechanische Wärmeäquivalente für den Erhaltungssatz der Energie bestimmt. Als Arzt hatte er beobachtet, dass Arbeiter in den Tropen helleres Venenblut besitzen, da unter diesen Bedingungen weniger Wärmezufuhr (Oxidation) nötig ist.⁹ In seinem Vortrag „Über die Erhaltung der Kraft“ (1847) bestimmt Hermann von Helmholtz schließlich die mathematischen Ausdrücke für die verschiedenen Formen der Energie. In der Mechanik sieht er die Annahme von Kräften als Voraussetzung des mechanischen Energiesatzes. Er betrachtet es als Aufgabe der Physik, alle Erscheinungen durch solche Kräfte der Mechanik zu erklären.

Vor diesem wissenschaftshistorischen Hintergrund formuliert Ostwald in seinem Buch *Die Energie* den Erhaltungssatz der Energie als erstes Prinzip seiner energetischen Naturphilosophie. Allerdings lehnt er dabei Mayers Dualismus von Materie und Energie ab, da der Begriff „Materie“ nur die extensiven Größen von Energieformen (z. B. Masse von Gasen) bezeichnet. Er weist aber auch Helmholtzens mechanistischen Monismus ab, da er nach damaligem Kenntnisstand auf unbewiesenen Annahmen über die Mechanik der Atome beruht. Beobachtbar und messbar sind damals nur die ständigen Umwandlungen von Energieformen der Natur „[...] und insofern können wir sagen, daß in der Energie sich das eigentlich Reale verkörpert.“¹⁰

Verbrauch freier Energie – Zweiter Hauptsatz der Thermodynamik

Das zweite Prinzip der Energetik behandelt den Verbrauch freier Energie – Ostwalds Formulierung des Zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik. Auch für diesen zeigt er zunächst sehr anschaulich die wissenschaftshistorischen Ursprünge auf. Am Anfang stehen hier die Industrialisierung und James Watts Dampfmaschine: Wärme kann Arbeit erzeugen, wenn sie von einer höheren auf eine tiefere Temperatur fällt. Sadi Carnot (1824) erklärt den Kreisprozess des sich auf- und abwärts bewegenden Kolbens einer Wärmekraftmaschine durch Expansion und Kompression eines Gases auf Grund von abwechselnder Abkühlung und Erhitzung. Bei

8 Vgl. Gottfried Wilhelm Leibniz: „Specimen dynamicum pro admirandis naturae legibus circa corporum vires et mutuas actiones detegendis et ad suas causas revocandis“, in: Carl I. Gerhardt (Hg.): *Math. Schriften VI*, Pars I, Halle (o. V.) 1860, repr. Hildesheim: Georg Olms 1962, S. 234–246, hier S. 238.

9 Vgl. Julius Robert von Mayer: „Mayer und die Mechanische Wärmetheorie“, in: *Kleinere Schriften und Briefe*, hg. von Jakob Johann Weyrauch, Tübingen: J. G. Cotta 1893, S. 386–394, hier S. 391 f.

10 Ostwald: *Die Energie* (Anm. 5), S. 5. Vgl. Klaus Mainzer: *Materie. Von der Urmaterie zum Leben*, München: Beck 1996. Jürgen Mittelstraß: „Ostwald oder: Naturphilosophie zwischen Naturwissenschaft und Philosophie“, in: *Mitteilungen der Wilhelm-Ostwald-Gesellschaft zu Großbothen e. V.* 9 (2004), S. 6–17 (Vorträge zum 150. Geburtstag von Wilhelm Ostwald).

einer idealen Maschine (ohne Wärme- und Arbeitsverlust) ist der Kreisprozess reversibel. Eine Maschine, die mehr Arbeit erzeugen könnte als Carnots reversibler Kreisprozess, wäre ein Perpetuum mobile.¹¹

Bei idealen reversiblen Kreisprozessen bleibt das Verhältnis von Wärmemenge und (absoluter) Temperatur konstant. Diese von Rudolf Clausius „Entropie“¹² genannte Größe nimmt jedoch bei jedem nicht umkehrbaren (nicht idealen) Vorgang in einem abgeschlossenen System zu.¹³ Der Zweite Hauptsatz besagt daher nach Clausius, dass für abgeschlossene Systeme bei einem irreversiblen Prozess die Entropieänderung größer als Null ist oder bei einem reversiblen Prozess gleich Null ist. Aus der ständigen Zunahme der Entropie in der Welt folgert Lord Kelvin, dass die vorhandenen Temperaturunterschiede und die damit verbundenen Umwandlungsmöglichkeiten in Arbeit verschwinden, bis ein Endzustand maximaler Entropie erreicht ist. Diesen Vorgang der Energiezerstreuung nennt er „Dissipation“.¹⁴

Für Ostwald steht der Energiebegriff im Vordergrund. Er unterscheidet daher zwischen der ruhenden Energie (die „sich niemals mehr aus sich selbst in Bewegung, d. h. in Umwandlung versetzen kann“¹⁵) und der freien (beweglichen) Energie (die „allein zu Geschehnissen in der Welt Anlass gibt“¹⁶). Der Zweite Hauptsatz fordert nach Ostwald, dass in abgeschlossenen Systemen die freie Energie nur abnehmen oder verbraucht werden kann, niemals jedoch zunehmen. Damit ist für ihn auch der Zusammenhang der beiden Hauptsätze mit dem Perpetuum mobile klar: In abgeschlossenen Systemen kann ohne äußeren Energieaufwand 1) keine Energie aus Nichts entstehen (Unmöglichkeit des Perpetuum mobile erster Art) und 2) keine freie Energie aus ruhender Energie entstehen (Unmöglichkeit des Perpetuum mobile zweiter Art).

In der Energetik ist dann Energie und nicht Materie der Grundbegriff. Das ist weltanschaulich häufig missverstanden worden, wie beispielsweise die Polemik Lenins gegen Ostwald demonstriert.¹⁷ Darin zeigt sich aber nur, dass diese Vertreter des Materialismus die physikalische Begründung von Ostwald nicht verstanden hatten. Vom wissenschaftstheoretischen Standpunkt aus lässt sich nämlich Ostwalds Argument methodisch präzise ohne weltanschauliche Implikate rekonstruieren.

11 Ursprünglich entwarf Rudolf Diesel seinen Motor, um Carnots ideale Maschine zu realisieren.

12 Rudolf Clausius: „Über die Wärmeleitung gasförmiger Körper“, in: J[ohann] C. Poggendorf (Hg.): *Annalen der Physik und Chemie*, Bd. 125, Leipzig: Verlag von Johann Ambrosius Barth 1865, S. 353–400, hier S. 390.

13 Das lässt sich bereits bei alltäglichen Vorgängen beobachten: Ein Glas Wasser fällt zu Boden, zersplittert, Flüssigkeit fließt aus und Energie wird zerstreut. Der umgekehrte Vorgang, dass sich die Splitter mit der Flüssigkeit und der Energie wieder zusammen finden, wurde nie beobachtet.

14 William Thomson [Lord Kelvin]: „On the universal tendency in nature to the dissipation of mechanical energy“, in: *Philosophical Magazine* 25 (1852) 4, S. 304–306.

15 Wilhelm Ostwald: *Energetische Grundlagen der Kulturwissenschaft*, Leipzig: Verlag von Dr. Werner Klinkhardt 1909, S. 31.

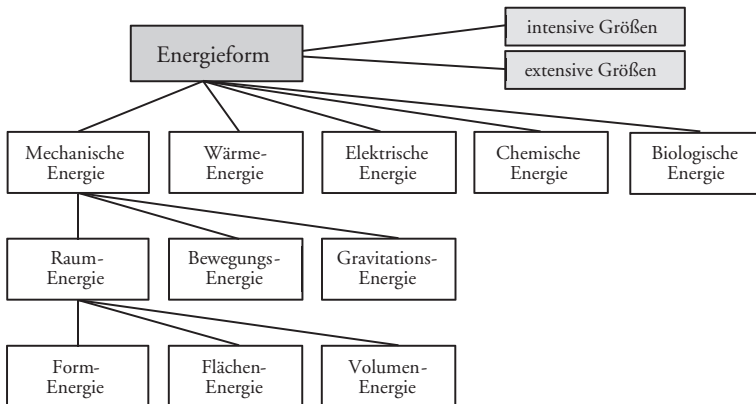
16 Ebd.

