Matthias Scheutz: Zur Geschichte der Berechnungsthese[1]

Der *Berechnungsbegriff* – der Ausdruck „Berechnung“ (lat. „calculatio“) – zählt zweifelsohne zu den fundamentalsten Begriffen des 20. und beginnenden 21. Jahrhunderts.

Seine Geschichte läßt sich bis zu Leibniz und sogar davor zurückverfolgen, in eine Zeit, als die fortschrittlichsten Philosophen bereits über „rechnende Maschinen“ nachdachten, d.h. Maschinen, die einen menschlichen „Rechner“ (lat. „calculator“) bei Berechnungen unterstützen würden und darüberhinaus u.U. sogar vollkommen eigenständig – ohne Anleitung und Eingriffe ihrer Erbauer – Berechnungen ausführen könnten. Vor allem der Gedanke, daß Maschinen zumindest im Prinzip zu selbständingen Berechnungen fähig sind, kann als Vorläufer der modernen *Berechnungsthese* angesehen werden, die besagt, daß jegliche geistigen oder kognitiven Vorgänge und Prozesse vollständig durch Computerprogramme beschrieben werden können. Kurz gesagt, Denken ist Berechnung.

Die Berechnungsthese wurde seit ihrer Konzeption und Inzeption im von der mechanistischen Sichtweise geprägten 17. Jahrhundert zumeist von Philosophen attackiert. Gerade in jüngster Zeit jedoch kamen neue Angriffe seitens der sogenannten „Dynamizisten“ in den Kognitionswissenschaften, d.h. von Vertretern der These, daß letztlich nur die mathematische Theorie der dynamischen Systeme und nicht die der Berechnungen geistige Prozesse zu erklären vermag. Im Gegenzug begann eine zunehmende Anzahl von Forschern, die nicht gewillt waren, ein im Grunde erfolgreiches Forschungsprogramm einfach aufzugeben, den Berechnungsbegriff und die darauf fußende Berechnungsthese neu zu überdenken.

Dieser Artikel ist ein Versuch, die historische Entwicklung der Berechnungsthese aus Sicht der Kognitionswissenschaften nachzuzeichnen, von ihren Anfängen im mechanistischen Denken der Renaissance, über die Formalisierung des Berechnungsbegriffs in den Zwanziger und Dreißiger Jahren und der darauf folgenden Etablierung der „cognitive science“ in den Fünfziger Jahren des letzten Jahrhunderts, bis hin zu gegenwärtigen Debatten über die Angemessenheit, Brauchbarkeit, und Anwendbarkeit der Berechnungsthese.

1. Die Ursprünge der Berechnungsthese

Bereits im 17. Jahrhundert, einem Jahrhundert, das vom Interesse für jegliche Art mechanischer Apparatur geprägt war, wurden die ersten funktionierenden Rechenmaschinen gebaut. Sie ähnelten in ihrem Aufbau klassischen Uhrwerken und wurden für die Erstellung verschiedenster mathematischer Tabellen, wie etwa die der Logarithmen, verwendet. Leibniz selber entwarf und baute eine ganze Reihe solcher Maschinen für die Addition und

[1] Dieses Kapitel ist eine übersetzte und überarbeitete Fassung von (Scheutz 2000).

Multiplikation von Zahlen, von denen eine sogar noch heute voll funktionstüchtig ist (Williams 1997, 130). Leibniz war sich nicht nur des kommerziellen Nutzens dieser Rechenmaschinen sicher, sondern sah vielmehr eine weitaus gewagtere Anwendung dieser mechanischen Rechner voraus, nämlich deren Verwendung als „Denkmaschinen".

Obwohl hier nicht näher auf die Leibniz´sche Theorie über die Beziehung von Logik und Denken eingegangen werden kann, sollen doch zwei grundlegende Gedanken angeführt werden, die ihn zum Begriff der „Denkmaschine" geführt haben könnten. Der erste hat mit der Konstruktion von Logik als formalem, deduktiven System zu tun, in welchem Denken als regelgerechte Ableitung konstruiert wird, der zweite mit der Ansicht, daß Denken auf der Manipulation von Symbolen (d.h. von Repräsentationen) beruhe.

Der erste Gedanke ist untrennbar mit dem Leibniz´schen Verständnis von Denken und Sprache verbunden, welches nicht weiter zerlegbare, atomare erste Begriffe bzw. Terme (d.h. „Repräsentationen") postuliert, von denen sich alle komplexeren herleiten lassen. Diese ersten Repräsentationen – in der heutigen Terminologie der Kognitionswissenschaften würde man von „grounded terms" sprechen – und ihr Erwerb bilden einen der großen Fragenkomplexe der „cognitive science", zumal es scheint, daß eben dieser Erwerb nicht direkt durch Sprache selbst, sondern vielmehr durch das Erlernen von Sprache erfolgt. Da nach Leibniz im alltäglichen Sprachgebrauch die Beziehungen zwischen verschiedenen Begriffen verborgen bleiben, postuliert er eine Universalsprache (lat. „characteristica universalis"), die den Unterschied zwischen „einfachen" und „komplexen" Repräsentationen mit formalen Mitteln darzustellen vermag. Leibniz war überzeugt, daß mittels einer solchen Universalsprache jeglicher philosophischer Disput entschieden werde könnte, da ja die Gültigkeit eines Satzes, sobald er in der Universalsprache übersetzt, also „formalisiert" war, mechanisch automatisch überprüfbar wäre, z.B. von einer mechanischen Denkmaschine — von solch einer Denkmaschine würde man heute als „automatic formal system" sprechen (Haugeland, 1985). Leibniz nimmt mit seiner Idee der Denkmaschine, d.h. der mechanischen Implementierung und des automatischen Ausführens von formalisiertem Schließen und Denken, nicht nur die Anfänge der Künstlichen-Intelligenzforschung (KI) vorweg, sondern verweist indirekt bereits auf die zugrundeliegende, im folgenden bewußt salopp formulierte Hypothese, daß „wenn die Syntax paßt, man sich um die Semantik keine Sorgen machen muß." Der zweite Gedanke, nämlich daß Denkprozesse Repräsentationen benötigen, findet seine Wurzeln ebenso im 17. Jahrhundert (Descartes, Hobbes, Locke u.a.) und wurde nicht zuletzt durch den damaligen Aufstieg der modernen Mathematik begünstigt.

Nachdem Vieta das Konzept der „Variablen" eingeführt hatte – Zeichen, welche bei Berechnungen als Platzhalter für Zahlen verwendet werden – wurden Berechnungen vermehrt mit Variablen durchgeführt anstatt irgendwelche Gegenstände physikalisch zu verändern (z.B. die Länge eines Holzstabes, um eine bestimmte

Zahl darzustellen). Die Verwendung von Zeichen als Repräsentationen in Rechnungen fand rasche Verbreitung und wurde bald zu einem allgemein dominanten Denkmuster (Pratt 1987). Die zugrundeliegende Mentalität läßt sich am besten mit einem Satz zusammenfassen, der in Folge zum Credo einer ganzen Generation von Denkern wurde: „Everything done by our mind is a computation“ (Hobbes 1994, 30).

