

## DIE ERZEUGUNG VON NEUEM IN DEN WISSENSCHAFTEN ALS ORIENTIERUNG FÜR DIE KONSTRUKTION HEURISTISCHER MITTEL<sup>1</sup>

WILHELM WOLZE, WILHELM WALGENBACH, STEFAN SCHULDT

"Macht euren Schüler auf die Naturerscheinungen aufmerksam, dann wird er neugierig. Aber um seine Neugier zu nähren, beeilt euch niemals, sie zu befriedigen. Stellt ihm Fragen, die seiner Fassungskraft entsprechen; laßt sie ihn selber lösen. Er darf nichts wissen, weil ihr es ihm gesagt habt, sondern weil er es selbst verstanden hat. Er soll die Naturwissenschaften nicht lernen, sondern erfinden."

JEAN-JAQUES ROUSSEAU

### *Zusammenfassung:*

Im Mittelpunkt steht die fundamentale didaktische Frage nach möglichen Lernwegen. Als Grundproblem wird die Initialphase beim Übergang von der einen zur anderen kognitiven Struktur angesehen (conceptual change), d.h. die Entstehung des Neuen. Orientierungen für die Problembearbeitung werden in der Wissenschaftsentwicklung gesucht. Der Begriff des kognitiven Mittels wird als zentraler Begriff herausgearbeitet. Anhand von drei Fallbeispielen aus der Naturwissenschaftsgeschichte wird das kognitive Mittel der Initialphase (heuristisches Mittel) bei der Entstehung des Neuen analysiert. Die Struktur solcher heuristischer Mittel wird expliziert und ein Bildungsprinzip für die Entstehung des Neuen aufgestellt. Die Anwendung auf die Didaktik erfolgt an zwei Beispielen, dem Verbrennungsprozess und dem mechanischen Wechselwirkungsprozess. Es werden Schwierigkeiten bei der Begriffsbildung erörtert und heuristische Mittel angegeben, mit denen ein möglicher Lernweg beginnen kann. Abschließend wird ein Lernwegtyp skizziert, der auf einer lokalen, relativ störungsfreien Modifikation eines kognitiven Systems beruht. In der Weiterentwicklung zum neuen kognitiven System werden Widersprüche weitgehend dadurch vermieden, dass gleichzeitig das alte System mit dem neuen Mittel uminterpretiert wird.

### *Abstract:*

At the core is the basic question about possible paths of learning. The initial phase during the transition from one to the other cognitive structure (conceptual phase) is seen as the fundamental problem, which is the origin of the new. Orientations for the examination of the problem are searched for in the development of science. The concept of the cognitive means is developed as the central idea. The cognitive means of the initial phase (heuristic means) is analyzed during the origination of the new based on three case-examples from the history of the natural sciences. The structure of this type of heuristic means is explicated and an educational principle for the origination of the new is set up. The application for didactic is demonstrated by two examples, namely the process of combustion and the mechanical process of interaction. Difficulties that arise during the development of the concept are mentioned and the heuristic means are listed that could lead to the beginning of possible paths of learning. At the conclusion a type of learning path is sketched out based on a local relatively uninterrupted modification of a cognitive System. Contradictions during the further development into a new cognitive System are avoided through the fact, which the old and the new Systems are reinterpreted simultaneously.

### 0 VORBEMERKUNGEN: PÄDAGOGIK UND DIE ERZEUGUNG VON NEUEM

Im alltäglichen Verständnis ist es Aufgabe der Pädagogik, Lernende an den Entwicklungsstand einer Gesellschaft heranzuführen. Vor allem in Verbindung mit Schule wird daran gedacht, dass es um die Reproduktion von vorliegendem Wissen geht, wie es in den Wissenschaften erarbeitet wurde. Zu lernen sind nach diesem Verständnis die dort entwickelten Kon-

zepte (Gesetze, Formeln, Theorien usw.) und deren Anwendung in spezifischen Bereichen.

Mit der Ausrichtung der Erziehung auf Selbsttätigkeit hat die Bildungstheorie die Pädagogik in einer gleichsam revolutionären Weise auf ein neues Ziel ausgerichtet. Unter Selbsttätigkeit wird dabei nicht einfach ein eigenhändiges Hantieren der Lernenden mit irgendwelchen Objekten - etwa beim Experimentieren im naturwissenschaftlichen Unterricht - verstanden, sondern die Hervorbringung von Individualität, die Entfaltung von Persönlichkeit in ihrer jeweiligen Einmaligkeit (siehe dazu etwa BRENNER 1987, FUNKE 1983, HOHENDAHL 1982, MOLLENHAUER 1972). Neben der Reproduktion von Altem, ist wesentliches Ziel der Pädagogik die Erzeugung von Neuem (WOLZE, WALGENBACH 1992), etwa als Funktionsziel im Sinne WAGENSCHAINS.

Wissenschaft ist in diesem Verständnis von Pädagogik nicht mehr nur von ihren Ergebnissen her von Interesse, sondern ebenso – oder sogar vorrangig – von den Orientierungen her, die sie für die Erzeugung von Neuem bieten kann. In den Mittelpunkt des pädagogischen Interesses tritt damit Wissen über Wissen(schaft), wie es die Wissenschafts- und Erkenntnistheorie und speziell die Heuristikforschung anzubieten hat (vergleiche z. B. BROMME, HÖMBERG 1977, MÜLLER 1970, PUSCHKIN 1968).

## 1. EINFÜHRUNG IN DIE PROBLEMSTELLUNG:

### HEURISTISCHE MITTEL FÜR DIE ERZEUGUNG VON NEUERN

Vor allem in Form von Fallanalysen untersucht die Heuristikforschung, mit welchen Mitteln und Methoden Neues in Wissenschaft (und Kunst) erzeugt wird. Ein oft zitiertes Beispiel ist dabei die Entdeckung des Benzolrings durch den Chemiker KEKULÉ (1890). Wie er selbst auf dem Kongress der Deutschen Chemiker 1890 berichtete, verfiel er eines Abends, im Lehrstuhl vor dem Kamin seines Arbeitszimmers sitzend, in einen Traum, in dem die Atome vor seinem geistigen Auge tanzten, sich in Schlangen verwandelten, von denen eine sich dann selbst in den Schwanz biss. Dieses Traumbild brachte ihn auf die Idee, die Elemente des Benzols ringförmig zu organisieren.

Eine erste formale Analyse der Struktur dieser Entdeckung führt zu folgendem Ergebnis: Gegeben sind einmal Daten (Informationen) A über Benzolmoleküle. Sie betreffen die Art und Anzahl der Atome als Molekülbestandteile (Elemente des Systems) und ihre Bindigkeiten. Zum anderen lag Wissen über (lineare) Molekülstrukturen vor, das Konzept der linearen, geometrischen Molekülstruktur B. Die Bemühungen KEKULÉ's, A und B zu synthetisieren, führten zu einer Anomalie. D. h. bzgl. der Gegenstandsebene, dass die Moleküle nicht die Eigenschaft einer linearen, geometrischen Struktur besitzen (Abb. 1). Das Konzept der linearen, geometrischen Molekülstruktur erklärt also nicht die Integration der betreffenden Atome (Elemente) zu einem Benzolmolekül.

KEKULÉ's heuristische Idee bestand vermutlich darin, anstelle des empirisch gehaltvollen Konzeptes der linearen Molekülstruktur B ein neues, abstraktes Formkonzept, den Kreisbegriff  $B^*$  zu verwenden, um über die Synthese der Daten A mit dem Konzept  $B^*$  eine Erklärung für das Benzolmolekül zu liefern. Die heuristische Idee bringt die empirischen Daten A

mit dem Kreisbegriff  $B^*$  in Beziehung. Dies ist ein erster wesentlicher Schritt zur Entstehung des Neuen. Die Beziehung zwischen A und  $B^*$  ist aber noch abstrakt, beide Seiten sind noch nicht miteinander verbunden. Die Durchführung der Integration beinhaltet, die empirischen Daten A mit Hilfe des Konzepts  $B^*$  neu zu organisieren:  $B^*$  wird zum (heuristischen) Mittel der Modellation von A (Abb. 2). Dies entspricht im Prinzip der Anwendung einer formalen (mathematischen) Struktur, um einen naturwissenschaftlichen Wissensbereich neu zu strukturieren, wie z. B. die Anwendung des Hilbertraumformalismus auf die vorgängige Fassung der

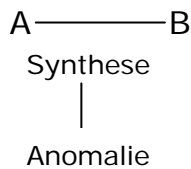


Abb. 1

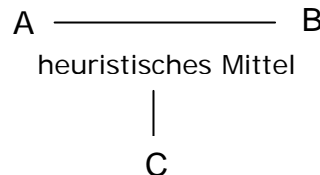


Abb. 2

Quantenmechanik. Das Resultat von KEKULÉ's Modellation, die eine ganze Nacht in Anspruch nahm, war das Benzolringkonzept C (vgl. Abb. 1 u. 2). Die heuristische Idee als hypothetische Aussage über den Gegenstand (Benzolmolekül) wird in der Modellationsphase zum Mittel. Das Besondere solcher heuristischer Mittel besteht darin, dass sie Mittel ihrer eigenen (Weiter-)Entwicklung sind. Heuristisches Denken findet sich nicht nur bei KEKULÉ. Auch Kepler benutzte die Form des Kreises, um die Planetenbahnen aus den empirischen Daten TYCHO BRAHES zu bestimmen. Entscheidend für diese Wahl waren die kosmologischen Harmoniegesetze der Antike, die auch Keplers Weltbild bestimmten. Die relativ kleinen Abweichungen zwischen Theorie und empirischen Daten deutete Kepler als Anomalie, da sie sich nicht aus den ermittelten Messfehlern der Daten TYCHO BRAHES erklären ließen. Dies veranlasste Kepler schließlich dazu, nach anderen Harmonien (Keplersche Gesetze) zu suchen. Hierzu nahm er "bewegende Kräfte" an, nämlich die Sonne als den Beweger, und entwickelte sein theoretisches Mittel funktional auf sein Ziel, in Übereinstimmung mit den Daten TYCHO BRAHES Gesetze aufzustellen. Aufgrund mathematischer Schwierigkeiten verwendete er das geometrische Konzept der Ellipse zu einer - wie er meinte - näherungsweise Beschreibung der Planetenbahnen. Auch WATSON/CRICK favorisierten bei ihren Forschungen über die DNS-Struktur ein bestimmtes B, nämlich die Spiral Vorstellung. Im Gegensatz zu KEPLER (1973) hielten sie trotz widersprechender empirischer Daten an dieser Vorstellung fest (vergleiche WATSON 1969). Ebenso blieb der Chemiker HERMANN STAUDINGER, nachdem C.F. HARRIES mit seinem Konzept zyklischer Strukturen gescheitert war, bei seiner Grundkonzeption von Makromolekülen, die er sich wie Mikadostäbchen vorstellte, obwohl Experimente seiner Kollegen auch diese Kombination eines bestimmten Inhalts A mit einem bestimmten Formkonzept B als falsch erschienen ließen (siehe dazu MINNSEN, WALGENBACH 1985).

