

Peter Brödner

# **Die dritte Welle der »automatischen Fabrik« – Mythos und Realität semiotischer Maschinen**

## **1 Einführung: Wellen technologischen Überschwangs**

Derzeit erleben wir mit den allgegenwärtigen Proklamationen einer »vierten industriellen Revolution« – rhetorisch modernisiert als »Industrie 4.0« – eine neue Welle technologischen Überschwangs. Abermals wird fortgeschrittene Computertechnik, diesmal in Gestalt »Cyber-physischer« und »Multi-Agentensysteme«, als Allheilmittel für alle möglichen gesellschaftlichen Gebrechen angekündigt, von geringer Ressourcen-Effizienz bis zu demographischen Unausgewogenheiten. Kaum ein Problem erscheint zu groß und schwierig, als dass es nicht mittels »Digitalisierung« bewältigt werden könnte. Vor dem Hintergrund wissensintensiver Wertschöpfung, anhaltend schwachen Wachstums und nachlassender Produktivitätsfortschritte in den fortgeschrittensten Gesellschaften hat das Davoser Weltwirtschaftsforum bereits früh in einem Bericht angemahnt, mit Mitteln der »digitalen Transformation« höhere Wettbewerbsfähigkeit in Produktion und Dienstleistung durch bessere Steuerung, höhere Flexibilität und gesteigerte Leistung der weltumspannenden Wertschöpfungsketten zu erreichen – gewissermaßen die Urschrift der Bewegung (WEF 2012).

Im Einklang mit diesen verbreiteten Grundideen haben verschiedene hoch entwickelte Industrieländer mehr oder weniger wirksame Maßnahmen zu deren Umsetzung ergriffen. Vor allem in Deutschland mit seiner starken Industriebasis wurde mit dem BMFT-Rahmenprogramm »Innovationen für die Produktion, Dienstleistung und Arbeit von morgen« ein zentraler Teil der »High-Tech«-Strategie der Bundesregierung zum Erhalt von Wettbewerbsfähigkeit und Wohlstand etabliert. Es setzt ebenfalls auf die Entwicklung weltweit vernetzter, sog. »Cyber-physischer Systems« (CPS). Dabei werden »intelligente« Maschinen, Werkstücke, Lagersysteme und Betriebsmittel als Kernkomponenten von Produktions- und Logistikprozessen ins Auge gefasst, die mittels fortgeschrittener Computertechnik befähigt werden sollen, als »Multi-Agentensysteme« (MAS) in »dezentraler Selbstorganisation« selbsttätig Daten auszutauschen, gegenseitig Aktionen auszulösen und so eine weitgehend flexibel automatisierte »Smart Factory« zu realisieren. Verhießt wird, neue Formen von Wertschöpfungsprozessen unter Berücksichtigung individueller Kundenwünsche anpassungsfähig und dynamisch zu gestalten, so insbesondere Einzelstücke rentabel herstellen, flexibel auf Störungen und Ausfälle reagieren, durchgängig Transparenz gewährleisten und optimale Entscheidungen ermöglichen zu können (BMBF 2014, Forschungsunion & acatec 2013).

Mit deutlich erweitertem Blickwinkel begründen etwa auch Brynjolfsson und McAfee (2014) das Heraufziehen eines »neuen Maschinenzeitalters« mit der außerordentlichen exponentiellen Steigerung von Leistungen der »Digitaltechnik« (Computer und

Netzwerke; laut »Moore'schem Gesetz«). Dadurch würden schnelle Fortschritte bei der Realisierung »künstlicher Intelligenz« und der Verarbeitung sehr großer Datenbestände im Zuge rasch expandierender »Digitalisierung« von Wertschöpfung ermöglicht, zudem beschleunigt durch die Möglichkeit unbegrenzter (Re-)Kombination von Ideen zur Innovation. Sie exemplifizieren das etwa an den Fällen des selbstfahrenden Autos von Google oder der Wissensverarbeitung durch IBM Watson. Allerdings zeigen sie auch Gefahren der Monopolisierung globaler digitaler Wertschöpfung durch Netzwerkeffekte und sehr geringe Grenzkosten (sog. »Alles-oder-nichts-Märkte«), verweisen auf starke Tendenzen zur Polarisierung von Qualifikation und Einkommen und diskutieren Möglichkeiten steuernder Eingriffe in die künftige Entwicklung.