17 Vgl. Vladimir Il'ič Lenin: *Materializm i ėmpiriokriticizm. Kritičeskie zametki ob odnoj reakcionnoj filosofii* (1909), dt.: Wladimir Iljitsch Lenin: *Materialismus und Empiriokritizismus. Kritische Bemerkungen über eine reaktionäre Philosophie*, übers. von Frida Rubiner, Wien: Verlag für Literatur und Politik 1927, S. 272, 274, 350.

ren. Wenn ‚Materie‘ ein naturwissenschaftlicher Begriff sein soll, dann muss er sich auf Messgrößen beziehen.¹⁸ So unterscheidet Ostwald zwischen Energieformen als extensiven (also additiven) Messgrößen, z. B. die Ausdehnung oder das Gewicht eines Gases, von intensiven (nicht-additiven) Messgrößen, z. B. Temperatur oder Druck eines Gases. Der Begriff der Materie bezeichnet offenbar nur die extensiven Attribute einer Energieform. Daher ist er nach Ostwald kein Grundbegriff der Naturwissenschaft, sondern abgeleitet.

Zu dieser Auszeichnung des Energiebegriffs mag man nun stehen wie man will. Methodisch ist es jedenfalls möglich, mit dem Energiebegriff zu beginnen und andere Begriffe darauf zurückzuführen. Damit müssen wissenschaftstheoretisch keine ontologischen Ansprüche verbunden sein. Vom heutigen Standpunkt aus sieht man dieses Unternehmen wesentlich entspannter als im damaligen weltanschaulich-ideologischen Kampfgetümmel.¹⁹ Es kommt darauf an, ein konsistentes Begriffssystem durchzuführen. Genau das hat Ostwald in seinem Buch *Die Energie* nach dem Vorbild thermodynamischer Terminologie getan. Als methodisches Forschungsprogramm hat seine Energetik bis heute Bedeutung.

Nach Ostwalds Forschungsprogramm lassen sich alle Grundbegriffe der Naturwissenschaften auf Energieformen zurückführen, die jeweils durch intensive und extensive Größen bestimmt sind:



(Form-, Flächen-, Volumenänderung mit Arbeit verbunden)

Abb. 1: Energieformen nach Ostwald

¹⁸ Zu den unendbaren Bemühungen um eine exakte Definition des Materiebegriffs vgl. Gregor Schiemann: *Natur, Technik, Geist. Kontexte der Natur nach Aristoteles und Descartes in lebensweltlicher und subjektiver Erfahrung*, Berlin/New York, NY: de Gruyter 2005.

¹⁹ Wie die heftige Reaktion Lenins auf die Energetik zeigt (vgl. Anm. 17), wird sie weltanschaulich als ‚bürgerliche‘ Zwischenposition zwischen Materialismus und Idealismus verstanden, die wiederum als weltanschauliche Kampfbegriffe in der politischen Auseinandersetzung von Arbeiterklasse und reaktionärer Bourgeoisie aufgefasst wurden. Eine methodisch-wissenschaftstheoretische Auseinandersetzung, wie sie seit dem Wiener Kreis bereits eröffnet war, wird also zur damaligen Zeit von Weltanschauungsdebatten überlagert.

Solche Taxonomien von Begriffen nennt man heute in der Datenbanktechnik der Informatik ‚Ontologien‘. Damit sind jedoch keine weiteren Ansprüche verbunden als eine klare und konsistente Klassifikation, bei der sich Eigenschaften übergeordneter Begriffe an untergeordnete Begriffe weitervererben. Auffallend ist, dass selbst geometrische Größen mit dem Energiebegriff verbunden werden. Das entspricht aber auch heute thermodynamischer Terminologie, in der die mathematischen Formen von z. B. Volumen- oder Flächenenergie bestimmt werden. Gemeint ist dabei, dass z. B. das geometrische Volumen eines Gases oder Körpers durch Arbeit aufrechterhalten wird, die einer Volumenlinderung unter Druck entgegengesetzt werden muss. Die Volumenenergie hat als intensive Größe den Druck und als extensive Größe die geometrische Volumenmessung. Ein weiteres Beispiel ist die Wärmeenergie mit intensiven Größen wie Temperatur und extensiven Größen wie Entropie. Methodisch sollen in Ostwalds Forschungsprogramm der Energetik die Begriffe von Physik und Chemie also auf eine (phänomenologische) Thermodynamik zurückgeführt werden. Das mag ungewöhnlich erscheinen, da im 19. Jahrhundert zunächst die klassische Mechanik (z. B. bei Helmholtz) im Vordergrund stand. Ostwald hat aber gute Gründe, um diesen methodischen Aufbau vorzuziehen. Als Kritiker der Atomhypothese stand er der statistischen Mechanik skeptisch gegenüber und wollte daher eine Reduktion der Thermodynamik auf eine Mechanik der Atome vermeiden. Nicht zuletzt spielt aber auch die überragende praktische Bedeutung der Energie und Energieumwandlung für die moderne technisch-industrielle Zivilisation eine große Rolle.

Energieumwandlung in der Energetik bedeutet, dass freie Energie nach dem Zweiten Hauptsatz verbraucht und in ruhende Energie umgewandelt wird. Die zentrale freie Energie auf der Erde ist die Sonnenenergie, aus der sich in Natur und Technik ein komplexes Netz der Energieumwandlung entfaltet: Pflanzen wandeln Sonnenenergie in chemische Energie um, die in Kohle gespeichert durch Verbrennung zu Wärmeenergie wird, um als Bewegungsenergie z. B. eine Dampfmaschine anzutreiben. Sonnenenergie konzentriert sich aber auch als Wasserenergie in einer Regenwolke, die abregnet und in einem Stausee gesammelt wird, um durch Gravitationsenergie auf eine Turbine geleitet neue Bewegungsenergie zu erzeugen, die schließlich in elektrische Energie umgewandelt wird. Mit Solarzellen gibt es heute zudem den direkten Weg von der Sonnenenergie zur elektrischen Energie. Ostwalds Energetik entwirft also die Grundlagen für ein weit schauendes Forschungsprogramm der Energienetze, ohne die die technisch-industrielle Zivilisationen heute nicht denkbar wäre.²⁰

20 Vgl. weiterführend dazu Heinrich Scheel (Hg.): *Internationales Symposium anlässlich des 125. Geburtstag von Wilhelm Ostwald*, Berlin: Akademie-Verlag 1979. Wolfgang Fratzscher/Karl-Friedrich Knoche: „Fran Bošnjaković and the School of Engineering thermodynamics in Dresden“, in: *Energy* 29 (2004), S. 1837–1842.

Von der Gleichgewichts- zur Nichtgleichgewichts-Thermodynamik

Eine Schwäche der Energetik wurde darin gesehen, dass sie phänomenologisch anschaulich bleibt und der nächste Schritt der mathematischen Umsetzung fehlt. Vom heutigen Standpunkt aus fehlt der Energetik zudem die Erklärung durch die Mikrophysik der Atome und Moleküle, die heute (im Unterschied zum Ende des 19. Jahrhunderts) bestens bestätigt ist. Diese Defizite behoben Ludwig Boltzmann und später Josiah Willard Gibbs durch ihre statistische Fundierung der Thermodynamik.²¹ Nach Boltzmann ist die Entropie ein Maß für die Verteilungsmöglichkeiten der Mikrozustände der Elemente (z. B. Gasmoleküle) eines Systems, die einen Makrozustand erzeugen. Wachsende Entropie in einem abgeschlossenen System entspricht dem Übergang von einer geordneten zu einer ungeordneten und zufälligen Verteilung im thermischen Gleichgewicht. Die Irreversibilität des Makrozustands ist hoch wahrscheinlich trotz Mikroreversibilität der molekularen Stoßgesetze.