Damit deuten sich neben Gemeinsamkeiten auch Unterschiede in der heuristischen Tätigkeit von Wissenschaftlern an. Ein Unterschied besteht etwa darin, dass die Form mit einem für sie spezifischen Inhalt verbunden oder formal-abstrakt gedacht werden kann: Für KEPLER ist der Kreis Ausdruck

göttlicher Ordnung, bei KEKULÉ ist er mit der Schlange verbunden, einem alten alchemistischen Symbol, bei Staudinger ist die Formvorstellung an bestimmte Objekte - die Mikadostäbchen -gekoppelt, während bei WATSON und CRICK die Form der Spirale mit keiner bestimmten Inhaltlichkeit in Verbindung zu stehen scheint.

Die Interpretation dieser Ergebnisse wurde von einem Standpunkt aus vorgenommen, der im Wesentlichen implizit geblieben ist. Im folgenden Abschnitt soll daher zunächst der Mittelbegriff im theoretischen Kontext so expliziert werden, wie er den weiteren Ausführungen zugrunde liegt. Im dritten Abschnitt werden dann drei Beispiele aus der Wissenschaftsgeschichte untersucht. Ziel ist es dabei, weitere Orientierungen für die Konstruktion heuristischer Mittel zu gewinnen, die Lernenden zur Entwicklung ihre Selbsttätigkeit zur Verfügung gestellt werden können. Anschließend werden auf dieser Grundlage zwei didaktische Beispiele erörtert.

## 2. THEORIEN DER KONSTRUKTION VON WISSEN UND DIE KOMPLEMENTARITÄT VON OBJEKT UND MITTEL

Ansätze wie der (Radikale) Konstruktivismus oder die Tätigkeitstheorie der Kulturhistorischen Schule, die anstelle der Repräsentation von vorgegebenem Wissen die Konstruktion von (neuem) Wissen zum Ausgangspunkt von Lösungsansätzen machen, suchen Lernwege als Konstruktionswege zu entwickeln, die vom lebensweltlichen Wissen zum (natur-) wissenschaftlichen Wissen überleiten. Im Folgenden werden beide Theorien, die im Bereich der Science Education zu den grundlegenden Ansätzen gehören, im Hinblick auf das Problem der Komplementarität von Gegenstand und Mittel miteinander verglichen (vergleiche etwa BAUERSFELD 1993, OERTER 1982). Um den Blick noch zu erweitern, werden Beispiele für die Behandlung der Mittelproblematik in der Wissenschafts- und Erkenntnistheorie kurz aufgezeigt, so dass für die folgenden Rekonstruktionen von Beispielen heuristisch-wissenschaftlicher Tätigkeit (EINSTEIN/PLANCK/CARNOT) ein grundlegendes Problemverständnis vorbereitet ist.

### 2.1 RADIKALER KONSTRUKTIVISMUS UND TÄTIGKEITSTHEORIE

Seinen Beinamen "Radikal" hat der Radikale Konstruktivismus, weil er am weitestgehenden die Rolle des konstruierenden Subjekts zum Ausgangs- und Mittelpunkt einer Theorie der Konstruktion von Wissen macht. Diese grundlegende Eigenschaft des Subjekts wird mit den Begriffen Selbstorganisation und Selbstreferentialität erfasst (vergleiche z. B. ROTH 1986, 1987). Selbstreferentielle Systeme, wie z. B. das menschliche Gehirn, sind operational geschlossene Systeme. Sie sind zwar durch externe Einwirkung modulierbar (beeinflussbar), doch diese Beeinflussung hat nicht den Charakter einer Steuerung. Selbstreferentielle Systeme organisieren sich auf der Basis ihrer bisherigen Geschichte, sie bestimmen selbst, welche Umweltereignisse in welcher Weise auf ihre Selbstentwicklung einwirken können. Eine Modifizierung des Radikalen Konstruktivismus nimmt VARELA (1990) vor. Er vermittelt die solipsistische Position eines auf die Spitze getriebenen Konstruktivismus mit einer naiv-realistischen Position und hebt damit beide auf. Die erste Position zeichnet sich dadurch aus, dass das kognitive System seine eigene Welt erzeugt, deren augenscheinliche

Stabilität der Beweis für die internen Gesetze, speziell die Selbstreferenz und Selbstorganisation, ist. Gemäß der zweiten, der realistischen Position ist die (Außen-) Welt mit festen Gesetzen vorgegeben, die das kognitive System in angemessener Weise zu erfassen hat. Die Synthese beider Positionen besteht nun darin, dass Subjekt und Objekt in einer wechselseitigen Bedingtheit gesehen werden. Vermittelt durch die Handlung wechselwirken Subjekt und Objekt miteinander und die spezifische Geschichte dieser strukturellen Koppelung erzeugt eine spezifische Welt.

Die von VARELA in Ansatz gebrachte Handlungstotalität erweitert die Gehirntätigkeit, auf die sich der Radikale Konstruktivismus i.a. beschränkt, um wesentliche Dimensionen. Allerdings bleiben die Mittel und ihre Funktion in diesem Kontext unthematisiert. Zurückgegriffen wird nur auf das gesamte kognitive System bzw. die neurobiologischen Systemzustände. Auch PIAGET, der als Vorläufer des Konstruktivismus angesehen wird, nimmt keinen expliziten Bezug auf einen Handlungs- bzw. Tätigkeitsbegriff. Außerdem kommt auch der Mittelbegriff nicht explizit vor, obwohl die Akkommodation gerade derjenige Prozess ist, in dem Mittel organisiert bzw. entwickelt werden (vergleiche z. B. PIAGET 1973). Für die Differenzierung von Erkenntnismitteln und logischen Strukturen vergleiche (JAHNKE, SEEGER 1984).

Relativ zu VARELAS handlungsorientierten Ansatz expliziert die Tätigkeitstheorie die fundamentale Rolle der Mittel im Konstruktionsprozess. Sie erfasst auch mit der Differenzierung von Tätigkeit, Handlung und Operation die Beziehung zwischen Subjekt und Objekt detaillierter, und zwar sowohl bzgl. der Erkenntnis als auch bzgl. der Emotion. In dieser Beziehung kommt die Gerichtetheit des Subjekts auf das Objekt zum Ausdruck, bestimmt durch die aktivierten Mittel sowie durch die Bedürfnisse und die sie befriedigenden Motive (vergleiche hierzu z. B. LEONTJEW 1982, ENGSTRÖM 1990). Mit der Bezugnahme auf die Widerspiegelungstheorie wird allerdings dem Objekt gegenüber dem Subjekt eine dominierende Rolle zuerkannt, die sich entscheidend in der Entwicklung der Mittel niederschlägt. Gerade solchen Ansätzen wird dann vorgehalten, dass sie zu einem materialistischen Dogmatismus insofern neigen, als mit dem Objekt eine bestimmte Wahrheit verbunden wird, die das Subjekt im Prozess zunehmender Annäherung zu rekonstruieren hat.

Der Radikale Konstruktivismus führt die Produktion der kognitiven Strukturen auf Subjektprozesse, d. h. quasi ausschließlich auf die Selbstentwicklung zurück. Das Moment des Entwickeltwerdens durch das Objekt bzw. das gesamte Umgebungssystem besitzt hierbei lediglich auslösenden Charakter in Form von Störungen. Dies betrifft insbesondere den Prozess der Mittelentwicklung. Demgegenüber dominiert bei der Mittelentwicklung gemäß der Tätigkeitstheorie das Moment des Entwickeltwerdens gegenüber der Selbstentwicklung, denn nur dies gewährleistet eine approximative Repräsentation (Widerspiegelung) der absoluten Realität. Die hier angedeuteten verschiedenen Theorieansätze erfassen die Subjekt-Objekt-Beziehung und damit den Lernprozess in wesentlicher Hinsicht unterschiedlich voneinander. Für die Diskussion der (heuristischen) Mittel gehen wir erst einmal von Varelas handlungsorientierten Ansatz aus. Die hierdurch konstituierten Grundcharakteristika der Subjekt-Objekt-

Beziehung entsprechen der impliziten Erkenntnistheorie, die der neueren Wissenschaftstheorie zugrunde liegt. Von dieser Orientierung aus lässt sich die Subjekt-Objekt-Beziehung in Zusammenhang mit der Funktion der Mittel unter Bezugnahme auf die Tätigkeitstheorie detaillierter beschreiben:<sup>2</sup> In aktualisierten Wechselwirkungen von Subjekt und Objekt bilden sich Mittel und Objekt in einem sich wechselseitig bedingenden Prozess heraus. Mit PIAGET's Begriffen der Akkomodation und der Assimilation lässt sich dieser Prozess auf der Subjektseite hinsichtlich grundlegender Charakteristika beschreiben.

## 2.2 DAS PROBLEM DER MITTEL IN DER WISSENSCHAFTSTHEORIE

Im Zusammenhang formaler Rekonstruktionen der Theoriedynamik expliziert STEGMÜLLER (1973) den Begriff des Verfügens einer Theorie. Hier kommt die Theorie als Mittel normalwissenschaftlicher Tätigkeit zum Ausdruck und nicht objekthaft als Repräsentation dessen, was in der Welt der Fall ist. In dieser Auseinandersetzung wird auch deutlich, dass der grundlegendste Unterschied zwischen dem Statement view (Aussagenkonzept) und dem non-statement view einer Theorie die Mittelfunktion einer Theorie ist:

- Die ältere Wissenschaftstheorie untersucht die Wissenschaft nur zustandsmäßig, so dass lediglich die syntaktische und semantische Dimension einer Theorie in einem Statement view thematisiert wird.
- Die neuere, prozesshaft orientierte Wissenschaftstheorie bezieht demgegenüber die pragmatische Dimension mit ein. Erst hierdurch kommt die Funktion einer Theorie als Mittel bei dem non Statement view in Sicht.

In historisch-wissenschaftstheoretischen Analysen, in denen sich T. S. KUHN mit der Theoriendynamik und dem Theoriebegriff auseinandersetzt, entwickelt KUHN mit dem Paradigmenbegriff einen spezifischen Mittelbegriff:

Das Paradigma ist das Mittel der normalwissenschaftlichen Praxis.

