

Die Zukunft der digitalen Maschine: Was kommt auf uns zu?¹

(Langvariante)

F. J. Radermacher²

¹ Langfassung zu einer umfangreichen Überarbeitung des Vortrags von Prof. Radermacher „Die Zukunft der digitalen Maschine: Was kommt auf uns zu?“ im Rahmen der Vortragsreihe „*Innovation*“ der TU Dresden am 01.12.2014. Der Text beruht in Teilen auf einem Beitrag „Algorithmen, maschinelle Intelligenz, BIG DATA: Einige Grundsatzüberlegungen“, veröffentlicht im Schwerpunktheft „Big Data contra große Datensammlung. Chancen und Risiken für die Gesundheitsforschung“ des Bundesgesundheitsblattes, Mitte 2015. Eingeflossen sind auch Überlegungen aus einem Beitrag für die *Computerwoche*, Ausgabe 38-39/2014.

² Prof. Dr. Dr. F. J. Radermacher, Vorstand des Forschungsinstituts für anwendungsorientierte Wissensverarbeitung/n (FAW/n), zugleich Professor für Informatik, Universität Ulm, Präsident des Senats der Wirtschaft e. V., Bonn, Vizepräsident des Ökosozialen Forum Europa, Wien sowie Mitglied des Club of Rome

Korrespondenzadresse: Forschungsinstitut für anwendungsorientierte Wissensverarbeitung (FAW/n), Lise-Meitner-Str. 9, D-89081 Ulm, Tel. 0731-50 39 100, Fax 0731-50 39 111, E-Mail: radermacher@faw-neu-ulm.de, <http://www.faw-neu-ulm.de>

Einleitung.....	3
1. Superorganismen – eine interessante Abstraktionsebene	4
2. Wissen – verschiedene Arten der Repräsentation.....	6
3. Was wollen wir unter Intelligenz verstehen?	10
4. Details und Qualitäten statt eines „Streit um Worte“	12
5. Die IT-Revolution.....	20
6. Die Welt der Algorithmen und die Turing-Maschine	27
7. Entscheiden.....	35
8. Die „Neuro-Maschine Gehirn“	37
9. Wie leistungsfähig ist unsere „Neuro-Maschine“?.....	42
10. Eine Turing-Maschine in einem Neuro-System.....	44
11. Die Sonderposition des Menschen zwischen Tier und Computer	50
12. Der Mensch und das Gefühl für Gerechtigkeit	54
13. Die Qualia-Frage.....	57
14. Wo werden uns immer intelligentere technische Systeme hinführen?.....	61
15. Der gläserne Mensch droht.....	65
16. Zur Zukunft der Arbeit	67
17. Zukunftsgestaltung unter schwierigen Randbedingungen.....	71
18. Eine weltweite Ökosoziale Marktwirtschaft bietet Chancen	76
Zusammenfassung.....	78
Danksagung.....	78
Literatur.....	79

Einleitung

Die Frage „**Was ist künstliche Intelligenz?**“ bewegt viele Menschen. Viele fragen sich, inwieweit eine Maschine jetzt oder in Zukunft tun kann, was der Mensch tut oder kann? Gibt es prinzipielle Unterschiede zwischen dem, was der Mensch kann und dem, was Maschinen können bzw. irgendwann können werden? Manche interessieren sich auch für die Frage nach der Intelligenz der **Menschheit als Superorganismus**. Dahinter steht die Überlegung, dass man die Menschheit in ihrer Gesamtheit als **ein einziges Lebewesen** sehen kann. Ist die Menschheit etwas anderes als eine „Herde von Menschen“? Von der Intelligenz her betrachtet geht es darum, ob die Menschheit eine eigene Form der Intelligenz besitzt, die mehr ist als die Summe der „Intelligenzen“ der Menschen. Darüber hinaus kann man fragen, ob die **Menschheit ein Bewusstsein** von sich selber besitzt, dass etwas anderes ist als die Addition der Bewusstseinskapazitäten der einzelnen Menschen? Wie sieht die Zukunft der Menschheit aus bei all der Intelligenz, die uns auf der Ebene der Individuen, wie auf der Ebene der Menschheit als Ganzes auszeichnet?

Abstrakt gesprochen stellt sich auch folgende Frage: Gibt es einen grundsätzlichen Unterschied zwischen einem Menschen als biologischem Wesen mit einem neuronalen Netz als Basis seiner Intelligenz im Verhältnis zu dem Vermögen eines heutigen oder zukünftigen **Computers** oder einer sogenannten **Turing-Maschine** als mathematischem Modell für die algorithmische Verarbeitung von Informationen. Erinnerung sei in diesem Kontext an das **Manifest einiger Neuro-Wissenschaftler** „Das Manifest: Elf führende Neurowissenschaftler über Gegenwart und Zukunft der Hirnforschung“ aus 2004, exklusiv in **Gehirn & Geist**, Hirnforschung im 21. Jahrhundert, vor 11 Jahren mit folgender Botschaft (hier etwas pointierter wiedergegeben) [9]: „Über das Gehirn können wir mittlerweile viel sagen. Wir verfolgen einen großen Plan. Wir werden verstehen, wie das Gehirn arbeitet. Mit Computerwissenschaft hat das eher weniger zu tun“. Zugegebenermaßen geht es den Neurowissenschaftlern dabei nicht nur oder primär um das abstrakte Ver-

stehen von Intelligenzleistungen, wie es in diesem Text (auch in Abgrenzung zu Begriffen wie Bewusstsein oder Empfindungsfähigkeit) thematisiert wird, sondern um Einsichten, die bei partiellen Ausfällen von Gehirnleistungen oder bei Krankheiten wie Alzheimer oder bei der Wiederaktivierung mentaler Fähigkeiten nach Krankheiten oder Unfällen von Nutzen sein können. Es geht im weiteren Sinne auch um neurochirurgische Eingriffe, Prothetik, Verknüpfungen zwischen Chips und Körper und um neue Medikamente.

Mittlerweile gibt es ein „**Gegenmanifest**“ von 15 Wissenschaftlern aus 2014, publiziert in **Psychologie heute**, unter dem Titel Memorandum „Reflexive Neurowissenschaft“ [21], stärker aus dem Bereich der Psychologie und der Philosophie kommend, das fragt: „Was ist denn nun in den letzten 11 Jahren nach den großen Ankündigungen auf Seiten der Neuro-Wissenschaft herausgekommen und wo geht die Reise hin? Nähert man sich dem Phänomen „Intelligenz“ von der Neuro-Seite her wirklich, oder ist das Phänomen „Intelligenz“ doch eher eine Frage der Philosophie? Der Autor würde ergänzen: oder ist es vielleicht sogar eher eine Frage der Mathematik? Gibt es einen direkten Link zu den Computerwissenschaften? Wie ist der Bezug zur Turing-Maschine? Im Weiteren folgt eine Reihe von Hinweisen. Ergänzend sei auf [24, 28] verwiesen. In [24] findet sich insbesondere eine umfangreiche Aufarbeitung von Literatur aus dem Bereich der „**Philosophie des Geistes**“ („**Philosophy of mind**“).

1. Superorganismen – eine interessante Abstraktionsebene

In Verbindung mit Fragen nach **Intelligenz, Kreativität, Kognition, Wissen, Willen, Freiheit** untersucht man heute in den verschiedenen Wissenschaften das Verhalten ganz unterschiedlicher Systeme. Steht hier zunächst der **Mensch** als Träger von Intelligenz im Vordergrund, so betrachtet man ebenso **höhere Primaten, Insektenstaaten, Roboter,**

aber auch **Mensch-Maschinesysteme, intelligente Informationssysteme, Unternehmen und Organisationen** und manchmal auch **Gaia**, d. h. das gesamte „lebende System“ der Biomasse auf dieser Erde. Eine Frage ist, unter welchem konzeptionellen Rahmen man derart unterschiedliche Systeme simultan analysieren kann, auch um zu versuchen, Erfahrungen und Einsichten aus einem Bereich in einen anderen zu übertragen (z. B. im Sinne der Nutzung von „Metaphern“). Ein solches Konzept sind **Superorganismen**. Dies sind „lebende“ Strukturen, deren Überlebensfähigkeit von einer geeigneten Koordination des Miteinanders von Einzelsystemen abhängt, die ihrerseits lebensfähig sind, so wie ein Mensch aus Milliarden lebender Zellen besteht.

Im **Evolutionsprozess** ist der Übergang von einzelnen lebensfähigen Formen zu einem Superorganismus besonders spannend. Die Selbstorganisation durchläuft in der Regel einen (Evolutions-) Prozess und muss dabei für die beteiligten Einzelemente „attraktiv“ genug sein, um sich zu einem Ganzen zusammenzuschließen. In der Regel geht es darum, dass das Ganze über **Arbeitsteilungseffekte** in der Lage ist, den einzelnen beteiligten Komponenten Biotopbedingungen zu bieten, die tendenziell vorteilhaft sind, so dass es sich unter den Aspekt des langfristigen Überlebens für das Ganze wie für die Teile als günstige Lösung erweist, in dieser Form zu kooperieren. Als Folge werden die einzelnen Teile in einem gewissen Umfang durch das Ganze koordiniert und verlieren Teile ihrer „Freiheit“ (**Versklavungsprinzip**). Im Gegenzug gewinnen die Teile durch stabile Biotopbedingungen Sicherheiten und „Freiheiten“ hinzu.

Praktische Fragen betreffen dann Punkte folgender Art, die allesamt Bezüge zur Überlebensfähigkeit und Performance derartiger Systeme besitzen: Kann ein Superorganismus **Informationen speichern und verarbeiten**? Verfügt ein Superorganismus über **Intelligenz**? Ist er **kreativ**? Hat er **Gefühle**? Wie trifft er **Entscheidungen**? Kann er **kommunizieren**? Besitzt er **Bewusstsein**? Ganz wichtig ist auch die Frage, wie die **interne Hierarchie** von konkurrierenden Ansprüchen und des **Umgangs mit knappen Ressourcen** or-

ganisiert ist? Letzteres ist eng mit der Rolle des Bewusstseins verknüpft [24]. Dabei ist es aus Sicht dieses Grundsatztextes wichtig, alle diese Begriffe und Konzepte zu unterscheiden und z. B. nicht die Intelligenzseite des Menschen sofort allumfassend mit Bewusstsein und der Fähigkeit zu Empfindungen und Gefühlen und zum Treffen von Entscheidungen auszustatten. Wir haben aus gutem Grund verschiedene Worte für Intelligenz, Kreativität, Entscheiden und Bewusstsein, also gilt es an dieser Stelle zu differenzieren. Das tun wir auch in diesem Text. Die Intelligenzfrage steht im Vordergrund. Das Dokument ist eingebettet in langjährige Überlegungen des Autors zu dieser Thematik. Die umfassendste Darstellung findet sich in [24], wo Intelligenz, Bewusstsein, Freiheit, Qualia ausführlicher und im Kontext eines natürlichen Verlaufs des **Evolutionsprozesses** zu diesen Themen diskutiert werden.

2. Wissen – verschiedene Arten der Repräsentation

Wissen ist von Intelligenz zu unterscheiden. Rein lebenspraktisch setzt aber intelligentes Verhalten vor allem sehr viel Wissen über Details voraus. Intelligenzoperatoren (wie etwa logische Folgerungen) erlauben es, aus Wissen neues Wissen abzuleiten. Oftmals hypothetisieren wir in „unbekanntem Gelände“, entwickeln Hypothesen oder gar Theorien. Detailwissen ist hilfreich, um Hypothesen zu „**falsifizieren**“, also als sicher falsch auszusondern, wenn sie nämlich Fakten oder Erfahrungen widersprechen. Dies verbessert die Qualität der Hypothesenbildung erheblich.

Im Weiteren unterscheiden wir mit Bezug auf [4, 22, 23] vier Repräsentationsformen von Wissen. Wissen wird dabei in unterschiedlichen Formen der **Musterbildung und –transformation** abgelegt und umgesetzt. In einer mehr klassischen Begriffswelt geht es dabei um folgende Mechanismen und Ebenen:

- (1) Wissen in Form **dreidimensionaler Passung**
- (2) **sensomotorisches Wissen** bzw. Wissen in Form von Können, repräsentiert in dynamischen Gleichgewichten, z. B. in **neuronalen Netzen**
- (3) Wissen auf der Ebene von **Sprache, Logik, symbolischen Kalkülen**, z. B. das klassische Wissen in der Philosophie
- (4) Wissen in Form **mathematischer oder anderer komplexer Modelle der Realität**

Die verschiedenen Ebenen des Wissens, wie sie hier betrachtet werden, sind in der biologischen Evolution eine nach der anderen aufgetreten und bauen konkret materiell aufeinander auf, d.h. die jeweils abstraktere, höhere Ebene ist materiell als spezielle Ausprägung der darunter liegenden Ebene realisiert. D.h. letztlich auch, dass alles Wissen auf dieser Welt auf Mechanismen der Passung zurückgeführt werden kann.

Als Beispiele für Wissen auf der Ebene (1) sei die Anpassung zwischen **Körper und Biotop** genannt, aber z. B. auch die „**Spiegelbildlichkeit**“ zwischen Krankheitserreger und Antikörper im Blut. Hierzu gehört auch das Wirken der Antikörper-Identifikation im **Immunsystem** und ganz allgemein das „**Schlüssel-Schloss-Prinzip**“ als eine spezielle Form der Passung.

Auf der Ebene (2) der sensormotorischen Funktionen sind alle Fähigkeiten etwa von Menschen oder höheren Säugern platziert, die zur ganzheitlich-holistischen Bewertung und Einschätzung von Situationen (**Intuition**) oder zur Ausführung von komplexen Körperbewegungen aller Art befähigen. Aufgrund mathematischer Ergebnisse der letzten 20 Jahre wissen wir heute, dass die hier wirksamen Mechanismen im Prinzip die Mächtigkeit haben, alle **stetigen Funktionen** (darüber hinaus sogar alle stetigen Funktionen mit einer begrenzten Zahl von Sprungstellen) zu erlernen. Hierauf wird unten noch eingegangen. Ferner sind sie insbesondere dazu in der Lage, im Prinzip alle Informationsverarbeitungsprozesse auszuführen, die ein Rechner bzw. eine Turingmaschine prinzipiell

verarbeiten kann („**Berechenbarkeitsvollständigkeit**“). Auch das wird im Weiteren noch ausgeführt.

Die Ebene (3), die Ebene der **sprachlichen, symbolischen Kalküle** ist die Ebene, die besonders charakteristisch für den Menschen ist.

Hier werden Einschätzungen der Realwelt nach **vorheriger Klassifikation von Situationen** und der Anwendung von **logischen Kalkülen** auf diese Situationen beurteilt. In diesen Rahmen der Informationsverarbeitung fallen alle sprachlichen bzw. logisch-abstrakten Prozesse. Aus der Evolution heraus geht es hierbei insbesondere auch um die Klassifikation von Zuständen (**Basis jeder Begriffsbildung**), um auf diese Weise die **Beschreibungskomplexität** von Situationen massiv zu reduzieren und in der Folge besser kommunizieren und gezielter lernen zu können.

Die Ebene (4) ist schließlich die Ebene der **abstrakten-mathematischen** bzw. **naturwissenschaftlichen Modelle**. Hier geht es um Modelle der Welt und damit um ein Wissen, das eigentlich zu komplex ist, um von einem Gehirn noch direkt auf einer biologischen Ebene beherrscht zu werden. Entsprechende Wissensformen, vor allem **wissenschaftliche Theorien**, sind relativ jungen Datums und in Breite erst nutzbar, seit entsprechende Rechnersysteme die Umsetzung erlauben. Sie sind damit ein „Schatz der Menschheit“ als Superorganismus und weit jenseits des natürlichen Verarbeitungspotentials des Menschen und erst recht anderer „höherer“ Tierarten angesiedelt.

An dieser Stelle ist zu beachten, dass die beschriebene Hierarchie der Wissensarten nicht bedeutet, dass höhere Ebenen der Wissenscodierung eine höhere Qualität des Wissens darstellen. Vielmehr sind viele Superorganismen, insbesondere auch Menschen und Firmen, häufig deshalb erfolgreich und überleben, weil sie Wissen auf den genannten, nicht-begrifflichen Ebenen besitzen, von dem sie in der Regel nicht einmal wissen,

dass es vorhanden ist. Noch deutlicher: **Unser Immunsystem hat auch funktioniert, als wir noch nicht wussten, dass wir ein solches besitzen.** Dabei ist es in unserer Gesellschaft heute allerdings oft so, dass der gesellschaftliche Kontext erzwingt, den Erfolg irgendwelchen Hierarchien bzw. Regelebenen zuzuweisen, auch wenn tatsächlich ganz andere Ebenen den Ausschlag gegeben haben.

Bewusstsein, Lernen, Kreativität, Freiheit, Kommunikationsverhalten sind weitere interessante Themen, die in den oben genannten Referenztexten [22, 23, 24] diskutiert werden und die teils auch einer technischen Analyse zugänglich sind, aber hier aus Platzgründen nicht detaillierter behandelt werden können. Interessant ist in diesem Kontext auch das wichtige Thema des Treffens von **Entscheidungen** unter Restriktionen, konkurrierenden simultanen Zielvorstellungen und Unsicherheiten über die Zukunft. Dies wird in Kapitel 7 angesprochen.

Für Superorganismen spielen in diesem Kontext auch die **Kommunikationsprozesse** untereinander eine zentrale Rolle. Kommunikation ist etwas, was nur zwischen Superorganismen stattfinden kann. Ganz allgemein geht es bei Kommunikation biologischer Systeme um die **strukturelle Koppelung von Nervennetzen** in einer Weise, dass letztlich ein intendierter Zweck erreicht wird. Dies kann über **Gattungsgrenzen** hinweggehen, wie alle Menschen wissen, die viel mit Tieren zu tun haben. Die Kommunikation zwischen einem Menschen und Hund, Katze oder beispielsweise Pferd kann sehr ausdifferenziert und präzise sein. Manchmal hängt davon das eigene Leben ab.

Kommunikation ist schwierig. In der Regel werden wechselseitige Mitteilungen von internen Zuständen der jeweils eigenen Informationsverarbeitungsprozesse unternommen. Hier ist den Beteiligten oft der eigene interne Zustand, z. B. auf einer neuronal-holistischen Ebene, selber nur partiell verfügbar. Das Problem ist dann die Übersetzung

dieser nur partiell wahrgenommenen internen Konstellation in eine Form, die sich für die Kommunikation zwischen Partnern eignet. Diese Form ist bei Menschen, insbesondere dann, wenn Distanz zwischen den Personen besteht, meistens eine **sprachliche oder textliche Äußerung**. Schon bei unseren eigenen sprachlichen oder textlichen Aussagen haben wir selber oft den Eindruck, dass der Satz nicht das sagt, was wir eigentlich sagen wollen. Auf der Seite des Partners ist dann der von uns geäußerte Satz wiederum zurückzuübersetzen in ein mentales Bild.

Es wundert in dieser Konstellation nicht, dass Kommunikation (insbesondere zwischen Fremden) oft, wenn nicht meistens, durch **Missverständnisse** gekennzeichnet ist. Die Dinge werden oft einfacher, wenn die Kommunikation auf der Ebene von Körpersprache angereichert wird, vor allem bei praktischen Fragen, Alltagsfragen, Überlebensfragen. Hier ist Kommunikation unter Einschluss von Körpersprache deutlich wirkungsvoller.

3. Was wollen wir unter Intelligenz verstehen?

Im Weiteren wird holzschnittartig eine mögliche Sicht auf die in Abschnitt 1 und 2 formulierten Fragen aus Sicht des Autors gegeben. Dabei wird Intelligenz begrifflich klar von Bewusstsein, Gefühl und weiteren Themen, wie z. B. Kreativität oder Willen, getrennt. Diese bilden andere wichtige Dimensionen des geistigen Lebens der Menschen, die allesamt mit Intelligenz zusammenhängen, aber doch auch eigenständige Themen sind. Den Hintergrund bildet, wie oben schon dargestellt, der **Evolutionsprozess** und die Frage „Wie kann man sich im Rahmen der biologischen Evolution, verstanden als einen Prozess der Selbstorganisation der Materie, den Weg zu unserer heutigen Welt vorstellen?“ Dabei muss man ausgehen von extrem einfachen Lebensformen, die im Wesentlichen **reaktiv** organisiert waren, also Reaktionen auf äußere Reize zu produzieren in der

Lage waren. Kann man sich vorstellen, wie aus einem solch (bescheidenen) Anfang über die Zeit in **Selbstorganisation** etwas entstehen konnte, das immerhin die Mächtigkeit an Intelligenz, Reflektionsfähigkeit und Bewusstsein besitzt, die uns auszeichnet, also den Menschen, der sich nun mit all diesen und vielen weiteren Fragen beschäftigt? Kann man diesen Weg nachvollziehen oder braucht man „**Wunder**“ als Erklärung, muss man dazu vielleicht sogar den Rahmen der Physik verlassen?

Lassen Sie mich die weiteren Überlegungen mit einer Analogie beginnen. Wir betrachten zunächst statt der komplexen Thematik „Intelligenz“ die biologische Fähigkeit mancher Lebewesen zum „**Fliegen**“ und vergleichen diese mit verfügbaren technischen Lösungen. Wir können als eine biologische Inkarnation des Fliegens einen **Adler** nehmen und als technische Inkarnation einen **Airbus**. Die Frage ist dann im Vergleich beider Alternativen die folgende: Wer versteht hier wirklich etwas vom Fliegen? Und was ist eigentlich die bessere Form des Fliegens? Haben wir technisch im Fliegen etwas hinbekommen, was sich mit einem Adler vergleichen kann? Oder ist der Adler irgendwie doch das wirkliche Fliegen und der Airbus „nur“ eine zweitklassige technische Annäherung an das Thema?

