

Theorie des Lebendigen *

Gerhard Mack

II. Institut für Theoretische Physik, Universität Hamburg

Dieser Aufsatz soll einen konstruktiven Beitrag zur Wiedervereinigung der Wissenschaften leisten. Ein allgemeiner Rahmen wird in Form einer explizit angegebenen "Sprache der Gedanken" formuliert und im Lichte von Anwendungen in Physik, Biologie, Mathematik, Philosophie und anderen Geisteswissenschaften diskutiert.

1 B.L. Whorfs Vision

Das folgende Zitat stammt aus einem publizierten Vortrag, den der amerikanische Linguist Benjamin Lee Whorf 1941 in Delhi hielt [1] ¹

"Der Gedanke, um den es mir geht, ist zu einschneidend, um ihn mit einem Schlagwort auszudrücken. Ich möchte ihm lieber keinen Namen geben. Es handelt sich um die Ansicht, daß die Wissenschaften vor der Entdeckung einer rein gedanklichen Welt, einer unräumlichen Welt höherer Dimensionen stehen, durch die sie vereinigt und vereinheitlicht werden. Der wichtigste Aspekt dieser Welt ist der eines Gebietes von STRUKTURIERTEN ZUSAMMENHÄNGEN, die unvorstellbar mannigfaltig sind und dennoch eine erkennbare Affinität zu der reichen und systematischen Ordnung der SPRACHE haben. Unter <Sprache> verstehe ich hier auch Mathematik und Musik, die im Grunde gleicher Abstammung mit der Sprache sind. Der Gedanke ist älter als PLATON und zudem so neu wie unsere revolutionärsten Denker. Er ist in WHITEHEADS Welt der <prehensive aspects> [2] impliziert und in der Relativitätstheorie der Physik...

Nach dieser Ansicht sind die von mir so genannten Strukturschemata in einem wirklich universalen Sinn grundlegend. Sie bilden ganzheitliche Gefüge, ... die in kontinuierlicher Progression von immer größeren Ganzheiten umfaßt werden. Das Bild des Kosmos hat so den Charakter einer reihenartigen hierarchischen Ordnung von Stufen oder Schichten..."

Um die Idee der Schichten zu verdeutlichen, verweist Whorf auf das <Mantra Yoga> und auf die rein geistige <Manas-Schicht > der altindischen Philosophie. Deren *Arupa* - Ebene sei eine Welt der Strukturgesetze *par excellence*: "ohne Bedeutungsbezug auf räumliche, visuelle Gestalt."

Der von Saussure begründete klassische Strukturalismus lehnte die traditionelle Idee ab, daß Sprache Bild einer geistigen Welt sei [20]. Andererseits hat Lévi-Strauss die Universalität des menschlichen Denkens betont. Der Neostrukturalismus ging noch weiter als Saussure [21]. Lyotards Buch, dessen Titel der Postmoderne ihren Namen gab, geht vom Zerfall der Möglichkeit einer universellen Metasprache aus. Bei Foucault findet man hingegen deutliche Berührungspunkte. Ich komme darauf zurück.

Es soll in diesem Beitrag ein Versuch zur Wiedervereinigung der Wissenschaften im Geiste von Whorf's Vision gemacht werden. Was Whorf STRUKTURSCHMATA nennt, wird präzisiert

*Unterstützt von der Deutschen Forschungsgemeinschaft

¹Ich danke Dirk Graudenz für den Hinweis auf Whorf's Werk

werden zum Begriff eines Systems als eines Geflechts von Beziehungen zwischen Objekten völlig allgemeiner Art, ohne notwendigen Bezug zu Raum und Materie. Es ergibt sich dadurch ein Bezug zur Systemtheorie, ohne daß allerdings alle Konnotationen von LUHMANNs Systemtheorie übernommen würden.

Ich hoffe damit gleichzeitig zu begrifflichen Klärungen in der Theorie komplexer adaptiver Systeme beizutragen, die bisher weitgehend fehlen. Außerdem soll die geistesgeschichtliche Bedeutung der Entwicklung in der Physik seit Ende der 60-er Jahre etwas beleuchtet werden. Schließlich hoffe ich beispielhaft zu zeigen, wie die Wissenschaften sich gegenseitig befruchten können.

Ich kann der Versuchung nicht widerstehen, ein Zitat von Clausewitz anzufügen [3].

Es ist überhaupt nichts so wichtig im Leben, als genau den Standpunkt auszumitteln, aus welchem die Dinge aufgefaßt und beurteilt werden müssen, und an diesem festzuhalten; denn nur von einem Standpunkt aus können wir die Masse der Erscheinungen mit Einheit auffassen, und nur die Einheit des Standpunkts kann uns vor Widersprüchen schützen.

2 Metabiologie als Grundlage der Physik?

In einem Kommentar zu Luhmann's Werk bemerkt Habermas, die Systemtheorie substituieren Metabiologie für die Metaphysik [4]. Es soll hier das Wort Metaphysik in seinem präzisen philosophischen Sinn als Metatheorie, auf der die Physik begründet ist, verstanden werden. Nach herkömmlicher Auffassung ist die Physik die Grundlage der Biologie; Metabiologie wäre also die Physik. Sie könnte dann aber nicht die Physik begründen.

Ein wesentlicher Aspekt der Biologie ist die Replikation von Struktur. Computer-Viren sind biologischen Viren sehr ähnlich, obwohl sie keineswegs aus denselben materiellen Konstituenten bestehen. Als METABIOLOGIE könnte man daher einen Rahmen bezeichnen, der die Beschreibung allgemeiner Strukturen, ihrer Veränderung und Replikation, erlaubt.

In einer hierauf basierenden Theorie liegt die Betonung auf Struktur statt auf materiellen Konsituenten. Materie und Struktur sind insofern grundlegend verschieden, als Struktur kopiert werden kann, während die Materie als unzerstörbar gilt. Dennoch, so behaupte ich, sind Raum und Materie mögliche Erscheinungsformen von Struktur.

Es wäre dazu zu zeigen, wie die fundamentalen physikalischen Gesetze als spezielle Anwendungen allgemeiner Gesetze rein struktureller Art ohne Bezug auf Raum und Materie gedeutet werden können. Die Behauptung ist, daß dies in der Tat möglich ist.² Im Rahmen des vorliegenden Beitrags kann dies nur an einem einfachen Beispiel - der Maxwell-Theorie des Elektromagnetismus - illustriert werden.

Die "Unzerstörbarkeit der Materie" kommt keineswegs als zusätzliches Postulat dazu. Sie ist, soweit sie gilt, Konsequenz einer strukturellen Beschreibung. In den modernen physikalischen Theorien erscheint sie in Form von Erhaltungssätzen. Absolute Erhaltungssätze folgen aus der inneren Konsistenz der Theorie. Beispielsweise ist elektrische Ladung absolut und exakt erhalten - es kommt weder etwas hinzu, noch geht etwas davon verloren - weil sonst die erwähnte Maxwell-Theorie in sich inkonsistent wäre. Die allgemeinen Erhaltungssätze können i.a. nur unter einschränkenden Bedingungen an die Struktur der Raum-Zeit als Unzerstörbarkeit interpretiert werden. In unserer alltäglichen Umgebung sind die Bedingungen erfüllt.

²Anhänger der von Whorf erwähnten altindischen Philosophie würden gesagt haben: Der Geist regiert die Materie. Sie würden sogar dem individuellen menschlichen Geist diese Fähigkeit zugebilligt haben; davon ist hier aber nicht die Rede.

3 Komplexe adaptive Systeme

Komplexe adaptive Systeme sind alle, die im weitesten Sinne lebendig sind: autokatalytische chemische Reaktionsketten, Nervennetze, Lebewesen, Ökosysteme, Begriffswelten, die für die Wahrnehmung und Erkenntnis von Bedeutung sind [6], Organisationsformen der menschlichen Gesellschaft auf allen Ebenen: Wirtschaftssysteme, Staaten, u.s.w.

Solche Systeme *bestehen aus vielen einzelnen Agenzien. Diese Agenzien können Moleküle oder Neuronen, Lebewesen oder Unternehmen sein. Woraus auch immer sie bestehen, sie organisieren sich ständig im Konflikt gegenseitiger Anpassung und Rivalität zu größeren Strukturen* [9]. So entstehen zum Beispiel einander wechselseitig stützende Beziehungsnetze in menschlichen Gesellschaften usw.

Die größeren Strukturen können selbst wiederum als von einem Geflecht von Beziehungen verbundene Agenzien betrachtet werden. Sie können auch zerfallen.

Komplexe adaptive Systeme werden intensiv untersucht ([9, 10] u.v.a.) Durch Computer ist dies möglich geworden. Erstaunliche Ähnlichkeiten des Verhaltens sehr verschiedener solcher Systeme sind oft bemerkt worden. Daher ist es sinnvoll, nach einer universellen Theorie zu suchen.

Maturana und Varela haben den Begriff AUTOPOIETISCHE SYSTEME eingeführt für Systeme, die ihre Elemente "selbst machen" [7]. Im Geist der hier vorgestellten Betrachtungsweise können wir autopoietische Systeme als solche definieren, die im Laufe ihrer durch dynamische Gesetze bestimmten zeitlichen Entwicklung Struktur replizieren. Der Kopiervorgang für allgemeine Strukturen wird später ausführlich behandelt werden.

Eine zentrale Hypothese in Maturana und Varela's Werk ist die näherungsweise Autonomie autopoietischer Systeme. Sie entwickeln sich weitgehend autonom nach Gesetzen einer inneren Dynamik, unabhängig von der Umwelt. Diese Unabhängigkeit ist nie absolut und bei genauer Betrachtung muß ihr Einfluß auch berücksichtigt werden. Jedoch kann dies häufig sukzessive und in pauschaler Weise geschehen, wobei nur wenige Parameter zu berücksichtigen sind. Im einfachsten Fall genügt die Unterscheidung, ob eine für Überleben und Reproduktion geeignete Umwelt vorliegt oder nicht.