Damit ist eine Rahmenbestimmung festgelegt, was noch bzw. nicht mehr zu einem Paradigma gehört. In der Diskussion über die Entwicklung von Paradigmen wird die Mittelproblematik auf zwei Ebenen behandelt:

- bei der Diskussion über explizite, relative Apriori als Mittel der Paradigmenentwicklung (vergleiche etwa HÜBNER 1979),
- bei der Diskussion über keimhafte (implizite, bildhafte) Ansätze zu einem neuen Paradigma, die sich aus einem Anomalienkontext ergeben (vergleiche z. B. KUHN 1979).

## 3. FALLBEISPIELE

### 3.1 *Einsteins Entwicklung der speziellen Relativitätstheorie*

Die Maxwell-Lorentzsche Theorie bezieht sich auf Bezugssysteme, die relativ zum Äther ruhen. Hierdurch ergeben sich Asymmetrien, z. B. bei der Induktion, sowie Interpretationsschwierigkeiten der Lorentztransformation (EINSTEIN 1905, 1979). Zur Lösung dieser beiden Probleme geht EINSTEIN von folgenden Setzungen aus:

- Die formale Struktur der Theorie wird akzeptiert;
- Annahme des Relativitätsprinzips (alle Inertialsysteme sind gleichberechtigt);
- Annahme des Prinzips von der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit.

Die drei Annahmen bilden eine Kombination der Maxwell-Lorentzschen Theorie mit zwei weiteren Prinzipien, die beide eine gewisse Plausibilität beanspruchen können. Das Relativitätsprinzip hatte erfolgreich die Vorstellungen vom absoluten Raum und der absoluten Zeit der Newtonschen Mechanik abgelöst und besaß inzwischen als allgemeines Prinzip den Rang eines relativen Apriori für die Entwicklung neuer Theorien. Es lag im Prinzip auch den von Lorentz entwickelten Transformationen zugrunde. Das Prinzip von der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit drängte sich aus zwei Gründen auf: Einmal kommt der Größenwert der Lichtgeschwindigkeit als Konstante in der Maxwell-Lorentzschen Theorie vor, zum anderen sprechen experimentelle Ergebnisse für dieses Prinzip. Mit der Annahme der drei zu kombinierenden Prinzipien war das zu lösende Problem verbunden, die formale Struktur (Syntax) der Maxwell-Lorentzschen Theorie neu zu interpretieren. Für seine Lösung bildeten diese Annahmen, zwar ein formales relatives Apriori, das jedoch als Mittel für die Entwicklung eines Lösungsansatzes nicht ausreichte. Die Problemstellung und das antizipierte Resultat waren noch zu abstrakt, eine Entwicklungsperspektive der neuen Semantik kam noch nicht in Sicht. EINSTEIN begründet dies damit, dass einerseits das klassische Gleichzeitigkeitsprinzip nicht in expliziter Form vorlag und damit auch nicht zum Gegenstand der Untersuchung gemacht werden konnte, andererseits aber dies implizite, quasi vorbewusste Prinzip an der Konstitution der physikalischen Welt, speziell des Anwendungsbereichs der Maxwell-Lorentzschen Theorie, wesentlichen Anteil hatte. Eine konkrete Lösungsperspektive gewann EINSTEIN durch eine bildhafte Vorstellung in Form eines Paradoxons (vergleiche EINSTEIN 1979), die er bereits als Schüler entwickelt hatte und nun zur Lösung seines Problems heranzog: Ein relativ zum Licht ruhender Beobachter sieht ein "ruhendes, räumlich oszillatorisches elektromagnetisches Feld", was im Widerspruch zu den Maxwellschen Gleichungen und der Erfahrung steht.

Auf der Schwelle des Widerspruchs lag ein neuer Ideenkeim, ein heuristisches Mittel, das nach EINSTEIN den Keim der gesamten relativistischen Raum-Zeit-Lehre enthält. Die Weiterentwicklung dieses Keims führte zu einer expliziten Kombination des klassischen Gleichzeitigkeitsprinzips mit dem Relativitätsprinzip: EINSTEIN brachte dies mit seiner operationalen Definition zum Ausdruck, der ein Verfahren zur Synchronisation von Uhren in verschiedenen Raumpunkten mit Hilfe von Lichtstrahlen zugrunde liegt (vergleiche EINSTEIN 1905).

### 3.2 Plancks Entwicklung des Begriffs des Wirkungsquantums<sup>3</sup>

PLANCKS Anliegen war es, sein "Studium der Entropie" auf dem Gebiet der Strahlenden Wärme fortzusetzen. Unter Verwendung der Formel:

$$\frac{dS}{dU} = \frac{1}{T}$$

entwickelte er zunächst für einen Oszillator den Ausdruck:

$$S = \frac{a_1}{a_2} \left( \left( \frac{U}{a_1 v} + 1 \right) \log \left( \frac{U}{a_1 v} + 1 \right) - \frac{U}{a_1 v} \log \frac{U}{a_1 v} \right)$$

mit den Konstanten  $a_1$  und  $a_2$ .

"Um diesen Ausdruck einen physikalischen Sinn geben zu können", versuchte er es mit der "Methode Boltzmann" und setzte "ganz allgemein für den beliebigen Zustand eines beliebigen physikalischen Gebildes:

$$S = k \cdot \log W "$$

Das Gebilde bestimmte PLANCK als eine große Anzahl  $N$  gleichartiger Oszillatoren. Die Aufgabe war nun, die Wahrscheinlichkeit zu berechnen, dass dies Gebilde die vorgegebene Energie  $U_N$  besitzt. Um diese Berechnung "durch Abzählung" durchführen zu können, macht PLANCK den entscheidenden formalen Ansatz:

$$U_N = N \cdot U = P \cdot \epsilon$$

( $U$ : mittlere Energie eines Oszillators)

Er stellte also die Gesamtenergie als "Summe von diskreten, einander gleichen Elementen  $\epsilon$ " (Energieelementen) dar. Damit war auch die Energie jedes Oszillators ein Vielfaches von  $\epsilon$ , im Widerspruch zur klassischen Auffassung, über die sich PLANCK mit diesem formalen Vorgehen hinwegsetzte. Als Wahrscheinlichkeit bestimmte PLANCK die "Zahl der verschiedenen Arten", "wie die  $P$  Energieelemente auf die (nummeriert gedachten)  $N$  Oszillatoren verteilt werden können":

$$W = \frac{(P + N)!}{P!N!}$$

Hieraus ergibt sich nun unter Verwendung der obigen Boltzmann-Formel und dem Stirlingschen Satz die zur Ausgangsgleichung strukturgleiche Formel:

$$S = k \left( \frac{P}{N} + 1 \right) \left( \log \left( \frac{P}{N} + 1 \right) - \frac{P}{N} \log \frac{P}{N} \right)$$

Ein Vergleich beider Formeln liefert:

$$k = \frac{a_1}{a_2} \text{ und } \frac{P}{N} = \frac{U}{a_1 v}$$

woraus  $\epsilon = a_1 v$ , d.h. mit  $a_1 = h$  und  $\epsilon = E v$  die bekannte Formel  $E = h v$  folgt. Das entscheidende Mittel für die Entwicklung dieser Formel lässt sich wie im ersten und auch dem folgenden Beispiel als Kombination zweier Elemente darstellen. Dies sind hier einmal der Energiebegriff der klassischen Physik, der eng mit der Kontinuumvorstellung verbunden ist, und zum anderen der Diskontinuumansatz.

PLANCKS Vorgehen orientierte sich schwerpunktmäßig an der Syntax, er nahm sogar formale Widersprüche in Kauf. Eine befriedigende Interpretation der Konstanten  $h$ , an der PLANCK auf klassischer Grundlage intensiv arbeitete, gelang erst mit der Quantenmechanik.

Im Vergleich zur Relativitätstheorie fällt die umgekehrte Vorgehensweise auf: Im Gegensatz zu PLANCK hat EINSTEIN erst mit der Lösung der physikalischen Semantik die Relativitätstheorie ausgearbeitet. Rein formal lässt sich ein analoges Vorgehen zu PLANCK rekonstruieren, in dem die formalen Konsequenzen aus EINSTEINS Setzung der drei geschilderten Positionen gezogen werden, wie dies zum Teil in Lehrbüchern geschieht. Zur Erklärung dieser Diskrepanz ist vermutlich der Umstand wesentlich, dass erst die Existenz des klassischen Gleichzeitigkeitsprinzips bewusst gemacht werden musste, um zum Gegenstand der Erkenntnis werden zu können, in der dieses Prinzip dann aufgehoben bzw. verändert werden konnte.

Die Möglichkeit solcher Entwicklungsprozesse ist wesentlich durch das vorhandene metatheoretische Wissen bestimmt, speziell durch die Auffas-



sung der Beziehung zwischen (naturwissenschaftlichem) Wissen und (naturwissenschaftlichem) Objekt. In den hier vorliegenden Fällen treten insbesondere dann Entwicklungsprobleme auf, wenn die klassische Raum-Zeit-Welt bzw. die Kontinuität der Natur als absolut und damit als unveränderbar angenommen werden.

### 3.3 Carnots Entwicklung der Theorie der Wärmekraftmaschinen

Der folgenden Skizze liegt im wesentlichen CARNOTS Werk "Betrachtungen über die bewegende Kraft des Feuers" zugrunde. In dieser Schrift, die CARNOT 1821 auf der Flucht vor den Bourbonen verfasst hat, werden seine Forschungsergebnisse systematisch dargestellt und entwickelt. Auf die Genese der Ergebnisse, d. h. auf seinen eigenen Erkenntnisprozess, geht CARNOT nicht ein. CARNOT knüpfte an die Wasser- und Dampfkrafttechnologie seiner Zeit an. Insbesondere legte er die Wärmestofftheorie zugrunde. Sein Ausgangsproblem verdeutlicht folgendes Zitat:

"Man hat oft die Frage erwogen, ob die bewegende Kraft der Wärme beschränkt ist, oder unendlich; ob die möglichen Verbesserungen eine angebbare Grenze haben, welche durch irgendwelche Mittel zu überschreiten durch die Natur der Sache unmöglich gemacht ist, oder ob im Gegentheile die Verbesserungen einer unbegrenzten Ausdehnung fähig sind. Auch hat man seit langem nach Agentien gesucht, [...] welche dem Wasserdampf zum Zwecke der Entwicklung der bewegenden Kraft des Feuers vorzuziehen sind, [...]" (CARNOT 1892, 6).