Unordnung entsteht aber spontan nach dem Zweiten Hauptsatz nur in isolierten Systemen. In Systemen mit Energie- und Stoffaustausch können sich Mikroelemente zu neuen Strukturen und Ordnungen arrangieren. So ist ein Regentropfen ein komplexes System von Wassermolekülen, die sich durch Energieminimierung im thermischen Gleichgewicht einer nahezu perfekten Kugelform organisieren. Kühlt man dieses System jedoch ab, entstehen im Gefrierpunkt die regulären Strukturen von Eiskristallen. Ein weiteres Beispiel für Ordnungsentstehung durch Energieminimierung ist ein Eisenmagnet. Mikrophysikalisch handelt es sich um ein komplexes System von atomaren Dipolen, deren zwei Zustände Spin up und Spin down im erhitzten Zustand irregulär verteilt sind. Die durchschnittliche Verteilung der auf- und abwärts zeigenden Dipole ist der Ordnungsparameter des Systems. Bei Abkühlung auf den Curie-Punkt organisieren sich die Elemente spontan in einem regulären Ordnungsmuster im Gleichgewicht. Dabei weisen die Spinzustände alle in eine Richtung und verstärken dadurch ihre Wirkung. Diese mikroskopischen Interaktionen erklären den neuen makroskopischen Zustand des Eisenkörpers, der nun magnetisch ist.

Gleichgewichtsstrukturen waren auch in Ostwalds Thermodynamik bekannt. Neu ist die Vorstellung, dass Ordnung und Strukturen fern des thermischen Gleichgewichts entstehen können, obwohl entsprechende Experimente mit Konvektionszellen (z. B. Bénard-Experiment) seit etwa 1900 vorliegen. So entstehen bei Erwärmung einer Flüssigkeitsschicht von unten an einem kritischen Wert spontan reguläre Rollmuster mit zwei möglichen Drehrichtungen. Welche Ordnung sich durchsetzt, hängt von geringsten Anfangsfluktuationen ab. Auch Strö-

²¹ Vgl. Ludwig Boltzmann: *Vorlesungen über die Gastheorie*, 2 Teile, Leipzig: Barth, 1896 und 1898. Josiah Willard Gibbs: *Elementary Principles in Statistical Mechanics, developed with especial reference to the rational foundation of thermodynamics*, New York, NY: Charles Scriber's Sons 1902.

mungsmuster in Flüssigkeiten oder Luft entstehen durch Erhöhung der Energiezufuhr. Steigende Strömungsgeschwindigkeit führt zu komplexen Ordnungsmustern (Attraktoren) fern des thermischen Gleichgewichts. Man spricht dann auch von Phasenübergängen fern des thermischen Gleichgewichts: Alte Ordnungen werden durch wachsende Kontrollwerte (z. B. Temperatur, Strömungsgeschwindigkeit) instabil, brechen zusammen, neue lokale Ordnungen entstehen, die wieder instabil werden, etc. So entwickelt sich ein thermodynamischer Verzweigungsbaum von immer neuen lokalen Gleichgewichten fern des thermischen Gleichgewichts, an deren Ästen neue lokale Ordnungen und Strukturen wie z. B. Strömungsmuster entstehen.

Das ist die Idee einer Nichtgleichgewichts-Thermodynamik, die u. a. Ilya Prigogine vertreten hat. Als Chemie-Nobelpreisträger ist er in einem gewissen Sinn Nachfolger von Wilhelm Ostwald, da auch er sein Forschungsprogramm mit naturphilosophischen Perspektiven versieht.²² Methodisch setzt Prigogine allerdings die mikrophysikalische Begründung Boltzmanns für die Nichtgleichgewichts-Thermodynamik fort:

Die klassische Thermodynamik führt zum Begriff der „Gleichgewichtsstruktur“, wie sie etwa Kristalle darstellen. Die Bénard-Zellen sind ebenfalls Beispiele einer Struktur, aber ganz anderer Art. Sie sind ‚dissipative Strukturen‘ fern des *thermischen* Gleichgewichts. [...] Können die Parameter, welche den Aufbau eines Kristalls beschreiben, aus den Eigenschaften der Moleküle abgeleitet werden, aus denen der Kristall besteht, und insbesondere aus der Reichweite der Anziehungs- und Abstoßungskräfte der Moleküle, so sind die Bénard-Zellen – wie alle dissipativen Strukturen – im wesentlichen ein Ausdruck der globalen Nichtgleichgewichtssituation, durch die sie hervorgerufen werden.²³

Das lässt sich auch mathematisieren: Auf der Mikroebene werden die Wechselwirkungen der Systemelemente durch gekoppelte Bewegungsgleichungen (in der Regel nichtlineare Differentialgleichungen) für die einzelnen Elemente beschrieben. In der Nähe eines Instabilitätspunktes lassen sich instabile und stabile Verhaltensweisen (Moden) durch eine lineare Stabilitätsanalyse unterscheiden. Wenige instabile Moden können dort durch heftige Fluktuationen Amplituden von makroskopischer Größenordnung erreichen und die übrigen stabilen Moden beeinflussen. So entsteht ein makroskopisches Verhaltensmuster, das schließlich die gesamte Systemdynamik dominiert. Mathematisch wird dieses Muster durch einen Ordnungsparameter charakterisiert. Es reicht also, wenige Ordnungsparameter zu kennen, um die makroskopische Dynamik von vielleicht Millionen oder Milliarden von Elementen zu verstehen. Dies ist das Konzept der Synergetik, das insbesondere

22 Vgl. Ilya Prigogine: *Vom Sein zum Werden. Zeit und Komplexität in den Naturwissenschaften*, München: Piper ⁴1985.

23 Ilya Prigogine/Isabelle Stengers: *Dialog mit der Natur: neue Wege naturwissenschaftlichen Denkens*, München: Piper ⁵1986, S. 152.

Hermann Haken weiterentwickelt hat.²⁴ Dazu dienen stochastische Differentialgleichungen wie die Mastergleichungen. Die Einführung von Ordnungsparametern in eine makroskopische Gleichung für die globale Gesamtdynamik eines Systems (z. B. Flüssigkeit) ist also eine gewaltige Reduktion von Komplexität gegenüber den entsprechenden Millionen oder Milliarden von Bewegungsgleichungen der vielen Systemelemente (z. B. Flüssigkeitsmoleküle).

Neuere Untersuchungen zeigen jedoch, dass eine Erklärung der Entstehung komplexer Muster und Strukturen nur durch instabile Zustände, wie es bei Prigogine und in der Synergetik geschieht, unvollständig ist. Bereits Alan Turing und Stephen Smale hatten an ausgewählten Beispielen mathematisch bewiesen, dass auch ursprünglich stabile Systemelemente komplexe Strukturen (z. B. oszillierende Muster) erzeugen können, wenn sie dissipativ gekoppelt werden.²⁵ Allgemein kann mathematisch bewiesen werden, dass Systemelemente ‚lokal aktiv‘ sein müssen, um aus instabilen oder stabilen Ausgangszuständen komplexe Strukturen zu erzeugen. Lokal aktive Systemelemente sind in der Lage, kleine Inputs aus ihrer lokalen Umgebung auf Kosten einer Energiequelle in einen großen Output zu verstärken, um damit die Struktur- und Musterbildung des Gesamtsystems auszulösen. Beispiel einer lokal aktiven Einheit ist in der Technik ein Transistor, der Strominputs auf Kosten einer Batterie verstärkt. Ebenso lassen sich Neuronen als ‚Verstärker‘ auffassen, die synaptische Inputs umgebender Neuronen zu einem Aktionspotential verstärken, das komplexe Verschaltungsmuster im Gehirn auslöst. Mathematisch lässt sich das Prinzip lokaler Aktivität für (nicht-lineare) Reaktions-Diffusionsgleichungen präzisieren, um komplexe Musterbildungen in Physik, Chemie, Biologie und Gehirnforschungen zu erklären.²⁶

Naturphilosophisch ist hier entscheidend, dass die neu entstandene Ordnung oder Struktur nicht auf die Systemelemente alleine zurückgeführt werden kann, sondern nur auf ihre lokale Aktivität durch (dissipative) Kopplung mit anderen Systemelementen. Das Ganze ist also mehr als die Summe seiner Teile. Das Prinzip der lokalen Aktivität durch dissipative Kopplung ist damit der Ort, an dem die alte naturphilosophische Einsicht synergetischen Zusammenwirkens eine mathematisch präzise definierte Funktion erhält.