Das Ziel dieses bisherigen skizzenhaften Rückblicks ist zu verdeutlichen, daß viele der grundlegenden Überzeugungen der heutigen Vertreter der Berechnungsthese bereits im 17. Jahrhundert entwickelt und zu einem gewissen Teil auch formuliert wurden, wenngleich nicht in der heutigen Terminologie und nicht mit dem heutigen Verständnis der Berechnungsthese. Mit seiner Verwurzelung sowohl im Gebiet der Mechanik (bedingt durch die mechanischen Rechenmaschinen) als auch in dem der Kognition (bedingt durch die „Imitation“ menschlicher Rechenkünste) kann der Berechnungsbegriff als Brückenschlag zwischen der physischen und geistigen Welt gesehen werden, der nicht nur die damalige Hypothese vom „mechanisierbaren Denken“ hervorbrachte, sondern auch die funktionalistischen Theorien des Geistes in der heutigen Philosophie inspirierte.

Bereits zu Leibniz’ Zeiten war Berechenbarkeit eng mit der Manipulation von Symbolen verbunden und die Rechenmaschinen der damaligen Zeit waren die prototypischen Symbolmanipulatoren. Bis zum Ende des 19. Jahrhunderts wurden zahlreiche mechanische Rechner entwickelt (manche dieser Rechner waren auch außerordentlich erfolgreich, siehe z.B. Pratt 1987, Williams 1997, oder Augarten 1985), ihre tatsächlichen Berechnungskünste, d.h. die Klasse von mathematischen Funktionen, die sie berechnen konnten, waren allerdings bescheiden. Der entscheidende Durchbruch sowohl beim Bau von Rechenmaschinen als auch bei der Konzeption des Berechnungsbegriffs gelang erst im 20. Jahrhundert, ein Quantensprung, der zu einem großen Teil zwei unabhängigen Entwicklungen zu verdanken ist: zum einen der tiefgehenden, logischen Analyse der Begriffe „formales System“ und „Demonstrierbarkeit“ (d.h. Beweisbarkeit mit endlichen Mitteln) von Formeln in formalen Systemen, welche zu weiteren Untersuchungen von Begriffen wie „rekursive Funktion“, „effektiv berechenbare Funktion“, „Algorithmus“, „endlicher Automat“, etc. führte, zum anderen dem rasanten Fortschritt bei der Herstellung und Entwicklung elektronischer Bauteile (von Vakuumröhren über Transistoren bis zu integrierten Schaltkreisen, und darüber hinaus.[2]).

Spätenstens ab diesem Zeitpunkt kann man nicht mehr von einer kontinuierlich linearen Entwicklung des Berechnungsbegriffs sprechen. Vielmehr lassen sich aus heutiger Sicht zwei getrennte Wege nachzeichnen: einerseits eine

[2] Auf der Webseite des IEEE läßt sich der enorme Fortschritt dieser Entwicklung seit der Einführung des Transistors im Jahre 1947 auf grafische Weise nachvollziehen. (Siehe auch Williams 1997).

„logisch-theoretische“, andererseits eine „praktisch-technologische“ Richtung. Jede dieser beiden Strömungen führte wiederum zu spezifischen Sichtweisen des Berechnungsbegriffs und in Folge zu speziellen Forschungsschwerpunkten. Während die logische Richtung die theoretischen Beschränkungen von Berechnung untersucht, widmet sich die technologische Richtung Fragen, die durch die Entwicklung und Konstruktion von Computern aufgeworfen werden. Wenn auch beide Zugänge wichtige und keinesfalls unvereinbare Aspekte von Berechnung behandeln, so ist der jeweilige Gebrauch des Berechnungsbegriffs doch stark von der Interessenslage der einzelnen Richtungen bestimmt. Und in Anbetracht der relativ großen Autonomie beider Forschungsfelder sollte die geringe Anzahl von Berührungspunkten nur wenig überraschen. Erst seitdem sich die „logische Richtung“ zunehmend der Beschränkungen der „realen Welt“ angenommen hat (z.B. auf dem Gebiet der Komplexitätstheorie), ist ein verstärktes gegenseitiges Interesse festzustellen. Mittels alternativer Berechnungskonzepte wie „Interaktiver Turingmaschinen“, „formaler Spiele“, usw. soll der „Entfremdung“ der klassisch-logischen Modelle von praktischen Belangen entgegengewirkt werden.

2. Berechnung aus logischer Sicht

Die Geschichte des Berechnungsbegriffs aus logischer Sicht nahm in den Dreißiger Jahren mit verschiedenen Formalisierungsversuchen ihren Anfang – damals sprach man nicht von „Berechnung“, sondern von „effektiver Kalkulierbarkeit“. Die logischen Analysen konzentrierten sich auf die Frage, was theoretisch, d.h. im Prinzip berechnet werden könne. Dies wiederum setzte eine grundlegende Analyse des intuitiven Berechnungsbegriffs voraus.

Die entscheidendste Erkenntnis in Hinblick auf den intuitiven Berechnungsbegriff war, daß sich drei verschiedene seiner Formalisierungsansätze als gleichwertig herausstellten. Genauer gesagt, wurde bewiesen, daß die Klassen der *rekursiven*, der *lambda-berechenbaren* und der *Turing-berechenbaren* Funktionen identisch sind. Die jeweiligen formalen Berechnungsbegriffe wurden dabei mittels Eingabe-Ausgabefunktionen definiert. Erst durch diese Verwendung von Funktionen als „Vermittler“ zwischen den unterschiedlichen Formalismen wurden die verschiedenen Systeme(in Bezug auf die Klasse der „berechenbaren“ Funktionen) vergleichbar und die Äquivalenzbeweise möglich.

Im Laufe der Jahre gesellten sich weitere, in Bezug auf die Klasse der berechenbaren Funktionen gleichwertige Formalismen dazu: Markov Algorithmen, Postsysteme, universelle Grammatiken, „C Programme“, so wie verschiedenste Automaten. Sie alle definieren dieselbe Klasse von Funktionen: sogenannte *rekursive Funktionen.* (Siehe z.B. Hopcroft und Ullman 1979) Diese umfassende Gleichwertigkeit (hinsichtlich berechenbarer Funktionen) von formalen Systemen, die mit teils vollständig unterschiedlicher Motivation eingeführt worden waren, bestärkt eine berühmte Definition von Church:

“We now define the notion ... of an effectively calculable function of positive integers by identifying it with the notion of a recursive function on positive integers (or of a lambda–definable function of positive integers). This definition is thought to be justified by the considerations which follow, so far as positive justification can ever be obtained for the selection of a formal definition to correspond to an intuitive notion”. (Church 1936, 356, auch enthalten in Davis 1965, 100)

Es folgt aus der Church’schen Definition, daß jedes der oben angeführten formalen Systeme dem intuitiven Verständnis von Berechnung entspricht. Oder anders gesagt, all die angegeben Formalismen sind Formalisierungen, d.h. formale Präzisierungen des intutitiven Berechnungsbegriffs, wenngleich die „Church’sche These“ – wie diese Definition gängig genannt wird – naturgemäß unbeweisbar ist.