Den Untersuchungsgegenstand, die Dampfmaschine bzw. allgemeiner die Wärmekraftmaschine, stellt CARNOT auf der obigen Grundlage folgendermaßen dar:

"Der in der Feuerung durch die Verbrennung entwickelte Wärmestoff durchdringt die Wände des Kessels, und erzeugt den Dampf, indem er sich sozusagen denselben einverleibt. Dieser nimmt ihn mit sich, führt ihn zum Cylinder, wo er irgendeinen Dienst thut, und von dort in den Condensator, wo er sich in Berührung mit dem dort vorhandenen kalten Wasser verflüssigt. In letzter Linie bemächtigt sich daher das kalte Wasser des Condensators des durch die Verbrennung entwickelten Wärmestoffs" (CARNOT 1892, 7f)

Aus dieser Darstellung entwickelt CARNOT schrittweise seine Theorie der Wärmekraftmaschine. Intendiertes Resultat ist die Konstruktion eines (idealen) Kreisprozesses mit den zwei Charakteristika:

- Die Wärmekraftmaschine produziert einen Überschuss an bewegender Kraft und
- die produzierte bewegende Kraft bildet ein Maximum.

Als Konstruktions-Mittel lassen sich neben der bekannten Technologie die folgenden Komponenten identifizieren:

- Konzept der Cagnardschen Maschine,
- Wasserfallanalogie,
- Prinzip/Vorstellung der Zirkulation in geschlossenen Kreisläufen.

Die Cagnardsche Maschine ist eine Mischform zwischen Wasserkraft- und Dampfmaschine. Ihr Konzept, das CARNOT bekannt war, ist als ein para-

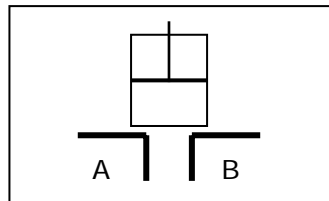
digmatisches Beispiel im Sinne T. S. KUHNs anzusehen. Solche Musterbeispiele versehen einmal die Theorie mit empirischem Gehalt, zum anderen dienen sie auf der Grundlage der Familienähnlichkeit als Mittel zur Konstruktion anderer (ähnlicher) Systeme. Die zugrundeliegende Methode ist eine spezielle Analogiemethode. Für CARNOT war die letzte Funktion wesentlich. Im Gegensatz zu den anderen Wasser-, Luft- und Dampfkraftsystemen besteht zwischen CAGNARDS Maschine und CARNOTS Wärmekraftmaschine die größte Ähnlichkeit hinsichtlich der Systemdifferenzierung und des Prozesstyps. Als paradigmatisches Beispiel enthält das Konzept der Cagnardschen Maschine die mehr oder weniger implizite Grundidee, dass nur durch die Entnahme von Wärme aus einem Reservoir hoher Temperatur (heißes Wasser) und die Abgabe von Wärme an ein Reservoir niedriger Temperatur (Umgebung) Arbeit durch Anheben eines Gewichtes verrichtet werden kann. Diese Beziehung zwischen Wärmeübergang und produzierter Arbeit modelliert CARNOT mit Hilfe der Wasserfallanalogie:

"Nach den bisher festgestellten Begriffen kann man sehr angemessen die bewegende Kraft der Wärme mit der des fallenden Wassers vergleichen: beide haben ein Maximum, welches man nicht überschreiten kann, [...]. Die bewegende Kraft des fallenden Wassers hängt von seiner Höhe und der Menge der Flüssigkeit ab; die bewegende Kraft der Wärme hängt gleichfalls von der Menge des angewendeten Wärmestoffes ab, und dem, was man seine Fallhöhe\* nennen könnte, und was wir in der That so nennen wollen, nämlich den Temperaturunterschied der Körper, zwischen denen der Austausch des Wärmestoffes stattfindet. Beim Fall des Wassers ist die bewegende Kraft in aller Strenge dem Höhenunterschied zwischen dem oberen und dem unteren Becken proportional. Bei dem Fall der Wärme nimmt zweifellos die bewegende Kraft mit dem Temperaturunterschiede zwischen dem warmen und dem kalten Körper zu; wir wissen aber nicht, ob sie diesem Unterschiede proportional ist." (CARNOT 1892, 17f)

\*"Der hier behandelte Gegenstand ist vollkommen neu und wir sind daher genöthigt, noch unbegreifliche und vielleicht nicht mit aller wünschenswerten Klarheit ausgestattete Ausdrücke zu gebrauchen"(ebd).

Der Vorgang der Modellation wird zwar nicht beschrieben. Es wird jedoch deutlich, dass eine Ausgangsähnlichkeit zwischen beiden Systemen vorlag und zum anderen die Beziehung zwischen Wärmeübergang und produzierter Arbeit relativ zur Beziehung zwischen fallendem Wasser und produzierter Arbeit für CARNOT nicht explizit und nicht konkret, sondern abstrakt war. Hiervon zeugt insbesondere der Fußnotentext des Zitats. Der Text lässt auch erkennen, dass die Modellation keine einfache Übertragung von Merkmalen gewesen ist. Speziell wurde die Proportionalitätseigenschaft des mechanischen Systems nicht auf das thermodynamische übertragen. Das Ziel scheint vielmehr gewesen zu sein, die Grundqualität der Beziehung derart konkret zu erfassen bzw. zu begreifen, bis ein ideelles Mittel zur weiteren Konstruktion des Kreisprozesses vorlag. Gemäß der Ausgangszielstellung sollte dieser Kreisprozess so gestaltet werden, dass die Arbeit (bzw. bewegende Kraft) das Maximum erreicht. Zur Konstruktion des Prozesses aus den Elementen:

- isothermer Expansionsprozess bei der hohen Temperatur  $T_1$  des Reservoirs A (Wärmekontakt zwischen dem Zylinder und dem Reservoir A),
- adiabatischer Expansionsprozess bis zur niedrigen Temperatur  $T_2$  des Reservoirs B (Isolation des Zylinders),
- isothermer Kompressionsprozess bei der Temperatur  $T_2$  (Wärmekontakt zwischen Zylinder und Reservoir B),
- adiabatischer Kompressionsprozess bis zur Temperatur  $T_1$  (Isolation des Zylinders),



musste CARNOT sich zunächst über grundlegende Eigenschaften des Kreisprozesses klar werden. Eine fundamentale Eigenschaft ist die Offenheit bzgl. des Wärmestoffes, eine weitere die der Beziehung zwischen Volumenänderung und Wärmestoffübergang von A nach B (Wiederherstellung des Gleichgewichts):

"Da jede Wiederherstellung des Gleichgewichts des Wärmestoffes die Ursache der Erzeugung von bewegender Kraft sein kann, so muß jede Wiederherstellung des Gleichgewichts, welche sich ohne Hervorbringung solcher Kraft vollzieht, als ein wirklicher Verlust anzusehen sein [...]. Die notwendige Bedingung des Maximums ist daher, daß an den zur Gewinnung von bewegender Kraft aus Wärme benutzten Körpern keine Temperaturänderung bedingt ist. Umgekehrt wird stets, wenn diese Bedingung erfüllt ist, das Maximum erreicht sein" (CARNOT 1892, 15).

Die Vermutung liegt nahe, dass CARNOT eine spezifische Idee des Kreisprozesses als explizites Konstruktionsmittel verwendet hat. Hierfür lassen sich mehrere stützende Argumente angeben. Eine Quelle für CARNOTS Kreislaufdenken bildet seine Auseinandersetzung mit dem Kreislaufdenken in der persischen Kultur, eine weitere sein Studium der Konzepte der stationären Geldkreisläufe und der Tauschzirkel in den neuesten Theorien über politische Ökonomie.

#### 4. ZUR STRUKTUR DER HEURISTISCHEN MITTEL<sup>5</sup>

Mittel und Tätigkeit entsprechen einander. Jeder spezifischen Tätigkeitsphase liegen spezielle Mittel zugrunde. Dies gilt für jede Tätigkeit, also auch für die wissenschaftliche Tätigkeit und die Lerntätigkeit. Das Mittel ist nur derjenige Teil eines Paradigmas/kognitiven Systems bzw. diejenigen Teile mehrerer Paradigmen/kognitiver Systeme, die für die Realisierung eines antizipierten Resultats (Ziel, Motiv) auch effektiv benutzt werden. Mittel, die mehreren Systemen angehören, treten in Fällen auf, in denen Neues bearbeitet wird und sich ein neues Paradigma/kognitives System entwickelt. Dies ist z. B. bei der Entstehung neuer Disziplinen aus zwei oder mehreren der Fall (Biochemie, Physikalische Chemie etc.), bei der Entstehung eines neuen Gebiets in einer Disziplin, das mit Hilfe meh-

rerer Paradigmen derselben Disziplinen bearbeitet wird (Plasmaphysik) oder auch bei der Entstehung des Neuen beim Paradigmenwechsel.

Der üblichen Differenzierung der Wissenschaftsentwicklung in die außerordentliche und normale Wissenschaft korrespondiert eine wesentliche erkenntnistheoretische Unterscheidung der (Lern-) Tätigkeit in die evolutionäre und die autopoietische Phase. Die Terminologie lehnt sich an E. JANTSCH (1982) an. Analog zur normalen Wissenschaft vollzieht sich die Tätigkeit der autopoietischen Phase in den vorhandenen kognitiven Systemen. In der evolutionären Phase entsteht – entsprechend zur außerordentlichen Wissenschaft – Neues, das die alten kognitiven Systeme transzendiert: Das Neue bildet den Keim eines neuen kognitiven Systems. Wie für jede Tätigkeit sind auch für die Herausbildung eines neuen Systems spezifische ideelle Mittel notwendig, vergleichbar mit denen bei der Entwicklung eines neuen Paradigmas.

Das herauszubildende Neue kann zunächst im Wesentlichen nur Gegenstand der (Lern-) Tätigkeit sein. Es bildet sich in der evolutionären Phase erst zum neuen Mittel, einem neuen kognitiven System, heraus, das dann einer sich anschließenden autopoietischen Phase zugrunde liegt. In der evolutionären Phase ist die Hauptentwicklungsrichtung bei der Produktion von Wissen (Informationsstrukturen) ein Verallgemeinerungsprozess, d. h. ein Akkomodationsprozess im Sinne PIAGETS. Diese Richtung kehrt sich in der autopoietischen Phase um: die Produktion von Wissen (Informationsstrukturen) ist im Wesentlichen ein Spezialisierungs- und Explikationsprozess (vergleiche hierzu WOLZE 1989, 1991), d. h. ein Assimilationsprozess. Eine Information (pragmatische Information) zeichnet sich durch zwei Komponenten aus, die einen Gegensatz andeuten, aber auch etwas sich gegenseitig Bedingendes. Neues ist in der menschlichen Kommunikation nur dann Neues, wenn es auch in gewisser Hinsicht verstanden wird, also in einem Sinnzusammenhang steht. E. v. WEIZSÄCKER (1974) erfasst diesen Gegensatz mit den allgemeinen Begriffen Erstmaligkeit und Bestätigung. Erstmaligkeit und Bestätigung werden danach für jede Information als konstitutiv angesehen; die Beziehung zwischen ihnen wird als Komplementarität, als wechselseitiges Bedingungsverhältnis angenommen. Damit bedingt aber erst die Bestätigung – die spezifische Art und Weise sowie der Umfang der Integration der Information ins kognitive System – die Erstmaligkeit (das Neue), die ihrerseits einen Möglichkeitsraum für die weitere Bestätigung konstituiert. In der autopoietischen Phase "entspricht" die neue Information im Wesentlichen der kognitiven Struktur, die Information zeichnet sich durch hohe Bestätigung und geringe Erstmaligkeit aus: sie liefert für das Subjekt relativ wenig Neues.