Vom abstrakten Standpunkt liefert die geforderte näherungsweise Autonomie der Dynamik ein Kriterium, wie man sich zum Zweck der Analyse ein komplexes Gesamtsystem in Untersysteme zerlegt denken soll, die als zusammengesetzte Objekte betrachtet werden. Diese Untersysteme sollen möglichst schwache Wechselwirkungen untereinander haben, so daß sie als sich näherungsweise autonom entwickelnde Strukturen - Organismen im Fall der Biologie, Organisationen in der Soziologie - betrachtet werden können. Die Herausbildung solcher zusammengesetzter Objekte ist die Essenz der Selbstorganisation.

4 Beschreibung von Struktur - die Sprache der Gedanken

Nach klassischer Definition besteht ein System aus Agenzien und Beziehungen zwischen ihnen. Um nicht unwillentlich Bilder handelnder Personen zu fixieren, wird im weiteren von *Objekten* statt von Agenzien gesprochen werden. Sie werden typischerweise mit X, Y, \dots bezeichnet. Es werden bestimmte grundlegende allgemeine Eigenschaften der Beziehungen angenommen. Sie sollen gerichtete zweistellige Relationen sein. Dies wird ausgedrückt durch die Bezeichnung $f : X \mapsto Y$ für eine Beziehung *von X zu Y*. Die *Beziehungen* werden auch *Pfeile* genannt und typischerweise durch Symbole f, g, \dots oder b bezeichnet. Es werden die folgenden Forderungen gestellt:

1. Unter den Beziehungen sind die Beziehungen $\iota_X : X \mapsto X$ der Identität eines jeden Objekts X mit sich selbst.
2. Die Beziehungen können zusammengesetzt werden. Mit Beziehungen f von X zu Y und g von Y zu Z ist eine Beziehung $g \circ f$ von X zu Z erklärt. Die Zusammensetzung ist assoziativ,³ und Komposition mit der Identität gibt nichts Neues: $\iota_Y \circ f = f = f \circ \iota_X$.
3. Gewisse Beziehungen b werden als unmittelbare Beziehungen ausgezeichnet; alle andern Beziehungen können aus unmittelbaren Beziehungen zusammengesetzt werden. Die Identitätsbeziehungen ι_X sind unmittelbar. Die *unmittelbaren Beziehungen* werden auch als *elementare Pfeile* bezeichnet.
4. Zu jeder Beziehung f von X zu Y gibt es eine eindeutig bestimmte mögliche entgegengesetzte Beziehung f^* von Y zu X . Es gilt $(g \circ f)^* = f^* \circ g^*$. Die Identität erfüllt $\iota_X = \iota_X^*$.

Es wird nicht verlangt, daß die entgegengesetzten Beziehungen im System vorhanden sind; sie sollen jedoch eindeutig bestimmt sein und hinzugefügt werden können. Gewöhnlich ist $f^{**} = f$.

In Anwendungen spielen auch Systeme mit *einem a priori ausgezeichneten Objekt* eine wichtige Rolle. In der natürlichen Sprache ist "Ich" (der Sprecher) ein solches a priori ausgezeichnetes Objekt.

Wir werden hier nur Systeme mit endlich vielen Objekten und höchstens abzählbar vielen Pfeilen betrachten.

Analyse in dem hier vorgestellten Rahmen wird als für menschliches Denken charakteristisch angesehen. Die "*Sprache der Gedanken*" wäre demnach die prädikative Sprache, die gewisse Symbole wie X, Y, \dots, f, g, b sowie die durch die Axiome gewährleisteten Funktionen, Relationen und Konstanten benutzt, um Aussagen über Systeme zu machen.⁴ Die Axiome legen gewisse syntaktische Regeln fest. Zum Beispiel ist $f \circ g$ nur dann ein wohlgeformter Ausdruck, wenn die Quelle des Pfeils f Ziel des Pfeils g ist.

Die Postulate 1.-4. werden als Axiome paradigmatisch gesetzt. Alles was sich in diesem Rahmen beschreiben läßt, ist Gegenstand der Untersuchung. Es wird zu demonstrieren sein, wie sich die oben erwähnten Wissenschaften in diesen Rahmen fügen. In diesem Beitrag soll das Wort *System* immer so verstanden werden, daß die obigen Axiome erfüllt sind.

Eine paradigmatische Grundlegung unterscheidet sich von einer traditionell-metaphysischen dadurch, daß die Axiome nicht als absolute Wahrheiten, sondern als Abgrenzung eines zur Betrachtung anstehenden Teils der Welt interpretiert werden [12]. Die Hoffnung ist, daß die obigen Axiome in etwa das abgrenzen, was für den menschlichen Geist verständlich ist. Sie wären dann ähnlich grundlegend wie die Logik, jedoch einer Beschreibung der Welt, die die Naturgesetze einschließt, ungleich näher.

Bevor wir Hintergrund und Motivation für die Postulate beleuchten, sei an einem Beispiel illustriert, wie sich Struktur in diesem Rahmen beschreiben läßt.

Beispiel: Ziegelsteinmauer (Figur 1). Objekte sind die Ziegelsteine, und die unmittelbaren Beziehungen (elementare Pfeile) bestimmen die Verschiebungen im Raum, die einen Ziegelstein an die Position eines seiner nächsten Nachbarn bringen. Diese Pfeile bestimmen die Struktur

³Assoziativität bedeutet $(h \circ g) \circ f = h \circ (g \circ f)$

⁴prädikativ heißt, daß die Symbole \forall, \dots der Prädikatenlogik verwandt werden dürfen. Die Funktionen sind $*$, \circ , und die Spezifikation von Quelle und Ziel eines Pfeil. Außerdem wird die Identitätsbeziehung von einer Funktion $X \mapsto \iota_X$ geliefert. Relationen sind $=$ und die Charakterisierung eines Symbols als Objekt oder Pfeil, unmittelbar oder nicht.

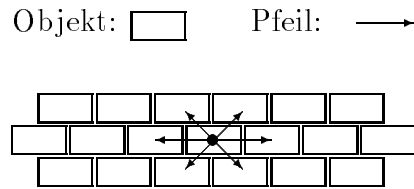


Figure 1: Die Struktur einer Ziegelsteinmauer

der Mauer. Die Pfeile können zu Verschiebungen zu den Positionen anderer Ziegelsteine zusammengesetzt werden. Zu jeder Verschiebung gibt es eine entgegengesetzte Verschiebung (“hin und zurück”).

An dem Beispiel können wir gleich noch einige spezielle Eigenschaften illustrieren, die nicht in jedem System erfüllt sind.

Es gibt (zusammengesetzte) Pfeile von jedem Objekt zu jedem andern. Ein System mit dieser Eigenschaft bezeichnen wir als zusammenhängend.

Betrachten wir eine Folge von unmittelbaren Beziehungen b_1 von X_0 zu X_1 , b_2 von X_1 zu X_2, \dots , und b_n von X_{n-1} zu X_n . Wir nennen dies einen “Weg”. Sind Anfangsobjekt X_0 und Endobjekt X_n vorgegeben, so erhält man als zusammengesetzten Pfeil $f = b_n \circ \dots \circ b_1$ von X_0 zu X_n die Verschiebung, die X_0 nach X_n überführt, also immer dieselbe. Es gibt also höchstens (im Beispiel: genau) einen einzigen Pfeil von X_0 nach X_n . Ein System mit dieser Eigenschaft nennen wir *unfrustriert*. Dieser Begriff ist von grundlegender Bedeutung.

Der physikalische Raum ist frustriert in diesem Sinn, wenn er gekrümmt ist. Einstein’s allgemeine Relativitätstheorie geht davon aus, daß der Raum und die Raum-Zeit gekrümmt sein können.

Die Logik betrachtet unfrustrierte Systeme. Es gibt nur eine Art Pfeil und ihr Entgegengesetztes, “folgt aus” und “impliziert”. Zu unmittelbaren Beziehungen könnte man die jeweils schon bewiesenen Folgerungen erklären.

Rationale intersubjektive Kommunikation zwischen Menschen ließe sich - im Idealfall - als ein Geflecht von Beziehungen charakterisieren, das ein unfrustriertes System ist. In einem unfrustrierten System kann durch einen Mechanismus der Synchronisation über die Gleichheit von Aussagen, die sich auf verschiedene Agenzien beziehen, Konsens hergestellt werden. Dies ist möglich, weil eine ankommende Nachricht nicht vom Weg abhängt, den sie genommen hat. Nicht jede sprachliche Kommunikation ist rational in diesem Sinn, d.h. eingeschränkt auf Kommunikation von Information, die dieselbe Bedeutung für jedermann hat. Poesie, politische Propaganda und alle Arten von Verführung nutzen dies. Eine auf die Logik gegründete Semantik steht dieser Tatsache hilflos gegenüber. Der hier vorgestellte Rahmen bietet Raum für eine rationale Theorie nichtrationalen Verhaltens.

Die dritte spezielle Aussage im Beispiel ist $f^* \circ f = \iota_X$. Man nennt einen Pfeil f^{-1} in entgegengesetzter Richtung Inverses zu f , wenn $f^{-1} \circ f = \iota_X$ und $f \circ f^{-1} = \iota_Y$ ist. In einem unfrustrierten System ist immer der entgegengesetzte Pfeil gleich dem Inversen. Im allgemeinen ist dies jedoch nicht so. Dies wird bei der Betrachtung der dialektischen Bewegung wichtig.

Wir kommentieren nun die Postulate.

Die Identität bedarf keines Kommentars.

Das Postulat der Zusammensetzbarkeit ist grundlegend; das obige Beispiel der rationalen Kommunikation deutete dies schon an. Andererseits ist es eine Tautologie, denn wir können immer Wege, d.h. Folgen b_1, b_2, \dots, b_n von unmittelbaren Beziehungen b_i von X_{i-1} zu X_i , zu Pfeilen erklären. Die Zusammensetzbarkeit von Pfeilen folgt dann aus der Zusammensetzbarkeit

von Folgen. Das Postulat ist deshalb von Nutzen, weil es die Möglichkeit institutionalisiert, daß verschiedene Folgen dieselbe Beziehung darstellen können. Beispiele von zusammengesetzten Beziehungen sind “Freund eines Freundes”, “Schwager”=Ehemann der Schwester.