Meine Aussage ist die folgende: Der Adler ist in seinen Flugbewegungen sehr elegant, und es ist bewundernswert, was ein Adler all das schafft, was er fliegerisch schafft, ganz abgesehen davon, dass er auch noch „Babys“ in die Welt zu setzen in der Lage ist. Das ist insgesamt schon beeindruckend. Andererseits ist aber auch folgendes richtig: Wenn man diverse Tonnen Material einigermaßen zuverlässig von Singapur nach Dresden und zurück transportieren will, dann nimmt man besser einen Airbus. D. h., dass ein Airbus in vielen Dimensionen dem Adler extrem überlegen ist, auch wenn es in anderen Fällen genau umgekehrt ist. Die Realisierungen Adler und Airbus sind offenbar extrem verschieden. Dennoch: Man kann nicht sagen, dass nur der Adler etwas vom Fliegen versteht oder dass der Airbus eigentlich kein richtiges Fliegen realisiert.

Die Analogie bezüglich Intelligenz (hier klar getrennt von Bewusstsein und vor allem Gefühl (Qualia)) sieht nun wie folgt aus: Der Mensch ist auf seine Art intelligent, aber die Maschine mittlerweile auf ihre Art auch. Mensch und Maschine operieren dabei jeweils sehr verschieden, aber es gibt keinen Grund anzunehmen, nur der Mensch habe die richtige Intelligenz und die Intelligenz der Maschine sei irgendwie „falsch“ oder könne ganz prinzipiell und unzweifelhaft nie dahin kommen, wo der Mensch ist. Mancher zweifelt prinzipiell, dass je eine „wirkliche“ **Silizium- oder Chip-basierte Intelligenz** möglich sein wird. Andere fragen provokativ zurück, ob eine „**Fleisch-basierte Intelligenz**“, wie die des Menschen, prinzipiell überhaupt vollumfänglich intelligent sein kann.

4. Details und Qualitäten statt eines „Streit um Worte“

Ich empfehle an dieser Stelle, sich mit Qualitäten und Details zu beschäftigen und mit der Frage, wie sich Leistungsniveaus über die Zeit verändern, statt einen „Streit um Worte“ zu führen. Interessant ist z. B., wie lange die Menschen geglaubt haben, dass **Schach** eine (Intelligenz-)Domäne sei, in der die Maschine gegen den Menschen keine Chance hat. Das galt bis 1996, bis IBM mit „Deep Blue“ den amtierenden Schachweltmeister besiegt hat.

Heute kann man für 100 Euro ein Schach-Programm kaufen, das auf verschiedene Spielstärken eingestellt werden kann. Wahrscheinlich gibt es niemanden in einer typischen Kolloquiumsveranstaltung, der auch nur auf dem niedrigsten Spielstärke-Niveau gegen das Computer-System bestehen könnte. Manche Beobachter kontern diesen eigentlichen deprimierenden Befund mit der Aussage: „Diese Maschine besitzt nur einen primitiven „Brute-Force-Algorithmus“. Die Maschine ist also nur deshalb so gut, weil sie alle Möglichkeiten von Zügen ausprobieren kann. Das ist allerdings ein schwaches Argument

und außerdem nicht zutreffend. Wir wissen, dass schon 2^{300} größer ist als die Anzahl aller Atome im Universum. Die Möglichkeit der Zugfolgen beim Schach ist aber noch viel größer. Würde ein Brute-Force-Algorithmus nun alle Möglichkeiten durchprobieren wollen, wäre das unmöglich, egal, wie viel schneller als heute die Computer in der Zukunft noch sein werden.

Das Geheimnis eines leistungsfähigen Computer-Schachsystems sind nämlich nicht nur die vielen Stellungen, die es betrachten kann, sondern die **Stellungsbewertungsfunktion**, mit deren Hilfe es eine beliebige Stellung statisch bewertet und damit insbesondere bezüglich verschiedener Stellungen eine Bewertung abgibt über die Qualität der Stellungen im Vergleich zueinander. Diese Funktion kommt nicht immer zum tatsächlich richtigen Schluss, vor allem, wenn raffinierte kombinatorische Konstellationen in der Stellung versteckt sind, aber doch sehr oft und im Vergleich zum Menschen oft genug. Die dann noch zu betrachtenden Suchbäume, die der Algorithmus mit „Brute-Force“ bearbeitet, werden auf diese Weise radikal verkleinert bis in eine Größenordnung, die praktisch abgearbeitet werden kann. In diesem „Brute-Force“ Prozess werden dann auch viele kombinatorisch schwierige Situationen adäquat erkannt. Der Faktor 1.000 in der Verbesserung der Leistungsfähigkeit der Chips alle 20 Jahre (**Moore's Law**) hilft, die Anzahl der analysierbaren Stellungen ständig zu vergrößern. Auch die Bewertungsfunktion wird ständig verbessert. Das verbessert die Qualität der Kriterien, gemäß deren man die Suche einschränkt. In der Koppelung dieser Elemente liegt die Systemstärke. D. h. auch, dass in der Bewertungsfunktion ein substanzieller Teil der „Intelligenz“ des Computer-Schachsystems steckt. Ein interessanter Unterschied zum Menschen ist dabei, dass die Maschine ihre Bewertungsfunktion explizit kennt, während der Mensch das nicht vollumfänglich tut. Die Maschine kann natürlich dadurch, dass sie immer schneller wird, ständig mehr Halbzüge untersuchen. Weshalb sie uns am Schluss besiegt.

Jetzt wird mancher sagen, dass aber der Mensch sich das alles ausgedacht hat. Das stimmt nicht ganz, weil man das System so gebaut hat, dass es an der Bewertungsfunktion selber Veränderungen vornimmt. Dann kann man allerdings immer noch sagen, dass der Mensch sich den Meta-Algorithmus ausgedacht hat, gemäß dem diese Veränderungen erfolgen. Allerdings muss man auch beim Menschen feststellen, dass er, in dem, was er tut, in einem genetisch und kulturell geprägten Evolutionsrahmen operiert, in dem andere oder die Natur Voraussetzungen geschaffen haben, auf die es als Individuum aufbaut. Und zwar gemäß der klugen Beobachtung: „**Wir sind alle Zwerge auf den Schultern von Riesen**“.

Wenn wir nun sagen, Maschinen seien trotzdem nicht intelligent, dann ist das eine mögliche Position in dieser Frage und betrifft den (pragmatischen) Gebrauch der Sprache und der Worte. Rein lebenspraktisch ist dabei aber zu beachten, dass es noch vor kurzer Zeit für uns Menschen als klarer Nachweis von hoher Intelligenz galt, wenn jemand gut Schachspielen konnte. Ich bin da pragmatisch und vermeide lieber den Streit um Worte. Offenbar ist es aber so: Da ist eine schwierige Aufgabe zu lösen und offenbar löst die Maschine diese Aufgabe mittlerweile ziemlich gut, sogar besser als wir Menschen.

Ein weiteres Beispiel: Vor 25 Jahren war es noch ein Maßstab für menschliches Intelligenzvermögen, dass wir gut darin sind, uns **in unbekanntem Gelände zurechtzufinden**. Wir kommen als Mensch auch in einer fremden Stadt zurecht. Richtig zufrieden sind wir aber heute nur dann noch mit uns, wenn es den Vergleich mit einem modernen **Navigationsgerät** nicht gibt. Ein Navigationsgerät ist in Sachen „sich zurechtfinden“ ein großer Schritt nach vorne. Menschen finden ihr Ziel nämlich oftmals nicht. Oder erst nach langem Suchen, das die Menschen manchmal zur Verzweiflung bringt und oft Auslöser von Streit ist, z. B. bei Paaren in einem Auto, die in der Nacht bei Regen nach einem Hotel in Italien suchen. Wobei es keine Rolle spielt, wer auf Seiten der Partner am Steuer sitzt und wer die Karte studiert. Menschen finden übrigens an Bahnsteigen häufig nicht die

Position ihrer Platzreservierung. Dennoch halten sich viele Menschen für eine großartige Inkarnation der Intelligenz. Diese großartige Inkarnation der Intelligenz scheitert aber oft schon an einfachsten Aufgaben.

Das Beispiel Navigation macht deutlich, wie viel Technik zusammenwirkt, um unsere heutigen, großartigen „Intelligenzleistungen“ technischer Systeme zu ermöglichen. Etwa in der Landwirtschaft als interessantes Anwendungsfeld von Navigationssystemen ein sogenanntes „**Precision farming**“, bei dem eine Erntemaschine auf den Quadratmeter genau erntet, die Ernteleistungen mit denjenigen der Vergangenheit vergleicht und dann noch „optimiert“, wie es den betrachteten Quadratmeter düngt. Interessant ist dabei die sogenannte **Technikkonvergenz**. Alle hier genannten, nicht direkt IT-bezogenen Innovationen profitieren von der Entwicklung der IT und der Verfügbarkeit leistungsfähiger Mathematik-Systeme, z. B. die Synchronisation zwischen Atomuhren in verschiedenen Satelliten. Umgekehrt liefern erst entsprechende Satelliten und Atomuhren die Informationen, mit deren Hilfe andere Computer Anwendungen wie „**Precision farming**“ realisiert werden können.

Mit moderner Technik wird also vieles viel einfacher, z. B. die Navigation. Die Voraussetzungen sind gewaltig. Zur Schaffung eines **Global Positioning Systems (GPS)** und darauf aufbauender moderner Navigationssysteme (z. B. in Fahrzeugen) mussten wir als Menschheit viel mehr tun, als (nur) leistungsfähige Computer entwickeln. Z. B. galt es, Satelliten zu erfinden und am Himmel in (geeigneten) Umlaufpositionen zu installieren, des Weiteren Uhren zu entwickeln mit einer Präzision, die eine Billion (10¹⁵) mal genauer ist als eine Sekunde³.

³ Hinweis: Atomuhren operieren z. B. auf der Feinheitsebene von **Atomsekunden**, das sind Größen, die mit der Periode von Mikrowellen in Resonanz sind, die von Grundschwingungen von Caesiumatomen (Cäsium 133) herkommen. Ihre Größe liegt bei 10⁻¹⁵ Sekunden, das ist eine Billion Mal kürzer als eine Sekunde.

Das **von den USA installierte GPS** verwendet einen Verbund von 24 Satelliten, die die Erde in nahezu kreisförmigen Bahnen in etwa 20.000 km Höhe umrunden und insbesondere nicht stationär sind. Insoweit ein Punkt auf oder über bzw. unter der Erde von einem dieser Satelliten zu einem bestimmten Zeitpunkt per Mikrowelle erreichbar ist, ist er maximal rund 25.000 km entfernt. Die Laufzeit des Lichtes für diese Strecke beträgt, je nach Entfernung, zwischen 0,067 s und 0,086 s.

Die Satelliten sind in der Lage, ihre Zeit auf der beschriebenen Genauigkeitsebene zu synchronisieren. Sie senden **gleichzeitig** in regelmäßigen Abständen (auf 30 Sekunden-ebene) Signale, die von eingesetzten Navigationssystemen (z. B. in einem Automobil) registriert werden können.

Die Signale werden von Mikrowellen mit einer Frequenz von $15 \cdot 10^9$ transportiert. Die Signale beinhalten auch eine Information über den absendenden Satelliten. Wenn von einigen (mindestens 4) Satelliten Signale empfangen werden, kann das Navigationssystem aus den Laufzeitdifferenzen der eingehenden Signale seine eigene Position hochgenau berechnen (heute teilweise schon auf Meterebene). Die eigene Position ergibt sich dabei im einfachsten Fall als Schnittpunkt von 3 Kugeloberflächen. Im Mittelpunkt der Kugeln stehen die Satelliten. Das GPS-System muss dazu nicht über eine Atomuhr verfügen. Von den Satelliten her wird nämlich über die Mikrowellen permanent auch eine genügend feine Zeitmetrik mitgeliefert, relativ zu der die empfangenen Signale der verschiedenen Satelliten gemäß Ankunftszeiten geordnet und Zeitdifferenzen genügend genau festgestellt werden können. Neben einer geografischen Position auf bzw. über der Erde kann so auch die eigene Höhe des Objekts relativ zum Meeresspiegel festgestellt werden, wobei Höhenkarten der Erde dafür Voraussetzung sind.

Erwähnt sei, dass wegen der Lichtgeschwindigkeit der Signalübertragung und der relativen Geschwindigkeit der Satelliten in Bezug auf die Erdoberfläche sowie aufgrund der

wirkenden Schwerkraft Korrekturen erforderlich sind, die auf der **speziellen bzw. allgemeinen Relativitätstheorie** beruhen. Weitere Korrekturen kommen hinzu. Es ist dies insgesamt eine extrem komplizierte Materie, bei der viele Wissenschaften und Technologien perfekt zusammen wirken müssen.

Mit Blick auf die Historie des Themas ist es übrigens interessant, dass Ortsbestimmung auch früher schon etwas mit Zeitbestimmung zu tun hatte. Eine zentrale Rolle spielt z. B. die Feststellung des Zeitpunkts 12 Uhr mittags durch Verfolgung der Sonnenlaufbahn und ihres Höchststandes. Dies ist zentral für die Bestimmung des **Breitengrades**, auf dem man sich gerade befindet.

Viel schwieriger als die Bestimmung des Breitengrades ist die Bestimmung des **Längengrades**. Diese Bestimmung warf prinzipielle Probleme auf. Die Nullposition bei Greenwich in England ist willkürlich festgelegt. Eine Orientierung an den Gestirnen führte nicht zum Ziel.

Die fehlende Lösung zur Feststellung des Längengrads hat viele Schiffe und sehr viele Leben gekostet. So kamen am 22. Oktober 1707 über 2.000 englische Kriegssoldaten ums Leben, als kurz vor der Heimat vier heimkehrende Kriegsschiffe vor den Scilly-Inseln auf Grund liefen. Darum wurden große Preise auf die Lösung des Problems der Bestimmung des Längengrades ausgesetzt. Im Besonderen hatte das britische Parlament in seinem berühmten **Longitude-Act aus 1714** für eine praktikable und nützliche Methode zur Bestimmung der geographischen Länge den in heutige Währung übersetzten hohen Preis von mehreren Millionen Dollar ausgesetzt.

Die Lösung, die schließlich gefunden wurde, war anders als erwartet [36]. Nicht die Beobachtung der Gestirne brachten die Lösung, sondern Chronographen, also eine für damalige Verhältnisse **hoch-präzise Uhr**, die auf den Erfinder Mr. Harrison zurückging. Sie

war so präzise, dass sie in einer mehrmonatigen Reise, auf den Tag bezogen, maximal zwei Sekunden Abweichung produzierte, sodass man also relativ zuverlässig überall auf dem Globus die Zeit zu Hause und damit die Greenwich-Zeit kennt. Über einen Vergleich mit der eigenen Mittagszeit kann man leicht feststellen, um wie viel Zeit die eigene Ortszeit von der Greenwich-Zeit abweicht. Dies reicht aus, um den eigenen Längengrad zu bestimmen.

Eine präzise Uhr, präzise in der Größenordnung von 10^{-5} auf den Tag bezogen, war also die Lösung für das Problem der Bestimmung des Längengrades. Die Herausforderung bestand dann darin, genügend präzise Uhren zu bauen. Benötigt wurden Uhren, die auch bei unterschiedlichen Temperaturen, hoher Luftfeuchtigkeit und schwerem See-gang ihre Genauigkeit beibehielten.

Mr. Harrison hat dieses Problem gelöst. 1773 bekam er schließlich, nach Intervention durch den englischen König, den ihm zustehenden Preis. Kurz danach haben dann eine ganze Reihe anderer Handwerker ähnlich gute Chronographen gebaut und auch so gebaut, dass sie deutlich preiswerter wurde. Der Siegeszug der Chronographen in der Navigation auf See war dann ein Selbstläufer.

Es gibt bezüglich technischer Intelligenz eine weitere Steigerung, die vor kurzem erfolgt ist, nämlich ein weiterer Erfolg von IBM nach Deep Blue 1996. Nachdem Schach erfolgreich gemeistert war, kam in den letzten Jahren „Jeopardy“ an die Reihe. Das entsprechende IBM-Computersystem heißt **WATSON**. Jeopardy, ein beeindruckendes US-Quiz, härter als das deutsche Fernsehquiz „Wer wird Millionär“. Bei „Wer wird Millionär“ müssen die Kandidaten auf Fragen die Antworten finden. Wenn ein System das hinbekommen würde, würden wir Menschen das sofort abqualifizieren und uns den Erfolg wie folgt erklären: Das System hat lange Listen von Fragen mit Antworten, geht die Fragen durch und findet hoffentlich die Antwort. Das ist sicher naiv gedacht, wäre aber eine zu

erwartende Reaktion. Bei Jeopardy ist die Situation grundsätzlich anders. Da wird die Antwort gegeben und nach der Frage gefragt. Vom Engineering her würde man sagen, dass das ein **Reverse-Engineering-Prozess** ist. Man muss also zu einer Antwort eine Frage finden, die, wenn sie gestellt worden wäre, zu der Antwort geführt hätte, die der Moderator gegeben hat. Hier hätten die meisten wohl nicht erwartet, dass die Maschine das nicht leisten kann.

Zusätzlich sollte man sich noch die Randbedingungen des Spiels vor Augen führen. Die Maschine operiert in Konkurrenz zum Menschen. Sie bekommt die Aufgabe schriftlich und digital, während der Mensch sie hört. Dann muss die Maschine den Text „verstehen“ und überlegen, wie die Antwort ihrer Ansicht nach aussieht. Anschließend muss sie mit einem Sprachsystem die Antwort generieren, denn diese muss sie „sprechen“. Das ganze erfolgt unter Zeitdruck in Konkurrenz zu menschlichen Konkurrenten.

Bei Jeopardy sind die Regeln dabei wie folgt: Wer sich als erster meldet, darf zuerst antworten. Wenn er richtig antwortet, erhält er Gewinnpunkte. Wenn er allerdings falsch antwortet, bekommt er einen Punkteabzug und hat zugleich den Mitspielern viel Zeit zum Nachdenken verschafft plus einen Hinweis darauf, wie die Antwort nicht aussieht. Einer der beiden verbliebenen Mitspieler, nämlich der, der sich als zweiter gemeldet hatte, antwortet als nächstes, der Dritte ggf. als Letzter. Es spielt dabei offenbar eine große Rolle, wie man **taktisch vorgeht**.

Jeopardy als technisches System muss Texte analysieren, überlegen, was es antworten will, für sich eine Vorstellung darüber entwickeln, wie wahrscheinlich es ist, dass die eigene Antwort stimmt (ein besonders wichtiger Punkt – hier sollten Werte oberhalb von 80 % erreicht werden), das System muss dann taktisch geschickt operieren, irgendwann „sprechen“.

Wie war das Ergebnis? WATSON hat bei Jeopardy vor laufenden Fernsehkameras **alle menschlichen Champions besiegt**. Das waren Personen, die über viele Jahre als „Stars“ im Fernsehen mit Jeopardy richtig viel Geld verdient haben.

Nun kann man immer noch sagen, dass auch WATSON nicht wirklich intelligent ist. Es sei „nur“ ein raffinierter Algorithmus, den sich Menschen ausgedacht haben. Mein Blick ist ein anderer. Ich bin beeindruckt, welche Inkarnationen einer technischen Realisierung von Intelligenz und hoher Performance hier gelungen sind.

These 1

Menschliche und technische Intelligenz sind verschiedene Methoden, bestimmte schwierige Aufgaben zu lösen. Intelligenz umfasst hier nicht die Themen Bewusstsein oder Gefühl (Qualia), das sind andere wichtige, aber eigenständige Themen. In Bezug auf Intelligenz im Sinne von Problemlösungsqualität in nicht-trivialen Themenfeldern ist Technik in manchen Gebieten heute schon weiter als der Mensch.

5. Die IT-Revolution

Woher kommen die großen Veränderungen in Bezug auf technische Realisierungen von Intelligenz, deren Zeugen wir sind? Sie sind im Wesentlichen eine Folge der Tatsache, dass wir im Bereich IT die höchste Innovationsgeschwindigkeit erleben, die es je gegeben hat. Im Kern steckt dahinter das s. g. **Moore'sche Gesetz**, das uns jetzt seit Jahrzehnten alle 20 Jahre etwa einen Faktor 1000 an Effizienzsteigerung bei elementaren Rechenoperationen bringt (d. h. mindestens eine Verdoppelung alle 2 Jahre). Dahinter

wiederum steht, dass wir Informationseinheiten (Bitwunderbarers) auf immer kleinerem physikalischem Raum kodieren können, was die **unglaubliche Miniaturisierung**, und damit auch Beschleunigungen und Kostensenkung bei diesen Prozessen, deren Zeuge wir sind, nach sich zieht. Dabei wird deutlich, dass Information nur sehr schwach mit einer konkreten physikalischen Repräsentation gekoppelt ist. Das ist der tiefere Grund dafür, warum Moore's Law möglich ist. Anders ausgedrückt: Für eine Addition ist es egal, wie groß man die Nullen und die Einsen hinschreibt. Das Additionsergebnis ist davon unabhängig. Die Situation ist an dieser Stelle ganz anders als bei einem Auto, das immer mindestens so groß sein muss, dass ein Mensch hineinpasst.

Miniaturisierung und Chipentwicklung sind insofern zentrale Bereiche, in denen die IT-Revolution vorangetrieben wird. Dies gilt ebenso für alle Peripherysysteme und die Kommunikationseinrichtungen, z. B. Mikrowellentechnik. Von der Physik über die Elektrotechnik und die Materialwissenschaften sind hier viele akademische Disziplinen beteiligt, dies wurde oben am Beispiel des **Global Positioning Systems (GPS)** genauer beschrieben. Die Informatik ist mit vielen Disziplinen an der Erarbeitung der umfangreichen Software-Systeme beteiligt, die in einer Hierarchie der Organisationseinheiten das Laufen von Prozessen auf der Hardware ermöglichen. Dabei sind viele Übersetzungen zwischen **unterschiedlichen Computersprachen**, die auf bestimmte Aufgabentypen zugeschnitten sind, zu leisten. Zudem ist eine Vielzahl von Systemen für unterschiedliche Zwecke simultan zu betreiben.