Dies Verhältnis kehrt sich in der evolutionären Phase um: die Information besitzt hier eine geringe Bestätigung und eine hohe Erstmaligkeit.

Die evolutionären Phasen sind die Problemphasen, d. h. diejenigen Lernphasen, die relativ schwer zu realisieren sind. Eine Information muss konstruiert bzw. rekonstruiert werden. Dabei zeichnet sich Neues durch eine hohe Erstmaligkeit und eine relativ geringe Bestätigung aus. Die Information ist abstrakt. Ihre Konkretisierung besteht darin, Erstmaligkeit in Bestätigung zu transformieren. Das hier diskutierte heuristische Mittel ist eine Ausgangsabstraktion im Sinne von DAVYDOV (1972), GIEST (1991 und

1991a) und LOMPSCHER (1990 und 1990a). In ihren Forschungen haben sie aufgezeigt, wie solche Mittel in einem Prozess des Aufsteigens vom Abstrakten zum Konkreten für die Entfaltung komplexer Systeme genutzt werden können. Dieser Prozess entspricht hier der Transformation von Erstmaligkeit in Bestätigung. Es lassen sich zwei Fälle unterscheiden:

1. Fall: Die Erstmaligkeit wird derart reduziert, dass sich das so reduzierte Neue ins alte kognitive System integrieren lässt. Es entsteht Hybridwissen, das einerseits das vorhandene System erweitert, andererseits für die Entwicklung eines neuen kognitiven Systems relativ unproduktiv ist.
2. Fall: Die Erstmaligkeit liefert die Orientierung für die Entwicklung neuer Informationsstrukturen. Es entsteht ein neues kognitives System, das die vorgängigen Objekte des alten Systems neu konstituiert. Der Entstehungsprozess des Neuen und seine Weiterentwicklung zum Mittel lässt sich in signifikante Phasen differenzieren (WOLZE 1991).

Von besonderem Interesse ist nun die Frage, welche Struktur das Neue besitzt. Als Konstruiertes muss eine Beziehung zu den Konstruktionsmitteln bestehen. Die Erforschung des Neuen, seine Entstehung und Struktur, steckt zwar noch in den Anfängen. Aus verschiedenen Wurzeln bildet sich jedoch ein Typ des Neuen heraus, für den ein allgemeines Bildungsgesetz konsumtiv ist, das – in unterschiedlicher Ausprägung – auch in den vorangehenden Beispielen auftritt.

*Bildungsgesetz:* Neues ist eine neue Integration alter Elemente

Ausgangsbasis für die Bildung der Kombination ist eine erklärungsbedürftige Situation, eine Desintegration. Sie kann wie bei KEKULÉ und EINSTEIN die Form eines Widerspruchs (Paradoxon, Anomalie) besitzen oder wie bei PLANCK und CARNOT die Form einer Wissenslücke. Die neue Kombination alter Elemente ist zunächst abstrakt, sie besitzt eine relativ hohe Erstmaligkeit. Die Elemente sind zwar konkrete Elemente des alten kognitiven Systems, die Information besitzt in diesem Kontext eine hinreichend hohe Bestätigung. Die neue Kombination bildet jedoch einen Widerspruch zum alten kognitiven System. Damit werden alte Bestätigungsdimensionen aufgehoben, die i. a. aber erst expliziert werden müssen. Die neue Beziehung besitzt in diesem Entwicklungsstadium nur eine geringe Bestätigung, aber relativ hohe Erstmaligkeit. Im ersten Schritt beinhaltet die neue Kombination das antizipierte Resultat der Erklärungs-Tätigkeit. Die Kombination besitzt hier Hypothesencharakter, sie kann daher als heuristische Hypothese/Idee bezeichnet werden. Wie schon im Eingangsbeispiel hervorgehoben, besitzt die methodische Dimension einer heuristischen Idee eine Besonderheit. Sie besteht in dem Aufforderungscharakter zur Modellation der einen Seite der Kombination durch die andere und evtl. umgekehrt.

Die heuristische Idee wird zum Mittel ihrer eigenen Aneignung. Dieser Besonderheit Rechnung tragend, soll hier vom heuristischen Mittel die Rede sein. Neues als neue Integration alter Elemente kann zwar ebenfalls als Hybridwissen angesehen werden, die Besonderheit besteht jedoch im Widerspruch zum alten Wissen. Hierdurch kann das Neue zum Mittel der Ent-

wicklung neuen Wissens werden. Neues in Form heuristischer Mittel ist so gesehen produktives Hybridwissen zur Entwicklung neuer kognitiver Systeme. In der Metaphernforschung tritt dieser Typ des Neuen in den sogenannten Wechselwirkungsmetaphern auf (vergleiche z. B. BLACK 1962, HESSE 1981, KUHN 1979, STEINER 1988): Sie sind vom Typ "Der Mensch ist ein Wolf oder "Die Nacht ist eine blaue Seidendecke". Die spezifische methodische Dimension des heuristischen Mittels kommt hier besonders deutlich zum Vorschein. In Wechselwirkungsmetaphern werden auch zwei bekannte Elemente neu kombiniert/integriert. Die Kombination/Integration ist eine Identität. Formallogisch betrachtet ist die Wechselwirkungsmetapher eine falsche Aussage und damit empirisch bedeutungslos. Aus erkenntnistheoretischer, entwicklungslogischer Sicht handelt es sich demgegenüber um ein (Erkenntnis-)Mittel mit Aufforderungscharakter: dies ist der Methodencharakter der Metapher. Der spezifische Aufforderungscharakter der Metapher besteht nun darin, jeweils eine der beiden Seiten aus der Sicht der anderen zu verstehen. Es werden allgemeine Merkmalskonzepte des einen Objektes (Wolf, blaue Seidendecke) zur Modulation des anderen (Mensch, Nacht) verwendet. Damit werden z. B. der Mensch unter dem Wolfsgesichtspunkt und (evtl. auch) der Wolf unter dem Menschgesichtspunkt neu verstanden. Jedes Element wird mit Hilfe des anderen moduliert: der Mensch wird wolfsähnlicher und der Wolf menschenähnlicher. Interpretiert man das isolierte Ergebnis formallogisch, so besteht die Modulation in der wechselseitigen Übertragung von Merkmalen. Entwicklungslogisch betrachtet ist der Modulationsprozess komplizierter. Es liegen i. a. weder die Merkmalskonzepte beider Seiten explizit vor noch sind diejenigen Konzepte klar bestimmt, hinsichtlich derer die Modulation im Wesentlichen durchgeführt wird. Die Verwendung einer Metapher als Erkenntnismittel hängt von den Zielen und Motiven ab sowie vom gesamten Mittel, das dem Erkenntnisprozess zugrunde liegt. So mag es z. B. darum gehen, das soziale Verhalten des Menschen in spezifischen Situationen zu bestimmen. Hierfür mag die Beziehung zum Wolf aus intuitiven Gründen als wesentlich erscheinen, d. h. diffuse Merkmalsbegriffe des Wolfes scheinen für diese Charakterisierung geeignet. Dies ist die heuristische Idee. Die Charakteristika treten jedoch erst während der Modulation expliziter hervor, u. U. in modifizierter oder auch anderer Form. Die Modulation selbst ist auch keine einfache Übertragung, sondern eine Interpretation des neuen Merkmalskonzepts im Objektbegriff der anderen Seite, wodurch sich das Objektbegriff wesentlich ändern kann. Von den Metaphern unterscheidet sich derjenige Typ des Neuen, der in den Beispielen von EINSTEIN, PLANCK, CARNOT und auch KEKULÉ vorkommt. Das Neue besteht auch hier aus einer Integration alter Elemente, die ebenfalls einen produktiven Widerspruch zum alten kognitiven System bildet. Der Unterschied zur Metapher besteht jedoch darin, dass sich mit der Weiterentwicklung des Neuen der Widerspruch aufhebt. Das Neue entwickelt sich zu einem eigenständigen System, in dem die Integrationsbeziehung ein konstitutives Element ist.

PEIRCE (1960, Vol. 5 §171) bezeichnete diesen Integrationsprozess (Abduktion) als "the only logical Operation which introduces any new idea". Neben diesen wissenschaftstheoretischen und wissenschaftshistorischen

Beispielen liefert auch die Kreativitätsforschung Beispiele, die das Integrationsprinzip bestätigen. Auch finden sich chaostheoretische Ansätze zur Entstehung des Neuen.<sup>6</sup> Hiermit gewinnt man auch eine konkretere Beziehung zum Konnektionismus: Das Neue, als emergente (System-)Eigenschaft in Form eines Attraktors, entsteht durch Integration von Neuronen (-Verbänden) zu einem neuen System.<sup>7</sup>

## 5. KONSEQUENZEN FÜR DIE DIDAKTIK

Historische Beispiele machen deutlich, dass die Entwicklung des Neuen ein langwieriger Prozess ist. Um das klassische Gleichzeitigkeitsprinzip zu explizieren, hat EINSTEIN z. B. ca. zehn Jahre gebraucht. Die Ausarbeitung der Speziellen Relativitätstheorie ging dann verhältnismäßig schnell vonstatten. Ein ähnliches Problem hatte EINSTEIN bei der Entwicklung der Allgemeinen Relativitätstheorie, die noch sieben Jahre dauerte. "Der hauptsächliche Grund liegt darin, dass man sich nicht so leicht von der Auffassung befreit, dass den Koordinaten eine unmittelbare metrische Bedeutung zukommen müsse" (EINSTEIN 1979, 25). Das Problem bei der Entwicklung des Neuen ist also die Konstruktion des neuen Ideenkeims in Form eines heuristischen Mittels. Theoretisch wie empirisch lässt sich begründen, dass dies auch das fundamentale Problem des schulischen Lernens ist, das fast ausschließlich in unproduktives Hybridwissen mündet. Zwei Beispiele sollen dies verdeutlichen.

### 5.1 Beispiele

#### *Beispiel 1: Verbrennungsprozess*

In der üblichen lebensweltlichen Erfahrung ist Verbrennung ein Vernichtungsprozess. Es werden gerade diejenigen Qualitäten der Ausgangsstoffe vernichtet, die in diesem situativen, lebensweltlichen Bereich relevant sind. Wie Unterrichtsversuche zeigen, ist die Aneignung des Umbildungskonzepts der Chemie (Verbrennung als Stoffumbildung) mit erheblichen Schwierigkeiten verbunden (vergleiche hierzu DIERKS, WENINGER 1988, 13 f. und 19 f.).

