Unscharfe Mengen, Begriffe im Fluss und die nicht-exakte Wissenschaft

Rudolf Seising

Zusammenfassung. Uneindeutigkeit forderte die moderne Mathematik, Naturwissenschaft und Technik im 20. Jahrhundert heraus, wie der folgende Beitrag zeigt. In der Einleitung wird auf die Schwierigkeiten früher Mengentheorie und Logik mit dem Phänomen der Uneindeutigkeit verwiesen, danach wird zu der seit den 1930er Jahren auch als Grundlagenwissenschaft eingeführten Semiotik übergegangen, aus der die in den 1940er Jahren entstandene Informationstheorie abgeleitet wird. In Abschnitt 2 betrachten wir die empirischen Wissenschaften vor dem Hintergrund der Phänomene Uneindeutigkeit, Ungenauigkeit und Ungewissheit. Wissenschaftsphilosophisch werden hier Ansichten von Heinrich Hertz, Ludwig Wittgenstein und Hans-Jörg Rheinberger herangezogen. Sowohl für die Physik als auch für die Molekularbiologie des 20. Jahrhunderts zeigt sich, dass Begriffe benutzt wurden, die uneindeutig und „im Fluss" waren. Abschnitt 3 gibt eine kurze wissenschaftshistorische Einführung in die Theorie der Fuzzy Sets, die aus den Ingenieurswissenschaften heraus entstand, Abschnitt 4 führt hin zu den darauf basierenden Methodologien des Computing with Words und der Computational Theory of Perceptions. Dabei wird versucht, an die philosophischen Ansichten von Hertz und Wittgenstein anzuknüpfen. Abschnitt 5 zeigt, dass Lotfi Zadeh, der Begründer der Theorie der Fuzzy Sets anfänglich nach Anwendungen seiner Theorie in den nicht-technischen Wissenschaften suchte. Bald wurden die Fuzzy Sets auch in der Medizin aufgegriffen und es kann sogar auf medizinphilosophische Betrachtungen von Ludwik Fleck verwiesen werden, die allerdings aus der Zeit vor der Fuzzy Set Theorie stammen. Der letzte Abschnitt fasst den Beitrag zusammen und gibt einen Ausblick.

1 Einleitung: Von Zeichen, Mengen, Logik und Begriffen

„*Am Anfang ist das Zeichen*" ließ David Hilbert (1862–1943) im Jahre 1922 zu Beginn seiner *Neubegründung der Mathematik* in kursiver Schrift setzen. Die Gegenstände der Mathematik, die Basis für ihr Verständnis seien Zeichen, einfache und endliche Ausdrücke, oder wie Hilbert schrieb: „Als Vorbedingung für die Anwendung logischer Schlüsse und die Betätigung logischer Operationen muß vielmehr schon etwas in der Vorstellung gegeben sein: gewisse außerlogische diskrete Objekte, die anschaulich als unmittelbares Erlebnis vor allem Denken da sind. Soll das logische Schließen sicher sein, so müssen sich diese Objekte in allen Teilen überblicken lassen und ihre Aufweisung, ihre Unterscheidung, ihr Aufeinanderfolgen ist mit den Objekten zugleich unmittelbar anschaulich für uns da als etwas, das sich nicht noch auf etwas anderes reduzieren läßt." Diese „feste philosophische Einstellung" war aus Hilberts Sicht „zur Begründung der reinen Mathematik" [...] erforderlich", und eben dieser Absatz endet mit dem eingangs zitierten, auf das Johannesevangelium verweisenden Satz: „*Am Anfang ist das Zeichen*" (Hilbert 1970: 162f.). Auch drei Jahre später fand Hilbert Worte, die der Wissenschaftshistoriker Herbert Mehrtens (1990: 123–127) „biblische Rhetorik“ nannte: „Aus dem Paradies, das Cantor uns geschaffen, soll uns niemand vertreiben können“ (Hilbert 1925: 170).

1.1 Mengen und Logik

Georg Cantor (1845–1918) hatte in seinen Arbeiten zu „Punktmannigfaltigkeiten“ das Gebiet der Mengenlehre entwickelt (Cantor 1932). Ob dieses nun paradiesische Zustände annahm oder sich doch als freiheitsraubendes Reservat erwies – diese Mengentheorie hat mit der realen Welt nur wenig zu tun, denn es waren keine realen Gegenstände sondern traditionelle, abstrakte, mathematische Entitäten, bei deren Untersuchung Cantor (1871, 1872) mengentheoretische Vorstellungen herausbildete: *Singularitäten trigonometrischer Reihen* und *transzendente reelle Zahlen*. Cantor und vor ihm auch andere Mathematiker nannten solche Entitäten zunächst „Inbegriff“, „Gesamtheit“, „Mannigfaltigkeit“ oder „Vielheit“ bzw. „Element“ – ihre heute gebräuchlichen Namen erhielten sie erst 1895, als Cantor seine Beiträge zur Begründung der transfiniten Mengenlehre schrieb:

> *Definition*: „Unter einer Menge verstehen wir jede Zusammenfassung M von bestimmten, wohlunterschiedenen Objekten m unserer Anschauung oder unseres Denkens (welche die Elemente von M genannt werden) zu einem Ganzen.“ (Cantor 1932: 282)

Damit erhielt der „Werkzeugkasten“ der Mathematiker die umkehrbar eindeutige Entsprechung zwischen Mengen und Funktionen, die so genannte *Indikatorfunktion* oder *Charakteristische Funktion* einer Menge M, die folgendermaßen definiert wird:

$$I_M(m) = \begin{cases} 1, & \text{wenn } m \in M \\ 0, & \text{wenn } m \notin M \end{cases}$$

Die Funktion I_m charakterisiert jedes Objekt m als Element von M, indem sie ihm den Wert 1 zuweist; wenn sie aber für m den Wert 0 hat, ist m nicht Element von M.

Dass die auf der Mengentheorie gründende „neue Mathematik“ Hilbert paradiesisch anmuten würde, konnte Cantor nicht voraussehen, aber er hatte den Mathematikern schon 1883 eine denkerische Freiheit prophezeit, die es ihnen ermöglichte „*einzig* und *allein* auf die *immanente* Realität ihrer Begriffe Rücksicht zu nehmen“. Weder durch „metaphysische Fesseln“ noch von einer „dem Intellekt gegenüberstehenden Außenwelt“ (Cantor 1883: 182)[1] beschränkt konnte sich die moderne Mathematik dann tatsächlich völlig losgelöst von der empirisch erkennbaren Realität entwickeln:

> „Existenz wird zu Widerspruchsfreiheit, Ontologie zu Mathematik. Damit aber hat die Mathematik das Territorium der Philosophie betreten und zugleich der Philosophie die Kompetenz abgesprochen, über die Natur mathematischer ‚Wahrheit‘ ihr Wörtchen mitzureden. Für einige Jahrzehnte waren gewisse Arbeitsfelder von Philosophie und Mathematik, was Gegenstand und Methoden anging, kaum zu unterscheiden.“ (Mehrtens 1990: 163)

[1] zitiert nach Mehrtens (1990): 25.

Dass schon Cantor das Auftreten von Widersprüchen in seiner Mengentheorie nicht fremd war, belegt ein Abschnitt in seinem Brief an den deutschen Mathematiker Richard Dedekind (1831–1916) vom 28. Juli 1899:

> „Eine Vielheit kann nämlich so beschaffen sein, dass die Annahme eines ‚Zusammenseins' aller ihrer Elemente auf einen Widerspruch führt, so dass es unmöglich ist, die Vielheit als eine Einheit, als ein ‚fertiges Ding' aufzufassen. Solche Vielheiten nenne ich *absolut unendliche* oder *inkonsistente Vielheiten*. (...) Wenn hingegen die Gesamtheit der Elemente einer Vielheit ohne Widerspruch als ‚zusammenseiend' gedacht werden kann, so dass ihr Zusammengefaßtwerden zu ‚einem Ding' möglich ist, nenne ich sie eine *konsistente Vielheit* oder eine *Menge*. (Im Französischen und Italienischen wird dieser Begriff durch die Worte ‚ensemble' und ‚insieme' treffend zum Ausdruck gebracht.)" (Becker 1964: 308–313)[2]

Cantor löste das Problem – wie später Hilbert – indem er zwischen inkonsistenten Begriffen, die zu Widersprüchen führen, und konsistenten Begriffen scharf unterschied; anders aber als Hilbert verbannte er die inkonsistenten Mengen gar nicht aus dem „Werkzeugkoffer" der Mathematiker. Warum Cantor dies nicht getan hat, lässt sich seiner früheren Definition der „Menge" entnehmen:

> *Definition*: „Eine Mannigfaltigkeit (ein Inbegriff, eine Menge) von Elementen, die irgendwelcher Begriffssphäre angehören, nenne ich wohldefiniert, wenn auf Grund ihrer Definition und infolge des logischen Prinzips vom ausgeschlossenen Dritten es als *intern bestimmt* angesehen werden muß, *sowohl* ob irgendein derselben Begriffssphäre angehöriges Objekt zu der gedachten Mannigfaltigkeit als Element gehört oder nicht, *wie auch*, ob zwei zur Menge gehörige Objekte, trotz formaler Unterschiede in der Art des Gegebenseins einander gleichen oder nicht. Im allgemeinen werden die betreffenden Entscheidungen nicht mit den zu Gebote stehenden Methoden oder Fähigkeiten in Wirklichkeit sicher und genau ausführbar sein; darauf kommt es aber hier durchaus nicht an, sondern *allein* auf die *interne Determination*, welche in konkreten Fällen, wo es die Zwecke fordern, durch Vervollkommnung der Hilfsmittel zu einer *aktuellen (externen) Determination* auszubilden ist." (Cantor 1883)[3]

Cantor war sich der Schwierigkeiten bewusst, die sich bei der Frage, ob ein Objekt m Element einer Menge M ist, oder nicht, ergeben können: Es sind nicht die „Zusammenfassungen von Objekten unseres Denkens", welche die Vagheiten ins mathematische Spiel bringen; es sind die „Zusammenfassungen von Objekten unserer Anschauung". Wir nehmen Gegenstände oder Phänomene der Außenwelt mit unseren Sinnen wahr, haben infolgedessen Anschauungen von ihnen, doch wenn wir sie unter einen Begriff bringen wollen, werden wir unsicher, „halten" wir uns „zwischen den Realitäten schwimmend", wie sich der dänische Physiker Niels Bohr (1885–1962) einmal im Zusammenhang mit den begrifflichen Problemen der Quantenmechanik ausdrückte.[4]

[2] Hervorhebungen im Original

[3] zitiert nach Mehrtens (1990): 282f.

[4] Niels Bohr in einem Brief an Albert Einstein vom 13.4.1927, zitiert nach Meyer-Abich (1978: 2).

Der deutsche Philosoph und Mathematiker Gottlob Frege (1848–1925) wollte diese Fälle durch logisch-mathematische „Schärfe“ aus der Wissenschaft ausmerzen, denn er forderte in seinem während an der Wende zum 20. Jahrhundert erschienenen Buch *Grundgesetze der Arithmetik*:

> „Eine Definition eines Begriffes (möglichen Prädikates) muss vollständig sein, sie muss für jeden Gegenstand unzweideutig bestimmen, ob er unter den Begriff falle (ob das Prädikat mit Wahrheit von ihm ausgesagt werden könne) oder nicht. [. . .] Man kann das bildlich so ausdrücken: der Begriff muß scharf begrenzt sein [. . .]“ (Frege 1998: 69)

Frege beschrieb auch die Konsequenzen der Nichtbefolgung dieses Gebotes:

> „Einem unscharf begrenzten Begriffe würde [wenn man sich Begriffe ihrem Umfang nach als Bezirke in der Ebene versinnlicht] ein Bezirk entsprechen, der nicht überall eine scharfe Grenzlinie hätte, sondern stellenweise ganz verschwimmend in die Umgebung überginge. Das wäre eigentlich gar kein Bezirk; und so wird ein unscharf definierter Begriff mit Unrecht Begriff genannt.“ (ebd.)

Schließlich resümierte er:

> „. . . ohne vollständige und endgültige Definitionen hat man keinen festen Boden unter den Füssen, ist man der Geltung seiner Lehrsätze nicht sicher, kann man nicht zuversichtlich die logischen Gesetze anwenden, die ja die scharfe Begrenzung der Begriffe und also auch der Beziehungen zur Voraussetzung haben.“ (ebd.: 70)

Frege ist der „der erste, der V[agheit] als ein neues Phänomen sui generis bestimmt“ urteilt der Philosoph Bernd Buldt (2001: 536), denn bei der Anwendung seiner 1879 veröffentlichten *Begriffsschrift* zur Formalisierung der vollständigen Induktion stieß er auf ein Problem: Manche Prädikate sind nicht induktiv, d. h.: Obwohl sie für natürliche Zahlen definiert sind, führen sie zu falschen Schlüssen, z. B. bei dem Prädikat „Haufen“.[5] Der Begriff sei für manche natürlichen Zahlen unbeurteilbar. Als Frege dann die Grundlagen seiner *Begriffsschrift* ein Jahrzehnt später für einen Vortrag bei der Gesellschaft für Medizin und Naturwissenschaft in Jena überarbeitete, deutete er Begriffe als Funktionen, die konsequenterweise überall definiert sein müssen:

> „Es ist also nötig, Festsetzungen zu machen, aus denen hervorgeht, was z. B. „$\odot$ +1“ bedeutet, wenn „$\odot$ “ die Sonne bedeuten soll. Wie diese Festsetzungen geschehen, ist verhältnismäßig gleichgültig; wesentlich ist aber, daß sie gemacht werden, daß „$a + b$“ immer eine Bedeutung erhalte, welche Zeichen bestimmter Gegenstände auch für „a“ und „b“ eingesetzt werden mögen. Für die Begriffe

[5] Dies ist die mathematische Formulierung des klassischen *Sorites Paradoxons*, das auf Eubulides von Alexandria (4. Jh. v. Chr.) zurückgeführt wird (griechisch: “Haufen“). Es sei S die Aussage „Wenn x ein Haufen Sand ist, dann ist das Ergebnis y der Wegnahme eines Sandkorns immer noch ein Haufen Sand“. Nun nimm von einem Haufen Sand Korn für Korn weg; die wiederholte Anwendung von S impliziert absurderweise, dass auch das letzte übrig bleibende Korn ein Haufen ist.

> haben wir hierin die Forderung, daß sie für jedes Argument einen Wahrheitswert als Wert haben, daß für jeden Gegenstand bestimmt sei, ob er unter den Begriff falle oder nicht; mit anderen Worten: wir haben für Begriffe die Forderung ihrer scharfen Begrenzung, ohne deren Erfüllung es unmöglich wäre, logische Gesetze von ihnen aufzustellen.“ (Frege 1969)

Freges Bestimmung der Vagheit als philosophisches Phänomen beeinflußte auch seinen Zeitgenossen, den britischen Philosophen und Mathematiker Bertrand Russell (1872–1970), der den ersten logisch-mathematischen Artikel über „Vagueness“ im Jahre 1923 veröffentlichte (Russell 1923). Ausgehend vom Sorites Paradoxon diskutierte Russell beispielsweise die Begriffe der „Farben“ und des „Glatzkopfs“:

> „Let us consider the various ways in which common words are vague, and let us begin with such a word as ‚red'. It is perfectly obvious, since colours form a continuum, that there are shades of colour concerning which we shall be in doubt whether to call them red or not, not because we are ignorant of the meaning of the word ‚red', but because it is a word the extent of whose application is essentially doubtful. This, of course, is the answer to the old puzzle about the man who went bald. It is supposed that at first he was not bald, that he lost his hairs one by one, and that in the end he was bald; therefore, it is argued, there must have been one hair the loss of which converted him into a bald man. This, of course, is absurd. Baldness is a vague conception; some men are certainly bald, some are certainly not bald, while between them there are men of whom it is not true to say they must either be bald or not bald.“ (Russell 1923: 85)

Russells Argumentation führte zu dem Schluss, dass Begriffe vage sind, obwohl es an Versuchen, sie präzise zu definieren, nicht gemangelt hatte:

> „The metre, for example, is defined as the distance between two marks on a certain rod in Paris, when that rod is at a certain temperature. Now, the marks are not points, but patches of a finite size, so that the distance between them is not a precise conception. Moreover, temperature cannot be measured with more than a certain degree of accuracy, and the temperature of a rod is never quite uniform. For all these reasons the conception of a metre is lacking in precision.“ (Russell 1923: 86)

Nach Russell können Gegenstände in einem bestimmten Bereich durch ein Wort bezeichnet werden, es gibt aber einen Grenzbereich, innerhalb dessen die Bezeichnung der Gegenstände durch dieses Wort fraglich wird, und außerhalb davon sich die Gegenstände der Bezeichnung durch dieses Wort völlig entziehen. (Russell 1923: 86f) Seiner Ansicht nach können auch die logischen Wahrheitswerte *wahr* und *falsch* nur eine präzise Bedeutung haben, wenn die benützten Symbole – Wörter, Wahrnehmungen (perceptions), Bilder (images) usw. – selbst präzise sind. Da dies, wie oben gesehen, in der Praxis nicht der Fall ist, schloß Russell:

> „that every proposition that can be framed in practice has a certain degree of vagueness; that is to say, there is not one definite fact necessary and sufficient

> for its truth, but a certain region of possible facts, any one of which would make it true. And this region is itself ill-defined: we cannot assign to it a definite boundary.“ (Russell 1923: 88f)

Russell betonte, dass es einen Unterschied gibt, zwischen unseren Vorstellungen in der Theorie und den Beobachtungen aufgrund unserer Sinneseindrücke aus der Realität (ebd.):

> „All traditional logic habitually assumes that precise symbols are being employed. It is therefore not applicable to this terrestrial life, but only to an imagined celestial existence.“

In diesem Zusammenhang schlug er vor folgende Definition für akkurate Darstellungen vor (ebd.):

> „One system of terms related in various ways is an accurate representation of another system of terms related in various other ways if there is a one-one relation of the terms of the one to the terms of the other, and likewise a one-one relation of the relations of the one to the relations of the other, such that, when two or more terms in the one system have a relation belonging to that system, the corresponding terms of the other system have the corresponding relation belonging to the other system.“

Im Kontrast dazu definierte er, „a representation is vague when the relation of the representing system to the represented system is not one-one, but one-many“, und schlussfolgerte: „Vagueness, clearly, is a matter of degree, depending upon the extent of the possible differences between different systems represented by the same representation. Accuracy, on the contrary, is an ideal limit“ (Russell 1923: 89f.).