Die beiden ersten Postulate kann man zusammenfassen in der Aussage, daß ein System eine Kategorie im Sinne der Mathematik ist.

Die Idee des dritten Postulats ist die, daß einige Beziehungen als in einem gewissen Sinne fundamental angesehen werden, und andere als deren Konsequenz verstanden werden sollen. Dieses Axiom ist vor allem auch durch das grundlegende Postulat der Lokalität in der Physik motiviert. Die Grundgleichungen der Physik stellen Beziehungen zwischen Größen am selben Punkt des Raums und zur selben Zeit oder doch zumindest in einem beliebig kleinen Zeitintervall und beliebig kleinen Raumbereich auf. Dies ist als Nahwirkungsprinzip bekannt. Seine Entdeckung im letzten Jahrhundert war einer der revolutionärsten Fortschritte der Physik. Die Maxwell-Gleichungen der Elektrodynamik genügen diesem Prinzip. Einsteins allgemeine Relativitätstheorie und die Eichtheorien der Wechselwirkung zwischen Elementarteilchen sind dadurch wesentlich charakterisiert, daß sie einer Verschärfung dieses Nahwirkungsprinzips genügen [15]. Dieses grundlegende allgemeine Relativitätsprinzip ist in den obigen Postulaten eingebaut. Die Postulate sollen jedoch nicht nur für materielle Objekte im Raum gelten. Sie nehmen keinen Bezug auf Raum und Materie.

In der Theorie komplexer adaptiver Systeme spielt der Begriff der *Emergenz* eine wichtige Rolle. In unserer Sprache ist Emergenz erklärt als Entstehen nichtlokaler Phänomene aus lokalen Beziehungen.

Das vierte Postulat schließlich ist motiviert

Erstens durch Hegel.

Zweitens durch die Bedeutung des Adjungierten A^* von Operatoren A in der Quantenmechanik. Observable sind in der Quantenmechanik selbstadjungierte Operatoren (d.h. $A^* = A$). Sie sind Abbildungen eines Raums von Zuständen in sich.

Drittens durch die Idee der Kopie nach Templaten, wie sie in der Replikation der DNA auftritt und für biologisches Leben grundlegend ist.

Hierarchische Strukturen, Ebenen der Beschreibung

Für die Beschreibung komplexer Systeme ist besonders wichtig, daß die Objekte eines Systems selbst Systeme sein können. Auf diese Weise kann Struktur in einer hierarchischen Weise beschrieben werden. Man erhält so gleichartige Beschreibungen auf verschiedenen Ebenen (“Schichten” in Whorf’s Worten). Es erinnert sonst vieles an Wittgensteins *tractatus* [14], aber sein Atomismus wird aufgegeben. Welche Pfeile als “elementar” ausgezeichnet werden, hängt von der Ebene der Beschreibung ab.

Aus Ziegelsteinmauern kann man einen Turm bauen, u.s.w.. Die zusammengesetzten Objekte in einem grösseren System haben im allgemeinen zusätzlich zu den Beziehungen zwischen ihren Objekten Beziehungen zu Objekten außerhalb - d.h. sie sind nicht abgeschlossen. Die Hypothese der Autonomie autopoietischer Systeme besagt, daß viele Details dieser Beziehungen unwichtig sind.

Selbstorganisation zu erklären bedeutet zweierlei.

Erstens müssen die Determinanten der zusammengesetzten Objekte und damit der hierarchischen Struktur definiert werden. Dies ist der begriffliche Aspekt - die Frage nach dem Ding, von der Heidegger sagt, sie sei alt, müsse aber immer wieder gestellt werden [13]. Welche Teile der Welt gehören zusammen, sodaß sie als ein Gegenstand betrachtet werden

können? Ein Kriterium (Autonomie) wurde oben angegeben. Im allgemeinen wird die Ebene der Beschreibung auch von Messunschärfen der Beobachter abhängen. Deren eingeschränkte Wahrnehmungsfähigkeit bringt außerdem den Zufall und damit Geschichtlichkeit ins Spiel. Die Quantenmechanik suggeriert, daß es universelle Eigenschaften von Beobachtern geben könnte. Dieser Fragenkomplex kann hier nicht behandelt werden.

Zweitens muß die hierarchische Struktur dann, von der Dynamik auf einer hinreichend fundamentalen Ebene ausgehend, tatsächlich bestimmt werden.

Die Frage der Superposition einer geeigneten hierarchischen Struktur durch Identifikation von Untersystemen ist häufig auch der entscheidende Schritt bei Problemlösungen in der angewandten Mathematik. Mehrgittermethoden zur Lösung von diskretisierten Differentialgleichungen sind ein Beispiel. Sie sind in der Elektrotechnik und im Flugzeugbau wichtig.

Mögliche Aussagen in der Sprache der Gedanken

Die Ausdrucksmöglichkeiten der Sprache der Gedanken sind einerseits sehr beschränkt. Andererseits sind sie aber weit genug. Der Rest des Beitrags wird dies zeigen.

Es gibt drei Haupt-Typen von möglichen Aussagen.

- i. Gewisse zusammengesetzte Pfeile von X zu X sind gleich der Identität ι_X ;
- ii. Aussagen über An- oder Abwesenheit von entgegengesetzten Pfeilen;
- iii. Existenz von Invarianten.

Invarianten sind Objekten X zugeordnete Größen, die wegunabhängig kommuniziert werden können. Deshalb kann über ihre Bedeutung durch einen Prozess der Synchronisation Konsens hergestellt werden. Dies wird im nächsten Kapitel diskutiert werden.

5 Darstellung eines Systems durch ein Kommunikationsnetzwerk

Um das folgende Resultat zu erläutern, wird der Begriff einer Darstellung benötigt. Eine Darstellung ist ein Bild, das strikten Regeln der Entsprechung gehorcht. In Wittgensteins Worten (*tractatus* Satz 2.15 [14]) *“Daß sich die Elemente des Bildes in bestimmter Art und Weise zueinander verhalten, stellt vor, daß sich die Sachen so zueinander verhalten.”*

Es ist aber wohl zu beachten, daß nicht nur die Objekte abgebildet werden müssen, sondern auch die Beziehungen. Eine Darstellung eines Systems ist demnach eine Abbildung F dieses Systems in ein anderes, derart, daß Objekte X in Objekte $F(X)$ abgebildet werden, Pfeile f von X zu Y in Pfeile $F(f)$ von $F(X)$ zu $F(Y)$ abgebildet werden, und die Struktur in folgendem Sinn erhalten bleibt: Das Bild eines zusammengesetzten Pfeils $g \circ f$ ist gleich dem aus den Bildern von f und g zusammengesetzten Pfeil. Ausserdem sollen unmittelbare Beziehungen in unmittelbare abgebildet werden, Identität in Identität, und entgegengesetzte Pfeile in entgegengesetzte Pfeile. In der mathematischen Kategorietheorie ist auch die Bezeichnung Funktor statt Darstellung gebräuchlich.

Es ist eine charakteristische Eigenart von Darstellungen,

- i. daß bei der Abbildung etwas verloren gehen kann - beispielsweise können verschiedene Objekte in dasselbe Bildobjekt abgebildet werden;
- ii. daß andererseits das Bild zusätzliche Struktur besitzen kann - d.h. Beziehungen, die nicht Bild von Beziehungen des dargestellten Systems sind - und möglicherweise auch

zusätzliche Objekte.

Man denke an ein perspektivisches Ölbild eines durchscheinenden Gegenstands. Das Bild ist zweidimensional, hintereinander liegende Punkte des Gegenstands werden in den selben Bildpunkt abgebildet. Andererseits geben die Struktur der Leinwand und die chemische Zusammensetzung der Ölfarben dem Bild zusätzliche Struktur.

Eine Darstellung heißt *treu*, wenn Sachverhalt i) nicht vorliegt. Es ist dann das Urbild seinerseits entweder Darstellung des Bilds oder Darstellung eines Teilsystems des Bilds. Im ersten Fall nennen wir die beiden Systeme *isomorph*.

Die folgende Aussage kann konstruktiv bewiesen werden:

Jedes System besitzt eine treue Darstellung als Kommunikationsnetzwerk.

Dies bedeutet, daß den Objekten X je ein Raum A_X ("input Raum") und ein Raum Ω_X ("output Raum") zugeordnet wird. Die Objekte X bestimmen Abbildungen \mathbf{X} des input-Raums A_X in den output-Raum Ω_X des jeweiligen Objekts. Die Pfeile f von X nach Y werden Abbildungen \mathbf{f} des output Raums Ω_X von X in den input Raum A_Y von Y . Dem zusammengesetzten Pfeil $g \circ f$ entspricht die (durch Hintereinanderausführen der Abbildungen erklärte) zusammengesetzte Abbildung $\mathbf{g} \circ \mathbf{X} \circ \mathbf{f}$.

Der Beweis kann hier nicht gegeben werden. Er konstruiert die Räume aus Mengen von Pfeilen und die Abbildung durch Zusammensetzen von Pfeilen.

Künstlerische Freiheit

Die Darstellung ist nicht eindeutig. Es gibt also "künstlerische Freiheit". Gewisse Transformationen einer Darstellung in isomorphe Darstellungen spielen in den fundamentalen physikalischen Theorien - allgemeine Relativitätstheorie, Elektrodynamik und Theorie der Wechselwirkung zwischen Elementarteilchen - eine zentrale Rolle. Sie werden als Eichtransformationen bezeichnet, und die genannten Theorien als Eichtheorien.