Neben der Formalisierung des intuitiven Berechnungsbegriffs haben die obigen Formalismen zumindest eine weitere Gemeinsamkeit, nämlich deren Unabhängigkeit von der physischen Welt. Kein einziges dieser formalen Systeme bezieht sich bei seiner jeweiligen Definition von Berechnung auf einen physischen Apparat, der die Berechnung vornehmen kann. Selbst bei Turings „Maschinenmodell“ – der später nach ihm benannten und allgemein als Prototyp eines mechanischen Geräts gehandelten „Turingmaschine“, welche Smith treffend mit dem Attribut „often-imagined but seldom-seen“ belegt (Smith 2002, 29) – bleiben Beschreibungen der tatsächlichen, physikalischen Funktionsweise ausgenommen (über technische Details seiner Umsetzung werden bloß allgemeine, theoretische Aussagen getroffen). Wenig überraschend, bedenkt man, daß Turing mit seinem Maschinenmodell die Berechnungstätigkeit eines Menschen beschreiben wollte, also jene automatische Abfolge von Schritten, die ein menschlicher „Rechner“ bei Routineberechnungen durchläuft, wenn bloß Papier und Bleistift als Hilfsmittel verwendet werden dürfen. Turings Interesse galt nicht dem digitalen Computer oder dessen Grundlagen, sondern vielmehr der Analyse und Beschreibung jener Prozesse, die in einem Menschen ablaufen, der bei einer Berechnung gewissermaßen „blind“ Regeln befolgt. Seine Analyse der geistigen und rezeptorischen Beschränkungen eines menschlichen „Rechners“ faßte er in fünf Punkten zusammen (im folgenden zitiert nach Gandy 1988):[3]

[3] Es erscheint in diesem Zusammenhang wichtig, auf Gandys Bemerkung (Gandy 1988, 87) hinzuweisen, daß Turings Auflistung der geistigen und sensorischen Beschränkungen ausschließlich auf die menschliche Wahrnehmung und das menschliche Denken bezogen seien und nicht auf das menschliche Nervensystem, und daß es keinen Hinweis in Turings Werken gebe, daß Turing jemals gemeinte habe, das menschliche Hirn (auf der Ebene der Neuronen und elektrochemischen Prozesse) funktioniere wie eine Turingmaschine.

1. Bei Berechnungen kann nur eine endliche Anzahl von Symbolen verwendet und niedergeschrieben werden.
2. Die Menge des Schreibpapiers sowie der daraufstehenden Symbole, die ein Mensch innerhalb einer bestimmten Zeit verarbeiten kann, um den nächsten Rechnungsschritt zu entscheiden, ist ebenso endlich.[4]
3. Symbole können jederzeit niedergeschrieben oder gelöscht werden; und zwar in einem genau ausgewiesenen Feld des Schreibpapiers, der sogenannten „Zelle".
4. Der Abstand zwischen jenen „Zellen", die innerhalb zweier Berechnungsschritte berücksichtigt werden dürfen, ist nach oben beschränkt.
5. Schließlich ist auch der Anzahl von „Geisteszuständen" des menschlichen Rechners eine Grenze gesetzt; darüberhinaus bestimmen der aktuelle Geisteszustand, zusammen mit dem jeweils letzten geschriebenen oder gelöschten Symbol, den nächsten Berechnungsschritt.

Scheint auch der eine oder andere Schritt in Turings Analyse abstrakten menschlichen Berechnens eher skizzenhaft und schwer fundierbar, so lassen sich seine fünf Punkte doch wie folgt zusammenfassen:

„The computation proceeds by discrete steps and produces a record consisting of a finite (but unbounded) number of cells, each of which is blank or contains a symbol from a finite alphabet. At each step the action is local and is locally determined, according to a finite table of instructions." (Gandy 1988, 81)

Mit anderen Worten: Indem er von Menschen, Schreibpapier, usw. abstrahierte, konnte Turing behaupten, daß jede Berechnung, die ein Mensch unter Verwendung von Schreibpapier und unter strikter Befolgung von Regeln auszuführen im Stande ist, ebenso von seiner Maschine bewerkstelligt werden kann. So wurde dann die Turingmaschine zum Modell eines menschlichen „Rechners"; zu einem *idealisierten* Modell, wohlgemerkt, ermöglichte es doch das Verarbeiten und Speichern beliebig langer, wenn auch endlicher Zeichenketten. Im Gegensatz zu Church, und das scheint bemerkenswert, wollte Turing also nicht nur eine These über den Berechnungsbegriff formulieren, sondern vielmehr ein Theorem beweisen (siehe auch Gandy 1988, 83, der die Church´sche These als „Turings Theorem" neu formuliert: „Any function that can be computed by a human being following fixed rules, can be computed by a Turing machine").

Turing war aber ebenso vom Umkehrschluß seines Theorems überzeugt, nämlich daß jede Funktion, die von einer Turingmaschine berechnet werden kann, auch von einem

[4] Diese Forderung schließt eine beliebig große Menge von Schreibpapier allerdings nicht aus. Es begrenzt einzig das Ausmaß an Papier und somit an Information, die dem menschliche Rechner als Entscheidungsgrundlage für den nächsten Berechnungsschritt zu einem bestimmten Zeitpunkt zur Verfügung steht.

menschlichen „Computer“ berechnet werden könnte (obwohl dabei zeitliche und räumliche Grenzen unberücksichtigt bleiben, und somit wohl vielmehr von einem abstrakten, von weltlichen Beschränkungen freien „homo calculans“ ausgegangen werden muß). Insbesondere war Turing davon überzeugt, daß sein Modell einer „diskreten Zustandsmaschine“ als brauchbare Beschreibung eines ganz speziellen Aspekts der materiellen Welt gelten könne: der Funktionsweise des Gehirns (Hodges 1988, 9). Als eine Quelle von Turings Theorem kann die enge Verbindung zwischen dem Begriff der „Berechenbarkeit“ und Gödels Begriff der „Demonstrierbarkeit“ (eines Beweises in einem formalen System) angesehen werden, und zwar in dem Sinne, daß alles, was mittels „definiter Methoden“ demonstriert werden kann genau dem entspricht, was von einer Turingmaschine berechnet werden kann. (Siehe Turing 1936) Indem er die Beschränkungen formaler Systeme, wie sie Gödel aufgezeigt hatte, mit den Beschränkungen seines Maschinenmodells in Zusammenhang brachte, sah Turing

„... a link between what to anyone else would have appeared the quite unrelated questions of the foundations of mathematics, and the physical description of mind. The link was a scientific, rather than philosophical view; what he arrived at was a new materialism, a new level of description based on the idea of discrete states, and an argument that this level (rather than that of atoms and electrons, or indeed that of the physiology of brain tissue) was the correct one in which to couch the description of mental phenomena.” (Hodges 1988, 6)

Dieser Brückenschlag Turings war nicht bloß ein bemerkenswerter Beitrag zur Fundierungsdebatte in der Mathematik und Logik, sondern inspirierte in Folge sogar die Entwicklung einer physikalistischen Philosophie des Geistes, die heutzutage unter dem Namen „(Turing)maschinen-Funktionalismus“ bekannt ist.