Nach der Physik lassen sich auch chemische Strukturen fern des thermischen Gleichgewichts untersuchen. In offenen dissipativen chemischen Systemen können Phasenübergänge zu immer komplexeren makroskopischen Mustern (Attraktoren) stattfinden, die durch lokal aktive Substanzen und ihre dissipativen Reaktionen in Abhängigkeit von einer äußeren Zu- und Abfuhr von Stoffen an kritischen

²⁴ Zur physikalischen Beschreibung dieses Phänomens vgl. auch Hermann Haken: *Die Selbstorganisation komplexer Systeme. Ergebnisse aus der Werkstatt der Chaostheorie*, Wien: Picus 2007, Kap. 6.7.

²⁵ Alan M. Turing: „The chemical basis of morphogenesis“, in: *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* 237 (641), S. 37–72. Stephen Smale: „The mathematical model of two cells via Turing’s equation“, in: *Lectures in Applied Mathematics* 6 (1976), S. 15–26.

²⁶ Vgl. Klaus Mainzer/Leon Chua: *Local Activity Principle. The Cause of Complexity and Symmetry Breaking*, London: Imperial College Press 2013.

Werten ausgelöst werden. Bekanntes Beispiel sind die oszillierenden Ringwellen der Belousov-Zhabotinsky (BZ)-Reaktion. Die Erhaltung solcher dissipativen Ordnungsmuster wird durch autokatalytische Wirkungen chemischer Stoffe erklärt. Chemisch werden die mikroskopischen Wechselwirkungen durch Diffusions-Reaktionsgleichungen beschrieben, denen mathematisch wiederum nichtlineare Gleichungen entsprechen. Chemische Oszillationen wie die BZ-Reaktion lassen sich durch Trajektorien eines Grenzzyklus (Attraktor) im Phasenraum als oszillierende Zeitreihe oder im thermodynamischen Bifurkationsbaum darstellen. Stabile und instabile Zustände können Musterbildungen (z. B. den Grenzzyklus einer chemischen Oszillation) auslösen, wenn die wechselwirkenden Substanzen lokal aktiv sind.

Von der Katalyse zur Autokatalyse und Selbstregulation

Die Schlüssel zur Analyse der Entstehung von Ordnung und Strukturen sind für Ostwald Katalyse, Autokatalyse und Selbstregulation. Katalyse macht die Entstehung von Neuem möglich: Zwei Reaktionspartner würden im atomaren Zustand eine chemische Reaktion eingehen. Ein Katalysator liefert die notwendige Aktivierungsenergie zur Trennung der Bindungen und geht Zwischenverbindungen ein. Am Ende der Reaktion liegt er wieder unverändert vor. So regt eine Platinmünze beim Zerfall von Wasserstoffperoxid die Sauerstoffentwicklung an und steckt eine Gold- und Kupfermünze durch elektrochemische Vorgänge an. Seit der Antike sind katalytische Reaktionen bekannt. Erinnert sei an die Wirkung von Enzymen bei der alkoholischen Gärung und der Essigsäure-Herstellung. Eine erste Definition der Katalyse lieferte 1836 Berzelius: „Die katalytische Kraft scheint eigentlich darin zu bestehen, dass Körper durch ihre bloße Gegenwart, *nicht* durch ihre Verwandtschaft, die bei dieser Temperatur schlummernden Reaktionseigenschaften zu erwecken vermögen [...]“.²⁷

Tatsächlich geht ein Katalysator chemische *Wechselwirkungen* ein und wirkt nicht nur durch die „bloße Gegenwart“. Die richtige Definition, für die Ostwald 1909 den Chemie-Nobelpreis erhielt, lautet daher bis heute: „Ein Katalysator ist ein Stoff, der die Geschwindigkeit einer chemischen Reaktion erhöht, ohne selbst dabei verbraucht zu werden und ohne die endgültige Lage des thermodynamischen Gleichgewichts dieser Reaktion zu verändern.“²⁸

27 Jöns Jakob Berzelius: „Einige Ideen über eine bei der Bildung organischer Verbindungen in der lebenden Natur wirksame, aber bisher noch nicht bemerkte Kraft“ [o.O.] 1836, wiederabgedr. in: Alwin Mittasch: *Lebensproblem und Katalyse. Mit klassischen Dokumenten aus der Geschichte der katalytischen Forschung und einem Beitrag von Jerome Alexander*, Ulm: J. Ebner 1947, S. 71–78, hier S. 77 (Hvh. K.M.).

28 Wilhelm Ostwald in einem Vortrag gehalten vor der 2. Hauptversammlung der deutschen Elektrochemischen Gesellschaft in Frankfurt am Main vom 6.-8. Juni 1895, zit. nach Etienne de Fodor: *Elektrizität aus Kohle* (1897), Nachdruck, Bremen: DOGMA im Europäischen Hochschulverlag 2012, S. 175.

Autokatalyse („Selbstkatalyse“) ist nach Ostwald eine Form der Katalyse, bei der ein Endprodukt katalytische Wirkung auf die Reaktion selber hat. Der Katalysator wird erst während der Reaktion gebildet. Das hat eine Beschleunigung zur Folge, die an das Wachstum von Organismen erinnert. Gibt man beispielsweise Kupfer zu konzentrierter Salpetersäure, setzt die Reaktion zunächst nur langsam ein. Die dabei gebildeten braunen Dämpfe der Stickoxide wirken katalytisch und beschleunigen die Reaktion dann immer mehr. Oszillierende chemische Reaktionen wie die BZ-Reaktion werden ebenfalls durch autokatalytische Reaktionen möglich. Dieser ‚Selbsterregung‘ durch Rückkopplung entspricht mathematisch die lokale Aktivität in nichtlinearen Reaktionsgleichungen. Sie sind ein Beispiel für nichtlineare Dynamik fern des thermischen Gleichgewichts. Analog lässt sich der Wachstumsprozess lebender Organismen auf autokatalytische Prozesse zurückführen: So trägt etwa eine Blumenzwiebel die Ressourcen für ihr Primärwachstum in sich. Sie erzeugen einen weißen Keim, der durch Wechselwirkung mit Licht grün wird. Dann beginnt die Pflanze selbstständig zu wachsen, indem sie ihre eigenen Enzyme, d. h. katalytisch wirkende Proteine aufbaut, erzeugt und sich immer schneller entwickelt. Auch dies ist, wie wir heute sagen würden, auf die lokale Aktivität dissipativ gekoppelter Substanzen zurückzuführen.

Energetik und Selbstregulation des Lebens

Lebende Organismen sind Ostwald zufolge schließlich dissipative chemische Systeme, die sich nach den Gesetzen der Energetik durch Umwandlung freier Energie ihrer Umwelt im stationären Gleichgewicht fern der Erstarrung des Todes im thermischen Gleichgewicht halten. Sie zeichnen sich durch *Selbsterhaltung*, *Selbstregulation* und *Selbstreproduktion* aus. Die Bedingungen der Selbstregulation und Selbsterhaltung erfüllt, wie Ostwald an vielen Stellen erläutert, bereits eine Kerzenflamme, die in einem rückgekoppelten Kreislauf einerseits freie Energie aus dem verflüssigten Wachs der Kerze in Wärmeenergie umwandelt, andererseits mit dieser Wärmeenergie das Wachs verflüssigt, das die notwendige freie Energie zur Verfügung stellt. Dieser Kreislauf ermöglicht ein stationäres Gleichgewicht von freier Energie und Dissipation von Wärmeenergie. Bei lebenden Organismen kommt die Selbstreproduktion noch hinzu. Zur Regelung ihrer chemischen Reaktionen dienen Katalysatoren oder Enzyme, die von Organismen in einer Autokatalyse selbstständig erzeugt werden. Der Begriff des stationären Gleichgewichts ist als ‚Fließgleichgewicht‘ bekannt und wird wissenschaftshistorisch dem Biologen Ludwig von Bertalanffy (1901–1972) zugeschrieben. Tatsächlich verwendet Ostwald diesen Begriff und seine grundlegende Bedeutung für das Verständnis von Leben in seinem 1903 in Berkeley gehaltenen Vortrag über „Chemie und Biologie“.²⁹