Die Strategie des Lehrgangs "Stoffe und Stoffumbildung" besteht darin, Verbrennung zunächst auch unter dem Gesichtspunkt der Produktion zu sehen, um dann zum Umbildungsschema übergehen zu können. Bei diesem Vorgehen wird das Vernichtungsschema mit dem Produktionsschema zum Umbildungsschema kombiniert. Alle drei Schemata sind zwar im lebensweltlichen System vorhanden, aber aufgrund der situativen Zweckgebundenheit nicht allgemein verfügbar. Wenn auch die Produktion von Asche und Rauch etc. gesehen wird, so ist diese im üblichen lebensweltlichen Zweckdenken irrelevant, zumindest dort, wo der Vernichtungsaspekt der Verbrennung dominiert. Die Konstruktion des Neuen stößt vermutlich nicht so sehr auf Geltungsprobleme als auf Sinnprobleme. Ein weiteres Problem ist der Übergang vom Abstrakten zum Konkreten: Prozesse, die Vernichtungs- und Produktionsphasen enthalten, müssen noch keine Umbildungsprozesse sein. Ein Beispiel hierfür ist das Zerschlagen (Verschwinden) eines Gegenstandes und seine (u. U. veränderte) Reproduktion durch Zusammenkleben der Teile. Im Übergang vom Abstrakten zum Konkreten durch die wechselseitige Modulation des Vernichtungs- und des Produkti-

onsschemas ist die spezifische Beziehung von Vernichtung und Produktion herauszuarbeiten: In der neuen Integration muss Vernichtung konstitutiv für Produktion werden. Das Ergebnis des Lernprozesses besteht dann aus drei weiterentwickelten Schemata.

Mit diesem Resultat ist das lebensweltliche Paradigma transzendiert. Wie EINSTEINS Entwicklung der Relativitätstheorie zeigt, sind es insbesondere die involvierten impliziten, vorbewussten Prinzipien, die für die Entstehung von Neuen Hemmnisse (Lerndefizite im Sinne von Konstruktionsdefiziten) bilden. In unserem Beispiel könnte die implizite Vorstellung von der lebensweltlichen Systematisierungsart eine solche Wirkung haben: Die lebensweltliche Systematisierung ist eine Systematisierung auf das Subjekt zur unmittelbaren Orientierung in einer komplexen Umwelt, während die naturwissenschaftliche Systematisierung eine Systematisierung auf das Objekt ist (vergleiche zu den verschiedenen Systematisierungsformen und der damit verbundenen Schwelle im Lernprozess BÖHME 1979). Deshalb machen für die Schüler nur solche Begriffsbildungen Sinn, die der lebensweltlichen Systematisierung gerecht werden. Begriffe, die diese Systematisierungsform transzendieren, haben zunächst keine Systematisierungsfunktion. Dies kann als ein Schlüsselproblem des naturwissenschaftlichen Unterrichts angesehen werden. Der Grund solcher Lernschwierigkeiten liegt im Folgenden:

Die vorbewussten Prinzipien konstituieren den Gegenstand. Die anderen Begriffe und Prinzipien, die mit den vorbewussten in Beziehung stehen, sind durch diese in unkontrollierbarer Weise geprägt. Um den Gegenstand anders sehen zu können, sind somit auch die vorbewussten Prinzipien aufzuheben. Wenn nun der Ausgang einer Entwicklung ein Widerspruch (Anomalie) ist, so kann zunächst nicht entschieden werden, was zur Entstehung des Neuen verändert werden muss. Eine neue Integration bewusster Elemente führt hier (zumindest direkt) nicht zum Ziel. Entsprechend ist der produktive Keim des Neuen bei EINSTEIN implizit durch die bildhafte Vorstellung in Form eines Paradoxons gegeben. Als Konsequenz für die Didaktik ergibt sich hieraus, dass vorbewusste Prinzipien der Lernenden, die im Aneignungsprozess zu Hemmnissen führen, zunächst bewusst zu machen sind. Unter Umständen ergeben sich hieraus schon Möglichkeiten zur Erzeugung einer heuristischen Idee, wie dies bei EINSTEIN der Fall war.

#### *Beispiel 2: Mechanischer Wechselwirkungsbegriff*

Im lebensweltlichen Denken wird die Wirkungsproduktion unsymmetrisch gedacht: Ein aktiver Körper (Magnet, Muskel etc.) hat die Potenz, auf einen anderen Kraft ausüben zu können.

Bei dieser Einwirkung ist der zweite Körper passiv; er besitzt nur die Potenz, dem einwirkenden Körper einen Widerstand entgegensetzen zu können.

Symmetrische Wechselwirkungen - z. B. Stoß mit zwei äquivalenten Stoßpartnern und gleichen Anfangsbedingungen - werden mit Hilfe des unsymmetrischen Aktiv-Passiv-Prinzips beschrieben, wobei wechselseitig jeder Körper jeweils die Rolle des aktiven, der andere die des passiven Körpers einnimmt. Für diesen symmetrischen Fall – der verallgemeinert werden kann – lässt sich das heuristische Mittel folgendermaßen bilden: Wechsel-



seitiges Einwirken ("Wechselwirkung") ist symmetrische Wirkungsproduktion.

Das wechselseitige Einwirken wird vom lebensweltlichen System aus noch unsymmetrisch verstanden; das heuristische Mittel enthält damit einen Widerspruch. Es ist, entsprechend dem vorangehenden Beispiel, produktives Hybridwissen. Die Symmetrieforderung spannt die Erstmaligkeit des heuristischen Mittels auf. Sie fordert dazu auf, das noch Unsymmetrische des doch andererseits anschaulich-symmetrischen Vorganges symmetrisch umzukonstruieren. In der wechselseitigen Modulation beider Seiten bildet sich sowohl der Wechselwirkungsbegriff heraus als auch der Begriff der (symmetrischen) Wirkungsproduktion. Der Wechselwirkungsbegriff führt zum adäquaten Verständnis des Newtonschen Kraftbegriffs, der Begriff der Wirkungsproduktion zum Impulsbegriff und zum Impulserhaltungssatz. Auch hier können vorbewusste Prinzipien, z. B. das Aktiv-Passiv-Prinzip, zu erheblichen Lernschwierigkeiten führen.

## 5.2 Zur Mittelaneignung

### a) Zwei unterschiedliche Aneignungsmethoden

Der kreative Akt bei der Entwicklung eines neuen kognitiven Systems besteht in der Produktion einer heuristischen Idee bzw. eines heuristischen Mittels. Für den Lernprozess bieten sich zwei extreme Möglichkeiten an. Einmal wird unter funktionaler Orientierung von außen von den Lernenden das heuristische Mittel selbst konstruiert, zum anderen als vorgegebene Information rekonstruiert. Die Möglichkeit der Anwendung der Methoden hängt von verschiedenen Faktoren ab. Zur Klärung sind hier neben detaillierten theoretischen Analysen auch empirische Untersuchungen notwendig. Die selbständige Aneignung ist i. a. zeitaufwendiger und schwerer zu realisieren als die Rekonstruktion; das Resultat des Lernprozesses ist dagegen im ersten Fall konkreter. Das heuristische Mittel ist expliziter entwickelt, es ist eher ein hinreichend effektives Mittel für die sich anschließende Phase der Modellation als im zweiten Fall. Es ist auch a priori klar, dass man sich bei einer selbständigen Konstruktion in größerem Maße metatheoretisches und methodisches Wissen aneignet als bei der Rekonstruktion des vorgegebenen Mittels. Wissen also, das insbesondere für die metakognitiven Lernphasen wesentlich ist. Im Prinzip handelt es sich bei dieser selbständigen Aneignung um ein Funktionsziel im Sinne Wagenscheins.

### b) Zum Problem defizitärer Mittel

Im Vorangehenden haben wir Lernschwierigkeiten angesprochen, die ihre Ursache in defizitären Mitteln haben. Diese Schwierigkeiten treten nicht nur bei der Entwicklung der heuristischen Mittel auf, sondern auch beim Übergang vom Abstrakten zum Konkreten in der sich anschließenden Modulationsphase. Eine mögliche Schwierigkeit beruht darauf, dass die im heuristischen Mittel integrierten alten Elemente unzureichend entwickelt sind. Im ersten der beiden aufgeführten Beispiele ist dies der Umbildungsbegriff, dessen Beziehung zum Vernichtungs- und zum Produktionsbegriff i. a. zu rudimentär ist. In dem angegebenen Wechselwirkungs-Heurismus ist dies der Symmetriebegriff: In der weiteren Entwicklung zum naturwissenschaftlichen kognitiven System muss der Begriff über die geometrische

Bedeutung hinaus weiterentwickelt werden. Im Allgemeinen wird es sinnvoll bzw. unentbehrlich sein, diese Elemente gesondert zu explizieren. Das didaktische Problem ist jedoch, dass eine solche Explikation im lebensweltlichen kognitiven System beim Lernenden i. a. Sinn- und Geltungsprobleme aufwirft und damit kognitive Barrieren schafft.

Eine Möglichkeit, solche Probleme zu vermeiden, besteht darin, auf eine formale Ebene überzugehen, die noch im Denkraum der Lernenden liegt und in der von denjenigen empirischen Bedeutungsdimensionen abstrahiert wird, die für etliche Sinn- und Geltungsprobleme verantwortlich sind. Innerhalb der Wissenschaftsentwicklung sind formorientierte Entwicklungen im Rahmen der Syntax (Mathematik) durchgeführt worden. Ein eindrucksvolles Beispiel hierfür ist die Entwicklung des Begriffs des Wirkungsquantums von M. PLANCK. Die Voraussetzung für die Möglichkeit von PLANCKS Entwicklung war die Abstraktion von klassischen Bedeutungsschichten. Diese formorientierte Entwicklungsmethode lässt sich auch über die Mathematik hinaus verallgemeinern. Eine Möglichkeit hierzu bieten Computersimulationen, die keine Darstellungen realer Prozesse sind bzw. von den Lernenden nicht mit solchen identifiziert werden. Simulationen dieser Art schaffen gemäß PAPERT (1982) "Mikrowelten", in denen potentielle Mittel entwickelt werden. Für die Anwendung auf Naturvorgänge reicht ihr ursprünglicher empirischer Inhalt im allgemeinen aber noch nicht aus, so dass sie hierfür weiterzuentwickeln sind. Zusätzlich zur 'direkten' Entwicklung im Kontext von Experimenten bieten sich neben Gedankenexperimenten Simulationen mit empirischem Gehalt an, mit denen

- (a) die potentiellen Mittel für den entsprechenden Anwendungsbereich expliziert und
- (b) die Aufhebung der alten Konstruktionen (Mittel, Prinzipien) durchgeführt werden können.