Bzgl. prinzipieller Fragen ist wie üblich die Mathematik (teils in der Ausprägung der „Theoretischen Informatik“) gefordert; bei Fragen der Berechenbarkeit, der Komplexitätstheorie, der Verschlüsselung etc. Viele weitere Disziplinen haben Anteil. Der Weg in die total vernetzte Informations- und Wissensgesellschaft und das Internet der Dinge / Entitäten (vgl. nachfolgende Hinweise) und zu einem hybriden „**Superorganismus**

Menschheit“ erfordert Beiträge fast aller akademischen Disziplinen. Es ist ein gesellschaftliches **Megaprojekt**.

In Ulm umfasst die Fakultät für Ingenieurwissenschaften, Informatik und Psychologie mittlerweile mit 17 Psychologieprofessuren, eine der größten Psychologieeinheiten an Deutschlands Universitäten. Diese Einheit ist insbesondere ausgerichtet auf die besondere Thematik der **Kooperation von Mensch und Maschine** im weiteren Fortschritt der Technologie.

Die Folge der unglaublichen Fortschritte im Bereich IT sind heute Systeme, etwa im Bereich Micro-Trading von Finanztiteln, die im Millisekunden-Bereich Verträge über Millionen Euro abschließen. Wesentliches passiert dabei, ehe ein Mensch überhaupt merkt, dass etwas im Gang ist. In Zukunft wird sich das alles weiter potenzieren und zwar durch das **Internet der Dinge / Internet of Everything**, das wiederum eine Folge davon sein wird, dass sehr preiswerte, leistungsfähige Chips verfügbar sein werden. Chips der heutigen Leistungsfähigkeit in Mobiltelefonen oder PCs werden in 20 Jahren nur noch Cent Beträge kosten. Dies wird zur Folge haben, dass wir in Milliarden von technischen Artefakten, z. B. Brillen, Kleidungsstücken, Zahnbürsten etc. intelligente Komponenten verfügbar haben werden, die ihrerseits kommunizieren.

So etwas wie das Auto der Zukunft wird z. B. dadurch befördert, dass zahlreiche Installationen am Wegesrand genauso wie alle anderen Verkehrsteilnehmer ständig allen Verkehrsteilnehmern **nützliche Ströme von Information** zur Verfügung stellen werden, die die (in manchen Bereichen) schlechteren technischen optischen Möglichkeiten des Autos der Zukunft im Verhältnis zum Menschen kompensieren und sogar überkompensieren werden. Zusätzlich werden sie auch Informationen verfügbar machen, die Menschen

heute prinzipiell verschlossen sind. Etwa das Herannahen von Fahrzeugen, die abgeschirmt sind durch Gebäude, hinter denen sie verdeckt fahren.

Über das Internet der Dinge werden technische Systeme Dinge tun können, die wir als Menschen heute nicht tun können. Die über das Internet der Dinge verfügbar werdende Information ist dabei immer öfter von einem Charakter, dass sie für Maschinen angemessen ist, für Menschen nicht. Unsere relative Konkurrenzlage gegenüber Maschinen verschlechtert sich also auch an dieser Stelle und zwar aufgrund der von uns selber betriebenen technischen Innovationen und deren Umsetzung über Marktprozesse. Hinweis: Nicht ausgeschlossen sind für die Zukunft technische Lösungen, ggf. **direkte Kopplungen** technischer Informationssysteme mit unserem Körper oder unserem Nerven-netz, die auch uns derartige Informationen unmittelbar verfügbar machen werden. Solche Lösungen würden potentiell auch die Möglichkeiten in der **Prothetik** noch einmal dramatisch erweitern. Eine direkte Verbindung zwischen **Chips und unserem Nerven-netz**, die Signal- bzw. Wissensaustausch beinhaltet, würde ganz neue Möglichkeiten eröffnen.

Als Ergebnis der beschriebenen Prozesse im IT Bereich liegen heute unglaublich große Datenmengen zu ganz verschiedenen Themenbereichen vor (**BIG DATA**). Zum Beispiel produziert die Europäische Union einen nie endenden Datensatz von Übersetzungen von einer europäischen Sprache in eine andere. Das Verhalten von Menschen wird in sozialen Netzwerken wie Facebook dokumentiert. Die Menschen stellen die entsprechenden Informationen freiwillig zur Verfügung, oft ohne es zu wissen, oft für kleine wirtschaftliche Vorteile, oft **nicht ahnend, welche Nachteile für Sie daraus resultieren können**. In Supermärkten kann man heute Enormes über das Kaufverhalten und damit auch den Lebensstil von Menschen eruieren, weil eben die entsprechenden Daten anfallen und festgehalten werden. So sandten in einem interessanten Anwendungsfall Anbieter von Babykleidung, -möbeln und -nahrung bereits vielfältige Angebote an eine (schwängere)

minderjährige Tochter einer Familie, bevor die Eltern von ihrer Tochter überhaupt darüber informiert worden waren, dass sie schwanger ist. Dies in Reaktion auf entsprechende Suchanfragen der Tochter über das Internet.

Heute nutzt z. B. das **Finanzamt** eine Software, die das Wissen über die Häufigkeit des Auftretens der Zahlen 0, 1, ..., 9 in Steuererklärungen ausnutzt, um Steuererklärungen mit abweichendem Muster zu identifizieren, die dann einer genaueren Prüfung unterworfen werden.

Es entstehen so immer neue Anwendungen und Aufgaben, die häufig von Maschinen übernommen werden können. Potenziell besteht auch die Perspektive, viele Aufgaben von Maschinen übernehmen zu lassen, die heute noch Menschen ein gutes Einkommen bescheren. Das ist im Prinzip nichts Neues. Es ist ein Prozess, den wir seit hunderten von Jahren beobachten. Beginnend mit der Ersetzung von Menschen durch Maschinen in der Landwirtschaft beim Übergang in die Industriegesellschaft, später dann bei der Ersetzung von Arbeitern in Fabriken durch „**Wissensarbeiter**“ beim Übergang in die Wissensgesellschaft. Es ist das ein Prozess, den man in der angelsächsischen Welt als „**race between education and technology**“ bezeichnet [5, 11].

In diesem Rennen fanden die Menschen bisher auf einem höheren Ausbildungsniveau immer wieder nicht nur ein Auskommen, sondern konnten durch entlohnte Arbeit sehr weitgehend auch ihren Lebensstandard verbessern. Dies war deshalb möglich, weil sie immer mächtigere Maschinen einsetzen konnten, um ihre **Produktivität zu steigern**. Und sie waren an dieser Stelle **unverzichtbar**, im Besonderen auch für die Eigentümer der entsprechenden technischen Systeme, weil der Mensch bis heute der einzige **leistungsfähige Integrator** ist, der alle diese immer leistungsfähigeren Maschinen Kontextabhängig vernünftig zum Einsatz bringen kann.

Wenn sich nun etwas Prinzipielles ändert, dann ist es die zunehmende Eigenschaft intelligenter technischer Systeme, selber als **Integrator** zu wirken und unterschiedlichste technische Komponenten zum Einsatz zu bringen. Etwa, wenn in Häfen fahrerlose Transportvehikel Schiffe entladen oder wenn beispielsweise Schwebbahnen ohne Fahrer Menschen zwischen Flughafenterminals hin und her transportieren.

Das alles kann und wird sich weiter entwickeln und das geschieht heute schon in Richtung **analytischer Berufe**. Also in Richtung von Berufen, die auf substantiellem **intellektuellen Input** aufbauen. Beispiele sind die Analyse von Gerichtsurteilen, die Analyse von Patientenbildern und Patientendaten in der Medizin (insbesondere auch bei bildgebenden Verfahren), die Vorbereitung von Entscheidungen über Versicherungsverträge, die Übersetzung von Dokumenten, die statistische Analyse von Datensätzen. Alle diese anspruchsvollen intellektuellen Aufgaben kommen zunehmend in den Blickwinkel einer teilweisen Substitution durch Maschinen. Das kann hochwertige Arbeitsplätze, die teilweise erst in den letzten Jahren entstanden sind, kosten, wobei wir nicht wissen, ob es für die betroffenen Menschen zukünftig eine attraktive neue Alternative auf dem Arbeitsmarkt geben wird.

All das, was hier beschrieben wird, heißt nun nicht, dass wir uns schon der s. g. **Singularität** nähern, also dem Punkt, an dem die Intelligenz von technischen Systemen explosionsartig anwachsen würde und diese möglicherweise dem Menschen ähnlich werden oder diesen intellektuell sogar überflügeln werden. Man stelle sich z. B. eine technische Intelligenz vor, die die **Ressourcen des Internet voll unter ihre Kontrolle bringen könnte**. Davon sind wir noch weit entfernt, wenn es denn je dazu kommen sollte. Aber immerhin sind wir so weit, dass uns Maschinen in Sachfragen immer öfter überlegen werden, weil sie bspw. alle wissenschaftlichen Veröffentlichungen eines Gebietes „lesen“ und analysieren und auswerten, während wir das als Mensch schon vom Volumen und der benötigten Zeit her nicht können. Wobei wir in unseren Jobs immer mehr zu Getrie-

benen werden und für Lesen und Nachdenken eher immer weniger Zeit haben, sicherlich nicht mehr.

In den heute schon erfolgenden Prozessen transformiert sich die Menschheit in einen **hybriden Mensch-Technik-Superorganismus**, der in 20 Jahren wahrscheinlich schon 30 Milliarden „intelligente“ Komponenten umfassen wird. Davon wird der weitaus größte Teil aus kommunikationsfähigen Maschinen mit „Intelligenzpotentialen“ bestehen. Zur **„Intelligenz“ dieser Komponenten** gehört insbesondere die Fähigkeit, den ganzen Apparat von IT-Protokollen und Sicherheitsmechanismen zu beherrschen, der Voraussetzung für die Internetfähigkeit technischer Systeme ist. Wobei Maschinen auch schon heute den größten Teil der Kommunikation im Internet untereinander ausführen.

Die Frage ist, was es für die Menschheit bedeuten wird, wenn sie Teil eines derartigen Informationsnetzwerks sein wird. Aktuell bauen sich z. B. an dieser Stelle massive Probleme bzgl. der **Eigentumsfrage** auf, und das wird beim weiteren Ausbau des „Internet der Dinge“ noch viel stärker der Fall sein. Geschäftsmodelle in diesem Bereich platzieren sich, wie in den Medien beschrieben wird, am Übergang von der **„Besitzgesellschaft“** zur **„Verfügungsgesellschaft“**. Apple hat bereits gelegentlich bestimmte Apps gesperrt und hat auf seiner Musik-Download-Plattform iTunes schon die Sperrung von zuvor bereits erworbenen Titeln vorgenommen. Amazon sperrt immer wieder Benutzeraccounts von Benutzern von Kindle-Lesegeräten wegen angeblicher Urheberrechtsverletzungen, was für die Betroffenen den Verlust ihrer gesamten digitalen Benutzerbibliothek zur Folge haben kann. Und wer heutzutage ein Auto erwirbt, unterschreibt im Kaufvertrag oftmals eine Passage, die dem Hersteller den (ggf. sogar exklusiven) Zugriff auf wichtige Daten erlaubt, z. B. auf Fahrzeugdaten, die im Betrieb des Fahrzeugs anfallen. Sie verbleiben im Besitz des Herstellers bzw. gehen auf diesen über. Hier wie an anderer Stelle wird der Gesetzgeber irgendwann Klarstellungen grundsätzlicher Art darüber herbeiführen müs-

sen, in wieweit Anbieter über die Gestaltung von Geschäftsbedingungen die Eigentumsverhältnisse in Kaufgeschäften beliebig zu ihren Gunsten ausgestalten können.

6. Die Welt der Algorithmen und die Turing-Maschine

Wir erleben heute, dass die **algorithmische Verarbeitung von Information** immer mehr an ökonomischer Bedeutung gewinnt. Dadurch wird das Thema „**Algorithmen**“ als solches immer mehr Menschen bekannt. Satellitenkommunikation, Navigationssysteme im Automobil, Micro-Trading an Börsen, dies alles sind Themen der Algorithmik. Algorithmik spielt auch eine Rolle, wenn wir technische Bauteile oder Häuser mit CAD-Modellen beschreiben, aus diesen Beschreibungen Bearbeitungsmodelle algorithmisch ableiten, die wir dann an Fräsmaschinen oder „Printer“ schicken, die dort Teile herstellen oder heute teilweise auch schon „ausdrucken“. Diese Veränderung „pflügt“ die Welt um. Der vor kurzem verstorbene frühere Chefredakteur der Frankfurter Allgemeine Zeitung, Frank Schirrmacher, hat in seinem Buch „EGO – Das Spiel des Lebens“ **die Macht der Algorithmen beklagt** [34]. Er sah darin eine große Gefahr für die Zivilisation, wie wir sie kennen. Der vorliegende Text adressiert eine Reihe dieser Fragen vor dem Hintergrund mehrerer Jahrzehnte Arbeit in diesen Themenfeldern.

Algorithmus bedeutet im Wesentlichen eine Abfolge von Operationen, die von einem Ausgangszustand zu anderen Zuständen führen, und zwar in einer Sequenz von Bearbeitungsschritten, bis (hoffentlich) ein angestrebter Endzustand erreicht wird. Abhängig von Zwischenzuständen oder anderen Parametern erfolgt auf dem Wege der Abarbeitung der Schritte der flexible, in der Regel Pfad-abhängige Übergang zu weiteren Zuständen. Wir haben es also auch mit einem Algorithmus zu tun, wenn ein Steinzeitmensch aus einem Feuerstein eine Klinge schlägt oder aus dem Stoßzahn eines Mam-

munts ein so beeindruckendes frühzeitliches Kunstwerk wie den Löwenmenschen herstellt, den man zurzeit im **Ulmer Museum** bewundern kann.

Den meisten Menschen in unserer Zivilisation ist zumindest der **Algorithmus der Addition** von Zahlen bekannt, wobei Zahlen dazu additiv als Vielfache von Exponenten der Zahl 10 dargestellt werden. Dies ist eine sehr geschickte Kodierung, die übrigens die Erfindung der „0“ voraussetzt und stellt einen zivilisatorischen Durchbruch dar, den wir in Europa dem **arabisch-indischen Kulturraum** zu verdanken haben. Ohne diese methodisch-algorithmische Innovation, die Europa zu Zeiten der „ersten Blüten des Islams“ um das Jahr 1000 erreichte und sich dort dann im 12. Jahrhundert allgemein durchsetzte, gäbe es unsere Zivilisation in der heutigen Form nicht.

Der Additionsoperator ist so etwas wie ein kulturelles Gemeingut der modernen Welt, was nicht ausschließt, dass viele Menschen Probleme haben, zwei größere Zahlen zu addieren. Algorithmen eignen sich dafür, von Maschinen abgearbeitet zu werden. In der Regel wird dabei in **digitaler** Weise operiert. Die modernste Form von Abarbeitungsmaschine ist der **Computer**, aber man kann auch an numerisch gesteuerte Werkzeugmaschinen denken. Und es gibt auch Programme, die Musikinstrumente bespielen. Bauanleitungen für „Do it yourself“ ebenso wie Bastelbücher haben in der Regel algorithmischen Charakter.

Man kann sagen, dass das technische Potential einer Zivilisation insbesondere durch die Leistungsfähigkeit der ihr verfügbaren Algorithmen festgelegt ist. Vielfältige (mathematische) Algorithmen stecken in praktisch allen Maschinen. Die Mathematiker sprechen deshalb gerne von „**Mathematics Inside**“, so wie Intel als Chiphersteller seinerzeit mit Bezug auf PCs der Firma IBM, die Intel Chips nutzen, Werbung machte mit dem Slogan „Intel Inside“.

In der Mathematik und theoretischen Informatik gibt es ein gutes Verständnis für die Menge dessen, was man algorithmisch behandeln kann. Im weitesten Sinne ist das die **Welt des Berechenbaren** [13]. Die Inkarnation der Berechnungsmaschine ist, wie erwähnt, ein Computer, versehen mit entsprechenden peripheren Systemteilen (z. B. Eingabetastatur, Scanner, Drucker etc.). Das den Computer abstrahierende mathematische Konstrukt ist die sogenannte **Turingmaschine** [13]. Dies ist eine abstrakte, konzeptionell sehr einfache, vom Leistungsspektrum her aber schon **maximal mächtige Maschine**, die auf einem endlosen Schreib- und Leseband operiert.

Abhängig von dem Zustand, in dem sie sich befindet und abhängig von einem Zeichen auf dem Band, das sie gerade liest, kann die Maschine (nur) wenige elementare Operationen (wie das Drucken eines Zeichens auf das Band und einen Schritt nach links oder rechts gehen) vornehmen. Sie begibt sich dann gleichzeitig in einen neuen Zustand. Dieser Prozess wird so lange fortgesetzt, bis sie stehen bleibt. Wobei eine interessante Frage, die nicht generell vorab beantwortbar ist, diejenige ist, ob die Maschine für jede Eingabe mit Sicherheit irgendwann stehen bleiben wird oder nicht (sogenanntes **HALTEPROBLEM** [13]).

Insofern als das, was wir üblicherweise als **Intelligenz** wahrnehmen, viel damit zu tun hat, dass man über entsprechende Algorithmen verfügt und diese ausführen kann, ist die zunehmende Durchdringung der Welt mit abstrakt kodierten Algorithmen einerseits und mit Maschinen, die Algorithmen abarbeiten können, andererseits ein **dominanter zivilisatorischer Prozess**. Dieser hat mittlerweile zu einer Welt von 7 Mrd. und bald 10 Mrd. Menschen geführt. Das wäre ohne eine entsprechende Technikentwicklung und ohne entsprechende Algorithmik nicht möglich gewesen.

Wir stehen nun heute vor der Frage, wie wir diese Entwicklung und ihre absehbaren Fortsetzungen beurteilen sollen. Insbesondere dann, wenn Algorithmen auf unglaublich

großen Datenmengen operieren (BIG DATA) und dabei in der Lage sind, erstaunliche Ergebnisse (mittels **Analyse-Algorithmen**) hervorzubringen, z. B. Ergebnisse, die wir so nicht erwartet haben, kann das das Funktionieren unserer Gesellschaft massiv verändern. Dies gilt immer auch dann, wenn technische Systeme Ergebnisse hervorbringen, von denen wir als Menschen vorab meinten, es sei dazu (menschliche) Intelligenz erforderlich. Und natürlich sind wir dann auch mit der Kehrseite dieser Prozesse konfrontiert. Wenn Intelligenz billig wird, können Systeme sehr viel tun, was früher nicht passierte, weil es nicht bezahlbar war. Und wenn Dinge immer schneller gehen, wobei das eine mit dem anderen zusammenhängt, gilt das gleiche.

Zusammenfassend sei an dieser Stelle noch einmal festgehalten, dass die Turing-Maschine die mathematische Inkarnation des Rechners ist. Die Herausarbeitung der Leistungsfähigkeit dieser einfachen Maschine durch große Denker wie **Gödel, Turing** etc., ist eine der ganz großen intellektuellen Leistungen der Menschheit im 20. Jahrhunderts. Viele werden auch wissen, dass Turing einer der Personen auf britischer Seite war, die die deutsche Verschlüsselungsmaschine „Enigma“ im Zweiten Weltkrieg dechiffriert haben – mit erheblichen Auswirkungen auf den Kriegsverlauf. Dieser Turing ist auch die Person, nach der der sogenannte **Turing-Test auf die Intelligenz von Maschinen** benannt ist⁴.

Die wichtigste Aussage über die Turing-Maschine ist wohl, dass sie im Sinne der sogenannten Church-Turing-These im Prinzip alles berechnen kann, was überhaupt denkbar ist. Ferner, dass es keine universelle Turing-Maschine gibt, die für jede Turing-Maschine feststellen kann, ob sie für jede Eingabe zum Halten kommt oder nicht. Letzteres ist das oben schon angesprochene Halte-Problem der theoretischen Informatik, eine wichtige

⁴ Der Film über sein Leben „The imitation game“ ist sehenswert. Der Titel des Films verweist auf den Turing-Test.

Testfrage für Algorithmen, die gemäß diesem Satz nicht generell algorithmisch beantwortbar ist. Das hat viele Konsequenzen, z. B. für die Unmöglichkeit, **sichere Software-systeme** zu bauen.

Diese „Unmöglichkeitsaussage“ ist wiederum eng verbunden mit der berühmten, auf den österreichischen Mathematiker Gödel zurückgehende Feststellung, dass es wahre Aussagen der Arithmetik gibt, die nicht beweisbar sind. Dieser Satz, der auf das Jahr 1931 [10] datiert ist, hat eine Zeitlang die Welt der Mathematik erschüttert, denn viele Mathematiker arbeiteten zu dieser Zeit noch mit großer Energie an dem Programm, das der berühmte deutsche Mathematiker Hilbert anlässlich seines Vortrags auf der **Welt-ausstellung in Paris** im Jahr 1900 vorgetragen hat, nämlich die Mathematik in ihrer Schönheit zu krönen durch den Beweis der „erwarteten“ Aussage, dass jeder **wahre Satz der Arithmetik beweisbar sei**. Genau diese Erwartung erwies sich als falsch. D. h. es gibt zutreffende Aussagen der Arithmetik, die wir nicht werden beweisen können.

Wenn man sich vorstellen will, wie das praktisch aussehen könnte, denke man an die sogenannte „**Goldbach-Hypothese**“, die besagt, dass jede gerade Zahl als Summe von 2 Primzahlen darstellbar ist, z. B. die Zahl 28 in der Form $28 = 11 + 17$. Gilt das für jede gerade Zahl, z. B. 283.556? Wir wissen das nicht generell, auch wenn ein Rechner den Spezialfall 283.566 angesichts der „Kleinheit“ dieser Zahl leicht klären könnte. Für die Zahl 283.556.794.846.492.567.841.231.567.246 ist wohl auch die Klärung dieses einen Falles heute nicht möglich.