1.2 Zeichen und Information

Als „allgemeine Lehre von den Zeichen, den Zeichensystemen und -prozessen“ entstand im 20. Jahrhundert die „moderne“ Semiotik. Sie wurde von Charles Sanders Peirce (1839–1914) und Charles William Morris (1901–1979) gegründet; etwa gleichzeitig entstandene Arbeiten von Ferdinand de Saussure (1857–1913) und Louis Hielmslev (1899–1965) sowie von Mitgliedern des Wiener Kreises können ebenfalls der Geschichte dieser „allgemeinen Zeichenlehre“ zugeordnet werden, doch der von Morris (1938) in seiner *Foundations of the Theory of Signs* vorgestellte Zugang ist der bei weitem umfassendste Versuch, eine „science of signs“ zu begründen, da hier nicht nur die Zeichenprozesse der Menschen sondern ganz allgemein aller lebenden Systeme berücksichtigt werden.[6]

Morris war ausgebildeter Ingenieur, hatte bei George Herbert Mead (1863–1931), dem Begründer der Sozialpsychologie promoviert, stand in Kontakt zum Wiener Kreis und war Mitglied des Unity of Science Movement. Seine *Grundlagen der Zeichentheorie*[7] beruhen „on a biological basis and specifically with the framework of the science of behavior“. Morris

[6] Auf die in der Antike entstandenen Zeichen- und Bedeutungslehren in der stoischen Dialektik durch Diogenes von Babylon und jene im mittelalterlichen Nominalismus durch Wilhelm von Ockam (um 1285–1347) kann an dieser Stelle nicht eingegangen werden.

[7] So der deutsche Titel seines Buchs Foundations of Theory of Signs (Morris 1938).

definierte die Semiotik (*semiotics*)[8], als eine „*universal* theory of signs and an *interdisciplinary* undertaking“, in der die Sprache als „Sozialsystem der Zeichen mit Dispositionen zum Handlen“ analysiert wird: Unser Verständnis des Gebrauch und der Folgen von Zeichen setzt unser Verständnis davon voraus, wie Zeichen das Sozialverhalten beeinflussen.

In Morris’ *Grundlagen* wird der Prozess, in dem ein „sign-vehicle“ als ein Zeichen fungiert, als *semiosis* bezeichnet und in vier Komponenten vorgestellt (Abbildung 1):

1. Zeichenträger (*sign vehicle*) – das Objekt oder Ereignis, das als Zeichen fungiert
2. Gegenstand (*designatum*) – das Objekt oder die Klasse von Objekten, die das Zeichen bezeichnet
3. Verhalten (*interpretant*) – die Wirkung/Disposition eines Interpreten, um eine Antwortsequenz als Ergebnis des Zeichenempfangs zu initiieren
4. Interpret (*interpreter*) – Person, für die das sign-vehicle als Zeichen fungiert

Morris unterschied zudem drei Dimensionen der Semiotik, d. h. drei große Forschungszweige der Zeichentheorie, die jeweils von dyadischen Relationen bestimmt sind:

- Die Syntaktik bestimmt die Relation zwischen dem zu analysierenden Zeichenträger und anderen Zeichenträgern.
- Die Semantik bestimmt die Relation zwischen den Zeichenträgern und ihren Designaten.
- Die Pragmatik bestimmt die Relation zwischen zwischen den Zeichenträgern und ihren Interpreten.

Das Auftragen eines Zeichens auf den Zeichenträger wird von jemandem (einer Person, einer Instanz) vorgenommen und kann als ein *Senden* aufgefasst werden, das Zeichen wird

[8] Das Wort semeiotics (ein Deuter von Zeichen), wurde erstmals von Henry Stubbe (1670: 75) für die medizinische Lehre der Zeichendeutung gebraucht. John Locke benutzte die Ausdrück *semeiotike* und *semeiotics* in Buch 4, Kapitel 21 seines Essay *Concerning Human Understanding* (1690/1823), wo er drei Teile der Wissenschaft betrachtete: „All that can fall within the compass of human understanding, being either, first, the nature of things, as they are in themselves, their relations, and their manner of operation: or, secondly, that which man himself ought to do, as a rational and voluntary agent, for the attainment of any end, especially happiness: or, thirdly, the ways and means whereby the knowledge of both the one and the other of these is attained and communicated; I think science may be divided properly into these three sorts“ (Locke 1823: 174). Die dritte Kategorie, die *σεμειϖτικη* (*semeiotike*), nannte Locke ‚the doctrine of signs’: „Nor is there any thing to be relied upon in Physick, but an exact knowledge of medicinal physiology (founded on observation, not principles), semiotics, method of curing, and tried (not excogitated, not commanding) medicines“ (Locke 1823: 175).

Im 19. Jahrhundert definierte Peirce den Begriff *semiotic/semeiotic* als die „quasi-necessary, or formal doctrine of signs“ ein. Sie soll die Eigenschaften aller Zeichen beschreiben “used by...an intelligence capable of learning by experience“ (Peirce 1932); sie sei ausserdem “philosophical logic pursued in terms of signs and sign processes“ (Peirce 1902). Der ebenfalls von Peirce eingeführte Begriff *semiosis* sollte „a process that interprets signs as referring to their objects“ bezeichnen (Houser/Kloesel 1998).

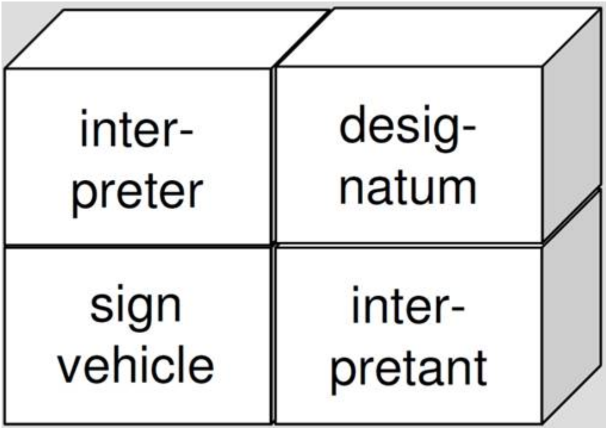

Abbildung 1. Die vier Komponenten des Zeichenprozesses (Semiosis) nach Morris

von einem Interpreten *empfangen* und erzielt bei ihm ein Verhalten, eine Wirkung, eine Disposition. Es ist daher naheliegend, Zeichenprozesse als Kommunikationsprozesse anzusehen, wobei sich als Zeichenträger alle möglichen Medien eignen. Sender oder Empfänger können Menschen, andere Organismen oder auch Maschinen sein. Folgt man dieser Interpretation, so wird die Analogie der dreidimensionalen Semiotik bei Morris zu den drei Ebenen des Kommunikations- und Informationsbegriffs deutlich, die der amerikanische Mathematiker und Wissenschaftsorganisator Warren Weaver (1894–1978) 1949 in seinem *Scientific American*-Artikel „The Mathematics of Communication“ (Weaver 1948) vorstellte, als er den im Vorjahr erschienenen Artikel „A Mathematical Theory of Communication“ (Shannon/Weaver 1948) des amerikanischen Elektroingenieurs und Mathematikers Claude Elwood Shannon (1916–2001) für die wissenschaftlich interessierte Öffentlichkeit erklärte und interpretierte. Shannon hatte für seine „Mathematische Theorie der Kommunikation“ ein allgemeines Kommunikationsschema angegeben (Abbildung 2):

- Eine *Nachrichtenquelle* (Information Source) produziert eine Folge von Nachrichten (Messages), die der Empfängerseite überbracht werden soll, die Übertragung kann über Telegraf- oder Fernschreibersystem geschehen, dann ist es eine Buchstabenfolge, sie kann auch über das Telefon- oder Radiosystem geschehen, dann handelt es sich um eine zeitliche Funktion $f(t)$, oder es ist eine Funktion $f(x, y, t)$, wie bei einem Schwarzweißfernsehsystem, oder sie besteht aus komplizierteren Funktionen.
- Der *Sender* (Transmitter) formt die Nachricht auf irgendeine Weise um, damit er Signale produzieren kann, die er über den Kanal senden kann. In der Telegrafie sind das Punkt-Strich-Codes, in der Telefonie wird der Schalldruck in elektrischen Strom umgewandelt.
- Der *Kanal* ist das benutzte Medium, das zur Übertragung benutzt wird. Hier sind Drähte, Lichtstrahlen und anderes möglich.
- Der *Empfänger* (Receiver) muss die zum Sender entgegengesetzte Operation durchführen und rekonstruiert so die ursprüngliche Nachricht aus dem übertragenen Signal.
- Das *Ziel* (Destination) ist die Person oder Instanz, der die Nachricht zukommen soll.

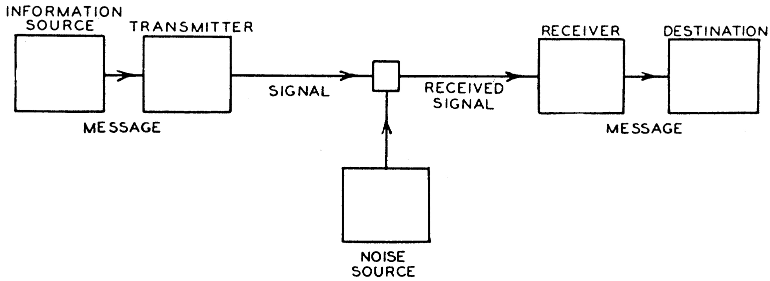

Abbildung 2. Kommunikationsschema von Shannon (Shannon/Weaver 1948)

Shannon hatte Kommunikation als reine Nachrichtenübertragung begriffen, die Bedeutung der übertragenen Zeichen spielte in seiner Theorie keine Rolle. Weaver betonte dies ausdrücklich indem er das Kommunikationsproblem grundsätzlich in drei Ebenen unterteilte: „In communication there seem to be problems at three levels: 1) technical, 2) semantic, and 3) influential“ (Weaver 1948: 11). In einer zweiten Version seines Textes, der dem Shannon-Artikel in einer Buchveröffentlichung 1949 vorangestellt wurde (Shannon/Weaver 1949) und auch in deutscher Übersetzung erschien (Shannon/Weaver 1976), verdeutlichte er dies folgendermaßen:

> „Bedingt durch das umfangreiche Gebiet der Kommunikation, scheint es Probleme in drei Ebenen zu geben. So erscheint es vernünftig, folgende drei Fragen zu stellen:
>
> - EBENE A: Wie genau können die Zeichen der Kommunikation übertragen werden? (Das technische Problem)
> - EBENE B.: Wie genau entsprechen die übertragenen Zeichen der gewünschten Bedeutung? (Das semantische Problem)
> - EBENE C: Wie effektiv beeinflußt die empfangene Nachricht das Verhalten in der gewünschten Weise? (Das Effektivitätsproblem)“ (Shannon/Weaver 1976: 12)

Shannon war nicht der erste Elektrotechniker auf der Suche nach einer wissenschaftlichen Theorie der Nachrichtenübertragung. Schon nach dem Ersten Weltkrieg hatte der ebenfalls in den *Bell Telephone Laboratories* arbeitende amerikanische Radio-Ingenieur Ralph Vinton Lyon Hartley (1888–1970) seine Telegraphentheorie im September 1927 auf dem *International Congress of Telegraphy and Telephony* am Comer See vorgestellt. In seinem Beitrag „Transmission of Information“ stellte er Einzelheiten für die Kriterien einer störungsfreien Signalübertragung zusammen (Hartley 1928): Ein einheitliches Konzept sollte die unterschiedlichen Übertragungstechniken zu vergleichen und bewerten erlauben: „What I hope to accomplish is to set up a quantitative measure whereby the capacities of various systems to transmit information may be compared. In doing this, I shall discuss its application to systems of telegraphy, telephony, picture transmission and television over both wire and radio paths“ (ebd.: 535). Es war auch Hartley, der den Ausdruck „theory of information“ in die

Kommunikationstechnologie einführte, denn seine Vorgänger benutzten noch die Ausdrücke „amount of intelligence“ und „transmission of intelligence“.[9] So fragte z. B. der ebenfalls bei *Bell* angestellte Harry Nyquist (1889–1976) noch in seiner 1924 erschienenen Arbeit nach der „maximum speed of transmission of intelligence by telegraph“, und sein besonderes Interesse galt dem Problem des „transmitting over a circuit the maximum amount of intelligence with a given number of signal elements“ (Nyquist 1924: 324).

Hartley formulierte folgende Forschungshypothese: „A system's ability to transmit any given sequence of symbols seemed to depend only upon whether the selections made on the transmission side could be recorded on the receiver side.“ Er betonte: „Yet this was completely independent of the symbols' meaning.“ Hartley führte auch als erster in diese „theory of information“ ein quantitatives Maß für die Informationsmenge ein, das er aus der Anzahl der überhaupt zu übertragen möglichen Nachrichten berechnete. Dabei ging er davon aus, dass die verschiedenen Zeichen auf der Empfängerseite für jede Auswahl von Zeichenfolgen gleich unterscheidbar sind. Für die praktischen Belange eines Ingenieurs sollte das Maß für die Information dann eine Proportionalität zwischen Information und Anzahl der Auswahlen aufzeigen (Hartley 1928: 539).

Wenn n die Anzahl der Zeichen in einer Nachricht und s die Menge der Zeichen ist, dann bezeichnet s^n die Anzahl der Zeichenfolgen der Länge n. Dieser Ausdruck s^n wäre zwar schon ein solches Maß, doch nach diesem Maß stiege die übertragene Informationsmenge exponentiell mit der Anzahl der Auswahlen solcher Zeichenfolgen und der Anteil jeder solcher Auswahl zur gesamten übertragenen Information stiege progressiv an. Da Hartley jedoch bei keinem der ihm bekannten physikalischen Nachrichtenübertragungssysteme einen exponentiellen Anstieg der technischen Gegebenheiten beobachtete, stellte er ein logarithmisches Übertragungsgesetz auf für die *Informationsmenge H* auf, das schon bald darauf „Hartley's Law“ genannt wurde:

$$H = K\ log\ s^n, \qquad K \text{ ist eine Konstante,}$$

Shannon entwickelte Hartleys Theorie zu einer „General Theory of Transmission and Transformation of Information“. Gleichzeitig arbeitete er in den 1940er Jahren an geheimen Binärcodes und deren Verbesserungsmöglichkeiten führten ihn auf folgende statistische Betrachtungen: Eine Quelle wählt aus einer Menge von Zeichen mit gewissen Wahrscheinlichkeiten aus. Unter der Annahme, dass sich die mit einem Zeichen verknüpfte Information erhöht, wenn seine Auftretenswahrscheinlichkeit steigt, last sich die Informationsmenge nach folgender Verallgemeinerung von „Hartley's law“ berechnen:

$$H_n = -\sum_i p_i\ log\ p_i$$

Dabei ist H_n die Informationsmenge, p_i sind die Wahrscheinlichkeiten für die Auswahlen eines der n Zeichen (i = 1, ... , n). Shannon benutzte den Logarithmus zur Basis 2, da elektrische Schalter zwei mögliche Positionen haben und binäre Entscheidungen so technisch realisierbar sind.

[9] Darauf hat schon William Aspray (1985) hingewiesen.

Die Informationsmenge einer Nachricht, die aus n binär codierten Zeichen besteht, ist demnach:

$$H_n = -\sum_i p_i \, log_2 \, p_i$$

Die Einheit für dieses „Maß der Information“ wurde ein „bit“ (binary digit) genannt.[10]

In seiner Darstellung von Shannons „Mathematical Theory of Communiction“, die bald auch „Information theory“ genannt wurde, unterstrich Warren Weaver ausdrücklich, dass alle Probleme der Ebenen B und C von Shannons Theorie überhaupt nicht berührt werden, dass daher der Begriff der Information nicht mit der „Bedeutung“ der Symbole identifiziert werden dürfe: „Tatsächlich können zwei Nachrichten, von denen eine von besonderer Bedeutung ist, während die andere bloßen Unsinn darstellt, in dem von uns gebrauchten Sinn genau die gleiche Menge an Information enthalten“ (Shannon/Weaver 1976: 18).