Zu dem Heurismus "Wechselwirkung ist symmetrische Wirkungsproduktion" wurde zum Begriff der Symmetrie eine solche interaktive Computersimulation entwickelt (SCHULDT 1994).

Ausgangspunkt ist ein Feld mit verschiedenfarbigen Kreiselementen, deren Anzahl und Bewegungsformen verändert werden können. Außerdem sind Feldbegrenzungen ("Wände") zuschaltbar, die Kreiselemente produzieren, indem sie sie zerlegen, zu größeren vereinigen oder aber vernichten. Durch Zuschaltung von Verbindungslinien lassen sich die Spuren der Elemente und die Veränderung ihrer Beziehungen untereinander verfolgen und in Bildern festhalten. Wie erste Versuche zeigen, regt das Spiel mit den Kreiselementen die Konstruktion von Ordnungen und die Reflexion dieses Prozesses an. In einem zweiten Schritt wird dann die Symmetrievorstellung als Mittel für die Erzeugung und Analyse von Ordnungen eingeführt. Entwickelt werden können verschiedene Arten von Symmetrien und Asymmetrien, so dass schließlich ein variantenreiches Repertoire von Symmetrievorstellungen vorhanden ist.

Das entwickelte Repertoire von Symmetrievorstellungen wird in einem dritten Schritt genutzt zur Systemanalyse von schwingenden Pendeln. Aus einem Feld von Anwendungsmöglichkeiten von vier schwingenden Pendeln können bestimmte Varianten ausgewählt und untersucht werden. Dabei taucht das Problem der Wechselwirkung auf, wenn zuerst "aktive Pendel"

gegen eine "passive Wand" stoßen, nach der Entfernung der Wand aber direkt aufeinanderprallen und die Frage provozieren: Ursache-Wirkung oder Wechselwirkung?

Die Arbeitsperspektive besteht darin, die Computersimulationen so weiterzuentwickeln, dass die Metapher "Wechselwirkung ist symmetrische Wirkungsproduktion" auf einer formal-ästhetischen, von Sinn- und Geltungsproblemen relativ freien Ebene spielerisch angeeignet werden kann. Damit ist analog zur Vorgehensweise von MAX PLANCK ein Mittel entwickelt, das dann für physikalische Systembildungen genutzt werden kann. Das so explizierte heuristische Mittel ist zunächst noch abstrakt. Die Weiterentwicklung des heuristischen Mittels zum neuen Erkenntnissystem ist also mit dem Übergang vom Abstrakten zum Konkreten verbunden. Verstärkt durch die Sinn- und Geltungsprobleme führt der Übergang zum Konkreten oft über eine Informationsreduktion: Die Erstmaligkeit des heuristischen Mittels wird so reduziert, dass es als Element konsistent ins vorgängige (lebensweltliche) Erkenntnissystem integrierbar wird. Hierdurch erweitert sich lediglich das alte System, es entwickelt sich aber kein neues. Zur Vermeidung dieser Reduktion ist es wesentlich, durch eine konkrete Vermittlung des Neuen mit dem alten System Sinn- und Geltungsprobleme möglichst zu reduzieren.

### *c) Skizze eines möglichen Lernweges*

In beiden Beispielen von Kap. 5.1 standen die sinnhaften und erklärungs-mächtigen lebensweltlichen Konzepte im Widerspruch zum jeweils neuen heuristischen Mittel: Lebensweltlich wird der Verbrennungsprozess mit dem Vernichtungskonzept erfasst, das im Widerspruch zum chemischen Umbildungskonzept steht. Entsprechend konstituiert der lebensweltliche Begriff des aktiven Körpers die Wirkungsproduktion als unsymmetrische Beziehung, während der Wechselwirkungsbegriff auf eine symmetrische Wirkungsproduktion verweist. Solche Konzeptpaare lassen sich in unterschiedlicher Weise ins Verhältnis setzen. Die in der Didaktik gängigste und auch heute noch nicht ganz überwundene Beziehung zwischen wissenschaftlichen und lebensweltlichen Begriffen resultiert aus der Charakterisierung der lebensweltlichen als misconceptions, die es auszumerzen gilt. Eine für die Begriffsentwicklung förderliche Beziehung ergibt sich aus einer Explikation der lebensweltlichen Begriffe, die zu einer sinnvollen Koexistenz bzw. zu einem sinnvollen Beziehungsgefüge beider Erkenntnis-systeme führt. Die Weiterentwicklung des heuristischen Mittels kann darüber hinaus so gestaltet werden, dass von Anfang an mit jedem Entwicklungsschritt schwerwiegende Sinn- und Geltungsprobleme vermieden werden. In diesem zweiten Fall besteht die Aufhebung der alten Mittel nicht in ihrer Elimination, sondern in ihrer Transformation. Für das erste Beispiel ergibt sich aus der oben beschriebenen Explikation des Umbildungskonzepts direkt die Explikation des Vernichtungskonzepts als die eine Seite der Stoffumbildung, nämlich die Vernichtung von Qualitäten der Ausgangsstoffe, die für die betreffenden lebensweltlichen Situationen von Bedeutung sind. Wenn also ein expliziter Begriff der Umbildung verfügbar ist, so lässt sich dadurch am lebensweltlichen Vernichtungsdenken bei der Verbrennung anknüpfen, in dem bei der Umbildung die Vernichtung der Ausgangskomponenten schwerpunktmäßig thematisiert wird. Bei diesem

Vorgehen bezieht sich eine möglicherweise verbleibende Sinn- und Geltungsproblematik nur noch auf die Relevanz des Umbildungsbegriffes, auf seine Beschreibungsfunktion, die es für die wissenschaftliche Systematisierung zu entfalten gilt.

Entsprechendes gilt für das zweite Beispiel. Um der lebensweltlichen Systematisierungsart und Sinnhaftigkeit gerecht zu werden, kann für die weitere Entwicklung am lebensweltlichen Kausalprinzip angeknüpft werden. Es beinhaltet, dass jede Veränderung eine Ursache hat, die i.a. Kraft genannt wird. Dieses Prinzip, das die unsymmetrische Wirkungsproduktion beinhaltet, lässt sich mit dem Wechselwirkungsheurismus dahingehend modifizieren, dass Wechselwirkungen auch bzw. ausschließlich als Ursachen angesehen werden. In beiden Fällen wird das Kausalprinzip (partiell) adäquat expliziert und braucht nicht transzendiert zu werden. Als aktive Körper können nun wechselwirkende Objekte angesehen werden. Einem solchen System kann nun die Potenz (Augenblicksdisposition) zugeschrieben werden, dass die einzelnen Objekte simultan Kraft aufeinander ausüben; die dabei auftretenden Veränderungen des Systems (Wirkungen) sind durch die Wechselwirkungen verursacht. Auch der engere lebensweltliche Begriff des aktiven Körpers (permanente Disposition) lässt sich in diesem Rahmen sinnvoll und stimmig interpretieren. Er bezieht sich auf die Möglichkeit einer Wechselwirkung und damit Wirkungsproduktion unter bestimmten Bedingungen. So sind bei der Betrachtung einer magnetischen Wechselwirkung in diesem Sinne zwei Eisenstücke passiv, wenn keines von ihnen magnetisch ist. Mit diesen beiden Objekten lässt sich also kein mögliches abgeschlossenes System mit einer magnetischen Wechselwirkung konstruieren. Anders ist dies, wenn eines der Objekte aktiv, d.h. ein Magnet ist. Der lebensweltliche Begriff des aktiven Körpers erfasst so vorthoretisch Objekte mit spezifischen Kraftursachen. Ausgehend von einer solchen lokalen Uminterpretation für phänomenologisch symmetrische Fälle, kann nun sukzessive das gesamte lebensweltliche System der Mechanik uminterpretiert werden. Die lebensweltlichen Widerstände werden in diesem Rahmen als Wechselwirkungen mit der bestimmten Funktion aufgefasst, die situativ gewollten Veränderungen zu hemmen. In ähnlicher Weise lassen sich auch andere lebensweltliche Begriffe explizieren, z. B. das weitverbreitete Verbrauchskonzept in Kontexten wie "Verbrauch von Energie" oder "Verbrauch von Strom". Diese Uminterpretation transformiert die Vernichtungsvorstellung in die Vorstellung, dass etwas nicht mehr zur Verfügung steht.

Das hier skizzierte Entwicklungsprinzip hat Ähnlichkeiten mit dem naturwissenschaftlichen Prinzip der sogenannten schwachen Kausalität: relativ kleine Modifikationen im Erkenntnisssystem (durch Bildung eines heuristischen Mittels und der darauf folgenden Uminterpretation/Explikation lebensweltlicher Konzepte) leiten Entwicklungen ein, die schließlich zu völlig neuen Systemen führen.

## Anmerkungen

- 1 Dieser Aufsatz ist die Ausarbeitung von drei kleinen Beiträgen zur Jahrestagung der GDCP 1993 in Kiel. Vgl. (SCHULDT, WALGENBACH, WOLZE 1994), (Walgenbach, Wolze, SCHULDT 1994), (WOLZE, SCHULDT & WALGENBACH 1994).
- 2 In diesem Zusammenhang erscheint die Aufarbeitung des Mittelbegriffs bei VYGOTSKY erfolgversprechend. (Vgl. etwa DAVYDOV 1995).
- 3 Für die folgenden Ausführungen vgl. (PLANCK 1990).
- 4 Die mit diesem Mittel verbundene kreative Leistung hebt T. S. KUHN (1961, 371 f.) mit den Worten hervor: "But, above all, CAGNARDS engine is suggestive because, unlike all other known steam and air engines, it takes nothing from the high-temperature reservoir except heat. Caloric transfer is the only net environmental change required to raise a weight. That view of the relation between heat and mechanical effect is, however one of CARNOTS most novel and most fundamental contributions to physical science".
- 5 Siehe dazu ausführlicher (WALGENBACH 1995).
- 6 Zum Kombinationsprinzip vgl. (Sternberg 1988), speziell die Beiträge (GRUBER, DAVIS 1988) und (PERKINS 1988). Eine kurze populärwissenschaftliche Skizze zur chaostheoretischen Deutung befindet sich in (BRIGGS, PEAT 1990, 293 f.).
- 7 Für einen kurzen Überblick zum Konnektionismus in Abgrenzung zur älteren Kognitionstheorie einerseits und einem Ansatz zu einer handlungsorientierten Kognitionstheorie vgl. (VARELA 1990).