3. Die Geburt der Kognitionswissenschaft

In den späten Fünfziger Jahren begann sich eine Gruppe von Psychologen bei ihren Forschungen verstärkt für Computer und die Erkenntnisse der sich damals gerade im Anfangsstadium befindenden Computerwissenschaften zu interessieren. Einer der Gründe dafür war die begriffliche, theoretische Unabhängigkeit der Berechnungen von deren physikalischer Realisierung, d.h. von den Geräten, auf denen sie abliefen. Ein weiterer Grund lag in der Fähigkeit von Computern Information zu verarbeiten – eine Fähigkeit, von der angenommen wurde, daß sie die Grundlage menschlicher Kognition sei. Die Tatsache, daß die Art und Weise, wie Informationen in Computern verarbeitet werden, mit Hilfe von *Computerprogrammen* exakt bestimmt und festgelegt werden kann, führte zu einer außerordentlich folgenreichen Fragestellung: Wäre es möglich, menschliche Erkenntnisprozesse – als informationsverarbeitende Prozesse verstanden – mit dem Begriffsraster von Berechnungen zu begreifen? Ist es denkbar, daß kognitive Prozesse – so spekulierte man weiter – vielleicht nichts anderes seien als Berechnungen? Wäre dem so, dann könnten geistige Prozesse erstmals in wissenschaftlich abgesicherter Weise als durch Programme beschreib- und bestimmbare Informationsverarbeitungsprozesse gefaßt und studiert werden, ohne notwendigerweise zusätzliche neurologische Komponenten berücksichtigen zu müssen. Das Gehirn („wetware") würde solcherart zum Computer („hardware"), auf dem dann die *sofware* „Denken" ablaufen könnte. Und wenn schon nicht das Denken selbst, so doch zumindest all jene kognitiven Funktionen, die das Denken ausmachen. Als Folge dieses Ansatzes konnte sich die Kognitionspsychologie, die vor allem wegen ihrer ursprünglich nahezu ausschließlich auf Introspektion beruhenden Methodik in wissenschaftlichen Kreisen während der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts in Ungnade gefallen war, erstmals als ernsthaftes wissenschaftliches Forschungsfeld behaupten.

Der Analogieschluß, der dem Gebrauch von „Computer" und „Programm" durch die Kognitionspsychologen zugrunde lag, die sogenannte „Computermetapher", läßt sich wie folgt zusammenfassen: „The mind is to the brain as the program is to the hardware." (Searle 1980, oder Johson-Laird 1988). Der Einfluß dieser Metapher war zunächst vor allem in der Psychologie, später dann aber auch in der *statu nascendi* befindlichen künstlichen Intelligenzforschung sowie in anderen Disziplinen zu spüren. Der Konsens unter den Befürwortern und Vertretern der „Berechnungsthese" führte schließlich zur Etablierung einer neuen wissenschaftlichen Sicht- und Herangehensweise zur Untersuchung des Geistes, die heute allgemein mit dem Namen „Computationalismus" bezeichnet wird. Von da war es nur noch ein kleiner Schritt zur Geburt einer neuen wissenschaftlichen Disziplin, der Kognitionswissenschaft oder „cognitive science". (Siehe z.B. Gardner 1985).

Allein der Versuch allen Standpunkten und Thesen nachzuspüren, die sich heute unter dem Schirmbegriff der Berechnungsthese versammeln, würde den Rahmen dieses Kapitels sprengen. Selbst bei oberflächlicher Recherche stößt man schnell auf Sätze wie „das Gehirn ist ein Computer", „Denken ist das Programm des Gehirns", „Kognition ist Berechnung" oder auch (zur Abwechslung) auf „Der Geist ist ein Computer", um nur einige zu nennen. Wobei bei aller Beliebigkeit, die diese Sammlung suggeriert, bei einem Slogan wie „Denken ist Berechnung" der Interpretation jedes einzelnen Worts große Bedeutung zukommt, das unscheinbare „ist" eingeschlossen: soll „ist" als extensionale Identität oder als extensionaler Einschluß interpretiert werden; oder gar intensional gelesen werden, usw.? Die oben angeführten Sätze sind teilweise natürlich slogenhafte Verkürzungen und sollten daher nicht wortwörtlich verstanden werden; zumal sie ja – bezöge man sie aufeinander – grundsätzlich verschiedene Begriffe gleichsetzen (z.B. würde „Programm" mit „Prozess", „Denken" mit „Kognition", usw. gleichgesetzt).

Es finden sich aber auch Definitionen der Berechnungsthese, die die Informationsverarbeitungskomponente von Computer betonen, wie anhand der folgenden drei Thesen ersichtlich ist: „Denken ist Informationsverarbeitung“, „Informationsverarbeitung ist Berechnung (und somit Manipulation von Symbolen)“, und schließlich „die Semantik der Symbole verbindet das Denken mit der Welt“.

Unbenommen der Details, gaben und geben sich die meisten Befürworter der Berechnungsthese mit den Berechnungsbegriffen aus den Reihen der formalen Logik zufrieden. Damit aber müssen auch gleichzeitig die theoretischen Beschränkungen, die sich aus den logischen Forschungen der Dreißiger und Vierziger Jahre - und nicht zuletzt aus der Church-Turing-These - ergeben, anerkannt werden. Wie stark die Schule der „Berechnungsthese“ dem klassischen Verständnis von Berechnung (bzw. vom Berechnen einer Funktion) verpflichtet ist, kann anhand einer Definition von Berechnung gesehen werden, die Dietrich seinem mit „Computationalism“ betitelten Manifest zugrundelegt: „Computationalismus“ als die „Hypothese, Kognition sei die Berechnung von Funktionen“. (Dietrich 1990)

Wie immer man die Berechnungsthese nun auch im Detail fassen mag, verbergen sich letztlich hinter der Computermetapher zwei fundamentale (oftmals unausgesprochene) Annahmen:

1. daß der Geist bzw. das Denken in gewisser Weise als „Berechnung zu verstehen“ oder „mittels Programm zu beschreiben“ ist (was einen klaren Begriff sowohl von Berechnung als auch von Programm voraussetzt), und
2. daß dieselbe Beziehung, die zwischen Programmen (*software*) und dem Computer (*hardware*) besteht (die „Implementationsbeziehung“) auch für das Verhältnis von Denken/Geist und Gehirn gelten kann.

Während die erste Annahme zu fruchtbaren Forschungen sowohl im Fachgebiet der Psychologie als auch in der künstlichen Intelligenzforschung geführt hat, ist die zweite Annahme über den Status der Vermutung nicht hinausgekommen.[5]

Folgt man nun der ersten Prämisse und versucht „Denken“ bzw. „Geist“ als (Computer-) Programm zu begreifen, scheint es hilfreich, „Berechnung“ als *regelgesteuerte Manipulation von Repräsentationen* zu definieren. Denn schließlich ist es genau das, was Computer im Großen und Ganzen tun: sie manipulieren

[5] Der Grund dafür liegt wahrscheinlich darin, daß diese zweite Annahme weder für die KI-Forschung noch für Psychologen von großem Interesse ist. Erstere begegnen beim Entwickeln ihrer Berechnungsmodelle zwar tagtäglich der Implementationsbeziehung der Software zum Computer. Mit der Implementationsbeziehung des Geists zur Hardware „Gehirn“ befassen sie sich jedoch nicht; genausowenig wie psychologischen Studien, die auf der Ebene der „Programmbeschreibungen“ bleiben. Und ist die Neurowissenschaft auch wahrscheinlich jene Disziplin, die sich noch am ehesten mit Fragen der Implementation beim Gehirn beschäftigt, so steht auch dort nicht die Beziehung einzelner Gehirnregionen zu programmähnlichen Beschreibungen im Mittelpunkt des Interesses, sondern vielmehr die Erforschung der Aufgabenbereiche dieser Regionen (im Verhältnis zum restlichen Gehirn) in Bezug auf ihre physiologischen Funktionen.