Die Eichtheorie der Wechselwirkung zwischen Elementarteilchen wurde um 1970 in zwei Stufen entdeckt. Die fundamentale Bedeutung dieser Entdeckung liegt darin, daß Einsteins allgemeines Relativitätsprinzip nicht nur die Struktur von Raum und Zeit betrifft, sondern als Spezialfall eines noch allgemeineren Prinzips begriffen werden kann, das in all den genannten Theorien gilt. Es sagt aus, daß Eichtransformationen keine physikalischen Konsequenzen haben. Beobachtbare Größen (Observable) werden durch Eichtransformationen nicht verändert, und die Grundgleichungen der Physik sind unter Eichtransformationen ebenfalls invariant. Tatsächlich ist es unmöglich, in der Sprache der Gedanken überhaupt Aussagen zu machen, die nicht die Eigenschaft der Eichinvarianz haben. (Diese Aussage muß präzisiert werden, wenn es ein a priori ausgezeichnetes Objekt gibt.)

Die am Ende des letzten Kapitels erwähnten Invarianten sind eichinvariant. Was bedeutet es, daß über die Bedeutung einer Größe ξ Konsens hergestellt worden ist? Nehmen wir als Beispiel einen möglichen Input ξ . Es müßte für jedes Objekt ("Agens") X ein Input ξ_X bestimmt sein, der, wenn er zu Y weitergeleitet wird, dort als der Input ξ_Y ankommt, der für Y die Größe ξ repräsentiert. ⁵

Allgemein sind isomorphe Systeme äquivalente Beschreibungen der - tentativ als Totalität aller möglichen Beobachtungen verstandenen - "Wirklichkeit". Man kann zwischen ihnen nicht durch Beobachtung unterscheiden. Definieren wir ein abstraktes System als Äquivalenzklasse

⁵In Formeln $\mathbf{f} \circ \mathbf{X}\xi_X = \xi_Y$ für jede Beziehung f von X zu Y und für alle X und alle Y . Insbesondere muß dies also auch für $Y = X$ und für Eichtransformationen $f = g_X$ gelten.

isomorpher Systeme, so wäre "Wirklichkeit, so wie wir sie uns denken" (s.u.) ein abstraktes System.

In der Linguistik ist eine analoge Beobachtung von Quine gemacht worden [16]. Im Sinne von Quine können wir Sprache als ein System auffassen, dessen Objekte die Sätze der Sprache sind. Die Beziehungen sind Verbindungen zwischen diesen Sätzen. Er sagt,

"Es leuchtet ein, daß dieses Gebilde aus untereinander verbundenen Sätzen ein einziges zusammenhängendes Gewebe ergibt, das alle Wissenschaften, ja alles, was wir jemals über die Welt sagen, einschließt".

Es leuchtet dann weiter ein, daß Eichtransformationen, wenn sie hier auftreten, nicht nur für die Physik von Bedeutung sind, sondern für alle Wissenschaft. Was wir hier Eichtransformationen nennen, charakterisiert Quine so

"Die Gesamtheit der Sätze der Sprache eines Sprechers läßt sich so permutieren bzw. auf sich selbst abbilden, daß

(a) die Gesamtheit der Dispositionen des Sprechers zu verbalem Verhalten unverändert bleibt und daß

(b) die Abbildung dennoch keine bloße Korrelation von Sätzen mit äquivalenten Sätzen ist (in einem plausiblen Sinn von Äquivalenz, und sei er noch so unbestimmt). Zahllose Sätze können drastisch von denen abweichen, die ihnen jeweils zugeordnet sind, und doch können diese Divergenzen einander systematisch so ausgleichen, daß das Gesamtmuster der wechselseitigen Verknüpfungen von Sätzen mit Sätzen und nichtverbalen Reizen erhalten bleibt."

Die "Disposition zu verbalem Verhalten" in Gegenwart eines nichtverbalen Reizes ist des Linguisten *Observable*.

Observable sind invariant. Die Struktur des Gesamtmusters [des Systems] bleibt erhalten. Genau dies sind die charakteristischen Eigenschaften von Eichtransformationen auch in der Physik.

Die hauptsächlichsten Eichtransformationen der Physik haben übrigens eine sehr einfache Gestalt. Sie sind einer Transformation des ursprünglichen Systems äquivalent. Die Transformationen sehen wie folgt aus. Wähle für jedes Objekt Z in willkürlicher Weise eine (nicht notwendig unmittelbare) invertierbare Beziehung g_Z von Z zu sich selbst aus. Pfeile f von X zu Y werden transformiert in $g_Y \circ f \circ g_X^{-1}$. Die Totalität dieser Transformationen bildet die *Eichgruppe*.

Es ist eine charakteristische Eigenschaft der physikalischen Eichtheorien, daß zwar die Grundgleichungen lokal sind, daß sie sich aber i.a. - die Maxwell-Theorie ist eine Ausnahme - nicht als lokale Beziehungen für *beobachtbare* Größen schreiben lassen. Dieser Wunschtraum des logischen Positivismus ist tot. Die Pfeile des Systems können deshalb in den fundamentalen physikalischen Theorien i.a. nicht als Sachverhalte interpretiert werden, wie Wittgenstein dies im *tractatus* vorschlägt. Denn sie sind nicht eichinvariant, also nicht beobachtbar, und man kann dem auch nicht abhelfen, ohne die Lokalität zu zerstören. Dennoch machen die Theorien sehr viele beobachtbare und damit falsifizierbare Aussagen. Sie haben seit ihrer Erfindung zahlreiche experimentelle Tests bestanden. Tatsächlich haben die Elementarteilchenphysiker verzweifelt, aber völlig erfolglos, nach Abweichungen gesucht, um Hinweise zu finden, wie eine noch fundamentalere Theorie aussehen könnte.

6 Universelle Dynamik

In der Linguistik unterscheidet man zwischen *Synchronie* - die Struktur einer Sprache zu einer Zeit - und *Diachronie* - die Entwicklung und Veränderung der Sprache im Laufe der Zeit.

Genauso unterscheidet man in der Physik zwischen einem Anfangszustand und der Entwicklung dieses Zustands in der Zeit. Beispielsweise ist nach Newton der Anfangszustand des Planetensystems zu einer Zeit bekannt, wenn Ort und Geschwindigkeit der Sonne und aller Planeten zu dieser Zeit gegeben sind.⁶ Mit Hilfe der Newton'schen Gesetze kann man daraus die Orte und Geschwindigkeiten zu späteren Zeiten bestimmen.

In der Sprache dieses Beitrags ist ein Anfangszustand durch die Struktur des Systems zu einer Zeit festgelegt. Die Beziehungen sind also Beziehungen zu einer Zeit. Man kann das System als Kommunikationsnetzwerk darstellen. Man muß dann jedoch die Abbildungen f von output Räumen in input Räume von Objekten als Kanäle, nicht Akte, der Kommunikation interpretieren. Ist ein solcher Anfangszustand S_0 zu einer Zeit 0 gegeben, so bestimmt eine Dynamik Systeme S_t zu späteren Zeiten t . Statt von Dynamik spricht man auch von einem Bewegungsgesetz oder von einem Prozess.

Universelle Dynamik ist ein Bewegungsgesetz, das für jedes beliebige System im Sinne unserer Definition sinnvoll ist und eine Zeitentwicklung bestimmt, ohne daß es dazu zusätzlicher externer Information bedürfte.

Die Grundidee ist die, daß ein abgeschlossenes System alle Information die nötig ist, um seine Zeitentwicklung zu bestimmen, in sich tragen sollte.

Wir sehen hier ein wichtiges Prinzip der strukturellen Analyse, das gleichzeitig ein grundlegendes Prinzip der Philosophie ist oder sein sollte: Was immer an a priori Struktur angenommen wird, muß explizit gesagt werden - es gibt keine "Selbstverständlichkeiten". Seit alten Zeiten waren die Philosophen bemüht, das angeblich Selbstverständliche als nicht selbstverständlich zu entlarven; sie sind dafür zu Unrecht von den "Praktikern" verlacht worden. In der modernen Mathematik, dem fruchtbarsten Teil der Philosophie, ist das Prinzip eiserne Regel geworden - a priori Struktur wird in Form von Axiomen festgelegt, und was nicht so festgelegt wurde, darf nicht in Beweisen benutzt werden.

Um technische Komplikationen zu vermeiden, denken wir uns die Zeit in hinreichend kurze Zeitintervalle der Länge Δt zerlegt. Wir betrachten die Zeit also als diskret. Es genügt dann, das System $S_{t+\Delta t}$ nach einem Zeitschritt durch das System S_t zu bestimmen. Das Verfahren kann dann wiederholt werden und liefert so die Zeitentwicklung des Systems zu allen späteren Zeiten.

Im Geist der Diskussion in Kapitel 4 wird gefordert, daß die Dynamik in folgendem Sinn lokal ist.

Jedes Objekt und jeder Pfeil ist Abkömmling eines Objekts X bzw. Pfeils f des Systems vor einem Zeitschritt. Abkömmlinge von X werden durch X und die unmittelbaren Beziehungen von und zu X alleine bestimmt. Abkömmlinge von f werden von f , Quelle X und Ziel Y von f , sowie möglicherweise von unmittelbaren Beziehungen von und zu X und Y alleine bestimmt.

Im Prinzip gibt es zwei Arten der Veränderung; ich nenne sie

- i. Wachstum,
- ii. Bewegung.

Und außerdem gibt es den Tod. Die Klassifizierung soll nicht nur materielle Objekte im Raum betreffen.

Die Angabe einer Zeitentwicklung ist eine Regel, wie aus einem System ein neues gemacht werden soll; diese Regel soll der genannten Lokalitätsforderung genügen. Die Möglichkeit, im Rahmen der erwähnten Sprache der Gedanken überhaupt Regeln zu formulieren, ist außerordentlich beschränkt, denn diese Sprache ist arm an Ausdrucksmöglichkeiten, wie wir sahen -

⁶Mit Geschwindigkeit meinen Physiker Betrag und Richtung der Geschwindigkeit

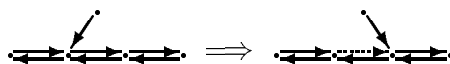


Figure 2: Interpretation von Bewegung als Umwandlung mittelbarer Beziehungen in unmittelbare

und wovon man nicht reden kann, darüber muß man schweigen [14]. Es ist daher eine sehr einschränkende Forderung, daß die fundamentalen Bewegungsgesetze der Physik in diesen Rahmen passen.