Ohne an dieser Stelle weiter auf die mathematische Theorie von Shannon einzugehen, soll hier noch eine der „Überlegungen zur Kommunikation auf den Ebenen B und C“ näher betrachtet werden, die Warren Weaver auf den letzten Seiten seines Artikels ansprach. Weaver hielt es dazu für erforderlich, das von Shannon vorgeschlagene Diagramm (Abbildung 1) zu ergänzen. Dazu möge man sich „einen weiteren Block vorstellen, der die Aufschrift ‚semantischer Empfänger’ trägt und der zwischen dem technischen Empfänger (der die Signale in Nachrichten umwandelt) und dem Ziel aufgestellt ist. Dieser semantische Empfänger unterwirft die Nachricht einer zweiten Decodierung, welche die statistisch-semantischen Eigenschaften den statistisch-*semantischen* Fähigkeiten der Gesamtheit der Empfänger anpassen soll oder jener Untermenge von Empfängern, die den Hörerkreis darstellen, den man beeinflussen will.“ (Shannon/Weaver 1976: 37) Auch für die andere Seite des Kommunikationsprozesses sah Weaver einen das ursprüngliche Schema ergänzenden „Block“ vor, der „zwischen der Nachrichtenquelle und dem Sender eingebaut, die Aufschrift ‚semantische Störung’ tragen würde, wobei der Block, der vorher einfach als Störung beschrieben wurde, jetzt die Aufschrift ‚technische Störung‘ trägt. Von dieser Quelle wird die Störung oder Entstellung der Bedeutung dem Signal aufgeprägt, welche von der Nachrichtenquelle nicht beabsichtigt ist, die jedoch unvermeidlich das Ziel beeinflußt. Das Problem der semantischen Decodierung muss eine solche semantische Störung in Betracht ziehen“ (Shannon/Weaver 1948: 379).[11]

Weaver war sich des vorläufigen Charakters seiner Überlegungen bewußt, denn „dies sollten nur erste Reaktionen sein, und am Schluß sollte man sagen, dass diese Sachlage so weit geklärt ist, dass man nun, vielleicht zum ersten Mal, für eine wirkliche Theorie der Bedeutung bereit ist“ (Shannon/Weaver 1976: 38). Weiter unten werden wir uns auf die Suche nach einer solchen Theorie der Bedeutung begeben, allerdings werden wir nicht auf dem von Weaver hier favorisierten statistischen Weg gehen, sondern die Theorie der Fuzzy Sets vorziehen. Zunächst soll diese Problematik allerdings in den Grundlagen der Wissenschaftsphilosophie diskutiert werden, denn in der Wissenschaft werden Aussagen, Hypothesen, Theorien mit Hilfe von Zeichen präsentiert und vermittelt und nur wenn auch deren Bedeutung übertragen wird, können die Zeichen vom Empfänger verstanden werden.

[10] Dieser Vorschlag kam von John Wilder Tukey (1915–2000), einem Statistiker an der Princeton University, der seit 1946 gleichzeitig für die *Bell Telephone Laboratories* tätig war.

[11] Übersetzung D.V.

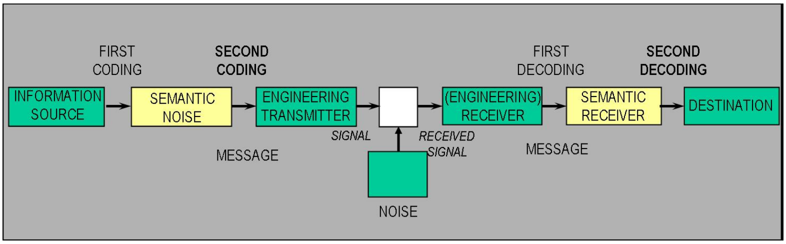

Abbildung 3. Das Kommunikationsschema von Shannon mit den zusätzlichen Elementen entsprechend den Überlegungen von Weaver

2 Theorie und Empirie

Wissenschaftliches Arbeiten hat theoretische und empirische Komponenten. Experimente werden entworfen, geplant und durchgeführt, kontrolliert und wiederholt, Theorien werden formuliert und entwickelt, Experimente sollen Theorien bestätigen oder widerlegen, Theorien werden beibehalten, verfeinert, abgeändert oder verworfen. In den Experimenten werden reale Systeme oder Phänomene beobachtet, sie werden Messungen unterworfen, um Daten zu „extrahieren". Es werden hypothetische Gesetze aufgestellt und Theorien eingeführt, die besagen, dass diese Gesetze für die gemessenen Daten gelten bzw. die beobachteten Systeme und Phänomene beschreiben. Wenn die Beobachtungen bzw. Daten mit den theoretischen Gesetzen zusammenpassen, dann ist die Theorie brauchbar, andernfalls nicht. Wie wird dieser Spagat zwischen Empirie und Theorie realisiert? Welcher Art ist die Verbindung zwischen theoretischen Größen und Beobachtungstermen? Wie bringen wir in der Wissenschaft Theorie und Realität zusammen?

Um die realen Systeme einer wissenschaftlichen Untersuchung zugänglich zu machen, bringt man sie also mit einer theoretischen Struktur in Verbindung, und dazu wird auch ihnen selbst eine Struktur zugeschrieben. „Wie dies genau geschieht, ist weithin unklar und darf wohl als eines der zentralen Probleme der Wissenschaftstheorie bezeichnet werden", schrieb der Wissenschaftstheoretiker Wolfgang Balzer (1982: 289), und weiter: „Das Problem besteht darin, einen Zusammenhang zwischen konkreten Systemen und ‚theoretischen' Strukturen herzustellen. Wir nehmen im Folgenden an, daß ein solcher Zusammenhang hergestellt werden kann. Ohne diese Annahme hat es keinen Sinn, von empirischer Wissenschaft zu reden." Die mit einer theoretischen Struktur verbundenen Systeme der Realität werden im *wissenschaftlichen Strukturalismus* (Balzer et al. 1987) „intendierte Systeme" der Theorie genannt.

Durch Messungen an den intendierten Systemen gewinnt der Wissenschaftler eine Datenstruktur, und daraus erstellt er ein Modell, das die Struktur des Systems darstellen soll. Oft wird in diesem Zusammenhang, in stark vereinfachter Ausdrucksweise, von einer „Abbildung der Realität durch Theorie" gesprochen.

Diese zwischen abstrakt formulierten Theorien und beobachteten realen Systemen bestehende und auch in der Elektrotechnik der 1940er Jahre deutlich gewordene Kluft war für den Elektroingenieur Lotfi A. Zadeh der Anlass, über eine „neue Mathematik" nachzudenken, die als eine Brücke über diese Kluft fungieren kann: „The mathematics of cloudy or fuzzy quantities ..." (Zadeh 1962), die er 1965 als Theorie der „Fuzzy Sets" in der Zeitschrift *In-*

formation and Control publizierte (Zadeh 1965a). Diese mathematische Theorie wird weiter unten diskutiert, doch zuvor werden mit den Zugängen von Heinrich Hertz, Ludwig Wittgenstein und Hans-Jörg Rheinberger drei historische Stadien der Wissenschaftsphilosophie vorgestellt.

2.1 Heinrich Hertz: Wenn der Verstand sich Bilder macht ...

Der Abstraktionsgrad moderner wissenschaftlicher Theorien ist sehr hoch. Dennoch (ge)brauchen auch moderne Wissenschaftler Bilder, auf die sie ihre empirischen Beobachtungsergebnisse reduzieren, um Theorien entwickeln zu können. Der deutsche Physiker Heinrich Rudolf Hertz (1857–1894) hat seine erkenntnisphilosophische Position in der Einleitung zu seinem Buch *Die Prinzipien der Mechanik in neuem Zusammenhange* dargestellt ausgeführt, das 1894 posthum von seinem Assistenten Philipp Lenhard (1862–1947) herausgegebenen wurde (Hertz 1996). Hertz, der vor 150 Jahren geboren und nur 36 Jahre alt wurde, hatte in den 1880er Jahren die von Michael Faraday (1791–1867) und James Clerk Maxwell (1831–1879) vorausgesagte Existenz elektromagnetischer Wellen nachgewiesen. Damit ist er einer der Wegbereiter heutiger Informations- und Kommunikationstechnologie.

Der breiten Öffentlichkeit weniger bekannt sind seine Überlegungen zur Naturerkenntnis, die er in dem genannten Buch entfaltete, und mit denen er „einen der großen klassischen Texte der Philosophie geschaffen“ hatte, wie sein Biograph Albrecht Fölsing (1997) schrieb. Bereits in seiner 1884 geschriebenen Kieler Vorlesung *Die Constitution der Materie*, die er allerdings zu seinen Lebzeiten nicht veröffentlichte, sondern erst von Fölsing (1999) herausgegeben wurde, hatte Hertz „eine Konzeption der ‚Bilder‘ zur Beschreibung der Wirklichkeit“ entwickelt, die er dann gut ein Jahrzehnt später in den *Prinzipien der Mechanik* modifizierte. 1884 war Hertz‘ Ausgangspunkt die Atomhypothese – die Frage war: Gibt es Atome oder sind sie nur eine mathematische Hilfskonstruktion? Hertz schrieb damals: „Ich kann mich darauf beschränken, es als meine Aufgabe zu betrachten, die sinnlich wahrnehmbaren Thatsachen möglichst einfach zu beschreiben, alles, was über die sinnliche Wahrnehmung hinausgeht, ist dann Fiction, die der Beschreibung dient und den Zweck hat, diese Beschreibung zu vereinfachen.“ Hertz betonte dann aber, dass Wissenschaftler oftmals ganz anders vorgehen:

> „Es ist eine allgemeine und nothwendige Eigenschaft des menschlichen Verstandes, daß wir uns die Dinge weder anschaulich vorstellen noch sie begrifflich definiren können, ohne ihnen Eigenschaften hinzuzufügen, die in ihnen an sich durchaus nicht vorhanden sind. Das geschieht nicht nur in allem Denken und Vorstellen des gewöhnlichen Lebens, auch die Wissenschaften verfahren nicht anders; einzig die Philosophie sucht und findet den Unterschied zwischen den Dingen, die wir wahrnehmen, aber sie sieht auch die Nothwendigkeit dieses Unterschiedes ein.“ (Hertz 1999: 35)

So müssen wir uns in der exakten Wissenschaft der Geometrie die Raumgebilde doch vorstellen, schreibt Hertz:

> „Aber alle diese sind solche, deren sinnliche Vorstellung unmöglich ist, wenn wir nicht ihnen Eigenschaften verleihen, von denen die Geometrie nichts wissen

> will, von denen wir ausdrücklich abstrahiren sollen. Wenn uns gesagt wird: stelle Dir eine unendlich dünne Kugelschale oder ein unendlich kleines Raumelement vor, so erscheinen vor unserem geistigen Auge die gewünschten Objecte, aber weder erscheinen dieselben unendlich dünn oder unendlich klein, noch ohne Farbe oder ohne andere Eigenschaften, die absolut dem eigentlich gewollten Object fremd sind." (Hertz 1999: 36)

Auf ähnliche Weise werden Physiker zu unmöglichen Vorstellungen aufgefordert: „Denke dir ein Atom als einen kugelförmigen mit Materie erfüllten Raum von 1 Millionstel mm Durchmesser [...] Freilich, wir können uns einen solchen Raum in wirklicher Größe nicht vorstellen, wir können ihn nicht erfüllt denken, ohne ihn mit Glas, Eisen oder irgend einer bestimmten Materie erfüllt zu denken, aber wir können doch uns klar machen, was von diesen Eigenschaften unwesentlich ist, und ein Kern wird bleiben, der die wesentlichen Eigenschaften, um die es uns zu thun ist, besitzt. Was wir hinzufügen, sind dann falsche Vorstellungen überhaupt; wir können sie nicht fortnehmen und bessere an ihre Stelle setzen, sondern wir müssen sie hinzuthun oder auf alle Vorstellungen in diesem Gebiete verzichten" (ebd.).

10 Jahre später nahm Hertz einen an entscheidender Stelle davon abweichenden erkenntnisphilosophischen Standpunkt ein, wie er in der Einleitung zu seinen *Prinzipien der Mechanik* formulierte, und der deutsche Mathematiker und Physiker Max Born (1882–1970) sah darin „wohl die erhellendsten Sätze über das Wesen der theoretischen Naturforschung überhaupt" (Born 1965) – sie lauten: „Es ist die nächste und in gewissem Sinne wichtigste Aufgabe unserer bewußten Naturerkenntnis, daß sie uns befähige, zukünftige Erfahrungen vorauszusehen" (Hertz 1999: 66). Born erläuterte dies 78 Jahre später für seine Zeit so: „mittels der theoretischen Systeme der Physik lassen sich nämlich Voraussagen ableiten, ‚zukünftige Erfahrungen vorauszusehen', wie es Hertz ausdrückte" (Born 1965). Hertz hatte geschrieben, dass uns das Voraussehen zukünftiger Erfahrungen dazu befähigt, „unser gegenwärtiges Handeln einrichten zu können" (Hertz 1999: 66). Unser wissenschaftliches Erkennen gründe nämlich auf unseren Erfahrungen, die unser Verstand in „Bilder" fasst. Hertz fand dann Worte, die Born für „wohl die knappste, klarste und treffendste Formulierung dessen, was unter der modernen Physik zu verstehen ist", hielt: „Wir machen uns innere Scheinbilder oder Symbole der äußeren Gegenstände, und zwar machen wir sie von solcher Art, daß die denknotwendigen Folgen der Bilder stets wieder die Bilder seien von den naturnotwendigen Folgen der abgebildeten Gegenstände" (Hertz 1996: 67). Dass es die dazu notwendige Übereinstimmung zwischen der Natur und unserem Geiste gibt, lehre uns die Erfahrung: *(Logisch) unzulässig* sind für Hertz jene Bilder, „die einen Widerspruch gegen die Gesetze unseres Denkens in sich tragen". Darüber hinaus können solche zulässigen Bilder *unrichtig* sein, „wenn ihre wesentlichen Beziehungen den Beziehungen der äußeren Dinge widersprechen". Es bleiben dann die „richtigen" Bilder übrig. Der Plural ist hier wichtig, denn es kann mehrere „richtige" Bilder" derselben äußeren Gegenstände geben, die sich aber hinsichtlich ihrer „Zweckmäßigkeit" unterscheiden:

> „Von zwei Bildern desselben Gegenstandes wird dasjenige das zweckmäßigere sein, welches mehr wesentliche Beziehungen des Gegenstandes widerspiegelt als das andere; welches, wie wir sagen wollen, das deutlichere ist. Bei gleicher Deutlichkeit wird von zwei Bildern dasjenige zweckmäßiger sein, welches neben den wesentlichen Zügen die geringere Zahl überflüssiger oder leerer Beziehungen enthält, welches also das einfachere ist." (Hertz 1996: 68)

Hertz' Auffassung von wissenschaftlichen Theorien als Bilder, die vom Verstand des Wissenschaftlers auf Grund bisher gesammelter Erfahrungen geschaffen werden, steht im Gegensatz zu der vorher herrschenden Ansicht, dass solche Theorien objektiv fest stehen und vom Wissenschaftler nur gefunden werden, und dass es nicht mehrere sondern nur eine richtige Theorie geben könne. Hertz' Erfahrungen mit der Elektrodynamik haben ihn gelehrt, dass es verschiedene Theorien mit unterschiedlichen Begriffssystemen geben, sich aber mit der Zeit auch eine Theorie durchsetzen kann (ein Versuch dies darzustellen ist Abbildung 4). In seiner „Bildersprache" formulierte er:

> „Was den Bildern zukommt um ihrer Richtigkeit willen, ist enthalten in den Erfahrungstatsachen, welche beim Aufbau der Bilder gedient haben. Was den Bildern zukommt damit sie zulässig seien, ist gegeben durch die Eigenschaften unseres Geistes. Ob ein Bild zulässig ist oder nicht, können wir eindeutig mit ja und nein entscheiden, und zwar mit Gültigkeit unserer Entscheidung für alle Zeiten. Ob ein Bild richtig ist oder nicht, kann ebenfalls eindeutig mit ja und nein entscheiden werden, aber nur nach dem Stand unserer gegenwärtigen Erfahrung und unter Zulassung der Berufung an spätere reifere Erfahrung. Ob ein Bild zweckmäßig sei oder nicht, dafür gibt es überhaupt keine eindeutige Entscheidung, sondern es können Meinungsverschiedenheiten bestehen. Das eine Bild kann nach der einen, das andere nach der andern Richtung Vorteile bieten, und nur durch allmähliches Prüfen vieler Bilder werden im Laufe der Zeit schließlich die zweckmäßigsten gewonnen." (ebd.: 68f)

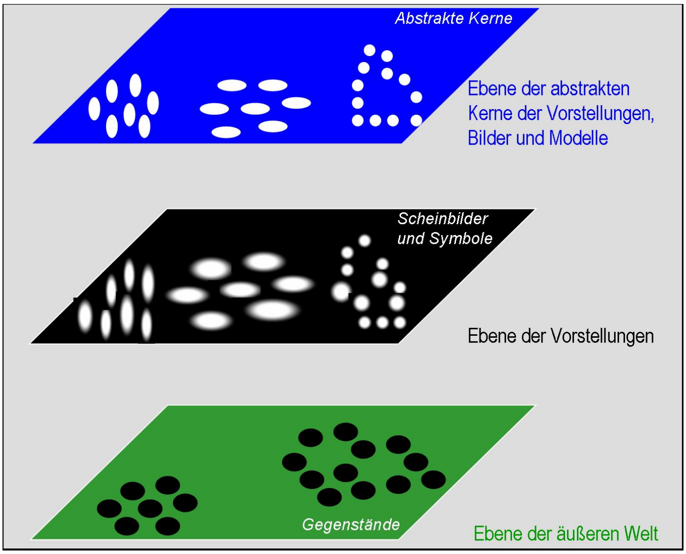

Abbildung 4. Versuch einer Darstellung der Erkenntnisphilosophie des frühen Heinrich Hertz. In der untersten Ebene befinden sich die Gegenstände der äußeren Welt, darüber liegt die Ebene der Scheinbilder. In der oberen Ebene befinden sich deren abstrakte „Kerne".