Das ruft Erinnerungen an frühere technische Utopien wach, mittels Computertechnik den wiederkehrenden Traum von der automatischen Fabrik, von ewiger selbsttätiger Wertschöpfung zu verwirklichen und so vom Eigensinn lebendiger Arbeit unabhängig zu werden. Bereits 1950 hatte Norbert Wiener (1950) sehr genaue Vorstellungen davon, wie mittels »Sinnesorganen« und »Effektoren« sowie der »Rechenmaschine« als »zentralem logischen Gehirn« für »komplizierte Unterscheidungsprozesse« eine »automatische Fabrik« zu realisieren sei. Und in den 1980er Jahren wurden unter dem Leitstern der »mensenleeren Fabrik« erneut gigantische F&E-Anstrengungen unternommen, um in Gestalt »wissensbasierter« (d.h. mit symbolischer »künstlicher Intelligenz« ausgestatteter), »computer-integrierter Produktion« (CIM) eine flexibel automatisierte auftragsgebundene Fertigung zu verwirklichen (Cyranek & Ulich 1993, Hunt 1989). Diese sich mit einer Länge von rd. 30 Jahren auftürmenden Wellen technologischen Überschwangs brachen sich indes jedesmal an den Klippen widerspenstiger Materie und verkannter Realisierungsprobleme mit der Folge langer Phasen tiefer Ernüchterung. Ironischerweise wurde dabei regelmäßig der hohe Wert impliziten Wissens, von Intuition, Kreativität und Handlungskompetenz menschlichen Könnens oder Arbeitsvermögens wiederentdeckt.

Um vor diesem Hintergrund Ähnlichkeiten und Unterschiede zu den neuen, doch sehr weit reichenden Verheißungen von »Industrie 4.0« realistisch einschätzen zu können, will der Beitrag zunächst deren wissenschaftlich-technische Grundlagen näher kennzeichnen und das eigentlich Neue im Vergleich zu früheren Ansätzen genauer bestimmen. Darauf fussend wird dann eine kritische Bewertung von Entwicklungs- und Gefahrenpotentialen vorgenommen, um abschließend Gestaltungsperspektiven einer zukunftsfähigen Entwicklung zu skizzieren.

## **2 Computermythen: Wiederkehrende Verheißungen und Illusionen**

### *2.1 Der Blick zurück*

Im Rückblick auf die Entwicklung der Computertechnik lassen sich mit Blick auf deren Verwendung in der Produktion drei große Wellen technologischen Überschwangs mit einer Wellenlänge von etwa 30 Jahren ausmachen. In der ersten großen Welle, während der 1950er Jahre, wurden Großrechner als »Elektronengehirne« betrachtet und gestützt auf Verfahren des Operations Research als zentrale Steuerungs- und Entscheidungseinheiten einer »automatischen Fabrik« ins Auge gefasst (Wiener 1966 (1950): 167f):

»Die Rechenmaschine stellt das Zentrum der automatischen Fabrik dar. Auf der einen Seite empfängt sie ihre ins einzelne gehenden Anweisungen von Elementen, die Sinnesorganen entsprechen. [...]

Neben diesen Sinnesorganen muß das Regelungssystem Effektoren oder Stellglieder enthalten, die auf die Außenwelt einwirken. [...]

So kann die Maschine Regelungshandlungen ausführen, sowohl solche der einfachen Art (mit einfachen Rückkopplungsschleifen), als auch solche mit komplizierten Unterscheidungsprozessen, die von der zentralen Regelung mit ihrem logischen ... ›Gehirn‹ ausgeführt werden. [...]