Bewiesen wurde bis heute, dass jede solche Zahl als Summe von 4 Primzahlen darstellbar ist. Das ist schon eine erstaunliche Einsicht, aber noch nicht die Goldbach-Hypothese. Vielleicht ist die Goldbach-Hypothese richtig, aber es gibt keine Möglichkeit, dies mit endlich vielen Argumenten für **alle** geraden Zahlen zu beweisen. Wenn das zutrifft, werden wir auch nie ein Gegenbeispiel finden, also ewig weiter rätseln, ob die Aussage wahr ist oder nicht, denn es gäbe kein Gegenbeispiel, aber beweisen könnten

wir die Aussage auch nicht. Wir würden dazu nämlich mehr als endlich viele Argumente brauchen, weil vielleicht unendlich viele zufällig passende Überlegungen nötig sind, um die Hypothese wie in einem „unendlichen“ Puzzle zu beweisen.

Der Satz von Gödel ist interessanterweise für einige Beobachter das Einfallstor für **metaphysische Spekulationen** über das menschliche Gehirn und, vielleicht noch verwunderlicher, zu Büchern zu **Quantentheorie** und **Quantenrechnern** und die Nutzung dieses Zusammenhangs, um die angebliche Überlegenheit des Menschen gegenüber der Maschine materiell zu unterfüttern. Diese **mystische „Aufladung“** ist in der Sache nicht angemessen und irreführend. Denn die interessante Aussage, dass es wahre Aussagen der Arithmetik gibt, die nicht beweisbar sind, ist bei tieferem Nachdenken gar nicht so überraschend und hat nichts mit **Metaphysik** oder **Quantentheorie** zu tun. Und sie eröffnet auch keine Fenster der Überlegenheit von Menschen gegenüber Rechnern, denn natürlich können auch Menschen nicht-beweisbare Aussagen nicht beweisen.

Es gibt eigentlich auch keinen Grund, warum alle wahren Aussagen über jeweils unendlich viele Zahlenkombinationen (z. B. die Goldbach-Hypothese) mit endlich vielen Argumenten ableitbar sein sollten. Hilbert war da einfach zu optimistisch bzw. hatte zu weitgehende Erwartungen an die Natur der Mathematik bzw. des Universums. Die Quantentheorie hilft hier auch nicht weiter bzw. hat mit dieser Frage nichts zu tun. Quantenrechner, an denen heute gearbeitet wird, können möglicherweise exponentielle **Laufzeitverbesserungen** bei bestimmten kombinatorischen Optimierungsaufgaben bewirken, und zwar bis zu einer bestimmten Exponentengröße, die wiederum von der Qualität des Quantenrechners abhängt.

Potentiell kann das einige heutige Verschlüsselungsmethoden von Daten, z. B. solche, die auf dem Finden der Zerlegung von Nicht-Primzahlen in Primzahlfaktoren beruhen, „aushebeln“. Das hängt damit zusammen, dass „Teilchen“ in der Quantenwelt gleichzei-

tig an verschiedenen (z. B. 2) Stellen präsent sein können, mehrere (z. B. n) solcher Teilchen dann gleichzeitig an 2^n Stellen, wobei ein Messvorgang schließlich die Teilchen in einer endgültigen Position fixiert. In bestimmten Situationen kann dabei aber ein Gesamtergebnis bzgl. aller temporär besetzten Positionen ausgelesen werden. Wenn die Positionierungen (x_1, \dots, x_n) mit x_i Null oder Eins zu einem Funktionswert $f(x_1, \dots, x_n)$ korrespondieren, der ebenfalls Null oder Eins sein kann und wir die Summe aller aufgetretenen f-Werte auslesen könnten, würde ein Summenwert echt größer Null z. B. äquivalent dazu sein, dass es mindestens eine Konstellation x_1, \dots, x_n gab, in der $f(x_1, \dots, x_n) = 1$ war. Umgekehrt würde der (Summen-)Wert 0 bedeuten, dass für alle x_1, \dots, x_n die Situation $f(x_1, \dots, x_n) = 0$ vorlag. In diesem Sinne wissen wir dann etwas über 2^n Fälle, können dies aber in einem Schritt feststellen.

Die Leistungen heutiger Rechner beruhen nicht auf solchen Eigenschaften. Sie sind möglich in der Welt der **normalen Physik**. Man muss also nicht in den Bereich eventuell einmal möglicher Quantenrechner wechseln. Es gibt dennoch seit einigen Jahren ernsthafte Forschungsarbeiten am **Quantenrechner**, z. B. auch an der Universität Ulm. Sie nutzen potentiell andere, d. h. nicht klassische physikalische Effekte aus. Das ist insofern, wie dargestellt, eine andere Welt. Solche Quantenrechner, wenn sie denn je stabil laufen, können zwar die Welt des Berechenbaren auch nicht prinzipiell vergrößern, wohl aber in manchen Fällen, wie schon angedeutet, eine **exponentielle Beschleunigung** (bis zu einer gewissen Obergrenze) gegenüber normalen Rechnern bringen – was lebenspraktisch ein extremer Schritt nach vorne wäre.

Quantenrechner würden uns für einen begrenzten Kreis von Aufgaben also ein Stück voranbringen in Richtung 2^{300} , eine Zahl, die, wie schon erwähnt, größer ist als die Anzahl aller Atome im Universum. Wobei der realisierte Verbesserungs-Exponent durch die Anzahl n der homogenen Quantenzustände begrenzt würde, die wir in einem physikalischen System, das wir als Quantenrechner nutzen, gleichzeitig stabil halten können. Der

Verbesserungseffekt wäre also 2^n , wobei n , nach allem, was wir heute wissen, nach oben eng begrenzt sein wird. Die Anzahl stabil haltbarer Quantenkonstellationen liegt im Moment bei vielleicht „10“, das hat also noch keine praktische Bedeutung, wohl aber ein Potential.

Ansonsten gilt auch: Unsere immer schnelleren Rechner bringen im Prinzip nichts prinzipiell Neues (mehr) hervor, wohl aber die rein lebenspraktisch bzw. ökonomisch wichtige Pragmatik eines immer höheren Tempos. All die Moden in der IT, aktuell „**Cloud**“ und „**Big Data**“, sind ein Thema der Masse und des Tempos, nicht des Prinzipiellen.

Und das gilt genauso für komfortable Hilfssysteme in der Mathematik, z. B. „*Mathematica*“, Matlab, SciLab (Open Source) oder Wolfram Alpha (online). Solche Systeme haben das Arbeiten der Mathematiker bzw. in der Mathematik revolutioniert. Man kann jetzt sehr viel stärker „experimentieren“ und sich z. B. „Beispiele“ im Kontext von Hypothesen und Beweisversuchen ansehen, was früher am Rechenaufwand gescheitert wäre. Tatsächlich gilt Ähnliches im Beweisen mathematischer Probleme, die das Abarbeiten vieler Fälle beinhalten. Der Beweis des **Vierfarbensatzes** oder der **kompaktesten Kugelpackung** sind von dieser Art (vgl. hierzu Kapitel 14]).

Beim Tempo sind allerdings mittlerweile auch die Grenzen erkennbar, aber erst, nachdem wir schon unglaublich weit vorangekommen sind, die Grenzen also nicht mehr so sehr schmerzen. Der Maßstab ist 2^n , wobei, wie schon mehrfach erwähnt, schon 2^{300} größer als die Anzahl aller Atome im Universum ist. Wir kommen mit unseren schnellen Rechnern lebenspraktisch nicht an diese exponentielle Steigerung heran. Oder anders ausgedrückt: Moore's Law wird bald an sein Ende kommen. Die abstrakte Turing-Maschine hat hingegen auch mit $(2^{300})^{300}$ kein Problem.

Die Turing-Maschine, in mehr oder weniger komfortabler Ausstattung, treibt bis heute die IT in der praktischen Anwendung, und zwar in „schwindelerregende Höhen“. Heute hat der Chip im Mobiltelefon bzw. I-Pad eine Leistungsfähigkeit, die mehrere tausend Mal oberhalb derjenigen des Großrechners liegt, mit dem die NASA zwischen 1961 und 1972 die Apollo Missionen berechnet hat. Der kostete 100 Millionen Dollar, der heutige Chip 5 Euro. Er wird in 20 Jahren 5 Cent kosten und als Folge dieses niedrigen Preises eine massive Ausdehnung des **“Internet der Dinge“ (Internet of Everything)** ermöglichen.

7. Entscheiden

Entscheidungsfindung ist eine Kernfähigkeit des Menschen. Im Wesentlichen ist unser Leben und das, was wir daraus machen, die Folge einer nicht endenden Kette von Entscheidungen, die wir treffen. Offenbar ist dieser Prozess stark **pfad-abhängig**, d. h. frühere Entscheidungen beeinflussen erheblich den Charakter später anstehender Entscheidungserfordernisse. Natürlich gibt es einen Bezug zwischen Intelligenz und Entscheiden, auch wenn beide Begriffe verschiedenes bedeuten. Man wird erwarten, dass Intelligenz hilft, bessere Entscheidungen zu treffen, auch wenn es manchmal vorkommt, dass Menschen vor lauter Überlegungen zum Schluss blockiert sind und gar nicht mehr entscheiden, was auch eine Entscheidung ist, und oft keine besonders gute.

Aus wissenschaftlichen Analysen wissen wir, dass die Entscheidungsfindung des Menschen oft „fehlerhaft“ ist [17, 18]. Die Qualität ist häufig nicht besonders gut, was übrigens oft auch das Urteil der Entscheider ist. Umgekehrt wird man Entscheidungsfähigkeit auch in Teilen als Ausdruck der Intelligenz sehen, und in einem abstrakten Sinne vor

allem auch als Ausdruck des Bewusstseins, das in der Evolution wohl insbesondere eine wesentliche Rolle einnimmt, lebensrelevante Entscheidungen über den Einsatz knapper Ressourcen zu treffen [22].

Der wissenschaftliche Einblick in die Natur von Entscheidungsfindungen im Rahmen der sogenannten **Entscheidungstheorie** ist vielfältiger Natur. Es gibt tiefe methodische Einsichten, zugleich oft große Diskrepanzen zu der Art, wie Menschen tatsächlich entscheiden. In vielen wirtschaftlichen Anwendungen lassen wir heute Maschinen nach einer bestimmten Abwägungslogik entscheiden. Die wirtschaftlichen Ergebnisse sind oft sehr zufriedenstellend. Dazu sind Trade-offs zu modellieren, wobei zu beachten ist, dass **Trade-offs und Kompromisse** den Kern der Entscheidungsfindung bilden.

Eine gute Methodologie steht für den Fall von **multi-attributiver Entscheidungsfindung** unter Unsicherheit mit bekannten Wahrscheinlichkeiten zur Verfügung [18]. Das Hauptergebnis ist der Satz von **von Neumann-Morgenstern**. Der Satz liefert eine vollständige Charakterisierung und Operationalisierung der besten Entscheidungen unter **sinnvollen Axiomen der Rationalität**, die von vielen Menschen für ihre persönlichen Entscheidungsfragen akzeptiert werden, auch wenn andere Menschen diese Form der Operationalisierung ablehnen. Die gemäß dem Satz von von Neumann-Morgenstern besten Entscheidungen **maximieren den zu erwarteten Nutzen** für die angenommene Wahrscheinlichkeits-Konstellation und einem multi-attributiven subjektivem Nutzen. Bezüglich der verschiedenen, zur Bewertung von Alternativen herangezogenen Attribute, spielen dabei die Auswahl der Bewertungskriterien und die dazugehörigen Skalen eine zentrale Rolle.

Das von Neumann-Morgenstern-Theorem ermöglicht in vielen komplexen Anwendungen eine gute algorithmische Operationalisierung der menschlichen Entscheidungsfindung, auch wenn der Weg, um zu der Entscheidung zu gelangen, in der Regel völlig anders ist als die Art und Weise, wie Menschen diese Aufgabe erledigen. D. h. folgendes: Wenn Menschen konsistent entscheiden, lässt sich das Ergebnis in der Regel über das von Neumann-Morgenstern Kalkül nachbilden, auch wenn die Menschen so nicht vorgehen und u. U. auch nicht vorgehen wollen und es zudem lebenspraktisch schwierig sein kann, die Entscheidung so herbeizuführen, dass erst die für die Theorie relevanten Größen erarbeitet werden und dann auf dieser Basis gemäß Kalkül entschieden wird. Entscheidung durch Systeme ist insofern ein wichtiges aber auch komplexes Thema mit vielen Facetten.

8. Die „Neuro-Maschine Gehirn“

Nach diesen Ausflügen in die praktische Sphäre von Intelligenz wie in die Welt der Algorithmen und des Entscheidens blicken wir jetzt aus abstrakter Sicht, also aus der Sicht von **Mathematik und Informatik** auf unser Gehirn bzw. Nervennetz. Wie sieht es aus dieser Sicht mit unserer biologischen Intelligenz („Intelligenz auf Basis von Fleisch“) aus und was hat diese gegebenenfalls mit der Intelligenz von Computern („Intelligenz auf der Basis von Siliziumchips“) zu tun oder auch nicht? Ist die These vieler Neuro-Wissenschaftler richtig, dass die Computerseite uns über die menschliche Intelligenz im Wesentlichen nichts sagen kann. Oder ist die Lage anders? Aus meiner Sicht ist das eine Zentralfrage in der wissenschaftstheoretischen Debatte um die „**Natur der Intelligenz**“. Und das Ergebnis, zu dem ich komme, ist anders als das vieler Vertreter der „Neuro-Seite“ bzw. auch der Philosophie und Psychologie.

These 2

Es ist ein Denkfehler zu glauben, dass der Mensch mit seinem Gehirn als biologischem neuronalem Netz in den wesentlichen Dimensionen seiner Intelligenz völlig verschieden ist von Computern bzw. abstrakten Maschinen (Turing-Maschine). Im Gegenteil ist die Intelligenz des Menschen nur richtig verstehbar, wenn man präzise erforscht, wie die Evolution in unserem biologischen, neuronalen Gehirn eine Turing-Maschine (begrenzter Leistungsfähigkeit) realisiert hat und wie diese ggf. in ihrer Leistungsfähigkeit weiter verbessert werden kann.

Lassen Sie mich folgende Bemerkung zur Einordnung vorweg machen. Wir wissen mittlerweile, dass das menschliche Gehirn inklusive Nervensystem und Rückenmark ein neuronales System ist. Dieses System besteht aus **vernetzten Neuronen** (Nervenzellen). Diese sind auf Erregungsleitung und Erregungsübertragung spezialisierte Zellen. Eine typische Säugetier-Nervenzelle hat einen Zellkörper und Zellfortsätze zweierlei Art: die **Dendriten** und das **Axon**. Die verästelten Dendriten nehmen vornehmlich Erregung von anderen Zellen auf. Das Axon kann über einen Meter lang sein und dient zunächst der Fortleitung einer Erregung der Ausgangszelle in die Nähe anderer Zellen. Dabei wird eine Spannungsänderung über den Fortsatz weitergeleitet, indem kurzzeitige Ionenströme durch besondere Kanäle in der Zellmembran zugelassen werden.

Die Axonenden stehen über **Synapsen**, an denen die Erregung selten unmittelbar elektrisch weitergegeben, sondern meist mittels Botenstoffen (Neurotransmittern) chemisch übertragen wird, in Kontakt zu anderen Nervenzellen, Muskelzellen (neuromuskuläre Endplatte) oder zu Drüsenzellen.

Nervennetze operieren also auf Basis elektrischer und chemischer Signalübertragungen. Die Kombination dieser beiden Übersetzungswege von Signalen, die im „Transport“ von

Informationen **analog** operieren, dann über das „**Auslösen**“ von Signalen beim Überschreiten von Schwellenwerten in Neuronen in Teilen auch **digital** bzw. diskret, eröffnet viele interessante Möglichkeiten zur Organisation von Informationsverarbeitungsprozessen. Die in Neuronen zusammenfließenden elektrischen Potentiale werden (teils mit Vorzeichenwechsel) „aufaddiert“ (also teils auch subtrahiert) und liegen dann unter oder oberhalb kritischer Schwellenwerte, wobei das Überschreiten zur Aussendung eines elektrischen Impuls führt.

Interessant ist dabei auch, dass die häufige Benutzung von Signalwegen zur Folge hat, dass diese sich stärker ausprägen, durchlässiger werden. Auf diese Weise wird durch „**Einschleifen**“ Wissen hardwareartig gespeichert. Man kann die resultierenden Effekte auch über sogenannte „**synaptische Gewichte**“ ausdrücken. **Lernen** bedeutet in diesem Sinne **dann** die **Veränderung synaptischer Gewichte**. Zugleich wird über schnelle Verbindungen die gleichzeitige Aktivierung ganzer Synapsengruppen bewirkt (sogenannte **neuronal assemblies**). Ebenso werden solche assemblies miteinander in Verbindung gebracht, inklusive einer gegenseitigen Tendenz zur **Anregung bei Aktivierung** einzelner Assemblies. Unser neuronales System umfasst ungefähr 1.000 Milliarden Neurone. Diese sind im Mittel mit etwa 10.000 Verbindungen pro Neuron zu anderen Neuronen ausgestattet.

Im Wesentlichen gibt es in diesem Netz nur sogenannte **innere Neuronen**. Hinzu kommen zusätzlich etwa 200 Millionen **sensorische Neurone**, die die Verbindung nach außen in die Welt herstellen, also die Anbindung an die uns umgebende Realität, also den erforderlichen Datenaustausch mit der Realwelt vornehmen, der Voraussetzung ist für z. B. **sehen, hören, riechen, fühlen**. Diese Neuronen sind unsere einzigen direkten Verbindungen zur Welt. Können wir diese Neuronen technisch irgendwie so stimulieren, dass die Wirkung so ähnlich ist wie die Stimulierung durch die Realität, können wir Realität und Stimulierung nicht mehr unterscheiden. D. h. unsere einzigen Brücken zur Real-

tät bilden **Potentialdifferenzen** an den Kontaktstellen unserer sensorischen Neurone zur Außenwelt. Moderne Filme sind übrigens schon sehr gut darin, bei uns die Vorstellung einer Realität zu erzeugen, die u. U. gar nicht existiert, häufig aus physikalischen Gründen gar nicht real existieren kann. Mit viel Fantasie können das manche in ihrem persönlichen „**Kopfkino**“ auch ganz ohne jeden stimulierenden Input von außen.

Interessant ist die folgende Feststellung: Es sind im Verhältnis nur wenige Neurone, die sensorische Verbindung nach außen haben. Hinzu kommen ungefähr noch 10-20 Millionen **Neurone, die aktorisch sind**, mit denen wir also in der Welt Dinge tun bzw. tun können, z. B. zupacken oder gegen Fußbälle treten. Das sind also noch einmal deutlich weniger Neurone als der sensorische Anteil.

Unser Denksystem ist also im Wesentlichen ein Netz, das sich (nur) mit sich selber beschäftigt. Man kann es gesamthaft auch so ausdrücken: Das Gehirn ist ein System, das ein wenig Information von Außen aufnimmt, viele Signale im Inneren verarbeitet, also herumrechnet“ und schließlich einiges, aber eher wenig, wirklich macht. Womit man sich auch der Beschreibung eines großen Unternehmens als Superorganismus nähert. Die Ähnlichkeiten sind offensichtlich und übrigens in der Sache auch gut begründet [23].

Um die entscheidende Aussage noch einmal zu verdeutlichen. Man nimmt als Mensch mit seiner Sensorik gewisse Informationen aus der Außenwelt auf, die sensorischer Natur sind und es uns erlauben, uns ein „Bild“ von der Welt und von unserer Einbettung in diese Welt zu machen. Der sensorische Input-Strom ist vergleichsweise klein. Dann verarbeitet das Gehirn die Daten intern in aufwendigen „Rechner“-Prozessen, wobei „rechnen“ für Kaskaden eines neuronalen Signalaustauschs zwischen inneren Neuronen steht. Wir bauen dabei ein Modell der Welt auf, überlegen gegebenenfalls, was wir tun können und wollen und treffen manchmal Entscheidungen. Als Folge von all dem werden gele-

gentlich aktorische Neurone aktiviert, mit denen wir in der Welt etwas tun. Aktorische Neurone gibt es noch viel weniger als sensorische.

Nehmen wir als Beispiel das **Schlagen eines Tennisballs**. Die Leistung des sensorischen Systems ist das Erkennen eines Tennisballs (und seiner Flugbahn), der mit etwa Tempo 100 km/h auf uns zukommt. Die Information, die wir aufnehmen, ist das „Bild“ dieses Tennisballs auf der Retina unseres Auges. Das ist die Input-Sensorik. Die Signale dieser sensorischen Neurone werden übersetzt in umfangreiche „Berechnungen“, deren Ergebnis Impulse an unser Bewegungssystem und insbesondere an die aktorischen Neurone unseres Tennisarms sind, der sich jetzt so bewegt, dass der Schläger den Ball so trifft, dass er ihn zurückschlägt, und zwar z. B. in die Ecke auf der anderen Seite des Spielfeldes, möglichst so, dass der Spieler auf der andere Seite des Netzes ihn nicht mehr erreichen kann. Das ist eine wesentliche Leistung, die ein neuronales Netz, wie wir es besitzen, erbringen kann.

Das ist eine großartige Leistung. Ähnliche Leistungen finden wir natürlich in der gesamten Tierwelt. Wahrscheinlich ist uns der Puma in vielen derartigen Aufgaben überlegen, aber wir sind als Menschen auch schon ganz gut. Mensch und Puma haben von außen betrachtet ähnlich aufgebaute Gehirne und Nervennetze. Beim Menschen und Menschenaffen gilt das in noch stärkerem Umfang. Woraus resultieren dann die Intelligenzunterschiede zwischen uns und den anderen Tierarten? Ähnlich ist es übrigens mit dem **Genom**, also der Erbinformation. Auch hier gibt es zwischen den Tieren und uns viele Übereinstimmungen. Wo kommen dann die Unterschiede zwischen den Tieren und uns Menschen her? Sie müssen offensichtlich eine Folge von Unterschieden in der Organisation eines ansonsten sehr ähnlichen Ausgangsmaterials sein. Was sind das für Organisationsprozesse? Wo übersetzen sich kleine Unterschiede in gigantische, lebenspraktische Verschiedenheiten?