Im folgenden sollen zwei Beispiele universeller Dynamik erläutert werden. Die Maxwellgleichungen der Elektrodynamik ohne Ladungen und Ströme dienen als Beispiel für Bewegung, und die Reproduktionsgabelndynamik wird als Beispiel für Wachstum dienen. Letztere ist eine universelle Kopiermaschine, die von der Natur bei der Replikation des genetischen Materials DNA während der Zellteilung benutzt wird.

7 Bewegung: Maxwell Gleichungen als Beispiel

Bei der Bewegung bleiben die Objekte unverändert, aber ihre Beziehungen - einschließlich derer zu sich selbst - können sich ändern.

Betrachten wir als Beispiel ein materielles Teilchen im Raum, das wir uns als punktförmig denken. Daß sich ein solches Teilchen an einem Ort befindet, interpretieren wir als fundamentale Beziehung des Teilchens zu einem Punkt des Raums, eben dem Ort, an dem es sich befindet.

Betrachten wir nun die elementaren Pfeile b' nach einem Zeitschritt.

Wie kann ein elementarer Pfeil b' von X nach Y konstruiert werden? Es gibt dafür nur eine Möglichkeit. Man muß die Pfeile des alten Systems benutzen. Diese kann man zusammensetzen, sonst nichts. ⁷ Das Resultat ist wieder ein Pfeil. Also ist $b' = f$, f ein nicht notwendig elementarer Pfeil von X nach Y im alten System.

Das bedeutet aber, daß sich die Kategorie überhaupt nicht ändert. Es ändert sich nur die Antwort auf die Frage, welche Pfeile als unmittelbar angesehen werden.

Bewegung bedeutet also, daß zusammengesetzte Pfeile zu elementaren ernannt werden.

Die Interpretation der Bewegung eines Punktteilchens im Raum in obigem Sinne ist in Figur 2 schematisch dargestellt. Die durch Pfeile mit Entgegengesetzten verbundenen Objekte werden als die Raumpunkte interpretiert, das andere Objekt als Teilchen (oder als "Idee der Materie"). Ein aus der vormaligen unmittelbaren Beziehung des Teilchens zu seinem Ort und der (rechts gepunktet gezeichneten) Nachbarschaftsbeziehung dieses Orts zu einem Nachbarort zusammengesetzter Pfeil wird als unmittelbar erklärt. Der vormals unmittelbare Pfeil des Teilchens zu seinem alten Ort verliert diesen Status. Als zusammengesetzter Pfeil bleibt er erhalten.

Die quantenmechanische Bewegung eines Teilchens im Raum gemäß dieser Interpretation kann als universelle Dynamik formuliert werden [5]. Wir werden statt dessen hier die klassischen Maxwell-Gleichungen ohne Ladungen und Ströme als Beispiel betrachten.

Das Bewegungsgesetz ist eine Regel, die die zu einer Zeit als unmittelbare Beziehungen geltenden Pfeile b' von X nach Y aus unmittelbaren Beziehungen zur vorigen Zeit zusammensetzt.

⁷Erzeugung von Entgegengesetzten etc. gilt als Wachstum.

Das einfachste Beispiel ist die *dialektische Bewegung*,

$$b \implies b' = b \circ b^* \circ b .$$

Sagen wir Hegel'sch "Denkbestimmung" statt "elementarer Pfeil", so beschreibt sich dies so: Eine Denkbestimmung verbindet sich mit der entgegengesetzten Denkbestimmung zu einer neuen, "höheren" Denkbestimmung. Dies ist jedoch keineswegs die einzige mögliche universelle Dynamik. Die Maxwellgleichungen sind nicht von dieser Art.

Nach der Lokalisationsforderung muß der neue unmittelbare Pfeil b' von X zu Y durch unmittelbare Pfeile von oder nach X oder Y alleine bestimmt werden. Eine Regel muß alle Pfeile gleich behandeln, die nicht unterschieden werden können. Dann gibt es nicht mehr viele Möglichkeiten. Die dialektische Bewegung ist eine davon. Andere benutzen die Komposition mit Dreiecken. Als Dreieck bezeichne ich einen geschlossenen Weg $b_1 \circ b_2 \circ b_3 : X \mapsto X$ aus drei elementaren Beziehungen zwischen Objekten X, Y und einem beliebigen dritten Objekt Z .

Tatsächlich ist die Situation in physikalischen Theorien etwas komplizierter. Wir wissen von Newton, daß ein Anfangszustand des Planetensystems erst dann bestimmt ist, wenn wir Ort *und* Geschwindigkeit der Planeten kennen, d.h. wo sie sind und wie sie sich momentan bewegen. Es gibt also zwei verschiedene Arten von Größen, die wir kennen müssen.⁸ Demgemäß gibt es auch in der Maxwell-Theorie zwei Arten von Pfeilen, die wir in der Zeichnung durch magere und fette Pfeile unterscheiden werden.

Da wir nur Systeme mit endlich vielen Objekten betrachten, müssen wir den Raum durch ein Punktgitter approximieren. Einen zweidimensionalen Durchschnitt durch ein solches Punktgitter zeigt Figur 3. Es sind nur die von einem Punkt ausgehenden Pfeile gezeigt. Der Zeitschritt wird typisch etwa gleich der Lichtgeschwindigkeit mal dem Abstand der Punkte sein.

Die Maxwell-Regel für die Zeitentwicklung der Pfeile lassen sich in der Form von Figur 4 schreiben. Es sind nur die in der Ebene liegenden Pfeile und Objekte dargestellt; es sollen aber im ersten Teil von Figur 4 alle gleichartigen Dreiecke, die mit beiden dargestellten in der Ebene liegenden Dreiecken eine gemeinsame Seite haben, nacheinander durchlaufen werden. Die Gleichungen selbst nehmen keinen Bezug auf Raum und Materie. Erst ihre Interpretation tut dies.

Die Behauptung, dies seien die Maxwellgleichungen, wird den Leser möglicherweise in einem Zustand der Perplexität hinterlassen. Ich werde es erklären. Die Perplexität ist jedoch auch einen Kommentar wert. Sie zeigt deutlich, daß das Problem der Beschreibung der Natur und ihrer Gesetze noch nicht dadurch gelöst ist, daß man Gesetze in Form von Gleichungen⁹ hinschreibt. Diese Gleichungen leben auf der rein geistigen Ebene. Sie sind syntaktische Regeln. Es kommt die Frage nach der Bedeutung hinzu - die Semantik. Sie fragt, welche Größen in den Gleichungen welchen beobachtbaren Dingen in der Natur entsprechen. Physiker sagen, die Theorie selbst müsse bestimmen, welche Größen beobachtbar seien. Die Frage nach der Bedeutung wird deshalb in zwei Fragen zerlegt. Die erste Frage ist, welche Größen in den Gleichungen prinzipiell beobachtbar sind; die zweite, wo ich diese Größen in der Natur finde.

Die erste Frage habe ich schon beantwortet. Beobachtungen können in Antworten ja oder nein auf Fragen formuliert werden, ob gewisse Aussagen richtig sind. Die erlaubten Aussagen

⁸In der Sprache der Systeme kommt dies letztlich daher, daß die Dynamik von zweiter Ordnung ist, wie man sagt, d.h. es bestimmt nicht das System zu einer Zeit das System zur nächsten Zeit, sondern erst die Kenntnis des Systems (im Beispiel: der Orte der Planeten) zu zwei aufeinanderfolgenden Zeiten bestimmt das System zur nächst folgenden Zeit.

⁹Figur 4 repräsentiert zwei Gleichungen von der Form "elementare Beziehung nach einem Zeitschritt ist gleich ...".

sind die, die in der Sprache der Gedanken formuliert werden können. Wie schon gesagt wurde, folgt daraus, daß beobachtbare Grössen eichinvariant sind.

Die zweite Frage berührt sich mit der Frage von Kant's Transzendentalphilosophie, wie kommt man von Begriffen zu konkreten Objekten. Heidegger behauptet, nebenbei bemerkt, die Frage nach dem Ding stehe im Zentrum dieser Philosophie[13].

Die Frage taucht jedoch in der Praxis des Physikers fast nie auf, weil die Gleichungen in der Praxis in der Regel aufgestellt werden, um gewisse Phänomene zu erklären - die beobachtbaren Grössen sind dann schon von vornherein als Gegenstand der Betrachtung gegeben. Im hiesigen Rahmen ist die Frage verknüpft mit der Frage, wie als Anfangszustände gegebene Systeme sich selbst identifizieren - etwa als elektromagnetische Felder, auf die die Maxwell'schen Bewegungsgleichungen anzuwenden wären, oder als Raum (=raumartige Hyperfläche in der Raum-Zeit) auf den die Bewegungsgleichungen der Einstein'schen allgemeinen Relativitätstheorie anwendbar wären. Die Antwort ist, durch gewisse Eigenschaften, die in der Sprache der Gedanken formulierbar sind. Die Physiker nennen sie Nebenbedingungen (engl. *constraints*). Die Semantik verlangt deshalb, daß Untersysteme mit diesen Eigenschaften in natürlicher Sprache mit Namen bezeichnet werden. Insgesamt ist dies ein Problem der Darstellung der Sprache der Gedanken durch eine natürliche Sprache. Ich komme darauf zurück.

Die wichtigste Nebenbedingung für die Elektrodynamik ist in Figur 5 dargestellt. Ihre Interpretation ist die Aussage, daß das elektrische Feld bei Abwesenheit von Ladungen quellenfrei ist. Die Nebenbedingung ist von der Form: geschlossener Weg=Identität. Außerdem hat der Anfangszustand noch folgende Eigenschaft. Sind $s : X \mapsto X$ und $s' : X \mapsto X$ zwei beliebige Beziehungen eines Objekts zu sich selbst, so gilt

$$s \circ s' = s' \circ s.$$

Die invertierbaren Pfeile $s : X \mapsto X$ bilden die Eichgruppe, wie wir sahen; obige Beziehung sagt, daß die Eichgruppe kommutativ ist. Es ist tatsächlich eine noch einschränkendere Eigenschaft erfüllt. Die Eichgruppe ist einer ganz bestimmten kommutativen Gruppe isomorph, nämlich der Gruppe \mathbf{R} der reellen Zahlen mit $+$ als Gruppenmultiplikation. Dies charakterisiert Elektromagnetismus.