²⁹ Vgl.: „[...] Lebewesen sind zunächst nicht stabile, sondern *stationäre* Gebilde, in ihnen verlaufen die schnellen Änderungen derart, dass Gewinn und Verlust sich nahezu decken, so daß der Gesamtzustand nur langsame Änderungen erfährt [...].“ Wilhelm Ostwald: „Chemie und Biologie“,

Damit antizipiert er heutige Erklärungen der Entwicklung des Lebens durch Phasenübergänge präbiotischer Evolution mit biochemischen katalytischen und autokatalytischen Prozessen. Erinnert sei in diesem Zusammenhang an Manfred Eigen und Peter Schusters katalytische Hyperzyklen.³⁰ Hyperzyklen sind selbstreproduzierende makromolekulare Systeme, in denen RNA-Strukturen und Enzyme kooperieren: Die i -te RNA-Matrize I_i kodiert das i -te Enzym E_i ($i = 1, 2, \dots, n$). Das i -te Enzym E_i beschleunigt die Replikationsrate der $i+1$ -ten RNA I_{i+1} . Die Information, die in RNA-Sequenzen kodiert ist, wird also in Enzyme übersetzt, analog dem Übersetzungsvorgang in biologischen Systemen. Die zyklische Organisation sichert die strukturelle Stabilität. Hyperzyklen sind Vorläufer von Protozellen. Sie sollen die Entstehung des komplexen Übersetzungsmechanismus mit eindeutigen genetischen Codes erklären.

Eine Zelle lässt sich im Sinne Ostwalds als energetisches System verstehen, das mit molekularen Tools wie Proteine, Nukleinsäuren, Lipide und Polysaccharide die Energieproduktion, Informationsverarbeitung und Selbstreplikation aufrechterhält. Nach der thermodynamischen Selbstorganisation von Ordnung wird damit die genetische Selbstorganisation von Leben möglich: Komplexe zelluläre Organismen wachsen unter geeigneten Umweltbedingungen durch Selbstreplikation, Mutation, Selektion und Metabolismus nach genetischen Codes. Die Entstehung der Arten lässt sich dann im Rahmen einer Nichtgleichgewichtsdynamik als Phasenübergänge verstehen. Analog zum thermodynamischen Bifurkationsbaum erhalten wir Darwins Evolutionsbaum der Arten. An die Stelle von Fluktuationen in thermodynamischen Instabilitätspunkten treten nun Mutationen als Zufallsveränderungen von DNA-Codes, die Verzweigungen im Evolutionsbaum erzeugen. Selektionen sind die treibenden Kräfte in den Ästen, an denen statt z. B. thermodynamischer Strömungsmuster nun die Arten als neue biologische Strukturen entstehen. Aber auch stabile Ausgangszustände können biochemische Strukturbildung auslösen, wenn dissipativ gekoppelte Substanzen lokal aktiv sind. Ein Beispiel liefern biochemische Substanzen, die in den lebensfeindlichen Tiefen der Ozeane scheinbar ‚tot‘ (also mathematisch stabil) sind, aber durch dissipative Kopplung mit der Energie heißer Tiefseevulkane lokal aktiv werden und Lebensformen von Tiefseeorganismen erzeugen.³¹

Methodisch muss an dieser Stelle betont werden, dass damit die biologische Evolution keineswegs auf die Thermodynamik reduziert wird. Das Prinzip lokaler Aktivität und die nichtlineare Dynamik komplexer Systeme sind rein mathematische Theorien nichtlinearer Differentialgleichungen, in der keine physikalischen oder andere naturwissenschaftlichen Größen festgelegt sind. Vielmehr wird der *mathematische Formalismus nichtlinearer Dynamik* im einen Fall thermodynamisch

in: ders.: *Gedanken zur Biosphäre: sechs Essays*, eingeleitet und mit Anmerkungen versehen von Hermann Berg, Ostwalds Klassiker der exakten Wissenschaften, hg. von D. Goetz/E. Wächtler/H. Wußing, Bd. 257, Leipzig: Akademische Verlagsgesellschaft 1978, S. 16–29, hier S. 22.

30 Vgl. Manfred Eigen/Peter Schuster: *The Hypercycle – A Principle of Natural Self-Organization*, Berlin: Springer 1979.

31 Vgl. Mainzer/Chua: *Local Activity Principle* (Anm. 26).

und im anderen Fall biologisch interpretiert. Wissenschaftstheoretisch gesprochen ergeben sich ein *thermodynamisches* und ein *biologisches Modell nichtlinearer Dynamik*. Diese Modelle sind dann mit den Beobachtungen und Messungen in den jeweiligen Anwendungsfeldern zu testen und zu überprüfen. So ist es später auch möglich, diesen Formalismus auf andere Anwendungsgebiete wie z. B. Gehirn- und Kognitionsforschung oder Sozialwissenschaften zu übertragen.³²

Nach diesem biologisch-evolutionären Modell entstehen Hierarchiestufen des Lebens mit immer komplexeren Systemen. Sie reichen von den physikalischen und chemischen Systemen über Zellen, Organe und Organismen bis hin zu Populationen und ökologischen Systemen. Diese Entwicklungen lassen sich wieder als *Phasenübergänge im Rahmen nichtlinearer Dynamik* verstehen. Für einige dieser Entwicklungsstufen liegen auch bereits mathematische Selbstorganisationsmodelle vor. Auf jeden Fall handelt es sich um ein methodisches Forschungsprogramm, das über den Ansatz von Ostwalds Energetik hinaus biologische Evolution erklären soll. Dabei ist der methodische Unterschied zwischen Ostwalds Begriff der ‚Selbstregulation‘ und dem Begriff der „Selbstorganisation“ im Rahmen der Nichtgleichgewichtsdynamik zu beachten.³³ ‚Selbstregulation‘ bezieht sich nach Ostwald auf stationäre Gleichgewichte und damit Gleichgewichtsdynamik, während ‚Selbstorganisation‘ Phasenübergänge im Rahmen einer Nichtgleichgewichtsdynamik meint. Anschaulich gesprochen lässt sich im Rahmen der Gleichgewichtsdynamik, wie Ostwald auch erläutert, die Erhaltung des Lebens, aber nicht seine evolutionäre Entwicklung verstehen. Der Grund ist, dass katalytische Prozesse, wie Ostwald selber in seiner berühmten Katalysedefinition betont, nicht das Gleichgewicht verändern. Beim Evolutionsprozess werden aber in einem Verzweigungsbaum alte Gleichgewichte instabil, Populationen und Arten sterben aus und neue Arten entstehen nach Phasenübergängen in neuen lokalen Gleichgewichten.

Naturphilosophisch ist hier wichtig, dass Ostwald mit seiner biologischen Energetik, d. h. der Lehre von energetischen Organismen im stationären Gleichgewicht, sowohl Materialismus als auch Vitalismus überwinden will. Leben lässt sich nämlich nicht allein durch die Eigenschaften von Atomen und Molekülen im Sinne des Materialismus erklären.³⁴ Es bedarf aber auch keiner ‚immateriellen Lebenskraft‘ im Sinne des Vitalismus. Henri Bergsons Konzept des *élan vital* weist zwar Ähnlichkeit mit dem Prinzip lokaler Aktivität auf.³⁵ Die Selbstreproduktion und Selbstregulation von Lebensenergie wird allerdings erst durch das Prinzip lokaler Aktivität mathematisch präzisiert und in der empirischen Forschung überprüfbar.

32 Vgl. ebd. sowie den Beitrag von Dietmar Hansch und Hermann Haken in diesem Band.

33 Vgl. den Beitrag von Marie-Luise Heuser in diesem Band.

34 Zur Debatte um den Materialismus vgl. Kurt Bayertz: „Was ist moderner Materialismus?“, in: ders./Walter Jaeschke/Myriam Gerhard (Hg.): *Weltanschauung, Philosophie und Naturwissenschaft im 19. Jahrhundert: Der Materialismusstreit*, Bd. 1., Hamburg: Meiner 2007, S. 50–70.