Hertz wandte sich dann, dem Titel seines Buchs gemäß, drei verschiedenen Bildern der Mechanik zu.[12] Leser aus dem nachfolgenden Jahrhundert konnten seine Erkenntnisphilosophie allerdings auch vor dem Hintergrund der damals neuen wissenschaftlichen Theorien, der Relativitätstheorie und der Quantenmechanik sehen, z. B. der schon oben zitierte Max Born, dessen Ausführungen Josef Kuczera in seinen Anmerkungen zum Hertz'schen Text paraphrasierte:

> „Der Physiker hat sich ein gedankliches, ‚abstraktes' Modell von der Natur zurechtgezimmert und versucht dabei, mit möglichst wenigen, einheitlichen Typen von ‚Bauklötzchen' auszukommen. Wie er aber damit sinnvoll ‚spielen' , also ‚operieren' dürfe, das sagt ihm der Mathematiker, indem er eine Auswahl von Rechenverfahren zur Verfügung stellt. Ob nun die ‚Bauklötzchen' , die Hertz ‚innere Scheinbilder' oder ‚Symbole' nennt, richtig geformt seien, das kontrolliere der Physiker im Experiment an der Natur selbst. Seine Experimente sind seine ‚Fragen an die Natur'. Die Versuchsaufbauten verraten dem Physiker, welches mathematische Rechenverfahren er für seine ‚Baukastenspiele' zugrundelegen dürfe. Jede mögliche ‚Operation' müsse in der Natur ihr Spiegelbild haben. Daß Baukästchen und Spielregeln manchmal geordnet werden müssten, haben die komplizierten Ergebnisse gezeigt, die den Anstoß für die Quanten- und Relativitätstheorie gaben. Für diese Wissenschaft sei es eine zentrale Aufgabe geworden, daß der Physiker versucht, mit immer einfacher geformten ‚Klötzchen' immer komplizierter werdende Sachverhalte seiner Wissenschaft darzustellen. Der Physiker hat sich eine *künstliche* Bilderwelt geschaffen, um *natürliche* Dinge und Erscheinungen zu beschreiben." (Hertz 1996: Anm. 35)

Ganz offensichtlich hatte Born die Vorstellungen und (Schein)Bilder von Hertz als mathematische Objekte angesehen und die von Hertz noch 1884 in *Die Constitution der Materie* (Hertz 1999) betonte Unterscheidung zwischen den Vorstellungen und ihren Kernen nicht gekannt. Abbildung 5 soll den Unterschied der späten Hertz'schen Erkenntnisphilosophie gegenüber seiner früheren (vgl. Abbildung 4) zeigen.

2.2 Ludwig Wittgenstein: Wenn unser Verstand sich Beulen holt ...

„Das Bild ist ein Modell der Wirklichkeit", „Das Bild ist eine Tatsache" und „Wir machen uns Bilder von den Tatsachen" schrieb Ludwig Wittgenstein (1889–1951) in seinem 1918 fertig gestellten und erstmals 1921 publizierten *Tractatus logico-philosophicus* (Wittgenstein 1963: 2.1, 2.12, 2.141). Diese Sätze bestätigten den in seinem Tagebuch erwähnten Einfluss von Hertz,*Prinzipien der Mechanik* auf Wittgensteins Denken (Wittgenstein 1984b: 476). Wittgensteins *Tractatus* beginnt mit den beiden Sätzen:

> 1. Die Welt ist alles, was der Fall ist.
> 1.1 Die Welt ist die Gesamtheit der Tatsachen, nicht der Dinge.
> (Wittgenstein 1963: 11)

[12] Auf diese Aspekte seiner Einleitung zu den Prinzipien der Mechanik kann hier leider nicht eingegangen werden. Siehe dazu Hertz (1996): 70–139.

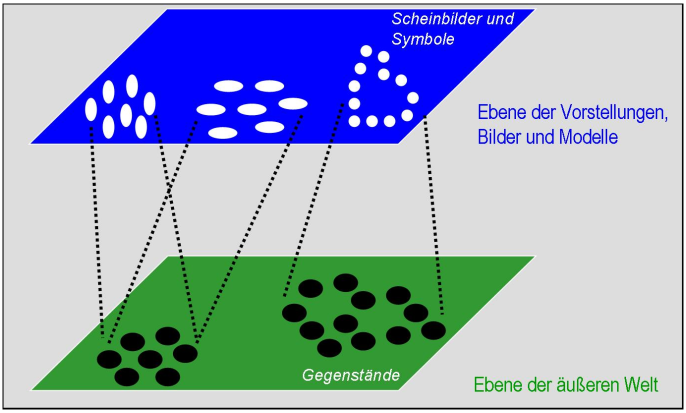

Abbildung 5. Gegenstände der äußeren Welt und die Scheinbilder (Symbole, Modelle), die nach Borns Interpretation mathematische Objekte sind.

Es folgen Sätze, die hier erläuternd zusammengefasst sind: Eine Tatsache ist ein bestehender Sachverhalt; ein Sachverhalt ist eine Verbindung von Gegenständen. Die Sprache wird als die Gesamtheit der Sätze aufgefasst. Umgangssprachliche Sätze sind komplexe Sätze. Sie werden durch logische Analyse auf einfache Sätze (Elementarsätze) zurückgeführt. Elementarsätze sind Verkettungen von Namen. Namen sind die einfachsten Zeichen (sie können nicht weiter durch andere Zeichen charakterisiert werden). Die Menschen benützen Sätze, um damit etwas mitzuteilen. Dazu muss ein Satz ein logisches Bild der Wirklichkeit sein. So folgen in Wittgensteins *Tractatus* die Sätze:

> 3. Das logische Bild der Tatsachen ist der Gedanke.
> 4. Der Gedanke ist der sinnvolle Satz.
> (Wittgenstein 1963: 19, 32)

Offenbar hatte sich Wittgenstein zu dieser Theorie durch das Nachstellen einer Unfallszene während einer Gerichtsverhandlung inspirieren lassen, wie einem seiner Tagebucheinträge zu entnehmen ist: „Im Satz wird eine Welt probeweise zusammengestellt. (Wie wenn im Pariser Gerichtssaal ein Automobilunglück mit Puppen etc. dargestellt wird.)“ (Wittgenstein 1984b: 29.9.1914). Da der übliche Sprachgebrauch allerdings sehr vage ist, vertrat Wittgenstein in seiner frühen Philosophie, die er im *Tractatus* formulierte, die Meinung, dass dieser Mangel durch die Konstruktion einer Präzisionssprache beseitigt werden müsse, eine exakte logische Sprache, die in der Lage ist, die Welt genau und eindeutig abzubilden. Von dieser Annahme einer idealen Abbildung der Gegenständen und Phänomenen der realen Welt durch eine präzise Sprache hatte er sich in seiner späten Philosophie allerdings abgewandt. Diese Wende wurde von dem zu Wittgensteins engsten Freunden zählenden amerikanischen Philosophen Norman Malcolm (1911–1990) in seinen *Erinnerungen an Wittgenstein* durch eine Schlüsselszene beschrieben: „Eines Tages [. . .] bestand Wittgenstein darauf, daß ein Satz und das, was er darstellt, dieselbe ‚logische Form‘, dieselbe ‚logische Mannigfaltigkeit‘ besitzen müssen. Sraffa machte eine Geste, wie sie den Neapolitanern geläufig ist, wenn sie so etwas wie Abscheu oder Verachtung ausdrücken wollen: Er fuhr mit den Fingerspitzen der nach außen gekehrten Hand über die Unterseite des Kinns und fragte: ‚Was ist die logische Form *davon*?' Sraffas Beispiel rief in Wittgenstein das Gefühl hervor, es sei absurd, darauf zu beharren, daß ein Satz und das, was er darstellt, dieselbe ‚Form' haben müssen. Dadurch löste er sich von der Auffassung, der Satz müsse buchstäblich ein ‚Bild' der Wirklichkeit sein, die er darstellt" (Malcolm 1987: 94).[13]

Offenbar müssen wir uns mit unserem vagen Sprachgebrauch abfinden. Somit bleiben Bilder, Modelle und Theorien, die wir mit den Worten und Sätzen unserer Sprache bilden, und mit denen wir kommunizieren „unscharf". Schon im *Blauen Buch*, das Wittgenstein seinen Freunden nach seiner Rückkehr aus Österreich nach Cambridge in den 1930er Jahren diktiert hatte, ist formuliert: „Wir sind unfähig, die Begriffe, die wir gebrauchen, klar zu umschreiben; nicht weil wir ihre wirkliche Definition nicht wissen, sondern weil sie keine wirkliche ‚Definition' haben. Die Ausnahme, daß sie eine solche Definition haben müssen, wäre wie die Ausnahme, daß ballspielende Kinder grundsätzlich nach strengen Regeln spielen" (Wittgenstein 1984a: 49). In dem seine Spätphilosophie charakterisierenden und erst nach seinem Tode veröffentlichten zweiten Hauptwerk *Philosophische Untersuchungen* hatte Wittgenstein dieses Beispiel vom Spielbegriff ausgearbeitet: „Betrachte z. B. einmal die Vorgänge, die wir ‚Spiele' nennen. Ich meine Brettspiele, Kartenspiele, Ballspiele, Kampfspiele, usw. Was ist allen diesen gemeinsam? – Sag nicht: ‚Es muß ihnen etwas gemeinsam sein, sonst hießen sie nicht ‚Spiele' ' – sondern schau, ob ihnen allen etwas gemeinsam ist. – Denn, wenn du sie anschaust, wirst du zwar nicht etwas sehen, was allen gemeinsam ist, aber du wirst Ähnlichkeiten, Verwandtschaften, sehen, und zwar eine ganze Reihe. Wie gesagt, denk nicht, sondern schau! – Schau z. B. die Brettspiele an, mit ihren mannigfachen Verwandtschaften. Nun geh zu den Kartenspielen über: hier findest du viele Entsprechungen mit jener ersten Klasse, aber viele gemeinsame Züge verschwinden, andere treten auf. Wenn wir nun zu den Ballspielen übergehen, so bleibt manches Gemeinsame erhalten, aber vieles geht verloren. – Sind sie alle unterhaltend? Vergleiche Schach mit dem Mühlfahren. Oder gibt es überall ein Gewinnen und Verlieren, oder eine Konkurrenz der Spielenden? Denk an die Patiencen. In den Ballspielen gibt es Gewinnen und Verlieren; aber wenn ein Kind den Ball an die Wand wirft und wieder auffängt, so ist dieser Zug verschwunden. [...] Und so können wir durch die vielen, vielen anderen Gruppen von Spielen gehen, Ähnlichkeiten auftauchen und verschwinden sehen. Und das Ergebnis dieser Betrachtung lautet nun: Wir sehen ein kompliziertes Netz von Ähnlichkeiten im Großen und Kleinen. [. . .] Ich kann diese Ähnlichkeiten nicht besser charakterisieren als durch das Wort ‚Familienähnlichkeiten' ; denn so übergreifen und kreuzen sich die verschiedenen Ähnlichkeiten, die zwischen den Gliedern einer Familie bestehen: Wuchs, Gesichtszüge, Augenfarbe, Gang, Temperatur, etc. etc. – Und ich werde sagen: die ‚Spiele' bilden eine Familie." (Wittgenstein 2003, 66, 67: 56f.)

In Abbildung 6 wurde versucht, das Verhältnis zwischen den Gegenständen und ihren Begriffs-Familien darzustellen. Es gibt keine scharfen Begriffe und die Wittgenstein'schen Begriffsfamilien entsprechen hier den Scheinbildern bzw. Vorstellungen aus der späten Hertz'schen Erkenntnisphilosophie (vgl. Abbildung 5).

[13] Der italienische Wirtschaftswissenschaftler Piero Sraffa (1898–1983) war ein wichtiger Gesprächspartner von Wittgenstein in Cambridge. Auf Vorschlag von John Maynard Keynes (1883–1946) kam er an das King's College nach Cambridge, nachdem er Italien verlassen musste. Ein Artikel, den er im *Manchester Guardian* publizierte, hatte Mussolinis Zorn erregt.

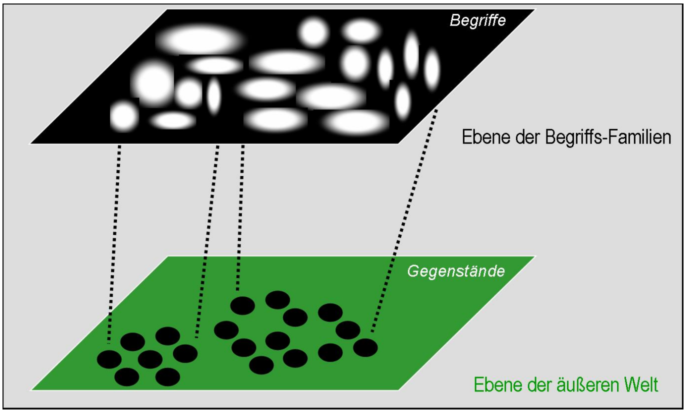

Abbildung 6. Versuch einer Darstellung der Erkenntnisphilosophie im Sinne von Wittgensteins *Philosophischen Untersuchungen*: Gegenstände der äußeren Welt und die sie bezeichnenden und Familien bildenden Begriffe.

Der späte Wittgenstein sah wie der späte Hertz keine über dieser Ebene liegende Schicht abstrakter oder scharfer „Kerne" dieser Vorstellungen bzw. Begriffsfamilien, die keine der „unwesentlichen Eigenschaften" mehr haben. Eine solche Ebene, die in der früheren Hertz'schen Philosophie noch gegeben war, hätte in Wittgensteins früherer *Tractatus*-Philosophie der exakten Sprache entsprochen, doch gab es dort keine Ebene der Begriffs-Familien. Der späte Wittgenstein ging davon aus, dass es keine exakte Sprache geben kann und die Begriffe unserer Sprache keine eindeutigen Abbilder der äußeren Gegenstände sind. Die Annahme solcher eindeutiger Abbildungen führte zu keinen nützlichen Resultaten: „Die Ergebnisse der Philosophie sind die Entdeckung irgendeines schlichten Unsinns und Beulen, die sich der Verstand beim Anrennen an die Grenzen der Sprache geholt hat. Sie, die Beulen, lassen uns den Wert jener Entdeckung erkennen." (Wittgenstein 2003, 119: 83) Wittgensteins altes „Bild" -Konzept war offenbar unscharf geworden.

2.3 Hans-Jörg Rheinberger: Wenn Begriffe im Fluß sind ...

Die Unschärfe wissenschaftliche Begriffe ist ein zentrales Moment der „Historischen Epistemologie" im Sinne Hans-Jörg Rheinbergers, die ebenso „Historisierung der Wissenschaftsphilosophie" wie „Epistemologisierung der Wissenschaftsgeschichte" ist (Rheinberger 2007). In den 1990er Jahren verknüpfte der Wissenschaftshistoriker und Molekularbiologe Rheinberger eine Epistemologie des modernen Experimentierens und eine Historiographie der Wissenschaft mit seiner Fallstudie zur Geschichte der „Proteinsynthese im Reagenzglas" (Rheinberger 2001; 1992a; 1992b). Später arbeitete er diesen molekularbiologiehistorischen Ansatz zu einer allgemeinen Sicht auf die Wissenschaftsentwicklung aus. Darin finden die beiden Komponenten wissenschaftlicher Forschung, Theorie und Empirie, ihre Entsprechungen in von Rheinberger so genannten „epistemischen" bzw. „technischen Dingen", die „verschwommen" und „vage" seien und als „voneinander nicht trennbare Strukturen ineinandergreifen" (Rheinberger 2001: 24). „Gegenstand der Forschung im engeren Sinne, Wissensobjekt oder auch epistemisches Ding" seien Bezeichnungen für die Strukturen, „denen die Anstrengung des Wissens gilt" und sie „präsentieren sich [...] in einer für sie charakteristischen, irreduziblen Verschwommenheit und Vagheit" (Rheinberger 2001).