Die anderen fundamentalen Bewegungsgleichungen der Physik können in analoger Weise geschrieben werden. Darunter ist auch die Dirac Gleichung für die Materie. Weil es zwei verschiedene Arten von elementaren Pfeilen gibt (dicke und dünne) gibt es verschiedene Arten von Dreiecken. Außerdem kann die Eichgruppe verschieden sein - nur im Elektromagnetismus ist sie kommutativ. Schließlich gibt es in der allgemeinen Relativitätstheorie auch noch zusätzliche Nebenbedingungen (*constraints*), die ein System als "Raum" charakterisieren.

Es ist allerdings nicht so, daß damit die ganze Elementarteilchenphysik eingefangen wäre. Es ist der Meisterschaft der Elementarteilchenphysiker gelungen, nahezu alles, was sie nicht verstehen, einem einzigen Sündenbock zuzuschieben. Er wird nach dem Physiker Higgs benannt. Unter den unverstandenen Tatsachen sind die Massen der Elementarteilchen; sie sollen durch das Higgs erzeugt werden. Ein fundamentales Higgs passt überhaupt nicht in den hier vorgestellten Rahmen. Es müsste zusammengesetzt sein.

Auch Massen *a priori* passen nicht in den Rahmen. Ebenso wenig passt eine nicht verschwindende kosmologische Konstante. Einstein wünschte bekanntlich, er hätte sie nie erfunden.

Es sollte noch die Bedeutung der angeblichen Maxwellgleichungen erklärt werden. Dies ist nicht möglich, ohne mit der gewöhnlichen Physik in Kontakt zu kommen. Da der Leser unter

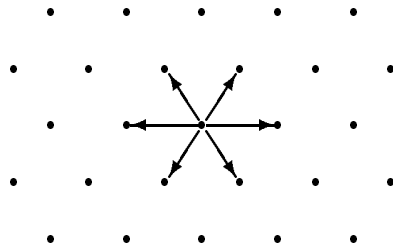


Figure 3: Punktgitter

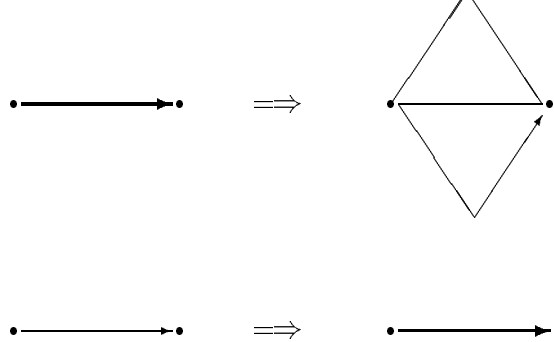


Figure 4: Maxwell Gleichungen der Elektrodynamik

diesen Umständen vielleicht die Antwort gar nicht wirklich wissen will, habe ich sie in den Anhang A verbannt.

8 Kopiervorgänge

Die Replikation des genetischen Materials DNA ist Grundlage des biologischen Lebens wie wir es kennen. Dieser Replikationsvorgang kopiert Struktur[8].

Auch moderne Gesellschaften nutzen in großem Umfang die Möglichkeit, Struktur zu kopieren. Die Nutzungsmöglichkeiten der Buchdruckerkunst - Bücher, Zeitungen - gehören hierher, ebenso die Benutzung von Tonträgern und von Fotokopierern. Massenproduktion von Gütern ist Kopie nach Templaten. Werbeplakate können vervielfältigt, Werbespots immer wieder ausgesandt werden. Eine Hamburger-Kette versteht man am besten als selbstreproduzierende Prozedur. Lehre versucht Wissen oder know how in die Köpfe der Schüler zu kopieren. Auch Wissenschaft schafft nicht nur abstraktes Wissen, sondern auch know how; sie bringt Problemlösung in reproduzierbare, d.h. kopierfähige Form, indem sie sie auf Rezeptanwendung reduziert. Dies ist am deutlichsten in der Mathematik. Sie bringt komplizierte Ketten logischer Schlußfolgerungen in die Form eines reproduzierbaren Kalküls.

Die Bereitstellung von mechanischer Energie durch körperliche Arbeit ist heute ein eher unbedeutender Wirtschaftsfaktor. Hingegen sind die Effizienz von Kopiervorgängen und die Regelung von Kopiervorgängen durch Katalyse u.ä. wichtige Determinanten der Konkurrenzfähigkeit einer Volkswirtschaft. Innovationsfähigkeit wird bestimmt durch dynamische Prozesse, in denen Kopien durch Herausschneiden von Teilen modifiziert und zu größeren Strukturen neu zusammengesetzt werden. Kriterien und Mechanismen der Auslese unter den veränderten Kopien spielen eine wichtige Rolle. Und manche Kritik an der modernen Gesellschaft läuft darauf hinaus, daß wir in Kopien ersäuft werden. Das betrifft vor allem auch die Wis-

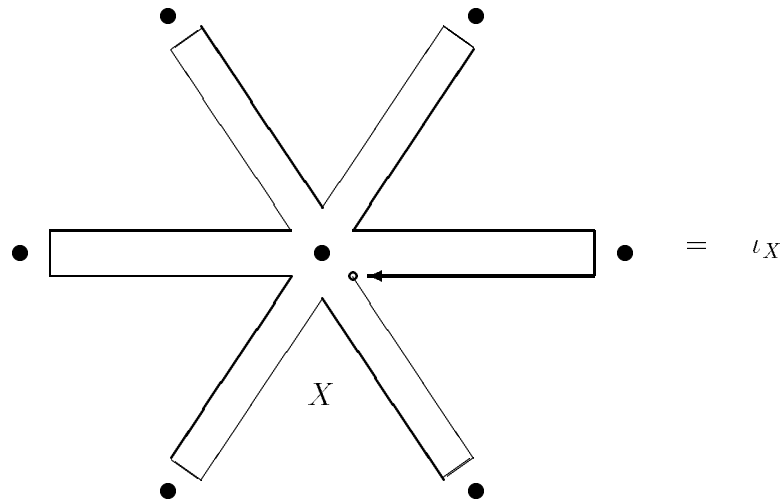


Figure 5: Quellenfreiheit des elektrischen Felds

senschaft.

Betrachtungen von Wirtschaft als autopoietisches System wie bei Luhmann [18] machen also guten Sinn. Jedoch sind die Kopiervorgänge mannigfaltig, es erzeugen nicht nur Zahlungen Zahlungen.

Eine am Modell der unzerstörbaren Materie orientierte Analyse tendiert zu der Schlußfolgerung, daß jemandem weggenommen werden muß, was einem andern gegeben wird. Aber Struktur kann kopiert werden, ohne daß dabei das Original zerstört wird.

Im Lichte dieser Betrachtungen ist es von prinzipieller Bedeutung, daß beliebige Strukturen - d.h. beliebige Systeme im Sinne unserer Definition - durch einen universellen Algorithmus kopiert werden können. Dieser Algorithmus soll im folgenden vorgestellt werden. Er wurde vor ca. 3 Milliarden Jahren von der Natur erfunden. Die Natur nutzt ihn bei der Replikation von DNA zum Kopieren linearer Ketten [8]. Er funktioniert jedoch als universelle Kopiermaschine für ganz beliebige Strukturen.

Der Kopiervorgang sei für den Fall beschrieben, daß anfänglich entgegengesetzte Pfeile zu allen elementaren Pfeilen vorhanden sind. Im Laufe des Kopiervorgangs entstehen Systeme, bei denen gewisse entgegengesetzte Pfeile fehlen. Hat ein Objekt mindestens ein Paar unmittelbarer Beziehungen von und zu anderen Objekten, deren Entgegengesetzte fehlen, so nennen wir dieses Objekt eine Gabel. Die elementaren Pfeile mit und ohne Entgegengesetztes werden beim Kopiervorgang unterschiedlich behandelt.

Der Kopiervorgang besteht aus einer Folge von Schritten. Jedesmal werden ausgesuchte Objekte X kopiert. Dadurch werden diese Objekte verdoppelt. Ich nenne den Vorgang Spaltung. Wir nehmen hier an, daß ein Kopiervorgang für Objekte erklärt sei. Im Falle von zusammengesetzten Objekten kann er rekursiv durch den Kopiervorgang für Systeme erklärt werden. Tatsächlich ist die Annahme unnötig, weil nach dem Darstellungssatz die Objekte aus der Zusammensetzungsregel rekonstruiert werden können.

Die Beziehungen des ausgesuchten Objekts X werden zunächst nicht verdoppelt, sondern unter die beiden Abkömmlinge X_0 und X_1 verteilt. Der ganze Schritt ist in Figur 6 dargestellt. Pfeile zu X ohne Entgegengesetztes gehen zu X_1 . Pfeile zu X mit Entgegengesetztem gehen zu X_0 . Pfeile von X ohne Entgegengesetztes gehen nachher von X_0 aus. Pfeile von X mit Entgegengesetztem gehen nachher von X_1 aus. Durch diesen Vorgang werden Paare von ent-

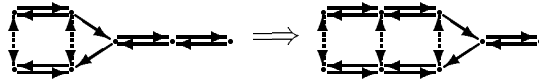


Figure 6: Reproduktionsgabelndynamik. Die gepunkteten Pfeile sind nur ideelle Bindungen, die vorstellen, daß die zwei Objekte Kopien voneinander sind

gegengesetzten Pfeilen aufgespalten in zwei Pfeile ohne Entgegengesetztes, sodaß neue Gabeln entstehen. Zusätzlich erhalten diejenigen Pfeile, die vorher keine Entgegengesetzten hatten, neue Entgegengesetzte.