9. Wie leistungsfähig ist unsere „Neuro-Maschine“?

Interessant ist, dass wir mittlerweile auf der abstrakten (mathematischen) Ebene gut verstehen, was ein biologisches Nervennetz, wie das des Menschen (im Sinne der Mathematik) prinzipiell zu leisten vermag. Ein solches neuronales Netz kann z. B. mit seinen eingebauten Lern- und Anpassungsalgorithmen die **Approximation** (d. h. angenäherte Realisierung) beliebiger, auch hochdimensionaler Input-Output Funktionen eines regulären Typs lernen. Erinnert sei hierzu an das Beispiel „Tennispielen“ im letzten Kapitel. Der wichtigste Satz über diese Netze, der nachfolgende Satz 1, besagt, dass so jede genügend glatte Funktion (= regulärer Typ) gelernt bzw. realisiert werden kann. Die Grenze der Erlernbarkeit dieser Funktionen ist also ihre „**Glattheit**“. Die Funktion muss dazu im Wesentlichen stetig sein, sie darf aber eine begrenzte Zahl von Unstetigkeitsstellen aufweisen. Wirklich „hässlich“ darf sie nicht sein (für die Mathematiker: eine Cauchy Funktion ist neuronal nicht erlernbar). Generell gilt die Nicht-Erlernbarkeit für alle Funktionen, die (ähnlich einem **nah-chaotischen System**) bei kleinsten Variationen von Parametern ganz unterschiedliche Ergebnisse bzw. Aktionen erfordern. „Hässliche“ Funktionen kann ein neuronales Netz also nicht lernen, glatte wohl. Alles Glatte mit gelegentlichen Sprüngen, wie die Führung des Schlagarms beim Tennis und Golf oder das Gleichgewicht halten beim Fahrradfahren sind damit machbar. Der entsprechende mathematische Satz [35] lautet wie folgt:

Satz 1: Neuronale Netze können „gutartige“ Funktionen approximieren

Wird einem neuronalen Netz ausreichender Größe eine adäquate Sequenz von Übungsaufgaben zum Lernen einer Funktion verfügbar gemacht, kann dieses Netz im Prinzip jede stetige (sogar jede messbare) Funktion lernen. Die hohe „**Plastizität**“ neuronaler Netze kommt darin zum Ausdruck.

Da insbesondere alle logischen Operationen in die Klasse der glatten Funktionen fallen, gilt auch der folgende Satz 2.

Satz 2:

Neuronale Netze können alle binären logischen Operationen, damit auch den Folgerungspfeil (Modus Ponens) lernen. Hinweis: Aus der Schaltungstheorie ist bekannt, dass man alle logischen Schaltungen rekursiv aus binären Operationen aufbauen kann. Diese sind also ebenfalls erlernbar. Auf diese Weise kann man z. B. auch beliebige Klammerprozesse organisieren. Insbesondere sind neuronale Netze in ihrer Gesamtheit so leistungsfähig wie (abstrakte) Rechner, d. h. berechenbarkeits-vollständig.

Die Sätze gelten für die **mathematische Abstraktion neuronaler Netze**. Nach allem, was wir wissen, verhält sich unser Gehirn im Prinzipiellen so, dass es die behaupteten mathematischen Leistungen rein lebenspraktisch zu erbringen vermag. D. h., dass von Details des Verhaltens des Gehirns für die Konsequenzen dieser Feststellung abstrahiert werden kann – das ist dann für diese Seite des prinzipiellen Verstehens von Intelligenzleistungen nicht erheblich – so wenig, wie man die Details eines Chips oder einer Schaltung verstehen muss, um sagen zu können, was ein Rechner im Prinzip leisten kann und was nicht. Bzgl. der konkreten Performance, z. B. **Schnelligkeit** oder **Verhalten** unter schwierigen äußeren Bedingungen, z. B. 40°C Außentemperatur und hohe Luftfeuchtigkeit, sieht das natürlich anders aus. Diesen Zusammenhang weiter zu erhellen, ist ein wichtiger Beitrag experimenteller Forschungen zu Funktionen von Gehirnen. Hier sind auch viele Beiträge des vor kurzem verstorbenen Gehirnforschers **Valentin Braitenberg** angesiedelt, mit dem der Autor über viele Jahre zusammengearbeitet hat.

Die Sätze 1 und 2 stellen die vielleicht wichtigsten abstrakten Eigenschaften unseres Gehirns auf der neuronalen Seite dar. Die behaupteten Eigenschaften gibt es auch beim Puma, bei den Menschenaffen sowieso. Pragmatisch sind aber die **Unterschiede noch**

wichtiger. Und mittlerweile ist es so, dass wir diese Fähigkeit mittels technischer neuronaler Netze, die ihrerseits wieder auf Digitalrechnern „simuliert“ werden, nachbilden können. Für spezielle Aufgabenstellungen ist das heute auch im technischen Bereich die Methode der Wahl. Wobei die interessante Feststellung die ist, dass wir auf diese Weise biologische neuronale Netze (d.h. analoge Systeme) mit Hilfe von Rechnern, also digitalen Systemen, „nachbilden“. Sinnvoll aus Anwendungssicht ist das aber nur in speziellen Fällen.

10. Eine Turing-Maschine in einem Neuro-System

Für das, was wir als die menschliche Intelligenz verstehen, ist die neuronale Ebene wichtig, aber es kommt darauf an, was wir daraus machen. Und das sollte mehr sein, als raffinierte **sensomotorische Bewegungsabläufe** zu realisieren. Sonst wäre der „Puma“ auch der Maßstab für das, was wir intuitiv unter Intelligenz verstehen. Das ist aber nicht der „Puma“, sondern das sind wir. Es muss also etwas hinzukommen. Hier sind nun obige Sätze 1 und 2 der Schlüssel zum Verständnis. Man kann auf der Ebene eines neuronalen Netzes, wenn es richtig konfiguriert ist und spezielle Bausteine besitzt, noch viel mehr hinbekommen als (nur) die Approximation gutartiger Funktionen. Der obige Satz 2 beinhaltet ja auch die Aussage, dass neuronale Netze (in der richtigen Ausgestaltung) mathematisch äquivalent sind zu einer „**Turing-Maschine**“.

Die Turing-Maschine ist, wie dargestellt, die Inkarnation des **Digitalen**. Die Aussage besagt jetzt die Umkehrung der oben beschriebenen Simulation neuronaler Netze auf Rechnern, nämlich die Möglichkeit der „**Simulation**“ eines **Rechners auf einem neuronalen System**, wenn man dafür die richtigen Vorkehrungen trifft, also das neuronale Potential adäquat nutzt. Wird ein neuronales Netz in einer solchen Form (in Teilen) ge-

eignet konfiguriert, wird es zu einem algorithmischen System, zu einem „Rechner“, der Algorithmen abarbeiten kann. Und natürlich können wir das als Menschen, dies zeichnet uns sogar in besonderer Weise aus. Hier unterscheiden wir uns erheblich von den Tieren, obwohl wir das gleiche „Ausgangsmaterial“ nutzen. Wir nutzen unsere entsprechenden Fähigkeiten beim Addieren mehrerer großer Zahlen, beim Spielen eines Klavierstücks, bei der Herstellung einer Figur wie dem Ulmer „Löwenmenschen“ aus einem Elfenbeinstück aus einem Mammutstoßzahn – eine der frühesten bekannten abstrakt-ästhetischen künstlerischen Leistungen des frühen Menschen vor etwa 40.000 Jahren, zu sehen im Ulmer Museum.

These 3

Unser Gehirn ist in der Lage, eine, wenn auch von der Leistungsfähigkeit her relativ stark begrenzte, Turing-Maschine in sich auszuprägen und diese im Laufe des eigenen Lebens auf der Basis eines neuronal realisierten „Betriebssystems“ dauernd zu verbessern. Im Rahmen zivilisatorischer Prozesse sind wir auch als Menschheit dauernd bemüht, diesen unseren Rechner in seiner Leistungsfähigkeit zu verbessern.

Man nennt das in These 3 beschriebene Phänomen auch das **Emulieren einer Turing-Maschine auf einem biologisch-neuronalen Netz**, so wie man eine Turing-Maschine auch auf einem System von Röhren oder mechanischen Registern oder eben Chips oder sogar mit Bleistift und Papier realisieren kann [22, 24]. Wobei der Mensch in der Natur allen anderen Lebewesen in der Realisierung einer solchen Turing-Maschine in seinem neuronalen Netz haushoch überlegen ist, obwohl auch andere Tiere erste Leistungen dieses Typs erbringen. Hier liegt von der Pragmatik her der wohl entscheidende Unterschied zwischen Menschen und den anderen Lebewesen.

Zu Ende gedacht: Alles, was wir auf der Ebene der Berechenbarkeitstheorie mathematisch tun können, kann im Prinzip auch ein (biologisches) neuronales Netz. Es muss dafür „nur“ geeignet konfiguriert werden oder genauer: Auf ihm oder mit ihm muss **ein kleiner Rechner „emuliert“ werden**. Die Turing-Maschine läuft dann nicht auf Röhren oder Transistoren, sondern macht sich den Basismechanismus eines biologischen neuronalen Netzes zu Nutze (Intelligenz auf der Basis von „Fleisch“).

Es steckt, wenn das einmal verstanden ist, nichts Besonderes darin, wenn ein neuronales Netz logische Schlüsse zieht, weil es zum Leistungspotential neuronaler Netzes gehört, logische Schlüsse ziehen zu können, wenn sie entsprechend konfiguriert sind, weil nämlich logische Schlüsse über „ausreichend glatte“ Funktionen dargestellt werden können. Über die biologische Evolution und die menschliche Kultur sind wir soweit gekommen, dass diese für uns heute selbstverständlich ist. Wobei das Beste am Menschen wohl die enge Verbindung zwischen unserem extrem mächtigen „neuronalen Netz“ ist, das wir mit der Tierwelt gemeinsam haben, und dem beschriebenen Computer begrenzter Leistungsfähigkeit, der bei uns zusätzlich emuliert ist. Da kommen die anderen Tierarten nicht mit, auch die Menschenaffen nicht.

So kann der Mensch Fahrrad fahren, da hilft kein logisches Kalkül, da hilft nur üben, d. h. das Trainieren des neuronalen Netzes im Sinne des „Erlernens einer glatten Funktion“ – wie beim Tennisspiel. Über viel Üben approximiert das neuronale Netz im Gehirn vielfältig interessante hochdimensionale Funktionen. Es ist dies die Basis unserer unglaublichen Bewegungsfähigkeit und unseres handwerklichen Könnens.

Sind logische Schlüsse zu ziehen, wechseln wir in den Turing-Maschine-Modus unseres neuronalen Systems. Die zentrale, hier vertretene These ist insofern die folgende:

These 4

Der Evolutionsprozess hat im Gehirn des Menschen einen (kleinen) abstrakten Rechner auf einem neuronalen Substrat realisiert. Der Informatiker würde sagen: Wir haben auf unserem neuronalen Substrat eine kleine Turing-Maschine emuliert. Das ist ein wesentlicher Kern dessen, was wir als menschliche Intelligenz wahrnehmen. Für die Intelligenz des Menschen ist insofern die Ähnlichkeit zu einem Computer charakteristisch und gut verstehbar. Für viele Dimensionen unserer Intelligenz ist die Neuroseite der Realisierung nicht so wichtig. Das Wesentliche ist, was damit hervorgebracht wird – ein kleiner, abstrakter Rechner, eingebettet in ein neuronales Netz. Für uns ist an dieser Stelle in der Summe festzustellen: Das Gehirn kann abstrakte Denkleistungen erbringen. Es verfügt dazu über eine Art Turing-Maschine. Wir verstehen auch, wie man diese auf einem neuronalen Netz realisieren kann.

Unser menschliches neuronales Netz ist bzgl. der realisierten Turingmaschine (natürlich) eingeschränkt. So ist es bekannt, dass Menschen im **Kurzzeitgedächtnis** maximal 7 ± 2 Dinge gleichzeitig präsent haben und überblicken können. Sollen es mehr Dinge sein, hilft nur Abstraktion und / oder eine baumartige Organisation von Ober- und Unterbegriffen (**Ontologie**). Von der Architektur her scheinen in dem emulierten kleinen Rechner jedenfalls nicht mehr Positionen im Kurzzeitgedächtnis gleichzeitig frei nutzbar zu sein. Andererseits ist auf dieser Basis doch schon Erstaunliches machbar, vor allem wenn man viel übt – und vieles andere kommt hinzu. Denn unsere Turing-Maschine ist in ein **extrem leistungsfähiges biologisches neuronales Netz** und einen **leistungsfähigen Körper** integriert, der wiederum über dieses neuronale Netz sensorisch und aktorisch und in all seinen Lebensvorgängen gesteuert wird. Was die Tierwelt auszeichnet haben wir auch – und den „kleinen Rechner“ dazu und mit all den anderen Fähigkeiten durchgängig integriert.

Dass wir das alles so einordnen können, verdanken wir u. a. einem **Hirnforscher** aus Baden-Württemberg, der leider vor einigen Jahren verstorben ist. Auf ihn wurde eben schon hingewiesen. Das ist **Valentin Braitenberg** aus Tübingen, von dem es sehr gute Bücher zu diesem Thema gibt [1, 3, 4]. Die Erkenntnis seiner Arbeiten besteht im Wesentlichen in der Feststellung, dass es kein prinzipielles Problem ist, auf unserem neuronalen Substrat eine Turing-Maschine zu realisieren. Die wichtigsten Dinge, die man dazu braucht, sind die folgenden: einerseits die biologische Realisierung der **logischen Grundoperatoren**, andererseits einen **Sequentialisierer**, mit dem man Klammer-Prozesse durchführt. Bei Braitenberg wird sehr schön beschrieben, wie die Natur im Rahmen der Evolution diese Operationen Schritt für Schritt realisieren konnte. Der **Sequentialisierer** ist im Wesentlichen derselbe, den wir auch bei der Bearbeitung von Steinen mit Werkzeugen, bei der Planung von Jagden oder in der Sprache bei der Sprachbildung mittels grammatikalischer Strukturen verwenden.

Zu beachten ist allerdings auch folgendes: Das Ergebnis, also der Rechner auf unserem neuronalen Netz ist - nicht überraschend - etwas dürftig im Verhältnis zu einem heutigen PC. Bei vielen Menschen ist bereits bei der dreifachen (manchmal auch der doppelten) Verneinung Schluss. Wir benutzen deshalb oft bereits für die einfache Verneinung ein eigenes Wort (z. B. Ablehnung = Nicht-Zustimmung). Das erleichtert das Denken und vermeidet Verwirrung. Ganz viele Menschen können übrigens den logischen Pfeil (Modus ponens) nicht zweimal hintereinander korrekt anwenden, manchmal nicht einmal „einmal“. Von der Integration gebrochen-rationaler Funktionen, eine Standardaufgabe der Integralrechnung, erst gar nicht zu reden – da tun sich selbst ausgebildete Mathematiker schwer.

Mit anderen Worten: wir können heute gut studieren, was auf unserem kleinen Rechner alles nicht gut funktioniert, vor allem, wenn wir das mit einem PC vergleichen, der uns an vielen Stellen haushoch überlegen ist. Wir sind uns also **unserer Denk-Defizite wohl**

bewusst und sollten besser entsprechend bescheiden sein. Weil das Substrat, auf dem wir unsere Turing-Maschine im Gehirn realisiert haben, nicht besonders gut dafür geeignet ist. Dafür war es auch ursprünglich nicht gedacht.

Braitenberg gibt sich in seinen Arbeiten sehr viel Mühe zu beschreiben, woher in der **Evolution der Sequentialisator** stammt. Er kommt, wie oben schon angedeutet, von unseren **Jagdtechniken** und unseren **handwerklichen Fähigkeiten**, die sich in Kulturprozessen ebenfalls graduell entwickelt haben. Dort müssen in Jagd- oder Fertigungsprozessen immer wieder Sequenzen von Schritten in der richtigen Reihenfolge abgearbeitet werden. Anders ausgedrückt: da werden Algorithmen prozessiert. Und das Gehirn muss das steuern, immer neue Einzelschritte in der richtigen Reihenfolge, mit Verzweigungen und ggf. auch Rücksprüngen, je nach Zwischenergebnis, d. h. Pfad-abhängig. Das sind genau die Sequenzen, die wir auch für die Realisierung der logischen Maschine, für die Operationen unserer kleinen Turing-Maschine, brauchen. D.h., zwischen der Entwicklung des Menschen als einem Wesen, das erfolgreich mit Waffen und in Gruppen jagt und jemandem, der ein Handwerk betreibt und dem Gehirn des Menschen, mit dem man sequentialisiert und insbesondere auch das Beherrschen einer **Sprache** realisieren kann, inklusive der immer komplexeren Verschachtelung von Sätzen, gibt es enge Zusammenhänge. Und diese Zusammenhänge sind abstrakt gut zu verstehen über den Weg der Realisierung eines kleinen Rechners in unserem Gehirn.

Entscheidend ist dabei folgendes: Irgendwann wird es zu aufwendig, jede Jagdmethode, jeden handwerklichen Vorgang einzeln hardware-mäßig bzw. neuronal fest zu verankern bzw. neuronal über trainierte Verbindungsstrecken „**einzuschleifen**“. Das ist alles viel zu langsam und unflexibel. Irgendwann braucht man ein flexibel nutzbares **Operationssystem** und muss dieses **neuronal realisieren**. In diese kann man dann Eingaben willkürlich einspeisen und abarbeiten – die kleine Turing-Maschine im neuronalen Netz. Diese operiert übrigens im Wesentlichen nur unter Kontrolle des **Bewusstseins** und kann auch nur

einen Prozess gleichzeitig bearbeiten. D. h., die neuronale Realisierung des postulierten operativen Systems ist wohl nur ein einziges Mal verfügbar und kann nur unter Kontrolle des Bewusstseins genutzt werden. Wahrscheinlich ist diese Kontrolle umgekehrt auch ein wichtiges Element des Bewusstseins, wie die Tatsache, dass dieses im Wesentlichen nur eine einzige Operation bzw. anspruchsvolle geistige Tätigkeit pro Zeiteinheit ausführen kann [24].

11. Die Sonderposition des Menschen zwischen Tier und Computer

Die Summe des bisher Gesagten bedeutet das Folgende: Wenn wir verstehen wollen, warum wir so sind wie wir sind, dann stellt man sich am besten die Mischung von einem „Puma“ mit einem kleinen dürftigen, aber immerhin funktionierenden Rechner vor. Wenn man diese Kombination vor Augen hat, verstehen wir auch, warum wir als Menschen zum Schluss die Welt beherrschen und nicht die Pumas. Weil wir den kleinen Rechner haben, die „**universelle Intelligenzmaschine**“, der Puma nicht. Wobei der Weg zum Menschen ein gradueller Prozess war und die Menschenaffen insofern viele Elemente des kleinen Rechners ebenso verfügbar haben wie wir, aber eben noch einmal viel eingeschränkter. Weil z. B. die **volle Sprache** fehlt, ein ganz wichtiges Element zur „Fütterung“ der digitalen Maschine. Und weil der kulturelle Prozess fehlt, mit dessen Hilfe wir die Leistungsfähigkeit dieses digitalen Teilsystems permanent verstärkt haben. Die **Schulpflicht** gehört dazu, das Lesen ganzer „Bibliotheken“ ebenso.

Wir verstehen dann gleichzeitig auch, warum die Computer, die wir heute bauen, trotz ihrer großen Überlegenheit in der immer schnelleren Abarbeitung immer komplexerer Algorithmen gegen uns lebenspraktisch bis heute nicht ankommen, obwohl sie als ab-

strakte Maschine viel besser sind als wir. Weil wir nämlich dieses wunderbare neuronale System haben – wie der Puma.

Wir können eben zusätzlich alles, was gute neuronale Systeme können und was Rechner nicht können. Wir sind ein **mächtiges Säugetier** mit all seinen Lebensfunktionen. Wir haben dazu einen **wunderbaren Körper**. Wir können damit **unglaubliche Dinge** tun. Es gibt keine Roboter, die heute auch nur im Entferntesten tun könnten, was wir Menschen als sensorisch-aktorisches System tun können, obwohl auch in diesem Bereich die Fortschritte groß sind. Ziemlich lange werden wir auf jeden Fall noch einzigartig bleiben, nämlich mit diesem kleinen Rechner in diesem wunderbaren Körper, verknüpft mit unserem neuronalen System.

Eine ganz entscheidende Frage ist dann natürlich auch die, **ob der Mensch mit seinem Gehirn besser werden kann?** Dies wurde oben gerade angesprochen. Ja, natürlich kann er das. Wir arbeiten kulturell permanent an der Verbesserung des „**Betriebssystems**“, das auf unserer kleinen digitalen Maschine und auf unserem neuronalen Netz läuft. Wir tun das als Individuen und wir systematisieren dies auch zivilisatorisch und bilden uns und unsere Kinder aus. Heute übrigens schon länger, als der Mensch früher lebte und am besten in der Form eines „**lebenslangen Lernens**“.

Wir erfinden z. B. immer mächtigere „**Makros**“, die in einem Bild, in einem Befehl, ganze Kaskaden von Überlegungen in Gang setzen bzw. ersetzen können, für die früher ein Einzelner hätte ewig überlegen müssen, was hier geht oder auch nicht. Er wäre überhaupt nicht von der Stelle gekommen. Wir haben jetzt als gesellschaftliche Leistung, als Fortschritt von Wissensmanagement, Technik und Kultur ganze Kaskadenprozesse zur Verfügung, die wir „betriebssystemmäßig“ über einen Makrobefehl induzieren. Das hilft uns z. B. in Entscheidungsprozessen mit „Trade-offs“ umzugehen. Das hilft uns, in dyna-

mischen Gruppenprozessen Situationen vom Typ „**Prisoners-Dilemma**“ zu verstehen [31] und durch organisatorische Maßnahmen zu überwinden.