Die „technischen Dinge" sind deren „stabile Umgebungen", es sind „die Experimentalbedingungen", dazu zählen beispielsweise „Instrumente, Aufzeichnungsapparaturen und, in den biologischen Wissenschaften besonders wichtig, standardisierte Modellorganismen mitsamt den in ihnen sozusagen verknöcherten Wissensbeständen". Von diesen technischen Dingen werden die epistemischen Dinge „eingefaßt und dadurch in übergreifende Felder von epistemischen Praktiken und materiellen Wissenskulturen eingefügt. [...] Bei näherem Hinsehen stellt sich aber heraus, dass die beiden Komponenten eines Experimentalsystems zeitlich wie räumlich in ein nicht-triviales Wechselspiel verwickelt sind, in dessen Verlauf sie sich ineinander schieben, auseinanderstreben und auch ihre Rollen tauschen können" (ebd.).

Schon in seiner im Jahr 2000 erschienenen historischen Betrachtung des Gen-Begriffs sah Rheinberger die Ziele wissenschaftlicher Forschung in der Betrachtung „epistemischer Dinge", die allerdings keiner logischen Schärfe im Sinne von Exaktheit, Eindeutigkeit und scharfer Abgrenzung genügen:

> „If there are concepts endowed with organizing power in a research field, they are embedded in experimental operations. The practices in which the sciences are grounded engender epistemic objects, epistemic things as I call them, as targets of research. Despite their vagueness, these entities move the world of science. As a rule, disciplines become organized around one or a few of these 'boundary objects' that underlie the conceptual translation between different domains." (Rheinberger 2000: 220)

In seiner Geschichte der Gen-Begriffe resümmierte Rheinberger:

> „More than a hundred years of genetic research have rather resulted in the proliferation of a variety of gene concepts, which sometimes complement, sometimes contradict each other. Some philosophers and scientists have tried to remedy this situation by reducing this variety of gene concepts, either 'vertically' to a fundamental unit, or 'horizontally' by subsuming them under a general term [...]. Others have opted for more pluralist stances. As a consequence, 'the gene' has become a hot topic in philosophy of science around which questions of reduction, emergence, or supervenience of concepts and theories (along with the epistemic entities they refer to) are lively debated. So far, however, all attempts to reach a consensus regarding these questions have been unsuccessful. Today, along with the completion of the human genome sequence and the beginning of what is being called the era of postgenomics, genetics is again experiencing a time of conceptual change, voices even being raised to abandon the concept of the gene altogether in favor of new terminologies [...]. The concept of the gene, emerging out of a century of genetic research, has been and continues to be, as Raphael Falk has reminded us not so long ago, a 'concept in tension'." (Rheinberger/Müller-Wille 2010)[14]

Neben dem „Gen" als „epistemischem Ding" der Biologiegeschichte identifizierte Rheinberger bald auch andere „fluktuierende" Begriffe in der Wissenschaftsgeschichte, denn die

[14] Rheinberger verwies hier auf Falk (2000).

„spezifischen experimentellen Praktiken moderner Forschungsgebiete“ führten die Wissenschaftler „zu Begriffen, die eng mit den Objekten der Forschung verbunden sind. Als solche stellen sie Attraktoren dar, die trotz – vermutlich sogar wegen – ihrer Unschärfe eine mehr oder weniger ausgeprägte Orientierungsmacht entfalten und die Welt der Forschung vorantreiben. Mitunter bilden sich ganze Disziplinen um eines oder wenige dieser unscharf definierten epistemischen Objekte; sie vermitteln damit die Abgrenzungen und Übergänge zu benachbarten Gebieten. In der Physik war das Atom lange Zeit ein solches Objekt; in der Chemie das Molekül; in der Evolutionsbiologie, zu einem gewissen Grad die Art; und in der klassischen Genetik übernahm das Gen diese Funktion“ (Rheinberger 1999). Doch epistemische Dinge sind die nicht unbedingt Dinge in der engen Bedeutung des Wortes, ein epistemisches Dinge kann auch sein: „a physical structure, a chemical reaction, a biological function whose elucidation is at the centre of the investigative effort. Since it is not and cannot be fixed from the beginning, it represents itself in a characteristic, irreducible vagueness, which is inevitable since it translates the fact that one does not exactly know what one is looking for“ (Rheinberger 1992b: 310).

Rheinberger sieht nun aber „nicht die Aufgabe von Epistemologen [darin], unscharfe wissenschaftliche Begriffe zu kritisieren oder präzisere Bedeutungen vorzuschlagen – etwa in der gut gemeinten Absicht, den Wissenschaftlern zu helfen, ihre Gedanken zu ordnen und exaktere Wissenschaft mit exakteren Begriffen zu treiben. Dringend für beide Seiten ist vielmehr die Frage, wie und warum verschwommene Konzepte, unfertige oder überschießende Bedeutungen in der Wissenschaft positiv wirksam sein können“ (Rheinberger 1999). Gerade wegen der Unschärfe der epistemischen Objekte und ihrer Begriffe liege im wissenschaftlichen Fortschritt „eine Spannung, in der auch ihre Produktivität liegt“. Mit unscharfen Begriffen tasten sich die Wissenschaftler in „den Bereich dessen vor, was wir gerade noch nicht wissen, und werden dadurch zu Instrumenten der Forschung“. Rheinberger nennt diese Spannung „gebändigten Überschuss“ und erinnert an das in ähnlichem Zusammenhang von dem französischen Genetiker François Jacob (geb. 1920) benutzte „jeu des possible“.

Schließlich verweist er auf Entwicklungen der KI-Forschung und angrenzender Disziplinen. Hier gebe es Bemühungen, sich „über die Bedeutung von Ungenauigkeit in der Wissenschaft genauer zu verständigen, also Unschärfe nicht generell zu verwerfen, sondern sie als epistemische Möglichkeit zu thematisieren“. Dann zitiert er Lotfi Zadeh, den Begründer der Theorie der Fuzzy Sets, mit dessen Behauptung, dass „es ein rasch wachsendes Interesse an unexaktem Denken und an der Verarbeitung von ungenauem, unvollständigem oder nicht ganz zuverlässigem Wissen gibt. Genau in diesem Zusammenhang wird sich auch die Überzeugung durchsetzen, dass klassische logische Systeme mit Unbestimmtheit nicht adäquat umgehen können und dass für diesen Zweck eine Art 'Fuzzy Logic' gebraucht wird“ (Rheinberger 1999).

In einer englischsprachigen Publikation argumentierte Rheinberger noch etwas weiter, indem er auf die Frage antwortete, „whether we need, in order to understand conceptual tinkering in research, more rigid metaconcepts than those first-order concepts that we, as epistemologists, analyze. I am inclined to deny this. Why should historians and epistemologists be less imprecise, less operational, and less opportunistic after all, than scientists?“ (Rheinberger 2000: 236).

Wie sieht die hier erwähnte „Fuzzy Logik“ aus? Kann mit ihrer Hilfe die Unschärfe von Mengen, Begriffen, Strukturen erfasst werden? Können wir mit Fuzzy Logik die scharfen Begrenzungen unserer Begriffe auflösen, die Frege doch strengstens verlangt hatte? Behauptete dieser doch: „[O]hne vollständige und endgültige Definitionen hat man keinen festen Boden unter den Füssen, ist man der Geltung seiner Lehrsätze nicht sicher, kann man nicht zuversichtlich die logischen Gesetze anwenden, die ja die scharfe Begrenzung der Begriffe und also auch der Beziehungen zur Voraussetzung haben".

3 Eine mathematische Theorie unscharfer Mengen: Fuzzy Sets and Systems

Lotfi A. Zadeh (geb. 1922)[15] führte zur Hälfte der 1960er Jahre eine mathematische Theorie „unscharfer Mengen" ein. Solche Fuzzy Sets sind „Objekte unserer Anschauung oder unseres Denkens", die nur graduell Elemente einer Menge zu sein brauchen.[16] Den Grad der Zugehörigkeit jedes Objekts zu einem fuzzy set gibt dessen „Zugehörigkeitsfunktion" an:

> *Definition*: „A *fuzzy set* (class) A in X is characterized by a *membership (characteristic) function* $f_A(x)$ which associates with each point in X a real number in the interval [0,1], with the value of $f_A(x)$ at x representing the ‚grade of membership' of x in A." (Zadeh 1965a: 339)

Der damit reichhaltiger gewordene mathematische „Werkzeugkasten" enthält nun auch eine umkehrbar eindeutige Entsprechung zwischen unscharfen Mengen und Funktionen. Sei A ein fuzzy set, dann ist

$$f_A(x) = \begin{cases} 1 & \text{wenn} & x \in A \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \text{wenn} & x \notin A \end{cases}$$

ihre *Zugehörigkeitsfunktion*.[17] Und mit Hilfe dieser Zugehörigkeitsfunktionen definierte Zadeh neues mathematisches Werkzeug:

- Zwei Fuzzy Sets A und B in einem Raum X sind gleich, $A = B$, genau dann, wenn gilt: $\mu_A(x) = \mu_B(x)$ für alle $x \in X$.
- Ein Fuzzy Set A ist *Teilmenge* eines Fuzzy Set B, $A \subseteq B$, genau dann, wenn gilt: $\mu_A(x) \leq \mu_B(x)$ für alle $x \in X$.
- Das *Komplement* A' eines Fuzzy Set A ist definiert durch: $\mu'_A(x) = 1 - \mu_A(x)$ für alle $x \in X$.

[15] Lotfi A. Zadeh wurde in Baku in Aserbaidschan geboren, doch 1931 zog seine Familie nach Teheran, wo Zadeh ein Elektrotechnik-Studium begann. 1944 emigrierte er in die USA. Dort setzte er bis 1946 sein Studium am MIT fort, promovierte 1949 an der Columbia-Universität in New York, und wurde 1959 Professor an der University of California, Berkeley. Den Artikel *Fuzzy Sets* schrieb er dort im Jahre 1964 (Zadeh 1965a). Zur Biographie Lotfi A. Zadehs sowie zur Geschichte Theorie der *Fuzzy Sets and Systems* und ihrer ersten Anwendungen siehe ausführlich Seising (2005).

[16] Zadeh schreibt zu Anfang des Textes: "As will be seen in the sequel, the notion of a fuzzy set provides a convenient point of departure for the construction of a conceptual framework which parallels in many respects the framework used in the case of ordinary sets, but is more general than the latter potentially, may prove to have a much wider scope of applicability" (Zadeh 1965a: 339).

[17] Die von Zadeh ursprünglich verwendete Bezeichnung $f_A(x)$ wird in der Literatur üblicherweise durch die Bezeichnung $\mu_A(x)$ rsetzt. Wir folgen im weiteren Verlauf dieser Konvention.

- Die *Vereinigung* zweier Fuzzy Sets A und B wird mit $A \cup B$ bezeichnet. Sie ist als das kleinste Fuzzy Set definiert, das sowohl A als auch B enthält. Die Zugehörigkeitsfunktion von $A \cup B$ ist $\mu_{A \cup B}(x) = \max\,[\mu_A(x), \mu_B(x)]$.

- Die *Durchschnitt* zweier Fuzzy Sets A und B wird mit $A \cap B$ bezeichnet. Sie ist als das größte Fuzzy Set definiert, das sowohl in A als auch in B enthalten ist. Die Zugehörigkeitsfunktion von $A \cap B$ ist $\mu_{A \cap B}(x) = \min\,[\mu_A(x), \mu_B(x)]$.

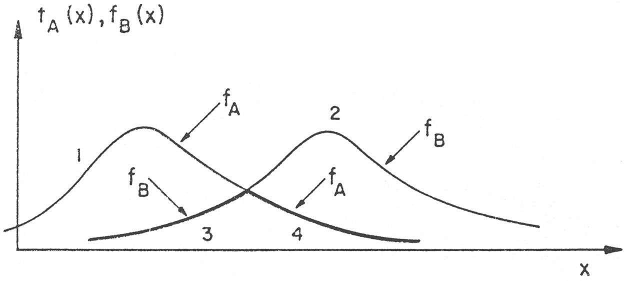

Abbildung 7. Illustration der Vereinigung und des Durchschnitt von Fuzzy Sets A und B in den eindimensionellen rellen Zahlen R^1. Die Zugehörigkeitsfunktion $f_{A \cup B}(x)$ der Vereinigung ist das Maximum beider Zugehörigkeitsfunktionen (max($f_A(x)$, $f_B(x)$)), zusammengesetzt aus den Kurvenabschnitten 1 und 2, die des Durchschnitts ($f_{A \cap B}(x)$) ist das entsprechende Minimum (min ($f_A(x)$, $f_B(x)$)), zusammengesetzt aus den Kurvenabschnitten 3 und 4.

Zadeh hatte genau an der von Cantor zwischen *konsistenten* und *inkonsistenten* Vielheiten gezogenen Trennungslinie weiter gedacht.[18] Seine Fuzzy Set–Theorie zielt auf die Klassen von Objekten *in der realen Welt*, deren Zugehörigkeitskriterien nicht scharf sind. Diese Unschärfe rührt daher, dass wir die „Zusammenfassungen von Objekten unserer Anschauung oder unseres Denkens“ sprachlich beschreiben müssen; als Illustrationsbeispiele dienten ihm die Klassen der großen Männer, der schönen Frauen oder der Zahlen, die viel größer als 10 sind. Der Anlass, sich mit solchen „unscharfen Mengen“ zu beschäftigen, waren allerdings Anwendungsprobleme der Systemtheorie in der Elektrotechnik.

Zadeh war und ist kein Philosoph und auch weder Logiker noch Mathematiker sondern ein mathematisch denkender Elektroingenieur. In den 1940er und 1950er Jahren war er noch fest davon überzeugt, dass die herkömmliche Mathematik für die Analyse fast aller von Menschenhand gefertigten Systeme und darüber hinaus auch der natürlichen Systeme ausreiche. Seit seiner Assistentenzeit an der Columbia University in New York (1946–1958) arbeitete er mit Methoden der Systemtheorie, die damals noch keine etablierte Disziplin in den Ingenieurwissenschaften war. 1963 erschien sein gemeinsam mit seinem Kollegen Charles Desoer geschriebenes Lehrbuch *Linear System Theory* (Rosenblatt 1985). Während der Arbeit daran wurde Zadeh bewusst, dass die konventionelle Mathematik der Analyse komplexer Systeme nicht angemessen war. Als er 1962 in einem Zeitschriftenaufsatz einen

[18] Siehe dazu die Einleitung in diesem Text.

Überblick über die damaligen Entwicklungen in der Elektrotechnik *From Circuit Theory to System Theory* gab, stellte er zunächst die Bedeutung der Systemtheorie heraus:

> „It has been brought about, largely within the past two decades, by the great progress in our understanding of the behaviour of both inanimate and animate systems – progress which resulted on the one hand from a vast expansion in the scientific and technological activities directed toward the development of highly complex systems for such purposes as automatic control, pattern recognition, data-processing, communication, and machine computation, and, on the other hand, by attempts at quantitative analyses of the extremely complex animate and man-machine systems which are encountered in biology, neurophysiology, econometrics, operations research and other fields.“ (Zadeh 1962: 856f.)

Dann allerdings betonte er seine inzwischen gefestigte Ansicht, dass die Methoden der konventionellen Mathematik für die Analyse großer und komplexer Systeme nicht geeignet seien und bessere Methoden gefunden werden müssen:

> „In fact, there is a fairly wide gap between what might be regarded as 'animate' system theorists and 'inanimate' system theorists at the present time, and it is not at all certain that this gap will be narrowed, much less closed, in the near future. There are some who feel that this gap reflects the fundamental inadequacy of the conventional mathematics – the mathematics of precisely-defined points, functions, sets, probability measures, etc. - for coping with the analysis of biological systems, and that to deal effectively with such systems, which are generally orders of magnitude more complex than man-made systems, we need a radically different kind of mathematics, the mathematics of fuzzy or cloudy quantities which are not describable in terms of probability distributions. Indeed, the need for such mathematics is becoming increasingly apparent even in the realm of inanimate systems, for in most practical cases the *a priori* data as well as the criteria by which the performance of a man-made system is judged are far from being precisely specified or having accurately-known probability distributions.“ (Zadeh 1962: 857)

Im Sommer 1964 hielt Zadeh auf der Wright-Patterson Air Force Base in Dayton, Ohio einen Vortrag über Mustererkennung. Die Erkennung bzw. Trennung und Klassifikation von Mustern war damals ins Zentrum des Aufgabenbereichs der Computer gerückt worden, nachdem Frank Rosenblatt (1985) sein *Perceptron* als erste Maschine vorgestellt hatte, die Muster klassifizieren könne. Das Militär hatte großes Interesse an mathematischen Formalismen zur maschinellen Lösung von Abstraktionsaufgaben wie z. B. die der Musterklassifikation und Zadeh präsentierte seine Idee, zur Separation von Mustern – oder Mengen von Punkten bzw. realisierten „Punktmannigfaltigkeiten“, wenn man nochmals Cantors Begriff benützen möchte – in einem n-dimensionalen Euklidischen Raum) eine graduelle Zugehörigkeit von Punkten zu einem Muster einzuführen (Abbildung 8):

> „For example, suppose that we are concerned with devising a test for differentiating between handwritten letters O and D. One approach to this problem would be to give a set of handwritten letters and indicate their grades of membership

in the fuzzy sets O and D. On performing abstraction on these samples, one obtains the estimates $\tilde{\mu}_0$ and $\tilde{\mu}_D$ of μ_0 and μ_D respectively. Then given a letter x which is not one of the given samples, one can calculate its grades of membership in O and D, and, if O and D have no overlap, classify x in O or D.“ (Zadeh 1965b: 30)

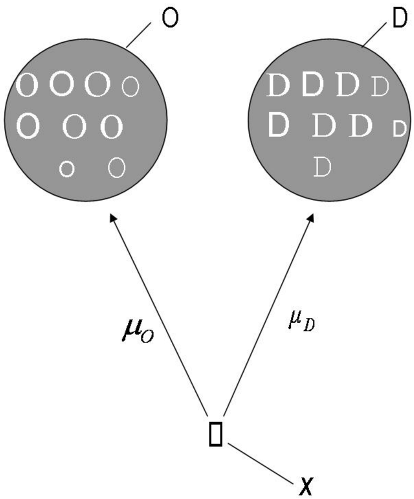

Abbildung 8. Illustration zu Zadehs Vorschlag der Musterklassifikation: Das Zeichen gehört mit Zugehörigkeitsgrad μ_O zum Fuzzy Set der O’s und mit Zugehörigkeitsgrad μ_D zum Fuzzy Set der D’s.