35 Zu Henri Bergsons Konzept des „élan vital“ vgl. dessen Schrift *L'évolution créatrice* (1907), Paris: Les Presses universitaires de France ⁸⁶1959, S. 59–64. Mainzer/Chua: *Local Activity Principle* (Anm. 26), S. 401–402.

Bemerkenswert ist, dass Ostwald seine biologische Energetik bis in die Medizin ausweitet.³⁶ Damit umfasst sie einen Anwendungsbereich, den man heute als Lebenswissenschaft oder Life Science zusammenfasst. Seine Schlüsselbegriffe lauten dabei „Selbstheilung“ und „Überheilung“.³⁷ Autokatalyse und Selbsterhaltung führen nach Ostwald zur Fähigkeit der Selbstheilung von Organismen. Man denke z. B. an die Phasen der Wundheilung des tierischen oder menschlichen Organismus. Als Reparaturvorgang steht Selbstheilung nach Ostwald im Fließgleichgewicht mit der Oxidation als ‚Selbstverbrennung‘ von Körpersubstanz. Mit ‚Überheilung‘ bezeichnet Ostwald die Fähigkeit, einen Überschuss als Gegenwirkung zu erzeugen. Ein Beispiel ist die Muskelbildung bei dauernder Beanspruchung oder Training. Sie ermöglicht Leistungssteigerung eines Organismus. Auch dabei geht es letztlich um gezielte Energieumwandlung zur Leistungsoptimierung. Die moderne Sportmedizin verfolgt heute die Ziele von Ostwalds medizinischer ‚Überheilung‘. Ostwald beschreibt aber in diesem Zusammenhang auch sehr anschaulich die abnehmende Fähigkeit des alternden Organismus zu Selbstheilung und Überheilung. Energie muss daher im Alter sparsam und gezielt therapeutisch eingesetzt werden – ein hoch aktuelles Anwendungsgebiet der biologischen Energetik im Zeitalter überalternder Wohlstandsgesellschaften.

Energetik und Selbstregulation des Geistes

Die natürliche Fortsetzung von Physik, Chemie, Biologie und Medizin ist die Energetik und Selbstregulation des Geistes. Programmatisch schreibt Ostwald dazu in seinem Buch *Die Energie* (1908):

Für die mechanistische Weltauffassung besteht zwischen den physischen Erscheinungen als mechanischen einerseits und den geistigen andererseits eine unüberbrückbare Kluft; für die energetische Weltauffassung besteht im Gegenteil ein stetiger Zusammenhang zwischen den einfachsten Energiebestätigungen, den mechanischen, und den verwickeltsten, den psychischen.³⁸

Dieser stetige Übergang lässt sich an den Hierarchiestufen des Zentralnervensystems (ZNS) veranschaulichen. Das ZNS besteht nämlich aus einer Hierarchie

36 Vgl. Ostwalds Vorträge „Zur Energetik der Psyche“, unveröffentlichtes Manuskript, Großbothen 1913 (Akademiearchiv d. Berlin-Brandenburg Akademie der Wissenschaft, Ostwald-Nachlass Nr. 4519) und „Überheilung, ein biologisches Urphänomen“, Manuskript und Korrekturfahnen, Vortrag 8.4.1930 (Akademie der Wissenschaften Berlin, Ostwald-Nachlass Nr. 5029, 5030). Vgl. Hermann Berg: „Ostwalds Ideen zum Energiefluss in der Biosphäre“, in: *Mitteilungen der Wilhelm-Ostwald-Gesellschaft zu Großbothen e. V.* 9 (2004), Sonderheft 18, S. 32–41. Eckhard Bendin: „Ostwalds biologische Energetik als Substrat der psychologischen Farbenlehre“, in: *Wissenschaftliche Zeitschrift der TU Dresden* 56 (2007) 3–4, S. 161–166

37 Wilhelm Ostwald: „Überheilung“, in: *Forschungen und Fortschritte* 6 (1. und 10.8.1930) 22/23, S. 296–297. Ders.: „Die Wirklinie der Überheilung“, in: *Forschungen und Fortschritte* 6 (1.9.1930) 25, S. 327–328.

38 Ostwald: *Die Energie* (Anm. 5), S. 156.

von organisierten Teilstrukturen zunehmender Größe und Komplexität.³⁹ Die Hierarchie reicht von Ionen, Molekülen, Membranen, Zellen und Synapsen über Netzwerke, Schichten und topographische Karten zu den Teilsystemen, die Wahrnehmung, Bewegung, Emotionen, Denken und Bewusstsein ermöglichen. Signalverarbeitung in Nervenzellen (Neuronen) ist Energieumwandlung im Sinne der Energetik. So wandelt z. B. ein sensorisches Neuron mechanische Energie (z. B. Reiz durch die Dehnung eines Muskels) in elektrische Energie (Aktionspotentiale) um.

Mit „Überheilung“ bezeichnete Ostwald die Verstärkung körperlicher und geistiger Fähigkeiten durch z. B. Training und Lernen. Tatsächlich lassen sich heute synaptische Veränderungen beim Lernen nachweisen, die durch autokatalytisches Wachstum ausgelöst werden. Sie führen zu verstärkter Ausschüttung von Transmittern, Einführung von Interneuronen, veränderten postsynaptischen Membranen, neuen synaptischen Kontaktstellen oder dem Umfunktionieren von Synapsen.

Energiepotentiale des Gehirns zeigen sich in neuronalen Verschaltungsmustern, die heute nahezu in Echtzeit mit computergestützten Verfahren wie PET (Positron-Emission-Tomography)-Bildern sichtbar gemacht werden können. Das Gehirn ist ein komplexes System von Neuronen, die sich durch neurochemische Wechselwirkung in Zellverbänden verschalten. Grundlage ist wieder eine nichtlineare Dynamik, bei der auf der Makroebene durch energetische Wechselwirkung der Systemelemente (Neuronen) Energiepotentiale erzeugt werden. Erinnerung sei in dem Zusammenhang an die Selbstorganisationsmodelle synchron feuender Neuronensembles, mit denen z. B. nach Christoph von der Malsburg das Erkennen ganzheitlicher Bilder möglich wird.⁴⁰ Wahrnehmung, Emotionen, Gedanken und Bewusstsein entsprechen also Energiepotentialen, die mit passenden Schaltmustern korreliert sind. Nach der thermodynamischen und genetischen Selbstorganisation hätten wir nun die neuronale Selbstorganisation, mit der Wahrnehmungen, Emotionen, Gedanken und Bewusstseinszustände als neue Systemstrukturen erzeugt werden. Mit Ostwald könnten wir daher die Hierarchiestufen des Lebens von der Mikroebene der wechselwirkenden Neuronen und Synapsen über makroskopische Schaltmuster von Wahrnehmungen, Gedanken und Gefühlen bis zu komplexen Bewusstseinszuständen fortsetzen. Auch hier soll es nicht um spekulative Behauptungen über ontologische Schichtungen der Wirklichkeit gehen. Vielmehr handelt es sich heute um die Fortschreibung des Forschungsprogramms nichtlinearer Dynamik auf dem Gebiet der Kognitionswissenschaften und Neuropsycholo-

39 Vgl. Klaus Mainzer: *Thinking in Complexity. The Computational Dynamics of Matter, Mind, and Mankind*, Berlin/Heidelberg/New York, NY: Springer 2004. Ders.: *Symmetry and Complexity. The Spirit and Beauty of Nonlinear Science*, Singapore u. a.: World Scientific Publishing 2005.

40 Vgl. Christoph von der Malsburg: *The correlation theory of brain function. Dept. of Neurophysiology Max-Planck-Institute for Biophysical Chemistry*, Internal Report 81–2, 1981 auf: https://fias.uni-frankfurt.de/fileadmin/fias/malsburg/publications/vdM_correlation.pdf (Stand Juli 2015). Siehe auch: ders.: „How are nervous structures organized?“, in: Erol Basar/Hans Flohr/Hermann Haken/Arnold J. Mandell (Hg.): *Synergetics of the Brain. Proceeding of the International Symposium on Synergetics*, Berlin/New York, NY: Springer 1983, S. 238–259.

gie. Für Teilbereiche wie das visuelle System liegen auch bereits mathematische Modelle nichtlinearer Dynamik vor.