Der Kopiervorgang besteht nun aus Schritten wie folgt. Am Anfang wird willkürlich ein Objekt X ausgesucht und gespalten. In den folgenden Schritten werden jeweils alle vorhandenen Gabeln gespalten. Dadurch werden i.a. neue Gabeln erzeugt. Auf diese Weise wandern Gabeln durch das ganze System. Der Prozess kommt zu einem Ende, wenn keine Gabeln mehr vorhanden sind. Ein detaillierter Beweis, daß das Verfahren funktioniert, wurde andernorts gegeben. [22]

9 Natürliche Sprachen

Nach Wittgenstein ist Sprache ein Bild der Welt. Genauer sagt er
Der Satz ist ein Bild der Wirklichkeit.

Der Satz ist ein Modell der Wirklichkeit, so wie wir sie uns denken. (tractatus Satz 4.01.)

Im Lichte von Wittgensteins späterer Revision der Ideen des *tractatus* sollte man jedoch besser die Sprache als Ganzes als Abbildung betrachten [17]. Als “Wirklichkeit, so wie wir sie uns denken”, nehmen wir ein (abstraktes) System im Sinne unserer Definition an, vgl. früher. Es muß ein Geflecht von Beziehungen sprachlich dargestellt werden, das wir als System bezeichnet haben. Es kann hier nur kurz darauf eingegangen werden.

Vorab sei klargestellt, daß der Begriff der Darstellung sich grundsätzlich immer auf ein System als Ganzes bezieht; man kann aber natürlich Darstellungen von Teilsystemen oder Einschränkungen von Darstellungen des ganzen Systems auf Teilsysteme betrachten.

Alle Äußerung in natürlicher Sprache hat notwendigerweise zusätzliche Struktur. Wie wir schon sahen, ist dies für Darstellungen nicht ungewöhnlich. Die sequentielle Abfolge von Worten und Ausdrücken begründet Nachbarschaftsbeziehungen - “vorhergehend” und “nachfolgend”. Es gibt keine natürliche - d.h. eindeutige oder bevorzugte - Abbildung eines beliebigen Beziehungsgeflechts in eine sequentielle Struktur. Konkrete natürliche Sprachen beinhalten mehr oder weniger einschränkende Regeln für die erlaubte Reihenfolge. Da ein Objekt im allgemeinen mehr als zwei Beziehungen haben kann, können i.a. nicht alle Beziehungen durch Anordnung der Wörter wiedergegeben werden. Natürliche Sprachen benutzen Fälle und Anaphern, d.h. Ausdrücke, die sich auf vorausgegangene Ausdrücke beziehen und diese wieder aufnehmen. Im allgemeinen ist, um die notwendigen Verweise durchführen zu können, die Benennung von Untersystemen mit gewissen Eigenschaften notwendig. Solche Untersysteme sind zusammengesetzte Objekte (“Situationen” [19]).

Man sieht, daß wegen der notwendigen zusätzlichen Struktur die Darstellungseigenschaft der Sprache subtil ist. Hier berühren wir uns mit Foucault[21]. *“Ce qui permet de définir une langue, ce n’est pas la manière dont elle représente la représentation, mais une certaine architecture interne, une certaine manière de modifier les mots eux-mêmes selon la posture*

grammaticale qu'ils occupent les uns par rapport aux autres: c'est son système flexionel.

Frank [21] interpretiert dies so, *“daß die Elemente der Vernunft-Ordnung nicht schon von Beginn an mit einer Bedeutung ausgestattet sind, die ihre Weltgeltung garantieren. (...) Wenn das Verhalten der Ideen zu ihren Gegenständen aber nicht im vorhinein festgelegt ist, dann erwirbt das Mittel, welches Ideen und Dinge in eine Beziehung setzt, eine gewisse Selbständigkeit; und dieses Mittel ist die Sprache.*

Es sei nochmals betont, daß zusätzliche Struktur in einer Darstellung nicht ungewöhnlich ist. Ganz im Gegenteil ist dies auch in der Mathematik der Standardfall eines Darstellungsproblems. Das wichtigste Beispiel ist die Theorie der Darstellung von Gruppen¹⁰.¹¹ Hier untersucht man nicht etwa die Darstellung von Gruppen durch beliebige Gruppen. Vielmehr sollen die Elemente der Bildgruppe lineare Abbildungen von Vektorräumen sein. Wegen der dadurch geforderten Verträglichkeit mit zusätzlicher Struktur gibt es i.a. *viele inäquivalente Darstellungen*. Das ist die *“gewisse Selbständigkeit”* der Darstellung. Die Darstellung ist nicht durch die Gruppe eindeutig bestimmt. Die durch treue Darstellungen definierten Gruppen sind zwar alle isomorph. Aber die durch die Isomorphie gelieferten Abbildungen zwischen ihnen erhalten nicht die zusätzliche Struktur, so wie ein Photo nicht die Chemie der Ölfarbe eines Ölbilds birgt. Außerdem gibt es u.U. auch noch nichttreue Darstellungen, die nicht isomorph zueinander sind.

Angesichts dieses einfachen Modells ist es nicht mehr überraschend, daß es viele inäquivalente Darstellungen der Sprache der Gedanken durch natürliche Sprachen gibt. *“Inäquivalent”* heißt, daß Übersetzungen notwendig sprachspezifische Struktur zerstören müssen, wenn es sie überhaupt gibt.¹²

Schon die wohlbekanntesten inäquivalenten Darstellungen der Gruppe der Drehungen unseres heimischen 3-dimensionalen Raums hätte man schwerlich mit den Methoden einer rein verbalen Beschreibung finden können. Die Klassifizierung der inäquivalenten Darstellungen der Sprache der Gedanken durch Gebilde mit der zusätzlichen Struktur natürlicher Sprachen wäre ein hübsches Problem für Mathematiker.

Kehren wir zu einfachen Dingen zurück. Im einfachsten Fall drückt ein Satz eine unmittelbare Beziehung von einem Objekt (*“Subjekt”*) zu einem anderen Objekt (*grammatisches “Objekt”*) aus. Es ist schlechter Stil, aber grammatisch erlaubt, zwei Sätze durch *“und”* zu verbinden, die in keinem inneren Zusammenhang stehen. Ein Satz kann also auch mehrere Beziehungen zwischen je zwei Objekten darstellen. Oft ist dann jedoch die Darstellung einer zusammengesetzten Beziehung intendiert.

Die Objekte können konkrete Objekte (Individuen) oder Klassen von Objekten sein. Bestimmte und unbestimmte Artikel können zwischen beiden Möglichkeiten unterscheiden. Die Objekte können auch zusammengesetzte Objekte im Sinne der früheren Diskussion sein.

Die Möglichkeit, konkrete Objekte auszuzeichnen, kommt aus der Existenz *eines a priori konkreten Objekts*, das *“Ich”* genannt wird. Andere Objekte können durch Angabe von Beziehungen zu *“Ich”* konkret gemacht werden (*“Der Tisch vor mir”*). Die Beziehungen können aus unmittelbaren Beziehungen zusammengesetzt sein. Einem so erklärten konkreten Objekt

¹⁰Eine Gruppe ist ein System mit nur einem Objekt, in dem außerdem jeder Pfeil ein Inverses besitzt. Alle Pfeile sind elementar

¹¹Ein anderes Beispiel ist die Modelltheorie [23]. Sie basiert auf der Prädikatenlogik. Sie studiert *“Modelle”* genannte Darstellungen mit zusätzlicher Struktur mengentheoretischen Charakters. Die traditionelle Semantik wurde von Logikern begründet (Frege, Russell, Montague u.a.). Barwise und Perry argumentieren jedoch, daß eine auf der Logik begründete modelltheoretische Semantik natürlichen Sprachen nicht gerecht werden kann [19].

¹²Merkwürdigerweise deutet Quine [16] die mögliche Nichtexistenz von Übersetzungen nur durch ein Beispiel an. Das Beispiel einer illegitimen Übersetzung lautet *“all men are rabbits reincarnate”*.

kann man einen Namen geben und durch Benutzung des Namens auf es verweisen. Für jedes sprechende Subjekt ist "Ich" ein anderes Objekt, nämlich jeweils es selbst. Transformationsregeln stellen sicher, daß die Identifikation so gekennzeichnete konkreter Objekte intersubjektiv kommunizierbar wird. Aus "Ich" wird "Du" usw.

Eine besondere Subtilität kommt weiter daher, daß vieles im sprachlichen Ausdruck auch weggelassen werden kann, weil es "sich versteht".

Sehr allgemeine Klassen von Zielobjekten ("etwas, irgendwohin") können weggelassen werden.

Die Existenz mancher Beziehungen kann als selbstverständlich unterstellt werden, und zur Charakterisierung konkreter Objekte mitverwandt werden, ohne daß dies explizit gesagt wird. Es ist nicht notwendig so, daß diese Beziehungen durch die verwandten Begriffe eindeutig impliziert würden. Wir leben alle in Räumen von Selbstverständlichkeiten, die im Prinzip veränderlich sind, ohne daß uns dies aber in der Regel bewußt wäre. Sie ähneln den Bezugssystemen, die die Physiker in der Relativitätstheorie benutzen. Diese Konstruktion könnte übernommen werden. T. Kuhn's Paradigmen definieren für den Praktiker Räume von Selbstverständlichkeiten. Das Wort "Kontextabhängigkeit" wird gewöhnlich gebraucht, jedoch in einem Sinn, der der allgemeinen Nichtselbstverständlichkeit von Selbstverständlichkeiten nicht gerecht wird.

Es sei schließlich noch ein anderer Bezug erwähnt. N. Chomsky postuliert die Existenz einer "*Universellen Grammatik*", die den Anfangszustand des Sprachvermögens von Menschen beliebiger Kultur und Rasse bestimmt [11]. Unter dem Einfluß der Umwelt entwickle sich daraus in früher Kindheit die Fähigkeit zum Gebrauch einer natürlichen Sprache. Es ist naheliegend, Chomsky's universelle Grammatik mit der Sprache der Gedanken zu identifizieren.

10 Bedingungen an zusammengesetzte Objekte

Die Auswahl möglicher zusammengesetzter Objekte ist von zentraler Bedeutung in der Theorie der Selbstorganisation. Ich diskutiere hier nur eine Bedingung an solche Objekte, die sich unmittelbar aus dem theoretischen Rahmen ergibt.