Wir sind mittlerweile auch schon gut darin, dass wir dieses Gehirn, das dafür eigentlich gar nicht gedacht war, sogar in einen **Time-Sharing Modus** bringen. Dass wir also innerhalb von Minuten auf genügender Abstraktionsebene in der Lage sind, von einem Thema zum anderen zu springen, um in ein paar Minuten wieder da anzusetzen, wo wir vorher aufgehört haben. Das ist kein neues Gehirn, das ist das alte Gehirn. Aber auf diesem „alten Gehirn“ verbessern wir das Betriebssystem und die „Bibliotheken“, mit denen das System arbeitet, meist als Teil der Verbesserung unseres „kleinen Rechners“. Deshalb wird unser Gehirn – lebenspraktisch – immer besser, gerade auch, was die abstrakte Seite betrifft.

Der stärkste Mechanismus, um das alles tun zu können, ist die **Sprache**. Das wäre jetzt ein eigenes großes Thema. Viele zu diesem Thema in der Logik dieses Textes findet sich in [24], wo insbesondere auch das Gehirn als große **Simulationsmaschine (Kopfkino)**, die Frage des **Bewusstseins** und der **Freiheit** und zusätzlich auch der konkrete Evolutionsprozess, der das alles hervorgebracht hat, besprochen werden. **Worte sind mächtige „Makros“**.

Sowohl sprachlich-wissenschaftlich als auch im Bereich der Künstlichen Intelligenz werden wichtige Themen erforscht. Die Verbindung von Sprache mit der Welt der Begriffe und der Ontologien ist ein großes Thema, wenn man Intelligenz verstehen will. Hierzu gibt es übrigens in Dresden große Kompetenz, auch außerhalb der Universität. Die Überlegungen in den hierzu zitierten Texten sind von großer Relevanz für die im vorliegenden Text entwickelten Überlegungen [6, 7].

Hier fragt man sich z. B. über welche Begriffe das Gehirn verfügt, für die wir nicht einmal Worte haben. Unser Gehirn arbeitet nämlich auch damit. Braitenberg würde sagen: „Das sind **nicht-sprachliche „neuronale Assemblies“**. Biologisch gesprochen sind das Komplexe von Neuronen, die miteinander über bestimmte Typen von Verbindungen verknüpft sind und als Assembly auftreten, also sich gegenseitig aktivieren, wenn einzelne Teile stimuliert werden. Diese Assemblies nutzen wir als Makros, oft übersetzbar in sprachliche Begriffe, mit denen wir dann verschiedene intellektuelle Prozesse anreichern. Auch dieses Thema ist weit ausdifferenziert. Es ist auch spannend. Es ist auch ein Thema, zu dem es Sinn macht, in moderne Filme zu gehen. Ich empfehle Ihnen vor dem Hintergrund des gerade Gesagten, die Filme „Her“ wie „Transcendence“. Aber das alles wäre ein neues Thema, heute werde ich das nicht weiter vertiefen, aber noch einen interessanten Hinweis anfügen.

In jüngerer Zeit wird über erstaunliche Fortschritte der Forschung im Bereich der **Sprachverarbeitung** berichtet. Für die Arbeit unseres „Kopfkinos“ ist die Aktivierung von Begriffsfolgen im Sinne von Neural Assemblies von entscheidender Bedeutung. Solche Assemblies können auch größere Einheiten darstellen, z. B. grammatikalische Unterstrukturen längerer Sätze. Forschern von KIT in Karlsruhe ist es nach Pressemitteilungen gelungen, die Aktivierung solcher Assemblies (im einfachsten Fall Wörter) sequenziell als Gehirnaktivität in Form von Bildmustern zu verfolgen. Ein Ziel ist dabei, **vollständig gelähmten Menschen Sprache zurückzugeben**.

Ausgewertet wurden Daten von Gehirnströmen von sieben Epilepsiepatienten in den USA. Ihnen lag während des Sprechens ein Elektrodennetz direkt auf der Großhirnrinde ihres Gehirns – es war ohnehin freigelegt, um eine Behandlung durchzuführen. Mit Elektroden, die von außen am Kopf angelegt werden und so die elektrische Aktivität des Gehirns messen, sind solche spezifischen Aufzeichnungen noch nicht möglich. Die Forscher können dabei zusehen, wie das Gehirn den Sprachvorgang plant – und dann die

Muskeln der Artikulationsorgane über die Neuronen in der Großhirnrinde aktiviert, bevor die eigentliche Sprache hörbar wird.

Sichtbar gemacht wurden die Aktivitäten mit Hilfe von Farben: „Die neuronale Aktivität auf der Großhirnrinde kann farblich dargestellt werden“. Auf Basis von Algorithmen aus der automatischen Spracherkennung gelang es anschließend, allein anhand der Gehirnströme zu verstehen, was gesagt wurde. Dazu werden Laute im Kontext von Wörtern und ganzen Satzphrasen betrachtet. „Nach Aussagen der Forscher wurden aussagekräftige Ergebnisse erreicht, die in der Erkennungsgenauigkeit zwar noch weit von der akustischen Spracherkennung entfernt sind, aber sehr deutlich über dem Zufall liegen“. Assemblies bzw. Wörter korrespondieren zu unterscheidbaren Mustern. Das ist ein ganz entscheidender Fortschritt, der es vielleicht einmal ermöglichen wird, genauer zu verstehen, wie die „kleine Turing-Maschine“ in unserem Gehirn praktisch organisiert ist.

12. Der Mensch und das Gefühl für Gerechtigkeit

Es entspricht der Lebenserfahrung, dass Menschen bestimmte Vorstellungen von **Gerechtigkeit** haben und sehr ablehnend sein können, wenn sie Verhältnisse als ungerecht wahrnehmen [26]. Es gibt auch Menschen, die bereit sind, viel für andere zu tun, selbst wenn sie davon keinen unmittelbaren Vorteil haben. Man spricht in diesem Zusammenhang auch von **Altruismus**. Es gibt auch die These, dass die Überlegenheit der Menschheit gegenüber ihren engsten Verwandten gerade auf dieser Eigenschaft beruht. Weil der Altruismus so doch wieder der Gruppe zugute kommt, spricht man manchmal auch vom „**Gruppen-Altruismus**“ oder **einsichtsvollem Egoismus**.

Ökonomische Theorien transportieren oft andere Vorstellungen über Menschen. Der sogenannte **Homo oeconomicus** ist nur an seinem **persönlichen Nutzen** interessiert. Und er wird jeder Lösung zustimmen, in der er sich verbessert. Wir würden dann als Gruppe alle Veränderungen akzeptieren, bei denen sich niemand verschlechtert bzw. bei denen sich jeder verbessert, selbst wenn die Niveaus der Verbesserung extrem unterschiedlich sind (**Pareto-Optimierer**). Interessanterweise ist das empirische Verhalten von Menschen oft ganz anders. Der Mensch ist nicht einfach nur **Nutzenoptimierer** und **Pareto-Optimierer**. Der Mensch ist in seinem Verhalten viel komplizierter, oft auch stark von **Emotionen** oder **höheren Kontrollebenen** (z. B. **Gewissen**) getrieben.

Wir nähern uns jetzt einer spannenden Thematik, die man seit einiger Zeit in der empirischen Ökonomie im Kontext des sogenannten **Ultimatumspiels** analysiert. Das ist ein Spiel, das naive Neoliberalen und Marktfundamentalisten mit ihren merkwürdigen Theoriekonstrukten à la homo oeconomicus zutiefst irritiert. Das Spiel geht wie folgt: Der reiche Onkel aus Amerika legt 1000 € auf den Tisch, an dem 2 Personen sitzen. Er spricht zum ersten und gibt ihm den ersten Zugriff. Nimm Dir davon soviel du willst, gib dem Kollegen den Rest – keine Kommunikation! Wenn der Kollege nicht ablehnt, könnt ihr Beide das Geld behalten. Weigert er sich, bekomme ich die 1000 Euro zurück.

Das ist ein interessantes Spiel. Für einen pareto-optimierenden Marktfundamentalisten ist vollkommen klar, wie sich der Kollege entscheiden muss. Denn selbst dann, wenn ihm nur ein Euro angeboten wird, **muss** er „Ja“ sagen. Denn wenn beide mehr haben als vorher, ist das Pareto-optimal, also in individueller Betrachtungsweise für beide besser als vorher. Und wenn der eine 999 Euro mehr als vorher hat, und der andere einen Euro mehr als vorher hat, dann ist das rein zahlenmäßig zweifelsfrei besser als der Zustand zuvor. Wieso soll sich auch jemand beschweren, wenn er, ohne etwas zu leisten, einen Euro geschenkt bekommt. Wenn der Betreffende dennoch nein sagt, ist er ein Spielver-

derber, ein bornierter Sozialist, jemand, der nicht gönnen kann, ein typischer **Neiddebattler**. So jemand ist kein homo oeconomicus.

Interessanter Weise ist es auf diesem Globus empirisch allerdings ganz anders, als die marktfundamentalistische Theorie unterstellt. Unter einem Drittel Anteil wird bei normalen Größenordnungen und wenn Menschen nicht in Not sind, immer nein gesagt. Normale Menschen akzeptieren in dieser Situation einfach keine Aufteilung unterhalb von einem Drittel. Es gibt eine Subgruppe, bei der das angeblich anders zu sein scheint, das sind ausgebildete MBA-Studenten. Diese akzeptieren wohl teilweise auch bereits 5 Euro. Man kann fast den Eindruck haben, dass ein Studium, das zumindest an manchen Orten zu nahe an marktfundamentalistischen Ideen platziert ist, zu einer gewissen Veränderung des Gehirn beiträgt. Da kann man in mentale Zustände kommen, in denen man Dinge akzeptiert, die eigentlich für Menschen und ihr Gerechtigkeitsgefühl vollkommen unakzeptabel sind.

Wichtig ist für unsere Überlegungen, dass die meisten Menschen auf diesem Globus eine Vorstellung davon haben, was gerecht ist. Moderne Gehirnforschung zeigt auf NMR-Tomographiebildern, dass bei **unfairen Angeboten das Schmerzzentrum aktiviert wird**. Und das ist schon bei **Schimpansen** so. Dabei ist in der oben beschriebenen Art des Ultimatumspiels die Willkür in der Zuordnung des ersten Vorschlagsrechts wichtig. Denn das menschliche Gerechtigkeitsgefühl ist sehr weit ausdifferenziert. Wenn z. B. die Zuteilung des Rechts auf den ersten Zugriff auf irgendeiner objektiven, zuvor erbrachten Leistung (z. B. einen individuellen Jagderfolg) beruht, dann werden von anderen bei nachfolgenden Aufteilungen auch sehr viel schlechtere Angebote akzeptiert. Wenn sich also jemand in akzeptabler Weise den ersten Zugriff verdient hat, dann ist die Vorstellung von dem, was eine gerechte Aufteilung ist, ganz anders, als wenn beide wissen, dass die erste Zuordnung willkürlich und zufällig war.

Die Empirie, wie sie heute in der psychologischen und der empirischen Ökonomie aufgezeigt wird, ist also ganz anders, als in manchen ökonomischen Theorien unterstellt wird. In der Empirie erweist sich der Mensch als höchst kooperatives Wesen (**Homo Ökonomikus Kooperativus**), der massiv auch mit **Gerechtigkeitsfragen** beschäftigt ist und oft auch mit einer lebenspraktischen Situation, bei der neben der absoluten Dimension des Reichtums eben auch eine **relative Dimension** des Reichtums eine große Rolle spielt. Die relative Dimension des Reichtums wird besonders deutlich in dem oben diskutierten Ultimatum Spiel, das sehr viel über die kooperative Natur des Menschen und sein Gerechtigkeitsempfinden aussagt.

13. Die Qualia-Frage

Heißt das Gesagte, dass die Maschine so intelligent wie der Mensch werden kann oder sogar intelligenter? Kann der Rechner werden wie der Mensch, oder gibt es Unterschiede, prinzipielle Grenzen?

Und was unterscheidet dann den Menschen von einer Maschine? Ist es das **Bewusstsein**? Die Antwort ist Nein, wenn Bewusstsein bedeutet, dass man etwas über sich selber weiß und über das, was man tut. Die Antwort ist vielleicht ja, wenn Bewusstsein das Fühlen beinhaltet, ein **wirkliches Gefühl haben**, das mehr ist als ein Wort oder Software. Übrigens ist dies das zentrale Thema des interessanten Filmes „Ex-machina“, der versucht, den Turing-Test für Intelligenz in Richtung Gefühl zu erweitern.

Was ist wirkliches Fühlen? Die Philosophen sprechen hier manchmal von **Qualia**. Es ist dies ein Thema von ganz zentraler Bedeutung, vielleicht das wichtigste, wenn man nach prinzipiellen Unterschieden zwischen (zukünftigen) technischen Systemen (Robotern /

Androiden) fragt und Menschen. Eine ausführliche Diskussion mit vielen Bezügen zur Literatur findet sich in [24].

Mögliche Grenzen für selbstlernende KI-Systeme und prinzipielle Unterschiede zu uns bestehen aus Sicht des Autors also am ehesten im Bereich „**echter Gefühle**“. Wir tragen als Menschen in der Folge der biologischen Evolution einen mächtigen, neuronal und hormonell basierten Gefühlsmechanismus in uns, der uns antreibt und den wir in seinem Funktionieren im Letzten **nicht voll verstehen**. Wir verstehen diesen allenfalls von der operationellen Seite her.

Darauf konzentrieren sich bisher auch die Versuche einer Annäherung von der technischen Seite. Z. B. bei sogenannten „Software-Teachers“, die in EDV-gestützten Trainingssystemen, z. B. beim Erlernen von Fremdsprachen, eingesetzt werden. Die Nutzer / Schüler erwarten teilweise, dass das „Gesicht des (Software-) Teachers“ freundlich zustimmend lächelt, wenn der Schüler alles richtig macht und gelegentlich unzufrieden oder ungeduldig dreinschaut, wenn auch noch der 5. Versuch fehlerhaft ist. Nun mag der „(Software-) Teacher“ lächeln oder nicht. Eine tatsächliche Gefühlsebene (im Sinne von Qualia) besitzt er sicherlich nicht.

Vielleicht können wir prinzipiell bisher deshalb keine Maschinen bauen, die so „fühlen“ wie wir. Vielleicht wird uns das nie gelingen. Kein Mensch versteht etwa, woher ein Gefühl wie Schmerz kommt. Der Computer empfindet ja den Schmerz nicht in unserem Sinne, wenn ihm softwaregetrieben das Phänomen Schmerz eingegeben wird, er also z. B. „Aua“ ruft, wenn wir ihn treten. Wir Menschen sind uns aber sicher, dass es uns wirklich weh tut, wenn man uns mit einer Nadel sticht. Und bei einem Menschenaffen wird es nicht anders sein. Genau hierin, also in der **Qualiafrage**, besteht bis heute ein prinzipieller Unterschied zwischen Menschen (bzw. hochentwickelten Lebewesen) und Maschinen.

Der Mensch ist zwar ein System, das zur Logik fähig ist. Er ist aber noch vieles andere. Er ist insbesondere, wie beschrieben, ein biologisches Wesen. Er hat Gefühle, er hat „**Qualia**“. Das, was den Menschen umtreibt, seine Evolutionserfahrung, seine Erwartungen, Wünsche, Neigungen, seinen Wunsch nach Nähe zu anderen, die Reaktion auf andere, auch das Mitleid mit anderen, all das hat erheblichen Einfluss darauf, wie der Mensch sich verhält. Oft verhält er sich aus einer rein ökonomischen Betrachtung nicht besonders zielstrebend, wie oben beschrieben. Wenn man daran glaubt, dass der Mensch ein Homo oeconomicus ist, wie es die marktradikale Philosophie der Ökonomie tut bzw. lange tat, dann verhält sich der Mensch - empirisch betrachtet – häufig falsch. Es sind oft ganz andere Dinge, als monetäre Vorteile, die ihn bewegen, Dinge, die mit der Zuneigung zu anderen Menschen, mit dem Gefühl von Verpflichtung und Verantwortung zusammenhängen. Im Marketing diskutiert man in diesem Kontext die Gruppe der **LOHAS** - Menschen mit einem Lifestyle of Health and Sustainability. Dies sind intelligente, gut ausgebildete Menschen, die ökonomisch gut dastehen und ein entsprechendes Leben führen wollen, dies aber in einer aus ihrer Sicht ethisch akzeptablen Weise, gleichzeitig auch ästhetisch anspruchsvoll. Billig um jeden Preis, ist für sie kein Thema. Sie wollen vor allem nirgendwo Schaden anrichten. Der Mensch ist deshalb weder ein **Pareto-Optimierer**, noch ein **Bruttoinlandsprodukt-Vollstrecker** und die Familien und die Freunde und die Liebe sind vielen viel wichtiger, als die sogenannte **Wertschöpfung**.

In vielen Fällen haben aber die Menschen dennoch dafür gesorgt, dass ein marktfundamentales Verhalten Platz greift, ein Verhalten, das mehr an das des Homo oeconomicus erinnert, als das des eigenen Lebens. Wir haben für die Ökonomie wichtige Superorganismen, vor allem Unternehmen und Organisationen, so aufgestellt, dass Menschen darin nicht mehr primär als verantwortungsvolle Individuen, sondern oft wie **kleine Räder in einem Räderwerk** operieren. Wenn die Polizei in den Einsatz muss, ist nicht viel Zeit für Debatten mit den Protestlern. Es geht nicht mehr darum, wie der einzelne Polizist eine irgendwo gemachte Äußerung einschätzt. Solche Entscheidungen werden auf die

Ebene der **Polizeiführung**, des **Verteidigungsministeriums** oder der **Politik** verschoben, dahin, wo man den Einsatzbefehl gibt – mit oder ohne parlamentarische Zustimmung. Die einzelnen Polizisten, Soldaten, Angestellten müssen funktionieren – sie müssen gehorchen und falls sie das nicht tun, droht Entlassung aus dem Dienst und möglicherweise auch der Verlust der Pension. Es ist zwar richtig, dass die Polizisten auch ihren Gewissen folgen sollen, aber was das im Einzelnen bedeutet und ob das vor dem Verlust der eigenen Position schützt, weiß man nicht. Aus Sicht des einzelnen Polizisten ist hier Vorsicht geboten.

Große gesellschaftliche Einheiten operieren deshalb sehr viel stärker algorithmischer, auch stärker ziel- oder nutzerorientiert als das im Allgemeinen der einzelne Mensch tut. Derartige Superorganismen operieren in diesem Sinne logischer, konsistenter und konsequenter. Ob das gut ist, ist ein anderes Thema. Die Frage ist nämlich, an welchen Kriterien orientieren sie ihre Entscheidungen?

These 5:

Wir Menschen, wie wohl auch andere hochentwickelte Lebewesen, haben ein **emotional-hormongetriebenes Bewertungssystem**. Dieses beinhaltet, was manche Philosophen als **Qualia** bezeichnen. Damit verbunden sind Vorstellungen von einer gerechten, gelingenden Welt, emotionale Reaktionen in Bezug auf die Frage, was richtig oder falsch ist und die Intentionalität, sich für eine „gute“ Welt einzusetzen. Die Maschinen, die wir bisher realisiert haben, haben das alles nicht, sie leben nur in einer Welt der Worte, Bilder und Modelle. Die wesentliche Rückbindung der Worte sind wiederum Worte. Das ist bei uns anders. Bei uns ist die **Symbolverankerung** (symbol grounding) über den Körper (inklusive Qualia) die entscheidende zusätzliche Größe.

14. Wo werden uns immer intelligentere technische Systeme hinführen?

Denken wir an die Zukunft technischer Intelligenz, an intelligente Systeme, vielleicht intelligente Roboter, stellen sich aufgrund des Gesagten viele Fragen. Einmal gibt es große Fortschritte. Zwei Beispiele aus der Mathematik sollen das unterstreichen, denn interessanterweise spielen Computer bzw. Algorithmen mittlerweile sogar eine Rolle im Rahmen **mathematischer Beweise**, von vielen als „Königsebene“ geistiger bzw. kreativer Betätigung des Menschen angesehen. Das erste bekannte Beispiel war der Beweis des **Vier-Farben-Satzes** durch Kenneth Appel und Wolfgang Haken 1976. Dabei geht es um die Möglichkeit, alle regulären Landkarten mit 4 Farben so färben zu können, dass benachbarte Länder verschiedene Farben haben. Appel konnte das Beweisproblem auf die Überprüfung von weniger als 2000 Einzelfälle reduzieren. Er konnte auch allgemeine Prinzipien angeben, mit deren Hilfe diese Fälle potentiell geklärt werden konnten. Für Menschen war das allerdings aus zeitlichen Gründen nicht machbar. Die Autoren verlagerten deshalb diese Aufgabe auf einen Rechner. Mit der eingesetzten Methodologie konnte der Rechner in allen Fällen erfolgreich nachweisen, dass der Vierfarbensatz in diesem Spezialfall zutrifft. Damit war der Satz bewiesen.

Es gab in der Scientific Community einige Debatten, ob man dies nun als Beweis akzeptieren soll. Alle Fälle händisch zu überprüfen, war nicht möglich. Die Arbeiten an dem Beweis wurden von anderen Forschern fortgesetzt. Neil Robertson, Daniel Sanders, Paul Seymour, Robin Thomas haben 1996 die Zahl der zu prüfenden Fälle auf 633 reduziert [33]. Für eine Bearbeitung durch Menschen immer noch zu viele.