Von Ostwald wird solche Forschungspraxis jedoch naturphilosophisch eingebettet. Es geht ihm um die Überwindung des Dualismus von Spiritualismus und Materialismus. Statt „Energetik des Geistes“ würde man heute eher von kognitiver Energetik sprechen, also der Lehre von den Energiepotentialen der Kognition. Kognitive Leistungen des Gehirns lassen sich nämlich nicht allein durch Eigenschaften von Atomen, Molekülen und Neuronen im Sinne des Materialismus erklären. Es bedarf aber auch keines ‚immateriellen Geistes‘ im Sinne des Spiritualismus. Im Rahmen von Energetik, Gehirn- und Kognitionsforschung werden vielmehr Wahrnehmung, Gefühle, Denken und Bewusstsein als Gehirnpotentiale erklärbar.⁴¹

Energetik und Selbstregulation in Technik und Gesellschaft

Auf diese Überlegungen aufbauend, entwickelte Ostwald in seinen Vorträgen und Arbeiten zur Technik visionäre Ideen, die wir heute Gebieten wie Bionik, Kybernetik und Künstlicher Intelligenz zuordnen. So heißt es in der späten Studie „Der biologische Faktor in der Technik“:

Die Lebewesen zeigen uns, dass und wie die Aufgabe der Beschaffung, Umwandlung und Steuerung von Energie an einem aus mannigfaltigen Teilen zusammengesetzten dauerhaften Ganzen gelöst werden kann, denn sonst würden sie nicht leben. Sie können uns somit als Beispiele und Anreger dienen, wie wir an technischen Komplexen die gleiche Aufgabe lösen können.⁴²

In dem bereits zitierten wegweisenden Vortrag Ostwalds über „Chemie und Biologie“ von 1903 heißt es diesbezüglich: „Wenn es eine Maschine gäbe, die zugrunde gehende Teile selbsttätig ersetzen oder eine neue Maschine herstellen könnte, dann müssten wir sie ein lebendiges Wesen nennen.“⁴³ Hier wird nun deutlich, wie sehr Ostwald in der Tradition von Leibniz steht, der bereits Ende des 17. Jahrhunderts auf dem Hintergrund der Mechanik Leben als komplexe Automaten begriff. Ostwald vertieft diese Perspektive, indem er Energetik, Chemie und Biologie als ihre wissenschaftlichen Grundlagen ausarbeitet.

Die Idee von sich selbst reproduzierenden Automaten wird mathematisch erst Ende der 1950er Jahre durch John von Neumann präzisiert.⁴⁴ Seine zellulären Automaten sind komplexe Systeme aus endlichen Automaten, deren Zustände sich nach einfachen Regeln in Abhängigkeit von Nachbarzellen wie lebende Zellen verändern. Geeignete zelluläre Automaten können sich in nachfolgenden Generatio-

41 Dazu auch Mainzer/Chua: *Local Activity Principle* (Anm. 26), Kapitel 5.3.

42 Wilhelm Ostwald: „Der biologische Faktor in der Technik“, in: ders.: *Gedanken zur Biosphäre* (Anm. 29), S. 67–73, hier S. 68.

43 Wilhelm Ostwald: „Chemie und Biologie“ (Anm. 29), S. 23.

44 Vgl. John von Neumann: *Theory of Self-Reproducing Automata*, hg. von Arthur W. Burks, Campaign, IL: University of Illinois Press 1966.

nen reproduzieren. Jeder Computer lässt sich im Prinzip durch einen geeigneten zellulären Automaten simulieren und umgekehrt. Nichtlineare Dynamik lässt sich im Prinzip, wenn sie in digitalen und deterministischen Modellen beschrieben wird, durch zelluläre Automaten darstellen.⁴⁵ Auch genetische Algorithmen, nach denen sich Computerprogramme durch Zufallsveränderungen („Mutationen“) ihrer Befehle und Selektionen in nachfolgenden Generationen optimieren können, sind der Evolution abgeschaut. So kann z. B. das LISP-Programm einer virtuellen Ameise in nachfolgenden Generationen einen optimalen Weg finden, um auf einem Gitterfeld verteilte Futterkörner in einem optimalen Weg zu erreichen. Genetische Algorithmen werden bereits im industriellen Alltag verwendet, wenn z. B. ein Roboterarm der Autoindustrie in nachfolgenden Generationen eine optimale Greifbewegung erzeugt.

Nach der Genetik der Zellen wird heute bereits auch die neuronale Dynamik des Zentralnervensystems und der Gehirne simuliert. Neuronale Netze orientieren sich mit geeigneten Netzwerktopologien und Lernalgorithmen an der Informationsverarbeitung von Gehirnen. So kann ein einfacher Roboter mit verschiedenen Sensoren (z. B. für Nachbarschaft, Licht, Kollision) und motorischer Ausstattung komplexes Verhalten durch ein sich selbst organisierendes neuronales Netz erzeugen.⁴⁶ Bei einer Kollision werden die synaptischen Verbindungen zwischen aktiven Neuronen der Nachbarschaft und Kollision durch Hebbische Lernregeln nach dem Vorbild lebender Neuronen verstärkt: Ein Lernmuster entsteht.

Als weiteres Beispiel für technische Selbstregulation sei das Konzept „Organic Computing“ erwähnt.⁴⁷ In einer evolutionären Elektronikarchitektur konfigurieren sich autonome Objekte (z. B. Schalter, Regler, Lampen) selbstständig, um Fahrzeugfunktionen (z. B. Richtungsblinken) in einem Kooperationsnetzwerk zu realisieren. Wenn ein elektronisches Bauteil ausfällt, dann fragen sich die übrigen Bauteile untereinander ab, welche Einheit die ausgefallene Funktion übernehmen oder wie eine Überbrückung durch andere Kooperationen erreicht werden könnte. Es ist quasi eine „Selbsteilung“ wie bei einem Schlaganfall des Gehirns, wenn z. B. bei einem Ausfall bestimmter Sprachzentren andere Gehirnteile diese Funktionen übernehmen. Technisch werden solche Rekonfigurationen durch Informationsaustausch nach dem Vorbild eines Intranets oder des Internets möglich. Ostwalds Prinzip der Selbsteilung lässt sich also unabhängig von biologischem Gewebe auch in technischen Stoffen realisieren. In der synthetischen Biologie werden heute

45 Klaus Mainzer/Leon Chua: *The Universe as Automaton. From Simplicity and Symmetry to Complexity*, Berlin: Springer: 2011.

46 Künstliche neuronale Netze basieren auf konnektionistischen Modellsystemen, etwa der Kohonen Feature Map nach Teuvo Kohonen: *Digital circuits and devices*, Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall 1972.