In den darauffolgenden Wochen diskutierte Zadeh diese Idee mit seinem Freund Richard Bellman (1920–1984) und dann schrieb er das Manuskript „Abstraction and Pattern Classification“, für das von Bellman herausgegebene *Journal of Mathematical Analysis and Applications*. Dieser Artikel erschien erst 1966 (Bellman et al. 1966), aber als Memorandum für die *RAND*-Corporation schon im Oktober 1964 (Bellman et al. 1964).[19] Für seinen Vortrag „A New View on System Theory“ auf dem *Symposium on System Theory*, das im April 1965 am Polytechnic Institute in Brooklyn stattfand, arbeitete Zadeh seine Idee der „Zugehörigkeitsgrade zu einer verallgemeinerten Systemtheorie“ aus, indem er den Begriff des „Fuzzy Systems“ einführte:

Definition: „A system S is a fuzzy system if (input) u(t), output y(t), or state x(t) of S or any combination of them ranges over fuzzy sets.“ (Zadeh 1965b: 33)

[19] Da es sich bei diesem Text um ein *RAND*-Memorandum handelte, sind die *RAND*-Mitarbeiter Bellman und dessen Mitarbeiter Kalman Co-Autoren, obwohl der Text von Zadeh allein geschreiben wurde.

Anders als der Vortragstitel hieß Zadehs Beitrag in dem im Folgejahr erschienenen Proceedingsband dann „Fuzzy Sets and Systems“ (Zadeh 1965b) und bereits 1965 war der berühmte Artikel „Fuzzy Sets“ erschienen (Zadeh 1965a). Zadeh erklärt, dass sich die Begriffe der Fuzzy Set Theorie auf solchen Situationen bezögen, in denen die Ungenauigkeit nicht in einer Zufallsvariable oder einem stochastischen Prozess begründet liege, sondern in einer Klasse oder Menge, die keine scharfen Grenzen habe (Zadeh 1965b: 29): „the difference between stochastic and fuzzy systems is that in the latter the source of imprecision is nonstatistical in nature and has to do with the lack of sharp boundaries of the classes entering into the descriptions of the input, output or state“ (Zadeh 1965b: 33). Joseph Goguen (1941–2006), ein Doktorand von Zadeh konstruierte dann in den 1960er Jahren eine „Non-Cantorian Set Theory“ als „logic of inexact concepts“ (Goguen 1967; 1968; 1969), für die der Linguist und Berkeley-Professor George Lakoff (geb. 1941) in seinem 1973 erschienenen Aufsatz „Hedges: A Study in Meaning Criteria and the Logic of Fuzzy Concepts“ den Namen „fuzzy logic“ prägte (Lakoff 1973). Dieser Artikel bezog sich auf Zadehs ein Jahr zuvor veröffentlichten Artikel „A Fuzzy-Set-Theoretic Interpretation of Linguistic Hedges“ (Zadeh 1972), in dem er hervorhob, dass die Menschen ihre Wahrnehmungen und Beobachtungen der Systeme und Phänomene in der realen Welt mit den Mitteln der natürliche Sprachen ausdrücken. Im Gegensatz zur klassischen Logik und zu künstlichen Sprachen, die zu dieser Zeit in den Computerwissenschaften aufkamen, würden aber weder die natürlichen Sprachen noch die Fuzzy Logik als allgemeine Werkzeuge der Wissenschaft berücksichtigt. Damit verwies Zadeh auf die Diskrepanz zwischen der Unschärfe menschlicher Wahrnehmungen aus der realen Welt und dem Exaktheitsanspruch der Wissenschaft. Zur Beschreibung der linguistischen Fuzziness benutzte er die Bezeichnungn „hedges“ für Ausdrücke wie z. B. „very“, „somewhat“, „quite“, „much“, „more or less“, „sort of“, „essentially“, die er in seiner Theorie der Fuzzy Sets als Operatoren interpretierte – „operators acting on fuzzy subsets of the universe of discourse“ (Zadeh 1973: 468).

Die von Zadeh im gleichen Jahr in sein Theoriengebäude für die Fuzzy Sets eingeführten „linguistischen Variablen“ werden nicht mit Zahlen sondern mit natürlich- oder auch künstlichsprachigen Worten oder Sätzen bewertet, z. B. „nicht sehr groß“, „sehr groß“ oder „dick“, „nicht dick“ oder „schnell“, „sehr langsam“. Solche linguistischen Werte sind Fuzzy Sets (fuzzy restrictions) die auf der Grundvariable (base variable) definiert sind, und den linguistischen Variablen, z. B. Größe, Dicke oder Geschwindigkeit zukommen. Zadeh illustriert diese Begriffe anhand der linguistischen Variable „Age“ mit den fuzzy restrictions „very young“, „young“, „old“ (Abbildung 9).

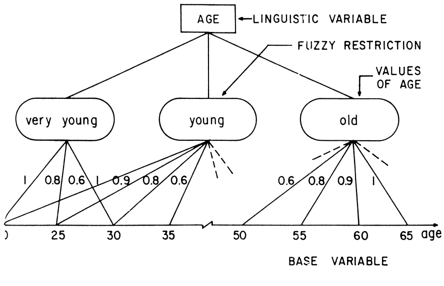

Abbildung 9. Hierarchische Struktur einer linguistischen Varaiablen (Zadeh 1975: 204).

Die möglichen Werte linguistischer Variablen wie etwa „young“, „very young“, „not very young“, „somewhat old“, „more or less young“, sind Ausdrücke, die sich aus der Bezeichung „old“, der Negation „not“, und den „hedges“ „very“, „somewhat“ und „more or less“ zusammensetzen lassen. Zadeh betrachtete linguistische Variablen als angemessene Werkzeuge, um ohne exakte Werte schlußfolgern zu können. Da die Messung oder Berechnung exakter Werte in vielen Fällen nicht möglich oder zu zeitintensiv oder teuer sei, habe sich das Konzept der linguistischen Variablen in vielen Fuzzy-Anwendungssystemen, z. B. in Regelungs- und Entscheidungssystemen erfolgreich bewährt (Zadeh 1974). Das im Gegensatz zum Rechnen mit Zahlen durch den Gebrauch der linguistischen Variablen möglich gewordene „Computing with Words“ sei somit ein Instrument des „unscharfes Schliessen“ geworden. Zukünftige Computer sollten auch die Information auf der Basis von Fuzzy Logik verarbeiten, um komplexe Probleme lösen zu können. „Making Computers Think like People“ (Zadeh 1984) ist Zadehs Motto seit den 1980er Jahren, in denen auch die ersten großen Fuzzy-Konferenzen und Fuzzy-Fachzeitschriften gegründet wurden. Dies war vor allem auf den großen Erfolg von Zadehs Theorie in Japan zurückzuführen, denn hier wurde eine Vielzahl von Haushaltsgegenständen, die mit Fuzzy-Regelung funktionieren (Reiskocher, Kameras, Waschmaschinen, etc.) mit immensem Werbeeinsatz auf den Markt gebracht. Dort war „Fuzzy“ damals ein Synonym für den wissenschaftlich-technologischen Fortschritt. Höhepunkt dieses fernöstlichen „Fuzzy Booms“ war die Inbetriebnahme der fuzzy-geregelten U-Bahn in der Großstadt Sendai.

Im ersten Jahrzehnt des 21. Jahrhunderts ist der „Fuzzy Boom“ längst vorbei, der Enthusiasmus abgeflaut und die Fuzzy Set–Theorie in Wissenschaft und Industrie Normalität geworden. Viele Techniker verwenden Fuzzy-Methoden, wenn die „klassische“ Mathematik zu kompliziert wird, zu lange Rechenzeiten erforderlich macht, oder kein Modell für das reale System bietet.

Niemand hat die Mathematiker aus dem Paradies vertrieben, wie Hilbert 1925 befürchtete, aber 40 Jahre später hatte Zadeh einen Weg für Ausreisewillige gefunden, der in die Mathematik der realen Welt führte und den Wissenschaftlern, die ihn gingen, neue, wenn auch nur noch annähernd paradiesische Möglichkeiten eröffnete – dafür aber die Freiheit, neues Terrain zu betreten: Ausgehend von den Fuzzy Sets kam es bald zu weiteren schöpferischen Akten, und so gibt es mittlerweile viele „fuzzifizierte“ mathematische Disziplinen: Fuzzy Topologie, Fuzzy Algebra, Fuzzy Differentialgleichungen, Fuzzy Wahrscheinlichkeitstheorie usw.

Der große Erfolg den die Fuzzy Set Theorie in Wissenschaft und Technik zu verzeichnen hat, zeigt sich auch in den Zahlen der Veöffentlichungen und Patente: Es gibt derzeit 22 gelistete wissenschaftliche Zeitschriften, die das Wort „fuzzy“ im Titel tragen.[20]

[20] Fuzzy Sets and Systems, IEEE Transactions on Fuzzy Systems, Fuzzy Optimization and Decision Making, Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, Fuzzy Economic Review, International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems, Journal of Japan Society for Fuzzy Theory and Systems, International Journal of Fuzzy Systems, International Review of Fuzzy Mathematics, Fuzzy Systems and Soft Computing, Turkish Journal of Fuzzy Systems, Annals of Fuzzy Sets, Fuzzy Logic and Fuzzy Systems, Iranian Journal of Fuzzy Systems, Fuzzy Information and Engineering, Advances in Fuzzy Systems, International Journal of Fuzzy System Applications, Advances in Fuzzy Sets and Systems, International Journal of Fuzzy Systems and Rough Systems, International Journal of Fuzzy Logic Systems, Journal of Biomedical Fuzzy Systems Association, Advances in Fuzzy Mathematics, Journal of Fuzzy Mathematics.

Die Anzahl der Publikationen mit dem Wort „fuzzy“ im Titel stiegen seit Begründung der Fuzzy Set Theorie rasant. Die Datenbanken INSPEC und MATH.SCI.NET gaben für den 29. März 2011 folgende Zahlen aus:

INSPEC Database		MathSciNet Database	
1970–1979:	521	1970–1979:	446
1980–1989:	2 163	1980–1989:	2 474
1990–1999:	20 210	1990–1999:	5 525
2000–2009:	42 079	2000–2009:	10 161
2010–heute:	10 506	2010–heute:	845
Total:	75 479	Total:	19 451

Die Zahl der Artikel, die das Wort „fuzzy“ im Title haben beträgt nach Google Scholar zurzeit 237000 und die bisherigen Zitationen von L. A. Zadehs Artikeln wird vom „Web of Science“ mit 29 225 angegeben, Google Scholar findet dagegen 88700. Allein Zadehs erster Artikel „Fuzzy sets“ in der Zeitschrift Information and Control aus dem Jahre 1965 wurde laut Google Scholar bisher 26088 mal zitiert. Die Zahl der Patente, für die Fuzzy Technologie wesentliches Merkmal ist, wird zurzeit mit 22541 für Japan und mit 33022 für die USA angegeben.

4 Von „Computing with Numbers“ zum „Computing with Words“

Ein Kennzeichen der modernen Wissenschaft ist und bleibt ihre Mathematisierbarkeit. Die exakte Berechnung der Werte für die einem Theoriengebäude entstammenden Größen ist neben der im Experiment gegebenen Messbarkeit derselben Größen ein Erfolgskonzept der empirischen Wissenschaften. Diesem „Computing with numbers“ (CN) stellte Zadeh zum Ende des 20. Jahrhunderts das „Computing with Words“ (CW) gegenüber. In seinem 1996 erschienenen Artikel „Fuzzy Logic = Computing with Words“ bezeichnete er CW als den Hauptbeitrag der auf der Theorie der Fuzzy Sets basierenden Fuzzy Logik: „No other methodology serves this purpose“ (Zadeh 1996).

Als im Jahre 2001 Zadehs Artikel *A New Direction in AI. Toward a Computational Theory of Perceptions* (Zadeh 2001) im *AI Magazine* erschien, wurde eine Alternative zum üblichen Rechnen mit Zahlen, zum „hard computing“ etabliert. Diese neue Richtung der Künstlichen Intelligenz sollte eingeschlagen werden, wenn die einem Beobachter zugängliche Information über ein reales System ungenau ist und daher nicht in Zahlen ausgedrückt werden kann, oder wenn ein Toleranzbereich für Ungenauigkeiten genutzt werden kann, um größere Robustheit oder leichtere Lenkbarkeit zu erreichen. Zadeh beeindruckte die „the remarkable human capability to operate on, and reason with, perception-based information“. Somit verknüpft er seine mathematische Theorie der Fuzzy Sets mit einer Wahrnehmungstheorie, wobei er sich – wie schon in den 1960er Jahren, als er die Theorie der Fuzzy Sets and Systems aus der Taufe hob – von den Fähigkeiten der Menschen inspirieren ließ, viele körperliche und geistige Aufgaben ohne Messungen und Berechnungen auszuführen: „In performing such tasks, for example, driving in city traffic, humans base whatever decisions have to be made on information that, for the most part, is perception, rather than measurement, based.“ Er nahm allerdings an, dass es nur langsame Fortschritte in jenen wissenschaftlichen

Bereichen zu verzeichnen geben werde, in denen Methodologien gebraucht werden, die es erlauben, mit Wahrnehmungen (perceptions) zu rechnen „– perceptions of time, distance, form, and other attributes of physical and mental objects“ (Zadeh 2001: 73).

Zwei Jahre zuvor beschrieb der Titel einer seiner Veröffentlichungen den ganzen Weg seines wissenschaftlichen Strebens: *From Computing with Numbers to Computing with Words – From Manipulation of Measurements to Manipulation of Perceptions* (Zadeh 1999). Zwar können wir mit Zahlen Messungen darstellen bzw. manipulieren, doch mit den Wörtern unserer Sprache sind wir in der Lage, unsere Wahrnehmungen zu repräsentieren, und darüber zu kommunizieren.

Das programmatisch angekündigte *Computing with Words* (CW) soll mit Hilfe der Theorie der Fuzzy Sets realisiert werden, und mit der dann darauf aufzubauenden *Computational Theory of Perceptions* (CTP) käme die Künstliche Intelligenz Zadehs alternativer Zielvorgabe einen großen Schritt näher, „Computer wie Menschen denkend zu konstruieren“. Die Hierarchie der Methodologien *Fuzzy Sets and Systems* und *Fuzzy Logic*, *Computing with Words* (CW), und *Computational Theory of Perceptions* (CTP) wird in Abbildung 10 veranschaulicht.

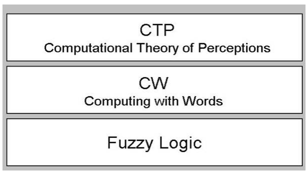

Abbildung 10. Zadehs Methodologienhierarchie

„Perceptions“ (Wahrnehmungen) spielen in Zadehs CTP die Rolle von unscharfen Vorstellungen der Menschen. Erkenntnis- bzw. wissenschaftstheoretisch interpretiere ich sie als Vorstellungen, Symbole oder Scheinbilder aus der frühen Erkenntnisphilosophie von Heinrich Hertz, wie er sie in seiner Vorlesung *Die Constitution der Materie* (Hertz 1999) vertrat (Abbildung 4). Hertz ging damals davon aus, dass es eine darüberliegende Ebene der exakten Daten und Modelle gibt, und Abbildung 11 stimmt daher mit Abbildung 4 überein, lediglich die Bezeichungen haben sich verändert, um hervorzuheben, dass die Theorie der Fuzzy Sets mit unscharfen Begriffen und Mengen umgeht, während die Daten und Modelle in der abstrakteren oberen Ebene exakt-mathematischen Größen entsprechen. Dies kann ein Vorteil sein, wenn die Elemente der oberen Ebene bekannt sind und zugleich leicht und preiswert messbar oder berechenbar. In diesen Fällen sind die Methoden der exakten Wissenschaften optimal einsetzbar. Falls aber exakten Daten und Modelle unbekannt, zu schwierig oder zu teuer zu ermitteln sind, dann bietet sich mit der Theorie der Fuzzy Sets eine gute, vielleicht die beste Möglichkeit, die beobachteten Systeme und Phänomene dennoch analysieren zu können. In solchen Fälle gibt es keine „theoretische Ebene“, wie in Abbildung 12 gezeigt wird. Diese Abbildung stimmt bis auf die Bezeichungen mit Abbildung 6 überein. Die „unscharfen“ Begriffsfamilien aus der Erkenntnisphilosophie des späten Wittgenstein werden darin als Fuzzy Sets interpretiert. Im nächsten Abschnitt wird stellvertretend für die Fälle aus den nicht-exakten Wissenschaften, in denen keine scharfen Daten und Modelle herangezogen werden können, ein Beipiel aus der Medizin vorgestellt.