Inzwischen ist es Georg Gonthier und Benjamin Werner gelungen, einen formalen Beweis des Satzes mit Hilfe des **Beweisassistenten** Coq [38] auf Basis von [33] zu konstruieren.

ren. Dies ist ein weiterer großartiger Schritt, der auf der Detailebene weitere Verbesserungen und Klärungen zum Vierfarbenproblem beinhaltet. Der Vier-Farben-Satz gilt jetzt als unzweifelhaft bewiesen, die Zusammenarbeit zwischen Mensch und Maschine ist jetzt gut etabliert. Die Maschine hat in solchen Beweisen jetzt eine wichtige Rolle. Eine vergleichbare Entwicklung gab es in jüngerer Zeit bezüglich der sogenannten **Keplerschen Vermutung**, die sich mit der optimalen Packung von Kugeln im Raum beschäftigt. Die vermutete optimale Lösung entspricht dem bekannten Stapeln von Apfelsinen als Pyramide. Den Beweis führte Thomas Hales, fast 400 Jahre nach der Formulierung der Vermutung durch Kepler um 1606. Er konnte das Problem auf die Betrachtung von etwa 5000 Fällen reduzieren. Mit Hilfe eines Doktoranden und eines Computers konnte er die „einfachen“ Fälle schnell erledigen. Die verbleibenden 100 konnte er einzeln abarbeiten, das dauerte aber mehrere Jahre und zwar bis 1998. Der Referee-Prozess zu dem Beweis dauerte Jahre und beinhaltete Unzufriedenheit auf allen Seiten und eine Restunsicherheit „wegen des hohen Überprüfungsaufwandes und der Frage ausreichender Prüfung im Detail“. Auf dieser Basis wurde das Ergebnis in 2005 publiziert, aber nur mit einem die Letztgewissheit relativierenden Zusatz vom Typ „ohne Gewähr“.

Verständlicherweise war Thomas Hales unzufrieden. Er entschloss sich deshalb zu einem erneuten Beweis, diesmal unter Nutzung eines Computer-Beweisassistenten (in Analogie zum Vorgehen von Gonthier und Werner bzgl. des Vier-Farben-Satzes). Mit einer enormen Rechnerleistung, die Microsoft speziell für diese Aufgabe dem Autor zur Verfügung stellte, konnte letztlich ein jetzt voll akzeptierter Beweis in der Wechselwirkung mit diesem Computersystem herbeigeführt werden.

Des Weiteren gibt es auch große Hoffnungen. Da wird die Maschine zum Helfer, zum Retter. Woher rühren diese Hoffnungen bzw. Träume und Illusionen? Manche Menschen verzweifeln schon lange an unserer Politikunfähigkeit und hoffen auf die „gütige“

kluge Maschine. In diesem Bereich ist vieles denkbar, man denke nur an das oben beschriebene System **WATSON** und seine enormen Leistungen im Bereich „**Cognitive Computing**“. Dieses System bringt die Generierung von Hypothesen oder Vermutungen, die beim Menschen die Basis sind für alle höheren kognitiven Prozesse, wie das Interpretieren von Bildern oder das Verstehen von Sprache, bereits in manchen Themenbereichen besser hervor als wir. Vielleicht wollen die Menschen, dass irgendwann derartige Systeme Führungsaufgaben übernehmen, weil sie uns so vielfach überlegen sind in ihren Möglichkeiten, z.B. im **Onlinezugriff auf hunderttausende wissenschaftliche Artikel zu einzelnen Themenfeldern**. In einem bestimmten Sinne liest ein WATSON-artiges System jetzt alle diese Forschungsarbeiten und verändert in Folge des Lesens seine Zugriffsstruktur und letztlich seine Entscheidungen und Empfehlungen. Wir haben als Mensch oft nicht einmal mehr die Zeit, einzelne Texte zu lesen. Ist dann die Maschine vielleicht irgendwann die Instanz, die wir fragen sollten? Weil sie mehr weiß als wir, mehr liest, mehr nachdenkt und vielleicht **weniger von Emotionen getrieben** ist als wir und deshalb bestimmte Fehler vermeidet?

Was so gut klingt, hat aber auch eine Kehrseite. Das alles kann potentiell gefährlich werden. Die Maschine könnte zum Schluss die Macht haben, nicht wir. Dieser Gedanke treibt auch den **Physiker Stephen Hawking** [12, 19] um, der seine eigene Wirkungsmöglichkeit als Schwerbehinderter massiver maschineller Unterstützung verdankt, die ihm als Folge der Innovationen der letzten Jahrzehnte im IT-Bereich heute zur Verfügung stehen. Hawking sieht also die bisherigen Fortschritte sehr positiv, deutet aber an, dass die Entwicklung irgendwann problematisch werden könnte.

In den Medien wurde berichtet, dass in seinem aktuellen Sprachsystem der Fa. Swiftkey auf Basis von Intel Technologien eine normale Sprechleistung von etwa 150 Wörtern pro Minute erreicht wird, obwohl er selber nur noch etwa 2 Worte in dieser Zeit der Maschine mitteilen kann. Die Maschine ist dabei als ein an Hawkings hoch angepasstes Sys-

tem in der Lage, fast schon „seine Gedanken zu lesen“ und kann auf Basis von ganz wenigen mitgeteilten Schlüsselwörtern die Hawking-üblichen Überlegungen und Sätze hervorbringen. Für Hawking sind die bisherigen Fortschritte der Technik zentral und unverzichtbar. Dennoch spricht er klar aus, dass die Entwicklung irgendwann problematisch werden kann (vgl. hierzu [8, 12, 19]).

Für die Wechselwirkung mit der Maschine kommt es deshalb darauf an, was der Mensch dem zukünftigen Humanoiden oder Hubot in dessen Verhaltenssystem einbaut, wozu er diese Maschinen (Wesen) befähigt. Wenn wir ihn mit Intentionen schaffen, wenn wir ihm immer mehr Fähigkeiten via Software (inklusive Lernmöglichkeiten) zur Weiterentwicklung einbauen, dann wird es potentiell gefährlich – mit und ohne Qualia. Da sollten wir uns klug zurückhalten und allenfalls in kleinen Schritten experimentieren – und immer mit **Ausschaltknopf** [27, 28].

Mit Blick auf die Zukunft sollte die Politik, wenn Vernunft der Maßstab ist, sehr enge Grenzen für solche Systeme und ihre Weiterentwicklung setzen. Irgendwann werden wir vielleicht einmal ein **weltweites Moratorium** brauchen, wie z. B. auch bei biologischen Kampfstoffen. Aber wird das so kommen? Die Machtinteressen von Menschen und Eliten, z.B. im militärischen Bereich, ökonomische Interessen und Sicherheitsinteressen können letztlich zur Folge haben, dass wir die Möglichkeiten solcher neuen Maschinen immer weiter treiben – über alle Vorsichtsgrenzen hinaus – weil spezielle Interessen sie für ihre Zwecke nutzbar machen wollen. Genau das müsste eine kluge Politik verhindern.

15. Der gläserne Mensch droht⁵

Aufgrund des Gesagten wirkt die schnelle Innovation im Bereich IT und Robotik massiv auf unser Leben zurück. „Immer intelligentere Maschinen, und zukünftig immer „menschlichere“ Roboter, können zwar immer nützlichere Dienstleistungen ermöglichen, zu Ende gedacht können sie aber auch unsere Arbeitsplätze gefährden, unser Privatleben ausspionieren, uns mit zugeschnittenen Konsumangeboten verfolgen und in der Wechselwirkung mit sozialen Netzen die Kapazität unseres Bewusstseins fast vollständig okkupieren.

Wir Menschen werden immer **transparenter**, weil es der Arbeitgeber will, weil unsere Lieferanten und Kunden es wollen, weil der Staat es will und die Technik es liefern kann. Mittlerweile sind wir zudem mit den vielfältigen Präsenz-Anforderungen in softwaregestützten sozialen Netzwerken konfrontiert. Auf diese Weise entsteht großer sozialer Druck, in den Netzen präsent zu sein. Unsere vielen Netzpräsenzen hinterlassen Spuren. Informationen, insbesondere sogenannte **Metadaten** über Verbindungen, werden systematisch gespeichert. Mittlerweile kann unser Leben in Teilen rekonstruiert werden, und das zu extrem geringen Kosten. Mit Big Data und immer leistungsfähigeren Algorithmen wird dies jetzt ein gesellschaftliches Thema. Mit der Zeit können Systeme heute ein viel besseres Beschreibungsmodell von uns aufbauen als unser menschliches Gegenüber. Denn das System bekommt ja von uns viel mehr Informationen, als wir einem Gegenüber freiwillig jemals geben würden.

Heute schon gibt es ein riesiges Interesse daran, die Menschen immer transparenter werden zu lassen. In dem Roman „*The Circle*“ [8] ist zum Schluss die **ultimate Transpa-**

⁵ Dieser Abschnitt ist teilweise eine Überarbeitung von Teilen eines Interviews „Chancen und Risiken durch Robotik“ in der Computerwoche [27]

renz das Thema. Diese Transparenz, letztlich auch über den Zugriff auf **biologische Parameter**, wird dann aber irgendwann zu unakzeptablen und völlig asymmetrischen Konstellationen zwischen Mensch und Maschine führen, die für das betroffene Individuum letztlich „Gewaltcharakter“ haben.

Es gibt viele Gründe, warum es nicht gleichgültig ist, ob alles über uns bekannt ist oder nicht. Das Leben ist viel angenehmer, wenn man sich über sich selbst und über den anderen noch Illusionen machen kann. Wissen wir zuviel, werden wir alle vielleicht zum Schluss erkennen (müssen), dass jeder von uns ein (wenn auch höchst komplexer, hochgradig individueller und in seinem Verhalten nicht-prognostizierbarer) „Algorithmus“ ist. Diesen „Algorithmus“ werden wir in seinen Stärken, aber oft auch in seiner ganzen „Armseligkeit“ vor uns sehen. Und natürlich auch in seinem Wandlungs- und Lernvermögen, das natürlich in je individueller Weise vorhanden ist, aber ebenfalls je spezifische Grenzen besitzt. Wir werden natürlich lernen, damit zu leben, auch mit der Dürftigkeit vieler Überlegungen, Prioritätensetzungen und Reaktionen, die wir nicht mehr durch „Tarnung“ werden abschirmen können. Das betrifft Charakterzüge mancher „Zeitgenossen“ wie z.B. Geiz (eine Krankheit), Neid, Aggressivität oder mangelnde Empathie für die Not anderer. Der Mensch wird dabei immer mehr wie eine **Maschine getaktet**, während diese sich zunehmend in Richtung eines menschlichen Wesens bewegt, wie z. B. in dem sehenswerten (älteren) Film „Blade Runner“. Solche Entwicklungen sind möglich, beinhalten aber die große Gefahr, den sozialen Zusammenhalt zwischen den Menschen weitgehend aufzulösen.

Noch ist das alles Zukunftsmusik. Soweit ist es noch nicht. Wenn wir heute an solchen Systemen arbeiten und dies technisch intelligent tun, gibt es den **Abstellknopf** noch. Dafür sollten wir, wie oben schon angesprochen, auch in Zukunft Sorge tragen und verhindern, dass z. B. Machtinteressen von Einzelnen Entwicklungen hervorbringen, die uns zum Schluss alle prinzipiell treffen werden. Das gilt auch für den gläsernen Menschen.

Da sollten wir konsequent dagegen halten, so, wie das die EU aktuell zum Thema Datenschutz diskutiert, nicht zuletzt angesichts der abstoßenden Berichte über Totalkontrolle durch Geheimdienste und Regierungen, die in den letzten Jahren bekannt geworden sind.

16. Zur Zukunft der Arbeit

Die beschriebenen Erfolge werfen jetzt viele neue Fragen auf. Das FAW/n in Ulm ist in die Analyse dieser Fragen in Zusammenarbeit mit der OECD involviert. Eine zentrale Frage lautet: „Können wir die neuen Fähigkeiten von Computern, die im weitesten Sinn durch Big Data und Analytics weiter „aufgerüstet“ werden können und immer mehr ökonomische Bedeutung gewinnen, so nutzen, dass sie der Menschheit Vorteile bringen? Oder sind diese Entwicklungen letztlich eine Bedrohung für den Zusammenhalt unserer Gesellschaft?“

Anders ausgedrückt: Wir beobachten heute interessante Entwicklungen in Bezug auf Ziele und Regulierungsfragen des Marktgeschehens. In diesem Kontext stellen sich allerdings entscheidend bestimmte **Macht- und Verteilungsfragen**, etwa auch im Sinne der neueren Arbeiten von Piketty [20], der sich mit der Verteilung von Einkommen und Vermögen beschäftigt – ein wichtiges Forschungsfeld des Autors seit vielen Jahren [15, 16, 31, 32]. Wenige Prozent der Erdbevölkerung halten heute die gesamten Assets und sind damit auch Eigentümer fast aller leistungsfähigen maschinellen Systeme in der Wirtschaft. Sie teilen heute mit den Arbeitnehmern das Ergebnis der Nutzung dieser Systeme, und das Ganze funktioniert, weil ohne Arbeitnehmer die technischen Systeme nicht zum Einsatz gebracht werden können. Sollte das zukünftig anders aussehen, könnte sich die Situation der Zusammenballung von Geld und Macht mit starkem Zugriff an

der Spitze weiter verstärken. Es könnte sich so etwas wie eine **Welt-Zweiklassengesellschaft** herausbilden, in der ein Großteil der Menschen, auch in den OECD Staaten, sich eher in Richtung „Proletariat“ entwickelt. Möglicherweise könnte diese Situation mit technischen Kontrollmitteln des IT Sektors stabil gehalten werden. Da gehören natürlich insbesondere auch die Möglichkeiten der **totalen Informationskontrolle** dazu, die uns zunehmend Kopfzerbrechen bereiten. Hier gilt es wachsam zu sein. Mehr dazu folgt in Kapitel 16.

Das Gesagte betrifft die lebenspraktische Situation von Menschen und der Menschheit insoweit, als es um folgendes geht: Was tut die zunehmende technische Intelligenz für uns und den ökonomischen Prozess? Offenbar ist, dass die Maschinen immer mehr von dem tun, was im Sinne von Markt und Wirtschaft „Intelligenz“ bedeutet. Die „technische Intelligenz“ übernimmt immer mehr Wertschöpfungsfunktionen, die früher (nur) von uns Menschen übernommen wurden bzw. übernommen werden konnten. Diese erforderlichen Beiträge von Menschen waren und sind im ökonomischen System für Normalbürger bzw. deren Familien (nicht für Eigentümer oder Erben und deren Angehörigen) die Basis für ein eventuell auskömmliches Einkommen und für persönlichen Wohlstand.

Die OECD beschäftigt sich, wie oben erwähnt, jetzt auch mit der Frage, wie Big Data, Analytics und Technical Intelligence unsere Zukunft als Gesellschaft beeinflussen werden? Hier ist sofort an **zwei mögliche Effekte** zu denken. Der eine Effekt ist wünschenswert: die Maschinen sorgen dafür, dass wir weniger falsch machen. Wir produzieren zukünftig gleich das Richtige, das Richtige erreicht die richtigen Personen. Mit viel weniger Materialeinsatz schaffen wir deshalb viel mehr Befriedigung oder anders ausgedrückt, mit dem heutigen Materialeinsatz können wir viel mehr Menschen materiell befriedigen. Wir werden zudem so intelligente Maschinen haben, dass selbst Personen, deren Intelligenz und Ausbildung bescheiden ist, mit Hilfe der Maschinen irgendwo auf Augenhöhe mit allen anderen Menschen interagieren können. Dies ist eine gute Voraus-

setzung für eine bessere soziale Balance und damit „**Inclusiveness**“. Wir werden vielleicht sogar Maschinen entwickeln, die uns als Menschheit empfehlen können, was wir tun sollen, was richtig und falsch ist, denn als Menschheit tun wir uns ja damit offensichtlich schwer.

Das ist die eine Sicht der Dinge. Es gibt natürlich auch eine ganz andere, die sagt: Diese Maschinen werden uns jetzt die nächste Kategorie **interessanter Arbeitsplätze wegnehmen**. Nicht nur die Eliminierung von Jobs in der Landwirtschaft oder später in der Fabrik oder später im Büro. Nein, jetzt reden wir über **hochqualifizierte Experten**, die Texte übersetzen, Finanztitel handeln, Versicherungen abschließen (oder auch nicht), in Rechtskanzleien Dossiers vorarbeiten und die Urteile der Vergangenheit durchforsten, über Fachleute in der Medizin, die auf Basis medizinischer Bildverarbeitung Diagnosen und Therapieanschlagen für Krebspatienten vorbereiten etc. Es gibt interessanterweise eine Variante von WATSON an genau dieser Stelle, bei der man anstrebt, dass sie in zwei Jahren den schriftlichen Teil der Doktorprüfung in der Medizin ablegt: wir hätten dann erstmalig ein „**promoviertes**“ **Software-Programm**. An anderer Stelle arbeitet man an einem System, das in Deutschland einmal die **Kaufmannsgehilfen-Prüfung** bei der IHK ablegen soll. Des Weiteren sei bemerkt, dass es auch ein erstes Unternehmen gibt, in dem ein **Software-Programm offiziell Mitglied des Vorstands** ist und gemäß Geschäftsordnung dieselben Rechte hat wie die anderen Vorstände. Man muss überlegen, was das für die Zukunft der Arbeitsplätze bedeuten kann.

Ich werde mich dann einer letzten Frage widmen: Können wir etwas machen, damit unser kleiner „Kopfcomputer“ besser wird, vor allem in der Konkurrenz mit Maschinen, die immer besser werden. Das was wir heute bezüglich der Jobs erleben, nennen die Amerikaner ja, wie schon erwähnt, „**The race between education and technology**“. Wenn man die Jobsituation über die letzten 200 Jahre verfolgte, dann sehen wir eine Menschheit, die permanent innoviert und durch ihre Innovationen den Menschen in vielen Be-

reichen überflüssig macht. Der Mensch wird gleichzeitig immer weiter dahingehend so ausgebildet, dass er in der Nutzung der unglaublich mächtigen Maschinen, die wir bauen, in Kombination mit seinen Fähigkeiten einen noch viel größeren Mehrwert hervorbringt als früher. Dabei hilft, dass bisher ohne den Menschen unsere großartigen Maschinen, also z. B. Kräne oder Automobile, ökonomisch nicht zum Einsatz kommen können. Was nutzt uns ein Zug, was nutzt uns ein Flugzeug, was nutzt uns ein Braunkohlebagger, wenn Sie keinen Menschen haben, der damit etwas macht? Im Moment überlegen wir, ob wir die Zugführer doch automatisieren sollten, damit wir bei der Bahn nicht dauernd mit Streiks der Lokführer zu kämpfen haben. Aber lohnt sich das wirklich? Was wird passieren? Wir wissen es nicht. Potenziell werden wir keine Jobs mehr haben. Diesen Zustand gilt es gesellschaftlich zu gestalten, wie oben beschrieben.

Natürlich kann man auch hier wieder die Sache ganz anders sehen und sagen „wir sind ja als Menschen nicht auf der Welt, um zu arbeiten.“ Und das ist sicher richtig. Wenn wir endlich Maschinen bauen können, die alles das machen, was wir bisher machen müssen, dann ist das super. Dann müssen wir nicht mehr im Job arbeiten – bzw. wir müssen da viel weniger Stunden arbeiten als bisher und können anschließend, wenn wir das wollen, hier in der Nähe von Dresden mit einem kleinen Boot auf die Elbe gehen. Das ist in der Tat eine interessante Perspektive. Aber das setzt natürlich voraus, dass die Wertschöpfung, die dann fast ausschließlich von Maschinen generiert wird, nach vernünftigen Mechanismen zu den Menschen fließt, selbst wenn diese im ökonomischen System mit ihrer heutigen oder einer zukünftigen Kompetenz nur noch begrenzt gebraucht werden. Das ist dann letztlich eine Frage der **„Inclusiveness“ des ökonomischen Systems**. Haben wir die politische Kraft, um diese „Inclusiveness“ gegebenenfalls durchzusetzen, auch wenn Maschinen unseren Job machen?

Es werden natürlich absehbar viele andere Arbeitsplätze von den jetzt anstehenden Veränderungen **nicht** tangiert werden. Alles, was zusammenhängt mit der **rechtlichen Rolle**

eines Eigentümers, alles was zusammenhängt mit der **Wahrnehmung staatlicher Autorität** oder der **Rechtssprechung** ist im Moment dem Menschen immer noch allein gegeben. Das gilt z. B. auch für **komplizierte handwerkliche Tätigkeiten oder Servicetätigkeiten** in schwierigen dreidimensionalen Umgebungen, u. a. auch deshalb, weil die Entlohnung im Servicebereich (z. B. Bedienung in Gaststätten) relativ niedrig ist, während entsprechende Roboter teuer sind).

Aber das betrifft eben nur einen Teil der heutigen Arbeitsbereiche. Bei anderen Teilen, insbesondere auch bei analytischen Teilen, sieht es anders aus. Das schafft ein Unbehagen über die Zukunft. Die zunehmende Ausspähbarkeit des Menschen kommt hinzu. Das bedeutet, dass der Mensch, wie in Kapitel 14 beschrieben, zunehmend **gläsern** wird. Der auf Sekundenebene durch Informationssysteme „verfolgte“ und „getaktete“ Mensch muss sich dabei in seinem Tun selber in Richtung Maschine entwickeln.

17. Zukunftsgestaltung unter schwierigen Randbedingungen

Versucht man die weltweiten Herausforderungen in den Bereichen Globalisierung, Nachhaltigkeit, Zukunft unter Beachtung der Hinweise in diesem Text und mit Blick auf das Jahr 2050 einzuordnen, geht es insbesondere um die internationale Entwicklung in Bezug auf zwei große Problembereiche: (1) die **rasch wachsende Weltbevölkerung**, den zunehmenden Konflikt um Ressourcen und die Problematik immer größerer Umweltbelastungen, z. B. im Klimabereich, (2) die aktuelle weltweite kritische Situation, die u. a. aus einer **Weltfinanzkrise** resultiert, die wiederum eine Folge der Architektur des globalen ökonomischen Systems und vor allem des Weltfinanzsektors bildet [20, 31, 32, 37, 39]. Hier treffen sehr spezifische Interessen der verschiedenen Staaten sowie starke

wirtschaftliche Kräfte und andere politische und gesellschaftliche Interessen hart aufeinander.