Das Gesamtsystem kommt einem vollständigen Lebewesen mit Sinnesorganen, Effektoren und Propriozeptoren gleich und entspricht nicht ... einem isolierten Gehirn, das für seine Erfahrung und für seine Wirksamkeit von unserem Eingreifen abhängt.«

Trotz der scheinbaren Überzeugungskraft der Wienerschen Vision der »automatischen Fabrik« drangen Computer in der Folge tatsächlich nur in sehr geringem Umfang in Produktionsprozesse ein. Zwar gab es den einen oder anderen vergleichsweise bescheidenen Einsatzfall numerisch gesteuerter Werkzeugmaschinen, in der Materialwirtschaft und Kostenrechnung oder in der Zeichnungserstellung – alles Einsatzgebiete mit hochgradig standardisierten Operationen und Abläufen –, gleichwohl nahm deren Einsatz erst Mitte der 1970er Jahre allmählich Fahrt auf. Hintergrund war, dass der zuvor eng begrenzte Zugang zu Großrechnern mit der Betriebssystem-Konzeption der »virtuellen Maschine« (u.a. IBM 360/370) über lokal verfügbare Terminals erheblich erleichtert wurde. Allerdings wurden Computer dabei – weit entfernt von automatischer Produktion – vor allem interaktiv für Planungs- und Berechnungsaufgaben genutzt, so die Leistung von Computerfunktionen mit dem Können menschlicher Experten verbindend.

Zwischenzeitlich, im Übergang zu einer wissensbasierten Wirtschaft (Bell 1975, Drucker 1994), entfaltete sich der Taylorismus mit seiner Trennung von Planung und Ausführung zu voller Blüte. Es entstanden auf allen Feldern der Produktion riesige Sammlungen expliziten, propositionalen oder kodifizierten Wissens *über* Produktionsprozesse. Das ermöglichte immer vielfältigere Formen des Computereinsatzes in Entwicklung und Konstruktion, in Produktionsplanung und -steuerung, in Fertigung und Qualitätssicherung sowie in Kostenrechnung und Personalwirtschaft, allerdings mit jeweils weitgehend isoliert arbeitenden Programmen, die jedoch häufig gleiche Daten verwendeten. Das legte, um deren ständige fehleranfällige Wiedereingabe zu vermeiden, den Gedanken nahe, die vielen isolierten Programmmodule mittels einer gemeinsam genutzten Datenbank zu einem einheitlichen System »computer-integrierter Produktion« (CIM) zusammenzuführen. Zugleich änderten sich aber auch die Marktkräfte und Wettbewerb änderte seinen Charakter von der Massenproduktion zu diversifizierter, flexibler Qualitätsproduktion. Vor diesem Hintergrund wurde, eingedenk der riesigen Bestände verfügbaren expliziten Produktionswissens, der Integrationsgedanke zudem mit großen Anstrengungen zur Verwirklichung »symbolischer künstlicher Intelligenz« verbunden, um dieses Wissen für die automatische Bewältigung der Komplexität und Dynamik sich ständig ändernder, hoch flexibler Betriebsabläufe zu nutzen (Brödner 1990, Cyranek & Ulich 1993, Hunt 1989). Kerngedanke war, menschliche Experten in Konstruktion, Planung und Fertigung weitgehend durch »wissensbasierte Systeme« zu ersetzen. »Experten gehen, Expertensysteme bleiben« war damals ein verbreiteter Slogan. So wurden in den 1980er Jahren, 30 Jahre nach Wieners Vision, »wissensbasierte« und »Expertensysteme« in

der »computer-integrierten Produktion« als Leitideen und Kernbestandteile einer »menschleeren Fabrik« angepriesen. Eine gewichtige Stimme liest sich so (Spur 1984):

»Die Rechnerintegration stellt den Kern der zukünftigen Produktionserneuerung dar. Sie verfolgt das Ziel einer automatischen Fertigung von variablen Produktprogrammen. [...] Es entsteht eine neue Produktionsstruktur, die ... als maschineller Organismus mit programmierter und damit gespeicherter Intelligenz zu automatischer Gütererzeugung fähig ist. [...] In dieser höheren Entwicklungsstufe wird die Fabrik Maschinenintelligenz benötigen.«