Symboltoken (z.B. Zeichenketten von „Bits“), die ihrerseits wieder als Repräsentationen eben jener Gegenstände angesehen werden könne, derer sich die Berechnung annimmt, also z.B. von Zahlen, die als abstrakte Entitäten ja nicht direkt manipuliert werden können, sondern nur indirekt durch physikalische Repräsentationen der Berechnung zugängig werden (vgl. auch Newell's Begriff *„physical symbol system“*). Die Lesart von „Berechnung“ als durch Regeln beschrieben und gesteuerte Manipulation von Repräsentationen ist besonders bei Philosophen beliebt, wogegen Informatiker mit Berechnung eher ein Maschinenmodell verbinden. In beiden Fällen jedoch haben Repräsentationen, die für Berechnungen verwendet werden, sowohl formale als auch semantische Eigenschaften; im Gegensatz zu den formalen, die eine Manipulation von Repräsentationen ja überhaupt erst ermöglichen und daher kausalen Gesetzen unterliegen, sind die semantischen Eigenschaften nicht kausal manipulierbar.

Die Fähigkeit zur Repräsentation ist nur einer der Gründe, warum „Berechnung“ als Modell für Kognition herangezogen wird neben weiteren Vorzügen, wie dem semantischen Potential von Berechnungsprozessen, ihrer kausalen Stringenz, ihrer Beschreibbarkeit als Algorithmen, usw. Auch ist die logische Seite des Berechnungsbegriffs mittlerweile weitgehend erforscht und ausgearbeitet, insbesondere die Turingberechenbarkeit (was sich auch darin zeigt und dafür mitverantwortlich ist, daß die meisten Befürworter der Berechnungsthese noch immer auf einem „klassischen“ Berechnungsbegriff aufbauen). Eine weitere Stärke von Berechnungen ist, daß es (zumindest im Prinzip) klar ist, wie diese implementiert werden können, d.h. wie eine abstrakte Beschreibung von Prozessen mit einem konkreten, physikalischen System verbunden werden kann. Oder anders gesagt, wie ein Programm in einem Computer implementiert werden und folglich ausgeführt werden kann - nichts anderes also als die oben angeführte zweite Prämisse der Computermetapher.[6] Schließlich sei als letzter Grund nocheinmal an die grundlegende, bereits erwähnte Idee erinnert, daß Programme (oder allgemeiner: Berechnungen) in gewisser Weise den „kausalen“ Aufbau der sie implementierenden, realen physikalischen Systeme (und natürlich allen voran, den der Computer) widerspiegeln; ein Befund, der für jede Spielart der „Berechnugsthese“ von zentraler Bedeutung ist.

4. Jüngste Einwände gegen die „Berechnungsthese“

Die Befürworter der Berechnungsthese waren schon immer von verschiedensten Seiten mit Kritik konfrontiert, selbst zu einem Zeitpunkt, als diese Denkrichtung als solche offiziell noch gar

[6] Vgl. Bridgemans Aussage zum Forschungsgegenstand der Künstlichen Intelligenz: „Artificial intelligence is about programs rather than machines only because the process of organizing information and inputs and outputs into an information system has been largely solved by digital computers. Therefore, the program is the only step in the process left to worry about.“ (Bridgeman 1980).

nicht anerkannt war. Insbesondere die Anwendung formal-logischer Erkenntnisse (wie etwa Gödels berühmter *Unvollständigkeitssatz*) auf den Berechnungsbegriff, vor allem der Begriff des „effektiven Verfahrens“, unterstützte die Argumente der Gegner der Berechnungsthesen. (Siehe Lucas 1961) Darüber hinaus gab es auch Kritik ohne formal-logischen Hintergund (z.B. Searles „Chinese room“-Gedankenexperiment). Aber keiner dieser Ansätze setzte den Vertretern der Berechnungsthese dermaßen zu wie die vollkommen neugearteten Einwände aus den Reihen der Kognitionswissenschaftler selbst, welche von Proponenten neuronaler Netzwerken (den sogenannten „Konnektionisten“) und vor allem von Verfechtern dynamischer Systeme (den sogenannten „Dynamizisten“) als adäquate Erklärungswerkzeuge menschlichen Denkens eingebracht wurden (und nach wie vor werden).[7]

Sowohl Konnektionisten als auch Dynamizisten weisen die der Berechnungsthese zugrundeliegende Annahme, Denken mit Symbolmanipulation gleichzusetzen, zurück, mit der Begründung, daß eine symbolische Beschreibungsebene nicht einfach vorausgesetzt werden könne, sondern (falls überhaupt existent) als Resultat fundamentalerer Prozesse auf einer anderen, möglicherweise niedereren Beschreibungsebene zu verstehen sei. Während die Gruppe der Konnektionisten die Ansicht vertritt, daß sich Symbole aus sogenannten „Subsymbolen“ entwickeln lassen (z.B. Smolensky 1988), halten die meisten Dynamizisten die symbolische Dimension menschlichen Denkens überhaupt für entbehrlich und befürworten eine Lesart von Kognition, die auf der Begriffswelt dynamischer Systeme beruht. (Siehe z.B. Port und van Gelder 1995) Andere wiederum – Biologen und Neurowissenschaftler beispielsweise – versuchen eine autonome Ebene von Berechnungen überhaupt zu umgehen und setzen mit ihren Forschungen beim Organ „Gehirn“ selbst an. Im Gegensatz dazu vertreten etliche Sozialwissenschaftler und Robotizisten den Standpunkt, daß das Wesen von Intelligenz statt in der in sich abgeschlossenen Welt der Symbolmanipulation vielmehr in der Interaktion mit der Außenwelt, also der Umwelt kognitiver Systeme, zu suchen wäre.

[7] Dynamische Systeme sind Sammlungen mathematischer Differential- oder Differenzengleichungen abhängig davon, ob Zeit als diskret oder kontinuierlich angenommen wird, mit diskreten oder kontinierlichen Variablen. Welche der insgesamt vier möglichen Kombinationen zum Einsatz kommt, hängt einerseits von der Art des Systems ab, dessen Verhalten als dynamisches System gefaßt werden soll, andererseits von pragmatischen Annahmen und Einschränkungen (wie z.B. Meßgenauigkeit und zulässigen Meßtoleranzen bei physikalischen Systemen). Dynamische Systeme sind weder an physikalische Qualitäten gebunden, noch an spezielle Begriffe von physikalischen Zuständen, und auch nicht an realistische oder instrumentalistische Interpretationen von Entitäten wissenschaftlicher Theorien. Jede Veränderung über einen gewissen Zeitraum hinweg kann modelliert werden, und strenggenommen ist nicht einmal die Bezugnahme auf einen zeitlichen Rahmen erforderlich, da es bei Differenzengleichungen lediglich um eine geordnete Folge von Zuständen geht. Aus diesem Grund wird manchmal angenommen, dynamische Systeme könnten Berechnungssysteme miteinschließen, obwohl sich das theoretische Interesse primär um die Frage dreht, *auf welche Weise* sie das tun. (Siehe etwa Scheutz 1999)

Diese neuen Einwände thematisieren unterschiedlichste Problemkreise: angefangen beim Berechnungsbegriff selbst (und dessen unangemessenen Anwendungen auf verschiedenste Phänomene im Bereich der Kognition), über „weite Begriffe“ von Inhalt und Supervenienz (d.h. Begriffe, die die Umwelt miteinschließen), bis hin zu universellen Realisierungsbehauptungen (die jedes System als „berechnend“ und den Berechnungsbegriff folglich als theoretisch unbedeutbar ausweisen), um nur einige zu nennen. Einer der neuen Hauptkritikpunkte an der Berechnungsthese wird vor allem von den Dynamizisten ins Feld gebracht und betrifft die genaue Erfassung temporaler Prozesse. Berechnungen, so wird behauptet, können die kontinuerlich ablaufenden Gehirnprozesse *prinzipiell* nur unzureichend beschreiben, womit die Gefahr bestehe, daß potentiell essentielle Details von Gehirnprozessen in Berechnungsbeschreibungen unerfaßt bleiben.