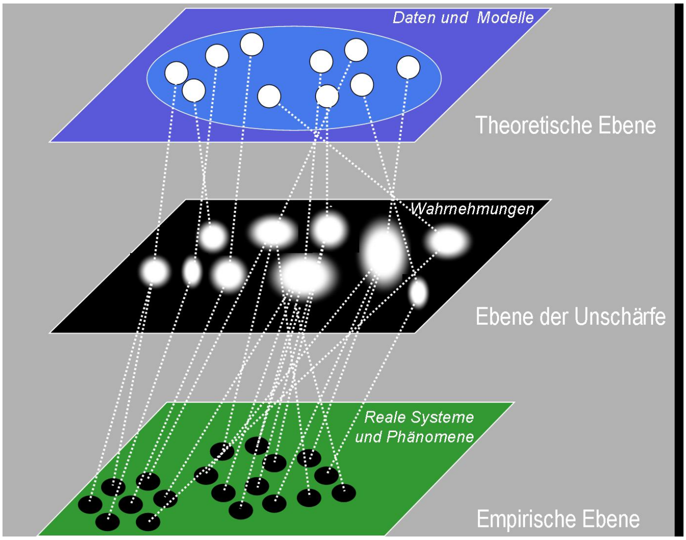

Abbildung 11. Die Ebenen der realen Systeme und der theoretischen Strukturen; dazwischen die Ebene der Unschärfe.

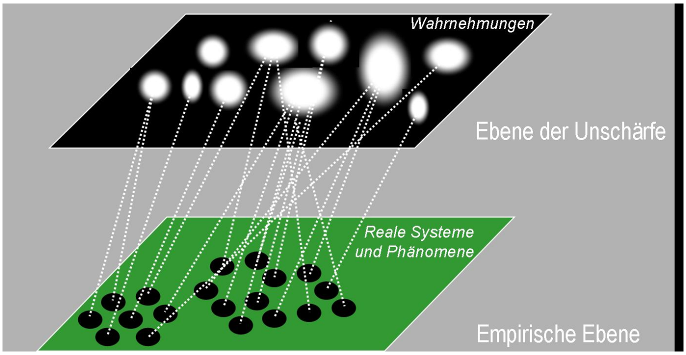

Abbildung 12. Die Ebenen der realen Systeme und die Ebene der Unschärfe.

5 Fuzzy Sets und nicht-technische Wissenschaft

Es waren weder die exakten Naturwissenschaften noch die Technik, für die Zadeh die vornehmlich möglichen Anwendungen seiner neuen mathematischen Theorie erwartete. Noch sechs Jahre nach der Veröffentlichung seines ersten Artikels über die „Fuzzy Sets" (1965a) schrieb er gegen deren Nichtbeachtung in den wissenschaftlichen Disziplinen an, und dabei verriet er auch, in welchen Disziplinen er ihre Anwendung vor allem für geboten hielt: „What we still lack, and lack rather acutely, are methods for dealing with systems which are too complex or too ill-defined to admit of precise analysis. Such systems pervade life sciences, social sciences, philosophy, economics, psychology and many other 'soft' fields" (Zadeh 2001). In einem 1994 gegebenen Interview für die Zeitschrift *Azerbaijan International* bestätigte er, dass er damals vor allem an die nicht-exakten Wissenschaftsdisziplinen als Anwendungsgebiete der Fuzzy Sets gedacht hatte. Auf die Frage „How did you think Fuzzy Logic would be used at first?" antwortete er hier:

> „In many, many fields. I expected people in the social sciences, economics, psychology, philosophy, linguistics, politics, sociology, religion and numerous other areas to pick up on it. It's been somewhat of a mystery to me why even to this day, so few social scientists have discovered how useful it could be. Instead, Fuzzy Logic was first embraced by engineers and used in industrial process controls and in ‚smart' consumer products such as hand-held camcorders that cancel out jittering and microwaves that cook your food perfectly at the touch of a single button. I didn't expect it to play out this way back in 1965." (Zadeh 2001)

In der Einleitung zum ersten Teil seiner 1975 veröffentlichten dreiteiligen Arbeit über „The Concept of a Linguistic Variable and its Application to Approximate Reasoning" begründete Zadeh den großen Entwicklungsvorsprung der exakten Naturwissenschaften gegenüber den Geistes-, Sozial- und Lebenswissenschaften mit deren Potential für den Computereinsatz: „Unquestionably, computers have proved to be highly effective in dealing with mechanistic systems, that is, with inanimate systems whose behavior is governed by the laws of mechanics, physics, chemistry and electromagnetism. Unfortunately, the same cannot be said about humanistic systems, which – so far at least – have proved to be rather impervious to mathematical analysis and computer simulation".

In einer Fußnote definierte Zadeh: Ein „humanistic system" sei „a system whose behaviour is strongly influenced by human judgement, perception or emotions. Examples of humanistic systems are: economic systems, political systems, legal systems, educational systems, etc. A single individual and his thought processes may also be viewed as a humanistic system". In seiner im Haupttext weitergeführten Argumentation begründete er die unterschiedliche Fortschrittlichkeit der exakten Wissenschaften „hard sciences" einerseits und der „soft sciences" andererseits damit, „that the use of computers has not shed much light on the basic issues arising in philosophy, literature, law, politics, sociology and other human-oriented fields. Nor have computers added significantly to our understanding of human thought processes – excepting, perhaps, some examples to the contrary that can be drawn from artificial intelligence and related fields" (Zadeh 1975: 200).

Dass die Computer in den „humanistic systems" der nicht exakt-wissenschaftlichen Disziplinen so wenig erfolgreich eingesetzt wurden, führte Zadeh auf das von ihm 1973 vorgeschlagene *Principle of Incompatibility* zwischen Genauigkeit und Komplexität zurück: „The closer one looks at a ‚real world' problem, the fuzzier becomes its solution".[21] Die Geltung dieses Prinzips voraussetzend sei hinzunehmen, dass der Standard der auf präzisen Zahlenberechnungen beruhenden Systemanalysen und Simulationen für die wissenschaftliche Untersuchung „humanistischer Systeme" nicht aufrecht erhalten werden könne. In diesem Sinne hätten präzise quantitative Analysen des Verhaltens humanistischer Systeme wahrscheinlich kaum Bedeutung für „real-world societal, political, economic, and other types of problems which involve humans either as individuals or in groups" (Zadeh 1973: 28). Um solche Probleme überhaupt wissenschaftlich fassen zu können, sei vielmehr Toleranz hinsichtlich des Gebrauchs approximativer Verfahren und Zugänge angebracht. „In retreating from precision in the face of overpowering complexity, it is natural to explore the use of what might be called *linguistic* variables" (Zadeh 1975: 201). Schon sechs Jahre zuvor hatte Zadeh großes Anwendungspotential für seine Fuzzy Set Theorie in den Biowissenschaften gesehen, und so verwundert es nicht, dass er sie auf dem *International Symposium on Biocybernetics of the Central Nervous System* 1969 in Boston anpries, um der großen Komplexität lebendiger Systeme Herr zu werden:

> „The great complexity of biological systems may well prove to be an insuperable block to the achievement of a significant measure of success in the application of conventional mathematical techniques to the analysis of systems. By ‚conventional mathematical techniques' in this statement, we mean mathematical approaches for which we expect that precise answers to well-chosen precise questions concerning a biological system should have a high degree of relevance to its observed behaviour. Indeed, the complexity of biological systems may force us to alter in radical ways our traditional approaches to the analysis of such systems. Thus, we may have to accept as unavoidable a substantial degree of fuzziness in the description of the behaviour of biological systems as well as in their characterization." (Zadeh 1969)

Unschärfe sei also der für die Unbrauchbarkeit der gewöhnlichen exakten Mathematik zu zahlende Preis, wenn Systeme zu analysieren sind, die aus einer großen Zahl miteinander wechselwirkender Elemente bestehen oder bei denen sehr viele Variablen berücksichtigt werden müssen. Seine neue Theorie sei geeignet, mit dieser quantitativen oder quasiquantitativen Unschärfe oder Fuzziness umzugehen (Zadeh 1969: 200), wie Zadeh dann am Beispiel der Krankheit Diabetes demonstrierte: Sie könne nämlich als Fuzzy-Teilmenge D der Grundmenge $X = x$ aller Menschen betrachtet werden. $\mu_D(x)$ bezeichne dann die Zughörigkeitsfunktion, die für jeden Menschen x den Grad seiner Zugehörigkeitswert zum Fuzzy Set D des Diabetes angibt. Über diese einfache Überlegung hinausgehend präsentierte er dann folgende Konstruktion:

> „In some cases it may be more convenient to characterize a fuzzy set representing a disease not by its membership function but by its relation to various

[21] Erläuternd schrieb Zadeh: „Stated informally, the essence of this principle is, that as the complexity of a system increases, our ability to make precise and yet significant statements about its behaviour diminishes until a threshold is reached beyond which precision and significance (or relevance) become almost mutually exclusive characteristics" (Zadeh 1973).

> symptoms which in themselves are fuzzy in nature. For example, in the case of diabetes a fuzzy symptom may be, say, a hardening of the arteries. If this fuzzy set in X is denoted by A, then we can speak of the fuzzy inclusion relation between D and A and assign a number in the interval [0,1] to represent the ‚degree of containment' of A in D. In this way, we can provide a partial characterization of D by specifying the degrees of containment of various fuzzy symptoms $A1, ..., Ak$ in D. When arranged in a tabular form, the degrees of containment constitute what might be called a containment table.“ (Zadeh 1969: 205)

Diese Idee, die Theorie der Fuzzy Sets zur philosophischen Durchdringung der Medizin und insbesondere zur Erfassung der Begriffe von „Krankheit“ und „Gesundheit“ zu nutzen, wurde in den 1980er Jahren von dem im Iran geborenen, mit Lotfi Zadeh nicht verwandten, deutschen Mediziner und Philosophen Kazem Sadegh-Zadeh ausgearbeitet (2000, 2012).[22]

Schon vor über 80 Jahren hatte ein anderer Mediziner und Philosoph, der polnische Mikrobiologe Ludwik Fleck (1896–1961) *Über einige besondere Merkmale des ärztlichen Denkens* nachgedacht, die wir heute durchaus mit unscharfen Begriffen oder Mengen assoziieren können. Fleck trug unter diesem Titel auf der IV. Sitzung der *Gesellschaft der Freunde der Geschichte der Medizin* 1926 in Łwow (Lemberg) vor. Der Vortrag wurde ein Jahr später als seine erste wissenschaftstheoretische Arbeit publiziert (Fleck 1983). Fleck hatte das „Entstehen eines besonderen Stils“ und eines „Denktyps“ der Ärzte beobachtet, der die Besonderheiten des Gegenstandes „ärztlichen Wissens“ aufzeige:

> „Während der Naturwissenschaftler typische, normale Phänomene sucht, studiert der Arzt gerade die nicht typischen, nicht normalen, krankhaften Phänomene. Und dabei trifft er auf diesem Weg sofort auf einen gewaltigen Reichtum und Individualität dieser Phänomene, die die Vielheit ohne klare, abgegrenzte Einheiten begleiten, voller Übergangs- und Grenzzustände. Es gibt keine genaue Grenze zwischen dem, was gesund ist, und dem, was krank ist, und nirgends trifft man wirklich ein zweites Mal auf dasselbe Krankheitsbild. Aber diese unerhört reiche Vielheit immerfort anderer und anderer Varianten muss gedanklich bezwungen werden, denn dies ist die Erkenntnisaufgabe der Medizin.“ (Fleck 1983: 37)

Zum einen konstatierte Fleck hier die „Wissensexplosion“ im Bereich der Medizin, die den Medizinern in einer nicht mehr übersehbaren Anzahl unterschiedlicher Krankheitsphänomene bewusst geworden war: „Es entsteht ein riesiger Reichtum an Material. Die Aufgabe der Medizin ist, in diesem ursprünglichen Chaos irgendwelche Gesetze, Zusammenhänge, irgendwelche Typen höherer Ordnung zu finden“ (Fleck 1983: 38). Dann betonte Fleck aber das Fehlen von Grenzen zwischen diesen Krankheitsphänomenen. Vielmehr gebe es nahtlose Übergänge, und die kleinsten Variationen könnten dazu führen, dass nicht Krankheitszustand x sondern y diagnostiziert werde. Offenbar vertrauten Ärztinnen und Ärzte in dieser Situation weit mehr auf ihre Erfahrung und Intuition, als dass sie versuchen, nach streng rationalen Regeln von den Patientendaten auf eine Erkrankung zu schließen: „Gerade die besten Diagnostiker sind am häufigsten nicht imstande, konkret anzugeben, wonach sie sich

[22] Siehe zur Thematik „Fuzzy Sets und Medizin“: Seising (2006).

in der gegebenen Diagnose gerichtet haben, wenn sie nur erklären, daß das ganze Aussehen typisch für den und den Krankheitsfall ist“ (ebd.: 40). Fleck widersprach der Ansicht wichtiger polnischer Medizinphilosophen in der Zeit zwischen 1890 und 1920, dass medizinische Diagnostik das Ergebnis logischen Schließens sei, als er sagte: „In der Medizin tritt der in seiner Art einzigartige Umstand auf, daß je schlechter der Arzt desto ‚logischer‘ seine Therapie ist“ (ebd.: 41).[23]

Damals wie heute zählte man die Medizin nicht zu den exakten Wissenschaften und medizinisches Wissen war kaum Gegenstand wissenschaftstheoretischer Betrachtungen gewesen, aber gerade deshalb wies ihm Fleck eine Sonderrolle zu. Nicht logische Konsequenz sondern Erfahrung und Intuition kennzeichnen in Flecks Augen die Wirklichkeit medizinischer Diagnostik. Eine Folge dessen „ist die Inkommensurabilität der Ideen, sie ergibt sich aus der jedes Mal anderen Weise, die Krankheitsphänomene zu fassen, und führt dazu, daß es unmöglich ist, sie einheitlich anzuschauen. Weder die Zellular- oder Humoraltheorie noch selbst eine funktionale Auffassung der Krankheiten oder deren ‚psychogenes‘ Bedingtsein schöpfen allein jemals den ganzen Reichtum der Krankheitsphänomene aus“ (ebd.: 43). Die „definierten Krankheitsbilder“ wurden immer zahlreicher und diese „Typisierungen von Phänomenen“, die das „ärztliche Wissen“ bildeten, nannte Fleck „Krankheitseinheiten“. Er führte ihr Wachstum darauf zurück, dass „man nämlich mit dem Fortschritt des ärztlichen Wissens in einem bereits bestimmten idealen Krankheitstypus gesonderte Untertypen unterscheiden mußte, z. B. Typhus – Paratyphus, die sich bisweilen als ganz und gar unverwandt herausstellen: Tabes – Psychotabes. Je weiter sich das ärztliche Wissen fortbewegt, desto mehr solcher Bestimmungen, solcher Beweise der Abweichung von der gesetzmäßigen Fassung entstehen und werden entstehen, weil sich der ursprüngliche Begriff als allzu abstrakt, als allzu ideal erweist“ (Sadegh-Zadeh 2000: 39). Folglich waren die Elemente medizinischen Wissens für Fleck essentiell unbestimmt: „Nirgends sonst, in keinem anderen Wissenszweig, haben die Gattungen so viele spezifische Merkmale, d.h. Merkmale, die sich nicht analysieren und nicht auf gemeinsame Elemente führen lassen. Auf diese Weise schafft der sehr weit getriebene Abstraktionsprozeß einen Gattungsbegriff, dessen Fiktivität bedeutend größer als in irgendeinem anderen Wissensbereich ist, und einen Elementbegriff von gleichermaßen spezifischer Unbestimmtheit“ (Fleck 1983: 40). Dieser hier zuletzt zitierte Satz von Ludwik Fleck charakterisiert meines Erachtens sehr gut, warum die Theorie der Fuzzy Sets in der Medizin und darüber hinaus auch in den anderen nicht-exakten Wissenschaften erfolgreich genutzt werden kann. Systeme und Phänomene aus der realen Welt durch einen „sehr weit getriebenen Abstraktionsprozeß“ in scharfe Begriffe zu zwängen bzw. durch exakt begrenzte Mengen bzw. Relationen und weiter Strukturen zu erfassen, kann dazu führen, dass die so geschaffenen „Gattungsbegriffe“ – Mengen und deren Verknüpfungen – fiktiv sind, und das bedeutet, dass sie mit der Wirklichkeit, mit den Menschen und deren Denken nichts zu tun haben. Dies wäre für die Geistes- und Sozialwissenschaften fatal.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Wir sprechen, schreiben, argumentieren und kommunizieren mit den Begriffen unserer natürlichen Sprachen. Diese Begriffe sind nicht scharf, sondern vage, hatte Bertrand Russell der strengen Auffassung Gottlob Freges, Begriffe müssten scharf sein, entgegengehalten. Sein

[23] Vgl. die Einleitung von Schnelle und Schäfer in Fleck (1983): 23.