In ihrer technozentrisch verengten Perspektive wurden auch bei dieser Welle des Überschwangs wesentliche Voraussetzungen erfolgreicher Produktion hoher Leistung unter den neuen Marktverhältnissen und Bedingungen der Wissensökonomie sträflich ignoriert. Insbesondere wurde die wachsende Bedeutung von Handlungskompetenz und Erfahrungswissen bei wissensintensiver Wertschöpfung wie auch effektiver sozialer Interaktion bei kooperativer wissenssteiliger Arbeit ausgeblendet.

Je komplexer sich explizites Wissen – und darauf fussende technische Artefakte – gestalten, desto wichtiger wird ein klares Verständnis der fundamentalen Unterschiede zwischen implizitem, praktischem Können als Inbegriff lebendigen Arbeitsvermögens und explizitem begrifflichen Wissen und wie diese dynamisch zusammenwirken (vgl. zu dieser Unterscheidung etwa Nonaka 1996, Polanyi 1985, Ryle 1987). Während die individuell verkörperte Handlungskompetenz als prä-reflexives implizites Wissen stets vorgängig ist und sich in Tätigkeiten gelingender sozialer Praxis äußert, kann explizites propositionales Wissen *über* bestimmte Aspekte dieser Praxis nur durch Beobachtung, Begriffsbildung und darauf beruhender Analyse gewonnen werden. Dieses für sich noch wirkungslose Wissen – und daraus erwachsende Artefakte – muss erst noch zur Wirkung gebracht werden durch aufwendige Aneignung für deren praktische Verwendung. Sowohl die Explikation begrifflichen Wissens als auch dessen Aneignung für praktisch wirksamen Gebrauch sind beides hohes Können erfordernde Leistungen des lebendigen Arbeitsvermögens, dessen Fähigkeiten sich eben dadurch erweitern (wie auch ungenutzte Fähigkeiten verkümmern; Brödner 2010). Ironischerweise wurden diese Zusammenhänge in besonderem Maße, entgegen verbreiteten Erwartungen, ausgerechnet durch die Schwierigkeiten offenbart, Expertenwissen für CIM zu explizieren.

Folglich strandete auch diese Welle wie schon die erste an den Klippen widerspenstiger Realität. Tatsächlich verkehrten sich am Ende die Bemühungen um wissensbasierte computer-integrierte Produktion in ihr Gegenteil. Konfrontiert mit Beispielen tatsächlicher Hochleistungs-Produktionssysteme wurde schnell deutlich, dass diese entgegen landläufiger Annahmen ihre hohe Produktivität nicht in erster Linie dem Einsatz fortgeschrittener Computertechnik, sondern vor allem geschickter Kooperation menschlicher Experten in multi-funktionalen Teams wie z.B. Gruppenarbeit in Fertigungszellen oder integrierten Konstruktionsteams verdanken (Brödner 2010). Genau dies konnte bereits aus der theoretischen Einsicht in die Dynamik der stets partiellen Explikation von Können als begrifflichem Wissen und dessen Aneignung für praktisches Problemlösen erschlossen werden. Letzteres erfordert typischerweise Expertise aus ganz unterschiedlichen Bereichen, die nur durch die selbstorganisierte Kooperation der individuellen Träger dieser Expertisen produktiv zusammengeführt werden kann; das erfordert deren Autonomie und kann nicht verordnet werden.