So vetritt beispielsweise van Gelder (1998) den Standpunkt, daß der Begriff des „effektiven Verfahrens“ das Um und Auf jeder Berechnung sei, welchem wiederum das Prinizip „diskreter“, also getrennter algorithmischer Schritte zugrundeliegt. Nach van Gelder verbieten diese diskreten Schritte, sowohl wegen ihrer zeitbezogenen als auch ihrer zeitlosen Aspekte, die Verwendung des Berechnungsbegriffs als umfassendes Erklärungsmodell für Kognitionsprozesse. Koginiton will van Gelder als prinzipiell dynamisches Phänomen verstanden wissen. Daher müsse man zur Beschreibung kognitiver Funktionen anstelle von gebräuchlichen Computern eben zu dynamischen Systemen greifen, da ja jedes beliebige System der realen Welt, das Veränderungen unterliegt, mit Hilfe von dynamischen Systemen beschrieben bzw. nachgebaut werden könne (und das gelte natürlich auch für kognitive Systeme). Je nach System erfolgt eine dynamische Systembeschreibung auf unterschiedlichen Ebenen, auf einer niedrigen im Falle der Maxwell-Gleichung, oder einer sehr hohen bei menschlichen Entscheidungsprozessen, wie z.B. bei der „decision field theory“. (Busemeyer und Townsend 1993)[8]

Ein weiterer Vorwurf, ebenso aus den Reihen der Dynamizisten, stellt die Berechtigung von Repräsentationen in der Kognitionswissenschaft überhaupt in Frage, und muß

[8] Zur Beschreibung eines physikalischen Systems wird für jede relevante physikalische Größe eine eigene Variable eingeführt und als Funktion der Zeit behandelt. Am einfachsten läßt sich dann sein das Verhalten bestimmen, indem man für jede dieser Variablen einen Graph über einer Zeitachse einführt, also eine Reihe von Funktionen $X_1(t)$, $X_2(t)$, ...,$X_n(t)$, wobei $X_i(t)$ den Zustand der relevanten physischen Dimension X_i zum Zeitpunkt t angibt. Obwohl diese Funktionen das Verhalten des Systems für alle Zeiten festlegen, sind mögliche Abhängigkeiten der X_i untereinander nicht leicht zu ersehen. Mit Hilfe von Differentialgleichungen ist es allerdings möglich, Aussagen zu den gegenseitigen Abhängigkeiten und Beeinflussungen zu treffen. Die Struktur dieser Abhängigkeiten spielt bei der Erklärung des Verhaltens des Systems eine bedeutende Rolle, und die mathematische Theorie dynamischer Systeme scheint bestens geeignet, jene Systeme quantitativ zu beschreiben, die solche Abhängigkeiten bzw. was Clark (1997) „continuous reciprocal causation“ nennt, aufweisen.

wahrscheinlich als grundsätzlicher Angriff auf „Berechnung“ innerhalb diese Forschungsgebiets gelesen werden. Einige Psychologen vertreten die Auffassung, daß bestimmte, üblicherweise als „kognitiv“ klassifizierte Prozesse nichts mit Kognition, sondern ausschließlich mit Motorkontrolle, also der Kontrolle von Bewegungsabläufen jeglicher Art, zutun haben, die in der Sprache dynamischer Systeme hinlänglich beschrieben werden können. (Siehe z.B. Thelen und Smith 1994) Folglich bedürfen diese Prozesse wohl kaum einer Erklärung, die „Manipulation von Repräsentationen“ miteinschließt, woraus sich für viele Dynamizisten die Frage ergibt, ob „Repräsentation“ bei der Erklärung und Beschreibung kognitiver Fähigkeiten überhaupt eine Rolle spielen solle, und wenn, in welchem Ausmaß. Oder, so eine weitere Überlegung, ob es denkbar sei, Repräsentationen innerhalb der Theorie der dynamischen Systeme und dann nur im Bedarfsfall zum Einsatz zu bringen um auf diese Weise die klassische Gleichsetzung von *Repräsentation* und *Berechnung* zu überwinden. (Siehe diverse Artikel in Port und van Gelder 1995)

Von philosophischer Seite wurde wiederum bemängelt, daß Berechnungszustände im Gegensatz zu bestimmten Geisteszuständen nicht relational individuiert seien, und weiters der traditionelle Berechnungsbegriff als unzureichend bzw. im besten Fall unvollständig kritisiert. (Smith 2002)
Bliebe es bei der Sichtweise von Berechnung als simpler Verarbeitung von Eingabe-Ausgabe-Funktionen, so andere Stimmen aus dem philosophischen Lager, wäre eine befriedigende Beantwortung der praktisch pragmatischen Fragen der Informatik schlichtweg unmöglich; so beispielsweise Fragen nach der Implementation einer Berechnung. Bedeutet „Berechnung von Funktionen“ lediglich das Befolgen von Regeln oder aber die Ausführung eines Algorithmus? Was genau bedeuted „Ausführung eines Algorithmus“, d.h., würde das Nachschlagen eines Results in einer Tabelle als Berechnung gelten, oder ist „Produktivität“, in diesem Falle das Errechnen eines Results, Bedingung? Auch sind allgemeinere Fragen, den reduktionistischen Ansatz betreffend, gestellt worden: Ist tatsächlich jede Berechnung als „Berechnung einer Funktion“ zu erklären? Man betrachte etwa Computerspiele: welche Eingabe-Ausgabe Funktionen werden von ihnen berechnet; oder Betriebssysteme, also Programme, die ihre Berechnungen *per definitionem* niemals beenden und somit – so wie alle anderen sogenannten „divergenten Funktionen“ - im klassischen Berechnungsparadigma gar nicht berücksichtigt werden können.

Eine weitere Frage stellt sich im Zusammenhang mit dem Begriff der „Implementation einer Berechnung“: Wie läßt sich sicherstellen, daß eine Berechnungsbeschreibung auch wirklich den Abläufen innerhalb eines physikalischen Systems entspricht? Von der praktischen Arbeit mit Berechnungssystemen ausgehend, wird oftmals angenommen, daß sich dieses spiegelbildliche Verhältnis von Berechnungs- zu physikalischem Prozess dann einstellt, wenn zwischen den physikalischen Zuständen und den Berechnungszuständen eine Korrespondenz besteht; wie zum

Beispiel zwischen Teilen der Architektur einer Neumann-CPU und bestimmten Begriffen seiner Assemblersprache. Ein anderes Beispiel dafür wäre ein Logikgatter (z.B. ein *UND Gatter*): Die Berechnungskapazität eines solchen Logikgatters läßt sich mittels einer Bool´schen Funktion beschreiben, deren rechnerische Werte die elektronischen Größen, die im tatsächlich gebauten Schaltkreis auftreten, „widerspiegeln". Während es bei Geräten oder Maschinen (also technischen Systemen, die auf ihre rechnerische Beschreibbarkeit hin entwickelt wurden) noch ziemlich einfach ist, eine derartige Korrespondenz zwischen physikalischen Zuständen und Berechnungszuständen herzustellen, ist das bei natürlichen Systemen wie dem menschlichen Gehirn ungewiß. Für jede dieser Entsprechungen spielen die „adäquaten" physikalischen Zustände eine entscheidende Rolle:[9] Berechnungen können die kausale Struktur eines Systems nur in Bezug auf die berücksichtigten physikalischen Zustände widerspiegeln (eine gegebene Korrespondenzfunktion zwischen Berechnungzuständen und physikalischen Zuständen vorausgesetzt). In logischer Folge ist deswegen jede Berechnungserklärung des Verhaltens eines gegebenen physikalischen Systems von jenen physikalischen Zuständen abhängig, die überhaupt in ein Verhältnis zu Berechnungen gebracht werden können; eine Abhängigkeit, die, solange entsprechende physikalischen Zustände eines Systems angenommen werden können (wie z.B. bei elektronischen Geräten), prinzipiell noch nicht weiter problematisch ist. Wenn jedoch für jede Berechnungsbeschreibung in einem physikalischen System auch ein entsprechender physikalischer Zustand gefunden werden kann, kommt es für jede Art der Beschreibung mittels Berechnung zu einem kritischen Punkt: jedes System wäre dann ein potentieller „Rechner".