Student und späterer Kollege Ludwig Wittgenstein hatte sich in der zweiten Phase seines philosophischen Schaffens von der durch Heinrich Hertz' Erkenntnisphilosophie inspirierten und im Tractatus logico-philosophicus vertretenen „Bildtheorie" – Sätze seien Bilder der Wirklichkeit – abgewandt und die Theorie der Familienähnlichkeiten vertreten, die er nun anstelle von Begriffen betrachtete, da letztere keine wirkliche Definition hätten.

Sprachliche Zeichen sind in der Semiotik von Charles W. Morris die Grundelemente eines Sozialsystems mit Dispositionen zum Handeln. Dieses System hat nach Morris' allgemeiner Zeichentheorie drei Dimensionen: Syntaktik, Semantik und Pragmatik, denn neben den Beziehungen der Zeichenträger untereinander sind auch die Bedeutungen der Zeichen und ihre Wirkungen wichtige Bestandteile seiner „science of signs". Warren Weaver übernahm die Problematisierung in diesen drei Ebenen für eine Theorie der Kommunikation, und er betonte, dass neben der von Shannon vorgestellten Nachrichtenübertragungstheorie, in der dieser die technische Problematik der genauen Zeichenübertragung behandelte, auch die Genauigkeit, mit der ein Zeichen der gewünschten Bedeutung entspricht, sowie die Effektivitat, mit der ein gewünschtes Verhalten durch den Empfang der Nachricht bewirkt wird, unerläßliche Bestandteile einer Theorie der Kommunikation sind. Er erweiterte Shannons Kommunikationsschema durch zwei neue Instanzen, die „semantische Störung" und den „semantischen Empfänger" (Abbildung 3) und hegte die Hoffnung, „dass diese Sachlage so weit geklärt ist, dass man nun, vielleicht zum ersten Mal, für eine wirkliche Theorie der Bedeutung bereit ist" (Shannon/Weaver 1976: 38).

Die von der Nachrichtenquelle kommenden Nachrichten haben eine intendierte Bedeutung, doch wenn sie in Zeichen(folgen) umgewandelt wurden, ist diese feste semantische Verknüpfung nicht mehr vorhanden. Die bloßen Zeichen(folgen) haben möglicherweise eine große Bedeutungsvielfalt, und diese möglichen Bedeutungen werden in Weavers Modell durch die „semantische Störung" berücksichtigt. Umgekehrt muss auf der Empfängerseite bei der Umwandlung der Zeichen(folgen) in die Nachrichten wieder jeder Nachricht die von der Nachrichtenquelle beabsichtigte Bedeutung ermittelt und zugewiesen werden; dies ist das von Weaver so genannte „Problem der semantischen Decodierung". Verständlicherweise erwartete Weaver damals, dass die noch ausstehende „wirkliche Theorie der Bedeutung" statistischen Charakter haben werde, denn Wahrscheinlichkeitstheorie und Statistik boten damals die mathematischen Werkzeuge der Wahl zur Bewältigung von Unschärfen, Ungenauigkeiten und Ungewißheiten in Wissenschaft und Technik, und die Wissenschaftler konnten diesbezüglich auf eine große Erfolgsgeschichte verweisen. Außerdem hatte ja auch Shannon seine nur die technische Ebene – also die von Weaver so genannte Ebene A – betreffende „Mathematische Theorie der Kommunikation" auf die Statistik zurückgeführt. Bei der Betrachtung semantischer und pragmatischer Probleme von Zeichen der natürlichen Sprachen und ihrer Kommunikation befinden wir uns allerdings nicht mehr auf dem Boden der exakten Naturwissenschaften, sondern im Bereich der Lebens-, Sozial- und Geisteswissenschaften. Wenn die hier vorgestellten Überlegungen von Russell, Wittgenstein, Morris, Zadeh und vielen anderen ernst genommen werden, dann laufen Versuche, die semantischen und pragmatischen Ebenen der Zeichen- und Kommunikationsprozesse – die von Weaver so genannten Ebenen B und C – mit den herkömmlichen Mitteln der exakten Wissenschaften zu lösen ebenso ins Leere, wie dies Ludwik Fleck für den Bereich des „medizinischen Wissens" beklagt hatte: Die vielen Merkmale ließen sich nicht auf gemeinsame Elemente führen und die trotzdem durchgeführten Abstraktionen ergäben einen fiktiven Gattungsbegriff, während der Elementbegriff sich als völlig unbestimmt herausstellte.

Mit der Theorie der Fuzzy Sets läßt sich ein weniger weit getriebener „Abstraktionsprozeß“ durchführen und die mit ihr einhergehende „Aufweichung“ des Elementbegriffs endet keineswegs in völliger Unbestimmtheit. Der Versuch, eine „wirkliche Theorie der Bedeutung“, wie sie Weaver für die Theorie der Kommunikation erwartete, auf der Theorie der Fuzzy Sets aufzubauen, wäre verdienstvoll. Eine solche Theorie könnte sich auch als Bindeglied für Wissenschaftler der „hard“ und „soft sciences“ eignen und die Interdisziplinarität fördern.

Literatur

Aspray, William (1985): The Scientific Conceptualization of Information. A Survey. In: Annals of the History of Computing 7 (2), S. 117–140

Balzer, Wolfgang (1982): Empirische Theorien: Modelle, Strukturen, Beispiele. Die Grundzüge der neuen Wissenschaftstheorie. Braunschweig/Wiesbaden: Vieweg

Balzer, Wolfgang/Moulines, C. Ulisses/Sneed, Joseph D. (1987): An Architectonic for Science. The Structuralist Program. Dordrecht: Reidel

Becker, Oskar (1964): Grundlagen der Mathematik in geschichtlicher Entwicklung. Freiburg/München: Alber

Bellman, Richard E./Kalaba, Robert/Zadeh, Lotfi A. (1964): Abstraction and Pattern Classification. Memorandum RM-4307-PR. Santa Monica/California: The RAND Corporation

Bellman, Richard E./Kalaba, Robert/Zadeh, Lotfi A. (1966): Abstraction and Pattern Classification. In: Journal of Mathematical Analysis and Applications 13, S. 1–7

Born, Max (1965): Geleitwort. In: Fuchs, Walter R. (Hrsg.): Buch der Modernen Physik. Exakte Geheimnisse. Knaur

Buldt, Bernd (2001): Vagheit. In: Ritter, Joachim/Gründer, Karlfried/Gabriel, Gottfried (Hrsg.): Historisches Wörterbuch der Philosophie. Band 11: U-V. Basel: Schwabe & Co, S. 531–539

Cantor, Georg (1871): Über trigonometrische Reihen. In: Mathematische Annalen 4, S. 139–143

Cantor, Georg (1872): Über die Ausdehnung eines Satzes aus der Theorie der trigonometrischen Reihen. In: Mathematische Annalen 5, S. 123–132

Cantor, Georg (1883): Über unendliche Punktmannigfaltigkeiten. In: Cantor, Georg (Hrsg.): Gesammelte Abhandlungen mathematischen und philosophischen Inhalts. Springer, S. 165–209

Cantor, Georg (1932): Gesammelte Abhandlungen mathematischen und philosophischen Inhalts. Berlin: Springer

Falk, Raphael (2000): The gene. A concept in tension. In: Beurton, P./Falk, R./Rheinberger, Hans-Jörg (Hrsg.): The Concept of the Gene in Development and Evolution. Cambridge: University Press, S. 317—348

Fleck, Ludwik (1983): Über einige besondere Merkmale des ärztlichen Denkens. In: Schäfer, Lothar/Schnelle, Thomas (Hrsg.): Erfahrung und Tatsache. Gesammelte Aufsätze. Mit einer Einleitung von Lothar Schäfer und Thomas Schnelle. Suhrkamp, S. 37–43

Fölsing, Albrecht (1997): Heinrich Hertz. Eine Biographie. Hamburg: Hoffman und Campe

Frege, Gottlob (1969): Nachgelassene Schriften. Hamburg: Meiner

Frege, Gottlob (1998): Grundgesetze der Arithmetik. Jena 1893–1903. Band II (Nachdruck). Hildesheim: Olms

Goguen, Joseph A. (1967): L-Fuzzy Sets. In: Journal of Mathematical Analysis and Applications 18, S. 145–174

Goguen, Joseph A. (1968): Categories of Fuzzy Sets: Applications of a Non-Cantorian Set Theory. Dissertation, University of California at Berkeley

Goguen, Joseph A. (1969): The Logic of Inexact Concepts. In: Synthese 19, S. 325–373

Hartley, Ralph V. L. (1928): Transmission of Information. In: The Bell System Technical Journal 7 (3), S. 535–563

Hertz, Heinrich (1996): Die Prinzipien der Mechanik in neuen Zusammenhange dargestellt. Drei Beiträge. Frankfurt am Main: Harri Deutsch

Hertz, Heinrich (1999): Die Constitution der Materie (1884). Herausgegeben von Albrecht Fölsing. Berlin: Springer

Hilbert, David (1925): Über das Unendliche. In: Mathematische Annalen 95, S. 161–190

Hilbert, David (1970): Neubegründung der Mathematik. Erste Mitteilung (1922). In: Gesammelte Abhandlungen. Band III, 2. Auflage. Berlin: Springer, S. 157–177

Houser, Nathan/Kloesel, Christian J.W. (1998): The Essential Peirce. Selected Philosophical Writings. Vol. 2 (1893-1913). Bloomington/Indianapolis: University Press

Lakoff, George (1973): Hedges. A Study in Meaning Criteria and the Logic of Fuzzy Concepts. In: Journal of Philosophical Logic 2, S. 458–508

Locke, John (1823): The Works of John Locke. A New Edition (Corrected) in Ten Volumes. Vol. 3. London: T. Tegg

Malcolm, Norman (1987): Erinnerungen an Wittgenstein : mit einer biographischen Skizze von Georg Henrik von Wright und Wittgensteins Briefen an Norman Malcolm. Aus dem Englischen von Claudia Frank und Joachim Schulte. Frankfurt am Main: Suhrkamp

Mehrtens, Herbert (1990): Moderne Sprache Mathematik: eine Geschichte des Streits um die Grundlagen der Disziplin und des Subjekts formaler Systeme. Frankfurt am Main: Suhrkamp

Meyer-Abich, Klaus-Michael (1978): Komplementarität – Die Sprache und die Einheit der Physik. In: Der Physikunterricht 12 (1)

Morris, Charles William (1938): Foundations of the Theory of Signs. In: Neurath, Otto (Hrsg.): International Encyclopedia of Unified Science Vol.1 (2). University Press

Nyquist, Harry (1924): Certain Factors Affecting Telegraph Speed. In: The Bell System Technical Journale 3, S. 324–346

Peirce, Charles Sanders (1902): On the Definition of Logic (Memoir 12). In: Logic, Considered as Semeiotic. Manuscript L75

Peirce, Charles Sanders (1932): Collected Papers of Charles Sanders Peirce. Herausgegeben von Charles Hartshorne and Paul Weiss. Cambridge/Massachusetts: Harvard University Press

Rheinberger, Hans-Jörg (1992a): The epistemic thing and its technical conditions. From biochemistry to molecular biology. In: Gremmen (Hrsg.): The Interaction between Technology and Science. Wageningen/The Netherlands: Wageningen Agricultural University, S. 281–298

Rheinberger, Hans-Jörg (1992b): Experiment, Difference, and Writing I. Tracing protein synthesis. In: Stud. Hist. Phil. Sci. 23 (305–331)

Rheinberger, Hans-Jörg (1999): Die Evolution des Genbegriffs – Perspektiven der Molekularbiologie. In: Epistemologie des Konkreten. Studien zur Geschichte der modernen Biologie. Frankfurt am Main: Suhrkamp

Rheinberger, Hans-Jörg (2000): Gene Concepts. Fragments from the Perspective of Molecular Biology. In: Beurton, P./Falk, R./Rheinberger, Hans-Jörg (Hrsg.): The Concept of the Gene in Development and Evolution. Cambridge: University Press, S. 219–239

Rheinberger, Hans-Jörg (2001): Experimentalsysteme und epistemische Dinge. Eine Geschichte der Proteinsynthese im Reagenzglas. Göttingen: Wallstein

Rheinberger, Hans-Jörg (2007): Historische Epistemologie zur Einführung. Hamburg: Junius

Rheinberger, Hans-Jörg/Müller-Wille, Staffan (2010): Gene. In: The Stanford Encyclopedia of Philosophy

Rosenblatt, Frank (1985): The Perceptron: A Probabilistic Model for Information Storage and Organization in the Brain. In: Psychological Review 65 (6), S. 386–408

Russell, Bertrand (1923): Vagueness. In: The Australasian Journal of Psychology and Philosophy 1, S. 84–92

Sadegh-Zadeh, Kazem (2000): Sadegh-Zadeh K. Fuzzy health, illness, and disease. In: . Journal of Medical Philosophy 25 (5), S. 605–638

Sadegh-Zadeh, Kazem (2012): Analytic Philosophy of Medicine (im Erscheinen). Berlin: Springer

Seising, Rudolf (2005): Die Fuzzifizierung der Systeme. Die Entstehung der Fuzzy Set Theorie und ihrer ersten Anwendungen – Ihre Entwicklung bis in die 70er Jahre des 20. Jahrhunderts. Stuttgart: Franz Steiner Verlag

Seising, Rudolf (2006): From Vagueness in Medical Thought to the Foundations of Fuzzy Reasoning in Medical Diagnosis. In: Artificial Intelligence in Medicine 38, S. 237–256

Shannon, Claude Elwood/Weaver, Warren (1948): A Mathematical Theory of Communication. In: The Bell System Technical Journal 27, S. 379–423

Shannon, Claude Elwood/Weaver, Warren (1949): The Mathematical Theory of Communication. Urbana: University of Illinois Press

Shannon, Claude Elwood/Weaver, Warren (1976): Mathematische Grundlagen der Informationstheorie. München/Wien: Oldenbourg–Verlag

Stubbe, Henry (1670): The Plus Ultra reduced to a Non Plus: Or, A Specimen of some Animadversions upon the Plus Ultra of Mr. Glanvill, wherein sundry Errors of some Virtuosi are discovered, the Credit of the Aristotelians in part Re-advanced; and Enquiries made [...]. London

Weaver, Warren (1948): The Mathematics of Communication. In: Scientific American S. 11–15

Wittgenstein, Ludwig (1963): Tractatus logico-philosophicus. Logisch-philosophische Abhandlung. Frankfurt am Main: Suhrkamp

Wittgenstein, Ludwig (1984a): Das Blaue Buch. In: Werkausgabe in Acht Bänden (Vol. 5). Frankfurt am Main: Suhrkamp

Wittgenstein, Ludwig (1984b): Tagebucheintrag. In: Werkausgabe in Acht Bänden (Vol. 8). Frankfurt am Main: Suhrkamp

Wittgenstein, Ludwig (2003): Philosophische Untersuchungen. Auf der Grundlage der kritische-genetischen Edition neu herausgebeben von Joachim Schulte. Frankfurt am Main: Suhrkamp

Zadeh, Lotfi A. (1962): From Circuit Theory to System Theory. In: Proceedings of the IRE 50 (5), S. 856–865

Zadeh, Lotfi A. (1965a): Fuzzy Sets. In: Information and Control 8, S. 338–353

Zadeh, Lotfi A. (1965b): Fuzzy Sets and Systems. In: Fox, Jerome (Hrsg.): System Theory. Microwave Research Institute Symposia Series XV. New York: Polytechnic Press, S. 29–37

Zadeh, Lotfi A. (1969): Biological applications of the theory of fuzzy sets and systems. In: The Proceedings of an International Symposium on Biocybernetics of the Central Nervous System, S. 199–206. Boston: Little, Brown and Company

Zadeh, Lotfi A. (1972): A Fuzzy-Set-Theoretic Interpretation of Linguistic Hedges. In: Journal of Cybernetic 2, S. 467—498

Zadeh, Lotfi A. (1973): Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Processes. In: IEEE Transactions on Sytems, Man, and Cybernetics 3 (1), S. 28–44

Zadeh, Lotfi A. (1974): On the Analysis of Large-Scale Systems. Memorandum No. ERL-M418. University of California, Berkeley, January 8, 1974.

Zadeh, Lotfi A. (1975): The Concept of a Linguistic Variable and its Application to Approximate Reasoning (I). In: Information Science 8, S. 199–249

Zadeh, Lotfi A. (1984): Making Computers Think like People. In: IEEE Spectrum 8, S. 26–32

Zadeh, Lotfi A. (1996): Fuzzy Logic = Computing with Words. In: IEEE Transactions on Fuzzy Systems 4 (2), S. 103–111

Zadeh, Lotfi A. (1999): From Computing with Numbers to Computing with Words. From Manipulation of Measurements to Manipulation of Perceptions. In: IEEE Transactions on Circuits and Systems: Fundamental Theory and Applications 45 (1), S. 105–119

Zadeh, Lotfi A. (2001): A New Direction in AI. Toward a Computational Theory of Perceptions. In: AI–Magazine 22 (1), S. 73–84

Dieser Aufsatz ist erschienen in:
Fischer, Daniel/Bonß, Wolfgang/Augustin, Thomas/Bader, Felix/ Pichlbauer, Michaela/Vogl, Dominikus (2011): Uneindeutigkeit als Herausforderung – Riskokalkulation, Amtliche Statistik und die Modellierung des Sozialen. Universität der Bundeswehr München: Neubiberg 2011. S. 147–185