47 Vgl. Klaus Mainzer: „Organic Computing and Complex Dynamical Systems – Conceptual Foundations and Interdisciplinary Perspectives“, in: Rolf P. Würtz (Hg.): *Organic Systems*, Berlin/Heidelberg: Springer 2008, S. 105–122.

längst neue Organismen wie z. B. Bakterien kreiert, deren Netzstruktur vorher in der Systembiologie mathematisch modelliert wurde.⁴⁸

Schließlich werden im World Wide Web Nachrichten elektronisch in einem weltweiten Computernetz ausgetauscht. Elektronische Energie wird im Sinne der Energetik zum Informationsträger. Ihre Selbstregulation über Routerknoten erinnert an die Vernetzung von Nervenzellen und Gehirnarealen. In seinem Buch *Energetische Grundlagen der Kulturwissenschaft* (1909) entwickelt Ostwald hieran anschließend sogar Ideen zur Globalisierung der Kommunikationstechnik, die damals noch auf dem technischen Hintergrund von Telefon und Telegrafie stehen, aber bereits die damit verbundenen sozialen Veränderungen reflektieren:

Dass weltweite Nachrichtenvermittlung (wie z. B. Telefon und drahtlose Telegrafie) mit Nachdruck ausgebildet werde, zeigt, in wie viel höherem Maße gegenwärtig der einzelne Mensch mit einer Unzahl anderer zusammenhängt, zeigt mit anderen Worten die ungeheure Zunahme der Sozialisierung der Menschheit durch die technischen Mittel der gegenseitigen Mitteilung.⁴⁹

Bezüglich der Organisation und Speicherung von Wissen stellt sich Ostwald zudem die Frage,

[...] ob nicht auch noch ein letztes Ideal auf diesem Gebiet erreichbar sein sollte, nämlich ein Handbuch, welches die Eigenschaften hätte, sich automatisch völlig modern zu halten. Ein solches Werk müsste nicht nur den Tatbestand der Wissenschaft zum Ausdruck bringen, wie er vor einigen Jahren im Augenblick des Abschlusses des fraglichen Teils bestanden hat, sondern den Wissensstand immer wieder bis in die Gegenwart ergänzen.⁵⁰

Vom heutigen Standpunkt fühlen wir uns bei solchen Ausführungen an Hypertexte im Internet oder Datenbanken mit Suchanfragen erinnert. Jedenfalls machen solche Schlüsseltechnologien der Information und Kommunikation die Globalisierung der Wissensgesellschaft möglich. Die Umwandlung von Information und Wissen in Know-how und Innovation ist die zentrale Energetietransformation in der Wissensgesellschaft. Die rohstoffabhängige klassische Industriegesellschaft wandelt sich zunehmend in eine Informations- und Wissensgesellschaft. Allerdings sieht Ostwald bereits im Jahr 1909 auch die Schattenseiten dieser Globalisierung, wenn er in seiner Schrift über die *Energetischen Grundlagen der Kulturwissenschaft* zur Globalisierung der Weltwirtschaft festhält:

Wir erkennen dem gemäß in der Organisation des Kapitals diejenige Energieorganisation, welche bereits sehr erheblich angefangen hat, die maßgebende Macht über den

48 Klaus Mainzer: *Leben als Maschine? Von der Systembiologie zur Robotik und künstlichen Intelligenz*, Paderborn: mentis 2010.

49 Vgl. Ostwald: *Energetische Grundlagen* (Anm. 15), S. 136.

50 Wilhelm Ostwald: *Forschen und Nutzen. Wilhelm Ostwald zur wissenschaftlichen Arbeit*, aus seinen Schriften ausgewählt, bearbeitet und zusammengestellt anlässlich seines 125. Geburtstages von Günther Lotz, Lothar Dunsch und Uta Kring unter Bearbeitung von Brigitte Milik, Berlin: Akademie-Verlag²1982, S. 169.

gegenwärtigen Staat hinaus zu werden [...] Gleichzeitig wird allerdings hierdurch der Begriff des Staates mehr und mehr aufgelöst, da das mobile Kapital schon längst international geworden ist und die Tatsache der Weltwirtschaft eine staatliche Schranke nach der anderen niederreißt.⁵¹

Wer denkt heute bei solchen Zeilen nicht an mächtige Firmen wie z. B. Google, die mit ihren globalen Datennetzen in immer neue Domänen von Wirtschaft und Gesellschaft eindringen?⁵² Ostwald fordert darum ethische und rechtliche Regelungen. Konsequenter fasst er seine Überlegungen dazu 1912 in seinem Werk *Der Energetische Imperativ*⁵³ zusammen. Da nach dem Zweiten Hauptsatz der Energetik jede Umwandlung von mechanischer, thermischer, chemischer, biologischer, geistiger, organisatorischer oder ökonomischer Energie nur unvollständig möglich ist, muss nach Ostwald freie Energie so zweckmäßig wie möglich verwendet werden: „Vergeude keine Energie, verwerte sie!“⁵⁴ Eine Energieform ist umso wertvoller, je vollständiger sich ihre Rohform in Nutzform verwandeln lässt, je größer also ihr Transformationskoeffizient ist.⁵⁵

Ein solcher ‚energetischer Imperativ‘ ist heute aktueller denn je. Konflikte, Reibung und Krieg bedeuten weltweite Dissipation, also Vergeudung von Energie in allen Formen. Nach Ostwalds energetischem Imperativ müssten daher Richtwerte global beschlossen, kontrolliert und dauernd verbessert werden, um ökologische, ökonomische, soziale und politische Spannungen abzubauen. Dadurch wird Energie frei für neue Innovationen, um die Lebensbedingungen der Menschheit zu verbessern. Als seinerzeit veränderte Richtwerte der Umweltbelastung zur Erfindung des Abgaskatalysators bei Automobilen führten, war damit nicht nur ökologische Entlastung erreicht, sondern auch ein ökonomischer Mehrwert mit erheblichem Gewinn.

„Energetischer Imperativ“

Am Ende seiner Schrift *Die Pyramide der Wissenschaften* (1929)⁵⁶ weist Ostwald darum der Philosophie die Funktion zu, diese heterogenen Wissensbereiche zu synthetisieren. Die Philosophie hat es mit den methodischen Grundprinzipien der einzelnen Wissenschaften und ihrer Systematisierung zu tun. Wenn wir die Einzelwissenschaften auf ihre methodischen Grundlagen und Grundgesetze untersuchen, bearbeiten wir den allgemeinsten Teil der Wissenschaften. Bereits in seinem *Grund-*

51 Ostwald: *Energetische Grundlagen* (Anm. 15), S. 162.

52 Vgl. Klaus Mainzer: *Die Berechenbarkeit der Welt. Von der Weltformel zu Big Data*, München: C. H. Beck 2014.

53 Wilhelm Ostwald: *Der energetische Imperativ: Erste Reihe*, Leipzig: Akademische Verlagsgesellschaft 1912.

54 Ebd., S. 85.

55 Ebd., S. 78.

56 Wilhelm Ostwald: *Die Pyramide der Wissenschaften. Eine Einführung in wissenschaftliches Denken und Arbeiten*, Stuttgart: Cotta'sche Buchhandlung 1929.

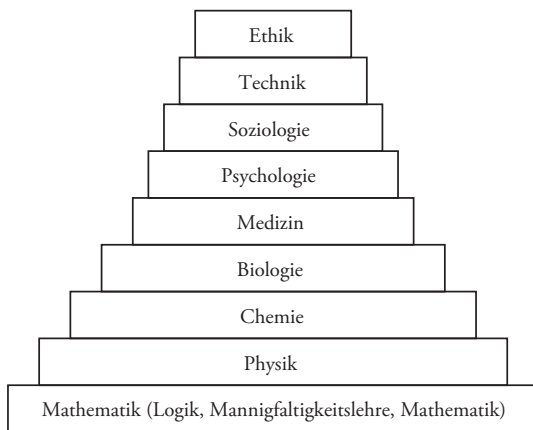


Abb. 2: „Pyramide der Wissenschaft“ nach Wilhelm Ostwald

riss der Naturphilosophie hatte Ostwald diesen allgemeinsten Teil der Naturwissenschaften als Naturphilosophie bezeichnet. Mit der Erweiterung der Energetik um Sozial-, Wirtschafts- und Rechtswissenschaften tritt die Untersuchung schließlich über den Bereich der Naturwissenschaften hinaus.

Mein Beitrag sollte verdeutlichen, dass viele von Ostwalds Grundsätzen auch heute noch gültig sind, andere müssen erweitert und ergänzt werden. Mit seinem Forschungsprogramm der Energetik ist vor allem aber ein Netzwerk methodischer Grundsätze entstanden, dessen Fortentwicklung sich lohnt. Philosophie ist darin Teil des Forschungsprozesses und keine abgetrennte Veranstaltung. Philosophie erweist sich als unverzichtbarer Katalysator der Wissenschaft. Sie befördert – bewusst oder unbewusst – wesentlich den Erkenntnis-, Forschungs- und Innovationsprozess, auch wenn sie nicht ausdrücklich (nach Art von Katalysatoren) in den Endprodukten von Wissenschaft und Technik genannt wird.