Mit anderen Worten: die Berechnungsthese wäre hinfällig, wenn jedes beliebige physikalische System im Stande wäre, jede

[9] Bei elektronischen Geräten sind diese „adäquaten" Zustände eindeutig bestimmbar; sei es durch die Angaben ihrer Konstrukteure oder durch den Vergleich ihres Bauplans mit ihrer Berechnungsbeschreibung. Bei biologischen Systemen ist das nicht ganz so einfach. So eröffnet sich beispielsweise dem Forscher beim Versuch, die verschiedenen elektrochemischen Zustände einer Pyramidenzelle im Gehirn in möglichst entsprechende Berechnungszustände überzuführen, augenblicklich ein weites Feld von Interpretationsmöglichkeiten: Bieten sich auf den ersten Blick „Signal gesendet" und „Signal nicht gesendet" als naheliegendste Kandidaten für diese techno-biologische Analogie an (wie z.B. bei McCulloch und Pitts 1943), so ist diese Analogie dennoch zu grob, um darüberhinaus auch den komplexen zeitlichen Abläufen innerhalb dieser Zellen Rechnung zu tragen (z.B. die zeitliche Integration der Signale, maximale Senderate, temporäre Signalspitzen, usw.). Es ist also notwendig, eine Reihe weiterer Eigenschaften der Pyramidenzellen in Betracht zu ziehen, was dann auch die Anzahl der physikalischen Zustände erhöht, denen dann wiederum Berechnungszustände zu entsprechen hätten. Einen erfolgversprechenden Weg in diese Richtung scheinen aus heutiger Sicht neuronale Netzwerke zu weisen, wenn auch von einer Lösung obiger Fragen noch nicht gesprochen werden kann. Denn es ist nach heutigem Erkenntnisstand genauso gut möglich, daß das komplexe Verhaltensmuster der Pyramidenzellen letztlich eine Berechnungbeschreibung schlichtweg nicht zuläßt; aber das ist offensichtlich ein empirische Frage.

beliebige Berechnung auszuführen. Und tatsächlich ist das Argument vorgebracht worden, jedes (offene) System könne beispielsweise als endlicher Automat verstanden werden (Putnam 1988). Daß im Bezugsrahmen eines solchen intuitiven Implementationsbegriffs eine normale Wand dann das Wordstar-Programm ausführt (Searle 1992), mag dann schon nicht mehr weiter verwundern. Nur wenn es sich tatsächlich so verhielte, wären mit unseren Intuitionen irgendetwas nicht in Ordnung. Diese als theoretische Herausforderung für die Anhänger der Berechnungsthese konzipierte Sichtweise von „Berechnung“ und „Implementation“ ist jedoch weder für den Praktiker noch für den Theoretiker vertretbar, und kann letztlich durch Präzisierung des Implementationsbegriffs widerlegt werden. (Scheutz 1999 und 2001)

Bei allen Unterschieden haben die bis jetzt angeführten Kritiker der „Berechnungsthese“ ein gemeinsam Kernthema: Berechnung ist als Erklärungsmuster für menschliches Denken deshalb nicht geeignet, weil es notwendigerweise genau jene Beschränkungen der realen Welt (Echtzeit, Köperlichkeit, sowie alle mögliche anderen Beschränkungen der wirklichen Welt), mit denen kognitive Systeme zu ringen haben, vernachläßigt; ein Befund, der sich direkt aus der Annahme ableiten läßt, „Berechnung“ definiere sich (unter Ausklammerung von realer Umsetzung, interagierender Umwelt und Semantik) einzig und allein mittels syntaktischer Begriffe.

Womit könnte ein weiteres Festhalten an der Berechnungsthese nun argumentiert werden, wo doch, um nur einige der Kritikpunkte zu rekapitulieren, ihre digitale Basis als einschränkend, die formale Manipulation von Symbolen als „weltfremd“, und die nahezu uneingeschränkte Realisierbarkeit der Turingmaschinen als absurd und beliebig empfunden werden? Zusammen mit den jüngsten Fortschritten, die das Lager der Dynamizisten verbuchen konnte (bei gleichzeitiger Stagnation des klassischen Ansatzes) ist es die Brisanz dieser Fragestellungen, die bei etlichen Kognitionswissenschaftlern dazu geführt hat, auf die „Berechnungsthese“ als Paradigma ihrer Forschung überhaupt zu verzichten.

5. Eine Renaissance der Berechnungsthese?

Trotz der pessimistischen Zukunftsaussichten, die der „Berechnungsthese“ seitens der Dynamizisten prophezeit werden, gibt bereits eine im Zunehmen begriffene Anzahl von Forschern, die eine permanente Abkehr von Berechnungsthese für verfrüht und überstürzt halten. Anstatt auf den einst so erfolgversprechenden Ansatz gänzlich zu verzichten, versuchen sie, den gesamten Fragenkomplex der „Berechnung“ und der auf ihr aufbauenden Modelle einer Neubewertung zu unterziehen. Die Hoffnungen dieser Forscher speisen sich aus der Erkenntnis, daß Fragen, die traditionellerweise mit dem menschlichen Denken in Zusammenhang stehen, auch bei der Untersuchung von physikalischen Computern eine entscheidende Rolle spielen (z.B.

Fragen der Körperlichkeit, der Interaktion, der physikalischen Implementation und der Semantik). Ihrer Meinung nach ist nicht die „Berechnungsthese“ (also die Entsprechung von Denken und Berechnung) widerlegt, sondern lediglich deren Beschreibung durch „abstrakte“ Theorien, die „real-weltliche“ Aspekte, für Computer ebenso relevant wie für kognitive Systeme, unbehandelt lassen. Vielleicht, so spekulieren sie, ist nicht „Berechnung“ selbst das Problem, sondern unser Verständnis davon. Wenn es also gelänge, einen neuen, „reiferen“" Berechnungsbegriff zu entwickeln, dann könnte die solcherart rehabilitierte „Berechnungsthese“ in der wissenschaftlichen Debatte um die Erklärung menschlicher Kognition wieder eine zentrale Rolle spielen.