Die Frage einer **nachhaltigen Entwicklung** wird durch die beschriebene Konfliktlage massiv erschwert. Das betrifft sowohl die ökologische Problematik als auch Fragen des sozialen Ausgleichs und der Gerechtigkeit und damit der weltethischen Orientierung, und zwar in einer intragenerationellen wie einer intergenerationellen Betrachtung. Als wesentlicher, zusätzlicher Faktor ist dabei die **weltkulturelle Thematik** mit zu berücksichtigen, dies wird in der aktuellen Auseinandersetzung der heutigen Status Quo Kräfte mit radikalen Teilen der **islamisch geprägten Welt** besonders deutlich.

Aus einer bestimmten systemtheoretischen Perspektive resultieren aus den aktuellen Trends für die Zukunft drei Attraktoren zukünftiger Entwicklung, nämlich **Kollaps, Welt-Zweiklassengesellschaft** und **Balance**, letzteres in Verbindung mit der Durchsetzung einer weltweiten **Ökosozialen Marktwirtschaft** (bzw. in angelsächsischer Terminologie eines „Green and Inclusive Capitalism“) als einem mit Nachhaltigkeit kompatiblen Ordnungsrahmen. Nur der letztgenannte Weg geht mit Nachhaltigkeit einher. Die aktuellen Entwicklungen auf G-20-Ebene, z. B. in Bezug auf eine sachgerechte **Besteuerung grenzüberschreitender Wertschöpfungsprozesse**, sind in diesem Kontext wichtig, ein **Global Marshall Plan** wäre ein möglicher weiterer Schritt in die erforderliche Richtung. Dabei ist zu beachten, dass der Umbau der heutigen weltweiten Verhältnisse mit Augenmaß erfolgen muss. Es ist dies eine „**Operation am offenen Herzen**“. Denn die „Musik muss spielen“, der Superorganismus Menschheit darf zu keinem Zeitpunkt aus dem Tritt geraten, sonst können mehr als 7 Milliarden Menschen nicht mehr mit **allem lebensnotwendigen versorgt werden**, vom Erhalt des heutigen Wohlstands in den OECD-Staaten schon gar nicht zu sprechen.

Die enormen Fortschritte im Bereich der Informations- und Kommunikationstechnik sowie auch der Aufbau entsprechender digitaler Wissensbestände mit uniformen Zugriffsstrukturen, sind wesentliche Antriebskräfte im Umfeld der beschriebenen Entwicklungen. Sie verändern, wie oben dargestellt, heute schon den Charakter der Arbeit, z. B. über zunehmende Digitalisierung und die Nutzung von Big Data. Die zunehmende Rolle technischer Intelligenz, die Rolle von Algorithmen und der Siegeszug der digitalen Maschine, insbesondere das **Internet der Dinge**, sind hier, wie dargestellt, prägend. Es ist abzusehen, dass sich diese Entwicklung in der Zukunft noch verstärken wird.

All das eröffnet neue Chancen für eine nachhaltige Entwicklung, bedroht aber zugleich nicht nur attraktive Arbeitsplätze, sondern auch die Sozialsysteme in den OECD-Staaten und die Möglichkeit einer aufholenden Industrialisierung und eines „**Leap-frogging**“ sich entwickelnder Länder. Die Frage, wie man international mit all diesen Herausforderungen umgehen soll, besitzt eine Schlüsselstellung für die Gestaltung der Zukunft. Gefordert ist insbesondere eine bessere **Global Governance** in Form einer weltweiten Ökosozialen Marktwirtschaft. Gelingt dies nicht, drohen eine Welt-Zweiklassengesellschaft oder ein ökologischer Kollaps.

Wir wollen hier zunächst die möglichen positiven Effekte von BIG DATA würdigen. BIG DATA und „Analytics“ eröffnen, wie dargestellt, viele attraktive Möglichkeiten, dass wir die **grüne Seite** des Wirtschaftens vernünftiger als bisher ausgestalten können. Im Prinzip können wir viel Wertschöpfung auf Maschinen verlagern und dort mit viel weniger Ressourcenverschwendung als bisher umsetzen, z. B. weil wir immer besser wissen, was Konsumenten wirklich wollen. Wenn wir ein **neues Energiesystem** finden, das preiswert, überall verfügbar und umwelt- und klimafreundlich ist, hätten wir wohl die Chance, die Voraussetzungen für eine Menschheit mit 10 Milliarden Menschen in Wohlstand zu schaffen.

Das ist eine wünschenswerte Perspektive. Wenn die Politik funktioniert, wenn die **Demokratie** weltweit im Interesse der großen Mehrheit der dann 10 Milliarden Menschen wirksam wird, könnte sich die **Besteuerung auf die maschinellen Wertschöpfungsprozesse verlagern**. Menschen müssten, um ihren Lebensunterhalt zu verdienen, sehr viel weniger von dem tun, was sie heute als Arbeit tun müssen. Sie würden dann Raum bekommen, andere Dinge zu tun, von denen unsere Gesellschaft schon immer wünscht, dass wir sie in größerem Maße tun können. Das heißt, dass es interessante Potentiale gibt, allerdings nur unter der Voraussetzung, dass die richtige Regulierung, die richtige **Global Governance** gelingt. Da sind aber viele Fragezeichen im Raum. Der Weg in die Zukunft ist alles andere als klar. Und es spricht mindestens so viel dafür, dass er nicht komfortabel sein wird, wie die Möglichkeit, dass wir uns in Richtung einer lebenswerten, mit Nachhaltigkeit kompatiblen Zukunft bewegen.

Es gibt aber auch eine weniger attraktive Alternative für die Zukunft. Wir leben heute in einer Welt mit einer Eigentümerstruktur, in der weniger als 10 % der Bevölkerung mehr als 50 % bzw. 60 % aller Eigentumsrechte gehören [1, 20]. Etwa die Hälfte davon gehört sogar nur 1 %, während **der ärmeren Hälfte der Weltbevölkerung im Wesentlichen nichts gehört**, wenn man noch die Schulden dagegen rechnet. Wenn diese Eigentümerstruktur in eine Maschine investiert, um Mitarbeiter zu ersetzen, dann erhöhen sich der Gewinn und das Vermögen dieser wenigen Personen weiter. Und indirekt das Vermögen ihrer Kinder, also dem Segment der Erben, denen gigantische Vermögen leistungslos zufließen [14]. Und sollten Maschinen so leistungsfähig und zugleich preiswert werden, dass sie gut und bestens ausgebildete Menschen zu hunderten von Millionen in ihren Jobs zu ersetzen erlauben und keine neuen Jobs nachfolgen, hätte das eine dramatische Umverteilung von den Vielen zu den Wenigen zur Folge – wenn die Politik das nicht korrigieren würde. Potenziell würden dann in Deutschland auf Seiten der Normalbevölkerung immer mehr Menschen in Hartz IV Strukturen wandern, egal wie fleißig sie waren oder sind, wie klug oder wie gut ausgebildet. Das **Narrativ der Leistungsgerech-**

tigkeit, an das kluge Köpfe sowieso noch nie geglaubt haben, würde sich dann völlig in ein Nichts auflösen.

Das wäre dann offenbar eine Zukunft, die „**Nicht-Inclusive**“ ist. Die Frage, die sich damit stellt, geht dahin, ob der Weg zu immer intelligenteren Systemen, z. B. zu **Automobilen, die selber fahren**, für die große Mehrheit der Menschen Sinn macht oder nicht. Das wird wohl ganz massiv davon abhängen, wie letztendlich die Governance der Menschheit sein wird, insbesondere im ökonomischen Bereich und bei Eigentumsfragen. Das alles kumuliert in der Frage nach einer „**Green and Inclusive Global Economy**“. Wird es diese geben oder eben nicht?

Wird es so kommen? Wir wissen es nicht. Die Chancen für einen guten Ausgang bestehen, aber sie sind aus Sicht des Autors begrenzt. Eine **weltweite Zweiklassengesellschaft** oder ein **ökologischer Kollaps** sind realistische Alternativen. Die Entwicklungen im Bereich IT, im Bereich Künstlicher Intelligenz und BIG DATA haben in diesem Ringen große Bedeutung. Es gilt klug zu operieren, wenn eine balancierte Welt und eine nachhaltige Entwicklung das Ziel sind. BIG DATA und die Möglichkeiten der Analytik sind dabei klug zu nutzen. Das Ergebnis könnte, wie dargestellt, viel weniger Verschwendung, eine viel passgenauere Produktion, im weitesten Sinne eine Annäherung an Nachhaltigkeit sein. Natürlich können wir potentiell ein auskömmliches Leben für immer mehr Menschen in weltweiter Perspektive mit deutlich weniger Arbeitszeit ermöglichen, wenn Maschinen immer mehr erforderliche Arbeiten erledigen. Wir können dann sogar mehr Menschen als heute in die Arbeitswelt integrieren (mit stark verkürzter Arbeitszeit), trotz immer intelligenterer Maschinen, d. h. immer mehr Menschen könnten immer stärker vom technischen Fortschritt profitieren. Diese technischen Entwicklungen könnten also, wenn sie richtig genutzt und vor Missbrauch geschützt werden, ein wesentlicher Schlüssel zu einer besseren Welt sein. Zu einer Welt in der wir die **Langsamkeit wieder entdecken**. Die Frage ist nur, ist das die Richtung, die wir einschlagen werden?

18. Eine weltweite Ökosoziale Marktwirtschaft bietet Chancen

Die bisherigen Überlegungen führen zu der Frage, wie man das weltökonomische System organisieren muss, damit das Ziel einer nachhaltigen Entwicklung durch das Aufkommen immer intelligenterer technischer Systeme gefördert, ermöglicht bzw. hervorgerufen wird?

Wie muss man die Weltökonomie organisieren, damit in 50 Jahren 10 Milliarden Menschen auf dieser Erde in Wohlstand und Frieden mit der Natur leben können? Wie kann man dieses System so organisieren, dass die Menschheit auf Dauer mit den vorhandenen Ressourcen auskommt und gleichzeitig eine Klimakatastrophe vermieden werden kann?

Bis zur Finanzkrise hatte sich der Marktfundamentalismus, wie oben dargestellt, als herrschende Ideologie des globalen ökonomischen Geschehens und damit als dominierendes Organisationsprinzip herausgebildet: „Lass den Finanzsektor nur machen!“. **Der Finanzmarkt ist das „Gehirn der Menschheit“**. Dort sitzt die wirtschaftliche Intelligenz. Auf diesem Finanzmarkt werden ständig tausende Milliarden Dollar bewegt. Diese Bewegungen werden getrieben von Eigentümerinteressen an Wertschöpfung bzw. Renditen. Die kollektive Intelligenz, die aus diesem Interaktionsprozess entsteht, ist der beste Wegweiser für das, was die Menschheit tun soll, zumindest, soweit es um die Organisation der Wirtschaft geht.

Die Regierungen sollen sich deshalb bitte aus all dem so weit wie nur möglich heraushalten. Die stören nur. Einzig der Schutz der öffentlichen Sphäre und des Eigentums und die Herstellung öffentlicher Ordnung und Sicherheit sind Sache der Regierung, den Rest machen die Finanzmärkte – ein Ort **kollektiver Intelligenz**.

Das marktfundamentalistische Narrativ der Finanzmärkte als Gehirn der Menschheit und das Lobeslied „freier“ Märkte hat nach dem Fall der Mauer unglaubliche Macht gewonnen. So wurde die Menschheit als Ganzes in ihren „Wertschöpfungsaktivitäten“ gesteuert. Erst mit der Finanzkrise in 2007/2008 ist diese „Story“, dieses **Narrativ**, (partiell) in sich zusammengebrochen. Sicher war das eine raffinierte „Story“, die von denen, die an der richtigen Stelle saßen, zu ihren Gunsten durchgesetzt wurde. Das waren vor allem Akteure, die einen asymmetrisch vorteilhaften Zugriff auf den Finanzmarkt hatten und wollten, dass wir alle glauben, der - öffentlich nicht strikt regulierte - Finanzmarkt sei die Lösung unserer Probleme. Die Sicht auf das Thema hat sich jetzt in Teilen glücklicherweise geändert.

Woran wird das deutlich? Die OECD, die Organisation der reichen Länder, hat, wie dargestellt, in der Folge der Finanzkrise ihre Position in diesen Fragen verändert, eine ganz wichtige Entwicklung. Die OECD tritt, wie oben dargestellt, heute für „**green and inclusive markets**“ und ein „**green and inclusive growth**“ ein, wie auch die UN, der IWF und die Weltbank. Es geht aus dieser Sicht um eine geeignete politische Regulierung der Märkte, um einerseits Umwelt- und Klimaschutz und andererseits soziale Balance und die **Überwindung der Armut** zu fördern. Offenbar sorgt das Finanzsystem dafür nicht von alleine. Interessanterweise hat sich auch eine Rothschild-Erbin mit dem Chef von Unilever zusammengetan als Sprachrohr einer Initiative, der sogenannten Jackson-Initiative, die für einen „**green and inclusive capitalism, compatible with sustainability**“ eintritt (**Fehler! Hyperlink-Referenz ungültig.**). In der Summe ist damit klar, wo wir hinmüssen: eine green and inclusive economy, eine weltweite Ökosoziale Marktwirtschaft. Einiges ist auf diesem Weg glücklicherweise schon gelungen [30], anderes ist noch zu tun. Die genaue Herausarbeitung der erforderlichen Global Governance im Sinne dieses Textes findet sich in [29].

Zusammenfassung

Wir erleben unglaubliche Dinge im Bereich Big Data und Künstliche Intelligenz. Sie folgen einem Schema, das wir jetzt seit Jahrzehnten beobachten: **Moore's Law**, also die Ver-tausendfachung der Leistungsfähigkeit und Effizienz im Bereich elementarer Rechenope-rationen alle 20 Jahre. Wenn wir auch noch nicht da sind, wo im Sinne einer **Singularität** die Maschinen so „intelligent“ werden wie die Menschen, werden die Maschinen doch zunehmend unglaublich gut. Wobei sie das zum Teil auf einem ganz anderen Wege tun, als wir als Menschen das tun. Das Internet der Dinge hilft, die Leistungsfähigkeit der Ma-schinen massiv zu steigern. BIG DATA und eine entsprechende Analytik tun dasselbe. Lassen wir diese Prozesse einfach weiterlaufen, können diese unsere Zivilisation an ganz vielen Stellen gefährden [12, 27]. Gelingt die „**Einhegung**“ **dieser Prozesse** im Sinne ei-ner vernünftigen politischen Global Governance, im Sinne einer weltweiten ökologisch-sozial vernünftig regulierten Marktwirtschaft, im Sinne einer green and inclusive market economy, dann könnte daraus viel Vernünftiges und für die Zukunft Gutes resultieren [1, 20, 26, 29, 31, 37, 39]. Irgendwann könnte dann auch der dauernde Zwang zu Innovation aufhören. Aber das ist alles andere als sicher, dass ist weit weg. Wir stehen vor großen Herausforderungen.

Danksagung

Im Zusammenhang mit der Erstellung des Textes gilt mein besonderer Dank den Herren Michael Gerth, Holger Hinkel, Gerd Elsner, Klaus Däßler sowie Prof. Gerfried Zeichen. Ihnen danke ich für ihre Unterstützung und zahlreiche Inputs.

Literatur

1. Atkinson, A.B.: Inequality: What Can Be Done?, Harvard University Press, 2015
2. Braitenberg V (1986) Künstliche Wesen – Verhalten Kybernetischer Vehikel, Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, Braunschweig/Wiesbaden
3. Braitenberg V (1986): Vehicles: Experiments in Synthetic Psychology, MIT Press,
4. Braitenberg V, Radermacher FJ (2007) Interdisciplinary approaches to a new understanding of cognition and consciousness, Ergebnisband Villa Vigoni Konferenz, Italien 1997, FAW/n Report
5. Brynjolfsson, E.; McAfee, A. (2012): Race Against the Machine: How the Digital Revolution is Accelerating Innovation, Driving Productivity and Irreversibly Transforming Employment and the Economy, Digital Frontier Press
6. Däßler K (2006) Wissen, Intelligenz und Muttersprache (www.mathint.com/grundlagen/muttersprache.pdf)
7. Däßler K (2008) Basiskategorien des Denkens, Teil IV des Zyklus "Wissen, Intelligenz und Muttersprache" (www.mathint.com/grundlagen/basiskat.pdf)
8. Eggers D (2013) The Circle, Hamish Hamilton. Imprint of Penguin Books
9. Gehirn & Geist (2004) Das Manifest – Elf führende Neurowissenschaftler über Gegenwart und Zukunft der Hirnforschung, Ausgabe 6
10. Gödel K (1931) Über formal unentscheidbare Sätze der Principia Mathematica und verwandter Systeme I. In: Monatshefte für Mathematik und Physik, 38, 1931, S. 173–198, doi:10.1007/BF01700692, Zentralblatt MATH
11. Goldin C, Katz LF (2010) The Race between Education and Technology. Belknap Press
12. Hawking S (2014) Physiker warnt vor künstlicher Intelligenz, Artikel Handelsblatt, <http://www.handelsblatt.com/technik/forschung-innovation/stephen-hawking-physiker-warnt-vor-kuenstlicher-intelligenz/11067072.html>
13. Hermes H (1961) Aufzählbarkeit, Entscheidbarkeit, Berechenbarkeit, Springer Verlag
14. Jenner G (2015) Das Ökonomische Manifest – Fünf Fundamentalreformen, um den Niedergang von Wirtschaft und Demokratie aufzuhalten, MV-Wissenschaft im Verlagshaus Monsenstein und Vannerdat OHK Münster

15. Kämpke T, Pestel R, Radermacher FJ (2003) A computational concept for normative equity. *European Journal of Law and Economics*, No. 15, Vol. 2, 129-163
16. Kämpke Th, Radermacher FJ (2015) *Income Modeling and Balancing – A rigorous Treatment of Distribution Patterns*, Springer Verlag
17. Kahneman D, Tversky A. (Hrsg.) (2000) *Choices, Values, and Frames*. Cambridge University Press
18. Keeney RL, Raiffa H (1976) *Decisions with Multiple Objectives*. John Wiley, New York
19. *Newsweek* (2015) The End – Could artificial intelligence kill us off?, Ausgabe vom 3. Juli
20. Piketty Th (2014) *Das Kapital im 21. Jahrhundert*. C. H. Beck Verlag
21. *Psychologie Heute* (2014) Memorandum „Reflexive Neurowissenschaft“, Ausgabe 05
22. Radermacher FJ (1996) Cognition in Systems. *Cybernetics and Systems* 27. No. 1, 1-41
23. Radermacher FJ (2000) Wissensmanagement in Superorganismen. In: *Unterwegs zur Wissensgesellschaft* (Christoph Hubig, ed.), S. 63-81, Edition Sigma, Berlin
24. Radermacher FJ (2007) Bewusstsein, Ressourcenknappheit, Sprache: Überlegungen zur Evolution einiger leistungsfähiger Systeme in Superorganismen, FAW/n-Bericht
25. Radermacher FJ (2011) Wir sind die Summe unserer Entscheidungen, Vorwort in *Hosp I*, Schüz A, Braitenberg Z: *Tentakel des Geistes – Begegnungen mit Valentin Braitenberg*, Edition Raetia/Arunda
26. Radermacher FJ (2013) Globalisierung und Gerechtigkeit, erschienen in: *Verantwortung und Gerechtigkeit im Zeitalter der Globalisierung*, Georg Olms Verlag AG, Hildesheim
27. Radermacher FJ (2014) Chancen und Risiken durch Robotik. Erschienen in: *Computerwoche*, Ausgabe 38-29
28. Radermacher FJ (2015) Algorithmen, maschinelle Intelligenz, BIG DATA: Einige Grundsatzüberlegungen“, veröffentlicht im Scherpunktheft „Big Data contra große Datensammlung. Chancen und Risiken für die Gesundheitsforschung“ des Bundesgesundheitsblattes
29. Radermacher FJ (2015) A better governance for a better future – A green and inclusive global economy – the key for a sustainable future, long version of the shorter article to be published *Journal of Future Studies*, special issue on “Explor-

ing paths to a viable future: obstacles and opportunities, requirements and strategies”

30. Radermacher FJ (2015) “.....und sie verändert sich doch”, erscheint in Ausgabe 2/15 der Zeitschrift „Senate“ des Senats der Wirtschaft e. V.
31. Radermacher FJ, Beyers B (2011) Welt mit Zukunft – Die Ökosoziale Perspektive. Murmann Verlag
32. Radermacher FJ, Riegler J, Weiger H (2011) Ökosoziale Marktwirtschaft – Historie, Programm und Perspektive eines zukunftsfähigen globalen Wirtschaftssystems. oekom Verlag
33. Robertson N, Sanders D, Seymour P, Thomas R (1997) The Four-Colour-Theorem, Journal Combinatorial Theory, Series B 70, 2 – 44
34. Schirmacher F (2013) EGO - Das Spiel des Lebens. Karl Blessing Verlag München, 3. Auflage
35. Siegelmann H, Sontag E (1991) On the computational power of neural nets. Report SYCON-91-11, Rutgers Center for Systems and Control
36. Sobel D (2003) Längengrad, Bvt. Berliner Taschenbuch Verlag
37. Solte D (2015) Wann haben wir genug? Europas Ideale im Fadenkreuz elitärer Macht, Goldegg Verlag
38. The Coq Development Team, The Coq reference manual, version 7.3.1, system and documentation available from <ftp://ftp.inria.fr/INRIA/coq/V.7.3.1>.
39. Zucman G (2014) Steueroasen – Wo der Wohlstand der Nationen versteckt wird. Suhrkamp Verlag