Nehmen wir an, ein Untersystem aus Objekten X_1, \dots, X_n und aus gewissen Beziehungen zwischen ihnen soll als ein einziges zusammengesetztes Objekt X mit Bestandteilen $X_1 \dots X_n$ aufgefaßt werden. Die Beziehungen von andern Objekten Y zu diesem Objekt wird durch die Beziehungen von Y zu den Bestandteilen $X_1 \dots X_n$ bestimmt sein müssen. Entsprechendes gilt für die Beziehungen von X zu Objekten Z außerhalb. Damit das Objekt X Teil des Systems werden kann, muß eine Zusammensetzungsregel für Pfeile von Y zu X und von X zu Z erklärt werden. Dies verlangt die Zusammensetzung von Pfeilen f_i von Y zu X_i und g_j von X_j zu Z . Dabei können die Bestandteile X_i und X_j verschieden sein. Die Zusammensetzung ist dann zunächst nicht erklärt. Sie kann jedoch dann erklärt werden, wenn es in dem Untersystem einen *eindeutig bestimmten* Pfeil u_{ji} von X_i zu X_j gibt. Dann kann man den zusammengesetzten Pfeil als den Pfeil $g_j \circ u_{ji} \circ f_i$ im alten System erklären. Die Voraussetzung ist aber nur dann erfüllt, wenn das Untersystem *unfrustriert* ist und zusammenhängt.

In der menschlichen Gesellschaft bedeutet, wie erwähnt, unfrustrierte Kommunikation rationale Kommunikation. Hier berühren wir uns mit Luhmann, für den die Herausbildung eines Mediums rationaler Kommunikation (in unserem Sinne) konstitutiv für die Bildung und Abgrenzung eines Systems ist. In der Wirtschaft ist dieses Medium Geld; die Kommunikation besteht aus Zahlungen [18].

Anhang A. Erklärung der graphischen Form der Maxwell-Gleichungen

Bekanntlich ist nach einer der Maxwell-Gleichungen das magnetische Feld \mathbf{B} quellenfrei und kann deshalb als Rotation eines Vektorpotentials \mathbf{A} geschrieben werden. Das skalare Potential kann man wegen der Freiheit von Eichtransformationen als Null annehmen. Das elektrische Feld \mathbf{E} ist dann das Negative $-\dot{\mathbf{A}}$ der Änderung des Vektorpotentials pro Zeiteinheit. Durch diesen Ansatz werden zwei der Maxwellgleichungen gelöst. Soweit findet man diese Dinge im Konversationslexikon.

Das Vektorpotential der Elektrodynamik ist der Prototyp eines Eichfelds. Es spielt im hier vorgestellten Rahmen eine zentrale Rolle. Figur 4 sind die beiden verbleibenden Maxwellgleichungen in der Form, die sie nach der Einführung des Vektorpotentials annehmen. Die elementaren Pfeile werden aus dem Vektorpotential konstruiert.

Die Objekte X repräsentieren Punkte des Raums, also Orte. Die elementaren Pfeile sind den in der Mathematik als Kanten bezeichneten Verbindungslinien zwischen nächsten Nachbarn des Punktgitters zugeordnet.

Wir können die von einem Ort X ausgehenden elementaren Pfeile irgendwie durchnummerieren mit $i = 1, 2, \dots$. Angabe von X und i wählt dann einen Pfeil aus. Es ist in der Physik üblich, Vektoren im Raum durch Pfeile darzustellen. Deshalb können wir jedem der elementaren Pfeile in Figur 4 einen Vektor \mathbf{e}_i im Raum zuordnen. Diese Vektoren haben eine Länge und eine Richtung.

Die Pfeile selbst sind in der Elektrodynamik reelle Zahlen (“Dezimalzahlen”). Die Zusammensetzung der Pfeile erfolgt durch Addition dieser Zahlen. Insbesondere ist dadurch jedem Dreieck eine Zahl zugeordnet. Wir sagen einfacher, Pfeile und Dreiecke “sind” Zahlen.

Die dünnen elementaren Pfeile sind Zahlen $A_i(X)$, und die dicken Pfeile sind Zahlen $A_i(X)'$. Der Pfeil in umgekehrter Richtung ist jeweils das negative dieser Zahl. Die Zahlen sind durch das Vektorpotential bestimmt. $A_i(X)$ ist die Komponente $\mathbf{e}_i \cdot \mathbf{A}(x)$ des Vektorpotentials in Richtung des Vektors \mathbf{e}_i am Mittelpunkt x der Kante von X aus in i -Richtung.¹³ Ich nenne diese Größen kurz die “Komponenten” des Vektorpotentials.

Die Aussage des zweiten Teils der Figur 4 ist, daß $A_i'(X)$ die Komponenten des Vektorpotentials einen Zeitschritt später sind.

Da das Magnetfeld quellenfrei ist, kann es durch Feldlinien graphisch dargestellt werden. Die Zahl der Feldlinien, die eine berandete Fläche durchstoßen, nennt man den magnetischen Fluß durch diese Fläche. Für genügend kleine Flächenstücke ist er gleich der Komponente des Magnetfelds in Richtung senkrecht zur Fläche multipliziert mit der Größe der Fläche. Die obige Formel $B = \text{rot}A$ sagt aus, dass der magnetische Fluß durch ein Dreieck gleich dem Dreieck (als Zahl) ist. Beim Durchlaufen des Dreiecks in umgekehrter Richtung (d.h. im Uhrzeigersinn) kehrt sich das Vorzeichen um. Die beiden Dreiecke im ersten Teil von Figur 4 haben gleiche Fläche und werden in umgekehrter Richtung durchlaufen. Man bekommt also Differenzen von Komponenten des magnetischen Feldes durch benachbarte Dreiecke, insgesamt eine Komponente der Rotation von $-\mathbf{B}$ (multipliziert mit einer dimensionsbehafteten Konstanten, die man durch Wahl der Einheiten geschickt festlegen kann).

Da eine Dreiecksseite fehlt, muß noch der alte dünne Pfeil dazugezählt werden. Wir denken uns diesen Beitrag mit umgekehrtem Vorzeichen auf die andere Seite der Gleichung gebracht.

¹³Da das Vektorpotential nicht dimensionslos ist, muß man geeignete Einheiten wählen um eine Zahl zu bekommen. Die Einheiten werden vom Abstand der Gitterpunkte abhängig gewählt.

Betrachten wir diese andere Seite der Gleichung für den neuen Pfeil. Die Änderung des Vektorpotentials in zwei Zeitschritten ist gleich der Änderung der Änderung in einem Zeitschritt, also gleich der Änderung $-\dot{E}$ von $-E$ (multipliziert mit dem Quadrat der Länge des Zeitschritts).

Insgesamt bekommt man (bei Wahl geeigneter Einheiten) die Maxwellgleichung $\dot{E} = \text{rot} B$.

References

- [1] B.L. Whorf, *Sprache, Denken, Wirklichkeit*, Rowohlt, Reinbek 1963, Kap IV
- [2] A.N. Whitehead, *Science and the Modern World*, 5.te Aufl. New York 1954, S 71 ff und 105 ff
- [3] C. von Clausewitz, *Vom Kriege* Reclam Stuttgart 1980 S. 332
- [4] J. Habermas, *Der philosophische Diskurs der Moderne* (Suhrkamp Frankfurt, 4. Aufl 1993), S.430
- [5] G. Mack, *Gauge theory of things alive* Nuclear Physics B (Proceedings Supplement) Band 42 (1995) S. 923-926,
erweiterte Fassung: *Gauge theory of things alive and universal dynamics* DESY 94-184 (Oktober 1994) <Bulletin Board hep-lat@ftp.scri.fsu.edu - 9411059>
- [6] M. Minsky, *The society of mind* (Simon Schuster New York 1986)
- [7] H.R.Maturana, F.G.Varela, *Der Baum der Erkenntnis* (Goldmann München 1992)
- [8] B. Albers et al, *Molecular biology of the cell* (Garland Publ. 1983)
- [9] M.M. Waldrop, *Inseln in Chaos - die Erforschung komplexer Systeme* Rowohlt 1993
- [10] H. Haken, *Synergetik* (Springer Heidelberg 1992)
- [11] N. Chomsky, *Knowledge of Language* (Praeger Publishers, Westport 1986)
- [12] T. Kuhn, *The structure of scientific revolution* Chicago 1962
- [13] Martin Heidegger, *Die Frage nach dem Ding. Zu Kant's Lehre von den transzendentalen Grundsätzen* (Max Niemeyer Verlag Tübingen 1987)
- [14] L. Wittgenstein, *Tractatus logico-philosophicus* (Suhrkamp Frankfurt 1963)
- [15] G. Mack, *Physical principles, Geometrical aspects and Locality properties of gauge field theories*, Fortschritte der Physik Bd. 29 (1981) S. 135 - 185
- [16] W.v.O. Quine, *Word and object* (MIT press Cambridge 1960)
- [17] S.A. Kripke, *Wittgenstein on Rules and Private Languages* Oxford 1982
- [18] N. Luhmann, *Die Wirtschaft der Gesellschaft* (Suhrkamp, Frankfurt 1989)
- [19] J. Barwise, J. Perry, *Situation und Einstellung. Grundlagen der Situationssemantik* (de Gruyter Berlin 1987)

- [20] F. de Saussure, *Cours de linguistique générale*, édition critique préparée par Tullio de Mauro, Payot, Paris 1980
- [21] M. Frank, *Was ist Neostukturalismus* (Suhrkamp Frankfurt 1984) S. 169
J.-F. Lyotard, *La condition postmoderne*, Paris 1979
M. Foucault, *Les mots et les choses* (Gallimard Paris 1966)
- [22] G. Mack, *Gauge Theory of Things Alive: Universal Dynamics as a Tool in Parallel Computing*, erscheint in: Suppl. Progr. Theor. Physics (Kyoto).
- [23] C.C. Chang, H.J. Keisler, *Model theory* (North Holland Amsterdam 1990)