## Literatur

- BAUERSFELD, H. (1993). Tätigkeitstheorie und Radikaler Konstruktivismus: Was verbindet sie und was unterscheidet sie? In H. BALHORN, H. BRÜGELMANN (Hrsg.): Bedeutungen erfinden - im Kopf, mit Schrift und miteinander. Konstanz, 38 - 56.
- BENNER, D. (1,987). Allgemeine Pädagogik - Eine systematisch-problemgeschichtliche Einführung in die Grundstruktur pädagogischen Denkens und Handelns. Weinheim, München.
- BLACK, M. (1962). Models and Metaphors. Ithaca N. Y.: Cornell University Press.
- BÖHME, G. (1979). Die Verwissenschaftlichung der Erfahrung - Wissenschaftsdidaktische Konsequenzen. In G. Böhme & M. v. Engelhardt (Hrsg.), Entfremdete Wissenschaft. Frankfurt/a. M.: Suhrkamp, 114-136.
- BRIGGS, J., PEAT, F. D. (1990). Die Entdeckung des Chaos - Eine Reise durch die Chaostheorie. München, Wien: Hanser.
- BROMME, R., HÖMBERG, E. (1977). Psychologie und Heuristik - Probleme der systematischen Effektivierung von Erkenntnisprozessen. Darmstadt.
- CARNOT, S. (1892). Betrachtungen über die bewegende Kraft des Feuers und die zur Entwicklung dieser Kraft geeigneten Maschinen. Leipzig: Oswalds Klassiker der exakten Wissenschaften, Nr. 37.
- DAVYDOV, V. V. (1995). The Influence of L. S. Vygotsky on Education. Theory, Research, and Practice. Educational Researcher (Vol 24) 3, 12 -21.
- DAVYDOV, V.V. (1972). Über das Verhältnis zwischen abstrakten und konkreten Kenntnissen im Unterricht. In J. LOMPSCHER (Hrsg.): Problem der Ausbildung geistiger Handlungen. Berlin, 241 -260.
- DIRKS, W., WENINGER, J. (1988). Stoffe und Stoffumbildungen – 3. Teil, Stuttgart.
- EINSTEIN, A. (1905). Zur Elektrodynamik bewegter Körper. Ann. D. Phys. 17, 891 - 921. Abgedr. in H. A. LORENTZ, A. EINSTEIN, H. MINKOWSKI (1958): Das Relativitätsprinzip. Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft.
- Einstein, A. (1979). Autobiographisches. In P. N. SCHILPP (Hrsg.): Albert Einstein als Philosoph und Naturforscher. Braunschweig, Wiesbaden: Vieweg.
- ENGSTRÖM, J. (1990). Learning, Working and Imagining - Twelve Studies in Activity Theory. Helsinki.

- FUNKE, R. (1983). Selbsttätigkeit - Zur theoretischen Begründung eines heute vernachlässigten Begriffs durch Fichte und seine Schüler. Vierteljahrsschrift für wissenschaftliche Pädagogik, 1, 62-78.
- GIEST, H. (1991). Lernen und Lehren auf der Grundlage inhaltlich-logischer Verallgemeinerungen. Arbeitsgruppe für Lehr-Lern-Forschung. Berlin.
- GIEST, H. (1991a). Einführung in die Naturwissenschaften - Wege zur Ausbildung theoretischen Denkens in der Mittelstufe. Empirische Pädagogik, 5, 25-45.
- GRUBER, H. E., DAVIS, S. N. (1988). Inding our way up Mount Olympus: the evolving-systems approach to creative thinking. In R. J. STERNBERG, R (Ed.): The nature of creativity. Cambridge: Cambridge University Press, 243 - 270.
- HESSE, M. B. (1966). Modells and Analogies. University of Science. Notre Dame Indiana: Notre Dame Press.
- HOHENDAHL, P. U. (1982). Reform als Utopie: Die preußische Bildungspolitik 1809 - 1817. In W. VOSSKAMP (Hrsg.): Utopieforschung - Interdisziplinäre Studien zur neuzeitlichen Utopie (Bd. 3). Stuttgart, 250 - 272.
- HÜBNER, H. (1979). Kritik der wissenschaftlichen Vernunft. Freiburg, München.
- JAHNKE, N., SEEGER, F. (1984). Erkenntnismittel versus logische Strukturen: SELZ und PIAGET. IDM Universität Bielefeld.
- JANTSCH, E. (1982). Die Selbstorganisation des Universums. München: dtv.
- KEKULÉ, A. (1890). Rede anlässlich der Feier der Deutschen Chemischen Gesellschaft zu Ehren August Kekulés. Bericht der deutschen chemischen Gesellschaft 1890, 23, 1.306.
- KEPLER, J. (1973). Weltharmonik. München.
- KUHN, T. S. (1977). Eine Funktion für das Gedankenexperiment. In T.S. KUHN: Die Entstehung des Neuen. Frankfurt/a. M.: Suhrkamp.
- KUHN, T. S. (1979). Metapher in Science. Ortony, 409-419.
- KUHN, T. S. (1961). Sadit Carnot and the Cagnard Engine. ISIS 52, 567 - 574.
- LEONTJEW, A. N. (1982). Tätigkeit, Bewußtsein, Persönlichkeit. Köln.
- LOMPSCHER, J. (1990). Wissenschaft vermitteln -Lerntätigkeit ausbilden. Grundschule, 10, 46 -49.
- LOMPSCHER, J. (1990a). Aufsteigen vom Abstrakten zum Konkreten im Unterricht. Versuche zu einer alternativen Lehrstrategie. Berlin.
- MINNSEN, M., WALGENBACH, W. (1985). Naturstoffe, Kunststoffe und das Makromolekülkonzept. Bad Salzdetfurth.
- MOLLENHAUER, K. (1972). Theorien zum Erziehungsprozeß. Zur Einführung in erziehungswissenschaftliche Fragestellungen. München.
- MÜLLER, J. (1970). Grundlagen der systematischen Heuristik. Berlin.
- OERTER, R. (1982). Interaktion als Individuum-Umwelt-Bezug. In E. D. LANTERMANN (Hrsg.): Wechselwirkungen, Psychologische Analysen der Mensch-Umwelt-Beziehung. Göttingen, Toronto, Zürich.
- PAPERT, S. (1982). Mindstorms - Kinder, Computer und neues Lernen, Basel, Boston, Stuttgart.
- PEIRCE, CH. S. (1960). Collected Papers of Vol. I to 6. In C. HARTSHORNE, P. WEIS (Eds.). Cambridge 1960.
- PERKINS, D. N. (1988). The possibility of invention. In R. J. STERNBERG (ED.): The nature of creativity. Cambridge: Cambridge University Press, 362-385.
- PIAGET, J. (1973). Einführung in die genetische Erkenntnistheorie. Frankfurt/a. M.: Suhrkamp.
- PLANCK, M. (1990). Zur Geschichte der Auffindung des physikalischen Wirkungsquantums. In M. PLANCK: Vom Wesen der Willensfreiheit und andere Vorträge. Frankfurt/a. M.
- PUSCHKIN, W. N. (1968). Die heuristische Tätigkeit in einem großen System. Ideen des exakten Wissens - Wissenschaft und Technik in der Sowjetunion, 11, 5 - 14.

- ROTH, G. (1986). Selbstorganisation und Selbstreferentialität als Prinzipien der Organisation von Lebewesen. In G. KRÖBER, H. J. SANDKÜLER (Hrsg.): Die Dialektik und die Wissenschaften. Köln: Pahl Rugenstein.
- ROTH, G. (1987). Erkenntnis und Realität: Das reale Gehirn und seine Wirklichkeit. In S. J. SCHMIDT: Der Diskurs des Radikalen Konstruktivismus; Frankfurt/a. M.: Suhrkamp.
- SCHULDt, S. (1994). Interaktive Computersimulation zu Symmetrievorstellungen. Kiel.
- SCHULDt, S., WALGENBACH, W., WOLZE, W. (1994). Funktion heuristischer Mittel bei der Entstehung des Neuen. Teil 3: Formorientierte Mittelentwicklung. In H. BEHRENDT (Hrsg.): Zur Didaktik der Physik und Chemie. Aisbach: Leuchtturm, 389 - 392.
- STEINER, H. G. (1988). Über Metaphern, Modelle und Mathematik - Theorie und Praxis. Festschrift für Heinrich Winter. Berlin, 190 - 201.
- STEGMÜLLER, W. (1973). Probleme und Resultate der Wissenschaftstheorie und Analytischen Philosophie, Band II, Zweiter Halbband. Berlin, Heidelberg, New York: Springer.
- STERNBERG, R. J. (1988), (Ed.). The nature of creativity. Cambridge: Cambridge University Press.
- Varela, F. J. (1990). Kognitionswissenschaft -Kognitionstechnik. Frankfurt/a. M.: Suhrkamp.
- Watson, J. D. (1969). Die Doppel-Helix - Ein Bericht über die Entdeckung der DNS-Struktur. Reinbek.
- WALGENBACH, W. (1995). Interdisziplinäre System-Bildungen. Ein tätigkeitstheoretischer Ansatz zu einer experimentellen ästhetisch-wissenschaftlichen Bildungspraxis. Polykopia Kiel: Institut für die Pädagogik der Naturwissenschaften.
- WALGENBACH, W., WOLZE, W., SCHULDt, S. (1994). Funktion heuristischer Mittel bei der Entstehung des Neuen. Teil 2: Konsequenzen für die Didaktik. In H. Behrendt (Hrsg.): Zur Didaktik der Physik und Chemie. Aisbach: Leuchtturm, 387 - 389.
- Weizsäcker, E. v. (1974). Erstmaligkeit und Bestätigung als Komponenten der pragmatischen Information. In ders. (Hrsg.), Offene Systeme I. Stuttgart, 82 - 113.
- WOLZE, W. (1989). Zur Entwicklung naturwissenschaftlicher Erkenntnissysteme im Lernprozeß. Wiesbaden: DUV.
- WOLZE, W. (1991). Lernen in der Komplementarität von Autopoiese und Evolution, physica didactica4, 3 - 37.
- WOLZE, W., WALGENBACH, W. (1992). Naturwissenschaftliche Bildung als System-Bildung. In P. HÄUBLER (Hrsg.): Physikunterricht und Menschenbildung. Kiel: Institut für die Pädagogik der Naturwissenschaften.
- WOLZE, W., SCHULDt, S., WALGENBACH, W. (1994). Funktion heuristischer Mittel bei der Entstehung des Neuen. Teil I: Zum Begriff. In H. BEHRENDT (Hrsg.): Zur Didaktik der Physik und Chemie. Aisbach: Leuchtturm, 384 - 387.

PD Dr. phil. habil. Wilhelm Wolze  
PD Dr. phil. Wilhelm Walgenbach  
Dr. rer. nat. Stefan Schuldt

Wolze@paedagogik.uni-kiel.de  
info@isybil.de