## 2.2 Die dritte Welle

Ungeachtet dieser doch eher ernüchternden Erfahrungen erleben wir nun, nochmals etwa 30 Jahre später, erneut große, wiederum rein technik-zentrierte Anstrengungen zur Realisierung »smarter Fabriken« auf der Basis »intelligenter« Multi-Agentensysteme bzw. »Cyber-physischer Systeme« (oft auch als »Internet der Dinge« apostrophiert). Dabei soll mit den plakativen Bezeichnungen »Industrie 4.0« oder »Second Machine Age« abermals ein qualitativer Sprung suggeriert werden. Zum Vergleich mit früheren Versuchen ist ein kurzer Blick auf die technisch-wissenschaftlichen Grundlagen nötig:

- *Eingebettete Systeme* sind Computer-Komponenten zur digitalen Steuerung physischer Prozesse, die mit Schnittstellen zum Menschen und anderen Systemen ausgestattet sind. Sie sollen über Datenaustausch durch das Internet hochgradig horizontal und vertikal zu »Cyber-physischen Systemen« (CPS) vernetzt werden.
- *Multiagentensysteme (MAS, auch: »Distributed Artificial Intelligence«)* bestehen aus begrenzt autonomen Software-Agenten, die mittels Datenaustausch zielorientiert miteinander interagieren; durch derart koordinierte Aktionen sollen sie anspruchsvolle Aufgaben selbsttätig bewältigen können.

Agenten sind softwaretechnische Objekte, die Daten aus der Umgebung und von anderen Agenten aufnehmen, proaktiv nach eigenen Algorithmen, zumeist mittels maschineller Lernverfahren, verarbeiten und resultierende Daten wieder nach außen abgeben können. Ihr Verhalten ist gekennzeichnet durch selbsttätige Zielverfolgung und die Fähigkeit zur Anpassung an veränderliche Bedingungen durch »maschinelles Lernen« (Breadshaw 1997, Maes 1994). Zwecks Bewältigung komplexer Aufgaben können solche begrenzt autonomen Software-Agenten miteinander interagieren, um derartige Aufgaben durch koordinierte Aktionen gemeinsam zu erledigen (Wooldridge 2002). Das außerordentliche Interesse an MAS beruht auf der Vorstellung, aus dem Zusammenwirken vieler Einheiten mit relativ einfachem Verhalten könne »künstliche Intelligenz« hervorgehen (Minsky 1988). Sie gründet sich letztlich auf die explizit artikulierte Überzeugung, dass »Interaktion mächtiger als Algorithmen« sei (Wegner 1997). Letzteres wurde freilich postwendend als Trugschluss widerlegt (auch MAS unterliegen der Beschränkung auf berechenbare Funktionen; Prasse & Rittgen 1998). Tatsächlich weist aber das Verhalten von MAS emergente Eigenschaften auf, die an den einzelnen darin zusammenwirkenden Software-Agenten für sich nicht zu beobachten sind.

Auch wenn einzelne im Systemverbund interagierende Agenten relativ einfache Algorithmen ausführen und gut durchschaubares Verhalten aufweisen, ist dem MAS insgesamt zwar ein vollständig determiniertes, aber hoch komplexes und analytisch von außen nicht mehr bestimmbares Verhalten eigen. Formal lassen sich MAS als sog. »nicht-triviale Maschinen« (Foerster 1993) beschreiben, deren Ausgabedaten nicht nur von den Eingabedaten, sondern gemäß einer Zustandsfunktion auch von veränderlichen inneren Zuständen abhängen, die auf vielfältige Weise die Interaktion der Agenten und deren Lernverhalten zum Ausdruck bringen (vgl. Abb. 1). Folglich ist das Verhalten von MAS in hohem Maße von der jeweiligen Vorgeschichte abhängig, von außen analytisch nicht mehr bestimmbar und mithin auch nicht vorhersehbar.