Ist man erst einmal bereit, die allgemeine Auffassung von „Berechnungsthese“ und „Dynamizismus“ als einander ausschließende Begriffe zu überwinden, sollte es möglich sein, die Stärken und Errungenschaften beider Ansätze in einem neuen Berechnungsbegriff zu vereinen. Es gibt bereits Versuche, die beiden Ansätze, vor allem ihr jeweiliges Verständnis von „Repräsentation“, zu integrieren. So ist bei der Suche nach einem „dynamischem Ersatz“ für den klassischen, symbollastigen Repräsentationsbegriff beispielsweise das aus der Neurowissenschaft stammende Konzept der „Emulatoren“ von großer Bedeutung, d.h. das Konzept dynamischer Regelkreise, die als Modell von Teilen der Umwelt und somit als „Platzhalter“ dieser Teile dienen. (Siehe z.B. Clark und Grush 1999)

Bei allen Erfolgen, die diese „hybriden“ Modelle (also Modelle mit sowohl dynamischen als auch „komputationalen“ Komponenten) bei der Verbindung beider formaler Systeme aufzuweisen haben, treffen sie doch über die allgemeine Beziehung von dynamischen Systemen und Berechnungen keine Aussage. Sie weisen zwar für einen ganz speziellen Fall nach, daß die Methoden dynamischer Systeme und Berechnungssysteme auf bestimmte Weise kombiniert werden können. Die Frage nach der allgemeinen Beziehung der beiden Modellierungsparadigmen bleibt allerdings unbeantwortet. Was diesen hybriden Modellen fehlt, ist die grundlegende Analyse der Vor- und Nachteile des jeweiligen Zugangs unter Berücksichtung ihres Zusammenspiels sowohl auf konzeptioneller als auch auf pragmatischer Ebene. Mit einem neuen Berechnungsbegriff, der die Beschränkungen von Berechnungsvorgängen berücksichtigt, die sich aus den implementierenden Systemen der realen Welt ergeben, könnte es gelingen, das Verhältnis dieser zwei unterschiedlichen Ansätze zur Erklärung von Denken und Geist genauer zu bestimmen. (Siehe die Beiträge in Scheutz 2002).

Darüberhinaus wird sich ein neuer Begriff der Berechnung mit einer ganzen Reihe weiterer Problemstellungen auseinandersetzen müssen, wie der Unterscheidung von „Programm“ und „Prozess“, dem Begriff der Implementation und Fragen der physikalischen Umsetzung, Echtzeitbeschränkungen und Interaktionen mit einer realen Umwelt, der Einsetzbarkeit und den Beschränkungen einzelner Modelle, Beziehungen zwischen „abstrakt“ und „konkret“, einer gültigen Interpretation von

Komplexitätsresultaten, der Beziehung von Berechnung und Intentionalität, sogenanten „weiten Berechnungsbegriffen“ (die die Umwelt des berechnenden Systems in der theoretischen Konzeption miteinschließen), der praktischen Informatik, usw. (Siehe den Epilog in Scheutz 2002). Erst dann, wenn es gelingt, all diese Aspekte in einem neuen Berechnungsbegriffs zu berücksichtigen, kann dieser zu einer soliden und dauerhaften Grundlage für die Kognitionswissenschaft werden.

Literatur

Augarten, S. (1985): *Bit by Bit—An Illustrated History of Computers*, London

Bridgeman, B. (1980): Brains + Programs = Minds, Erwiderung zu Searle, *Brain and Behavioral Sciences* 3, 427-428

Busemeyer, J.R./Townsend, J.T. (1993): Decision field theory: A dynamic-cognitive approach to decision-making in an uncertain environment, in: *Psychological Review* 100, 432-459

Clark, A./Grush, R. (1999): Towards a Cognitive Robotics, in: *Adaptive Behavior* Vol 7:1, 5-16

Church, A. (1936): An Unsolvable Problem of Elementary Number Theory, in: *American Journal of Mathematics* 58, 345-363

Davis, M. (Hg.) (1965): *The Undecidable,* New York

Dietrich, E. (1990): Computationalism, in: *Social Epistemology* vol 4, no 2, 135-154

Fodor, Jerry A. (1981): *RePresentations. Philosophical Essays on the Foundations of Cognitive Science*. Cambridge MA

Gandy, R. (1980): Church’s Thesis and Principles for Mechanism, in: Barwise, J./Keisler, H.J./Kunen, K. (Hg.): *Proceedings of the Kleene Symposium*, New York, 123-148

Gandy, R. (1988): The Confluence of Ideas in 1936, in: *The Universal Turing Machine: A Half-Century Survey*, Berlin, 55-111

Gardner, H. (1985): *The Mind’s New Science: A History of the Cognitive Revolution*, New York

Gerhard, C.J. (1875-90): *Die philosophischen Schriften von Leibniz*. 7 Bände, Berlin (Nachdruck 1965, Hildesheim)

Haugeland, J. (1985): *Mind, Design I*, Cambridge Mass.

Haugeland, J. (1996): *What is Mind Design? Mind Design II*, Cambridge Mass.

Herken, R. (1988): *The Universal Turing Machine: A Half-Century Survey*, Berlin

Hobbes, T. (1994): *Levithan*. In *The Collected Works of Thomas Hobbes*, Routledge

Hodges (1988): Alan Turing and the Turing Machine, in: *The Universal Turing Machine: A Half-Century Survey*, Berlin, 3-15

Hopcroft, J. E./Ullman, J. D. (1979): *Introduction to Automata Theory, Languages, and Computation*, Cambridge Mass.

Lucas, J.R. (1961): Minds, Machines, and Gödel, in: *Philosophy* 36, 122-127

Johnson-Laird, P.N. (1988): *The Computer and the Mind*, Cambridge Mass.

McCulloch, S.W./Pitts, W.H. (1943): A Logical Calculus of the Ideas Immanent in Nervous Activity, in: *Bulletin of Mathematical Biophysics* Vol.5, Chicago, 115—133

Molesworth, W. (1994): *The Collected Works of Thomas Hobbes*, Routledge

Pratt, V. (1987): *Thinking Machines – The Evolution of Artificial Intelligence*, Oxford

Port, R./van Gelder, T. (1995): *Mind as Motion: Explorations in the Dynamics of Cognition,* Cambridge Mass.

Putnam, H. (1988): *Representation and Reality*, Cambridge Mass.

Scheutz, M. (1999): When Physical Systems Realize Functions ..., in: *Minds and Machines* 9, 161–196

Scheutz, M. (2000): The Cognitive-Computational Story, in: Scheutz, M. Hrsg. (2000) “New Computationalism”. *Conceptus Studien* 14, St. Augustin, 136–152

Scheutz, M. (2001): Computational versus Causal Complexity, in: *Minds and Machines* 11, 534–566

Scheutz, M. (2002): *Computationalism-New Directions*, Cambridge Mass.

Searle, J. (1980): Minds, Brains and Programs, in: *The Behavioral and Brain Sciences* 3, 417–424

Searle, J. (1992): *The Rediscovery of Mind*, Cambridge Mass.

Smith, B.C. (1996): *The Origin of Objects*, Cambridge Mass.

Smith, B.C. (2002): The Foundations of Computing, in: Scheutz, M. ed. (2002): *Computationalism-New Directions*, Cambridge Mass,

Turing, A. M. (1936): On Computable Numbers, with an Application to the Entscheidungsproblem, in: *Proceedings of the London Mathematical Society*, Series 2, 42, 230 –265

Turing, A.M. (1939): Systems of Logic Based on Ordinals, in: *Proceedings of the London Mathematical Society* 45, 161-228

Van Gelder, T. (1995): What Might Cognition Be, If Not Computation? in: *Journal of Philosophy* 91, 345-381

Van Gelder, T. (1998): The Dynamical Hypothesis in Cognitive Science, in: *The Behavioral and Brain Science*s 21, 615-665

Williams, M.R. (1997): *A History of Computing Technology*, Los Alamitos