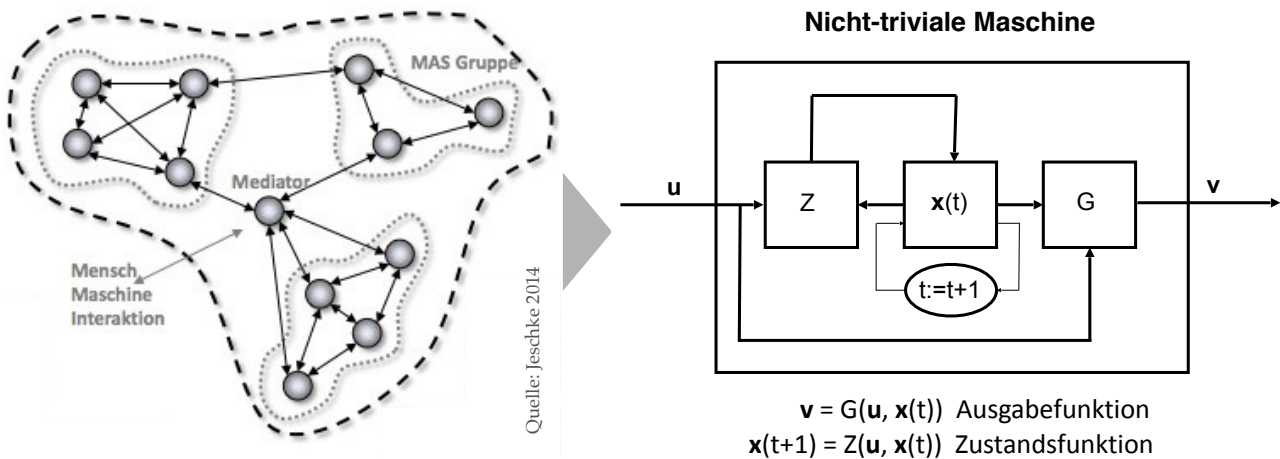


Abb. 1: MAS als nicht-triviale Maschine

Wo Computer anspruchsvolle Aufgaben selbsttätig und zielorientiert zu bewältigen oder ihr Verhalten an wechselnde Umgebungsbedingungen anzupassen haben, erweist sich die Starrheit algorithmisch gesteuerten Verhaltens als inhärenter Nachteil. Er lässt sich nur in Interaktion mit lebendiger Arbeit oder durch eigene Adaptivität mittels Verfahren »maschinellen Lernens« überwinden. Letztere umfassen ein breites Spektrum von Methoden und ihrerseits algorithmischen Verfahren zur gezielten Veränderung der Struktur und Parameter bzw. der Programme von Computern dergestalt, dass sich deren Verhalten gemessen an einer zuvor festgelegten Nutzenfunktion verbessert.

Durch aufsehenerregende Leistungen haben in jüngster Zeit sog. »künstliche neuronale Netze« (KNN) und Verfahren des »Deep Learning« (Wick 2017) große Aufmerksamkeit gefunden. Von Beginn an mit der Computertechnik eng verbunden, erfahren sie derzeit, nach dem von Vertretern der »symbolischen KI« ausgesprochenen Verdikt und einer gewissen Wiederbelebung in den 1990er Jahren (Brödner 1997: 206ff), eine abermalige Renaissance. Diese verdankt sich vor allem exponentiell gesteigerter Rechenleistung, die komplexere Netzwerk-Strukturen und deutlich beschleunigte Lernverfahren ermöglicht.

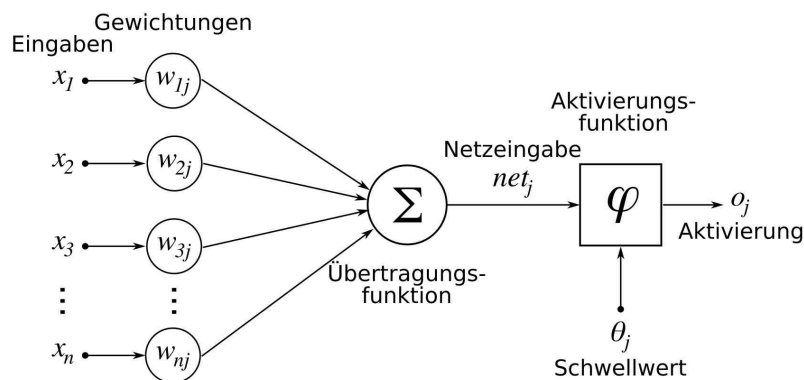


Bild 2: Berechnungsfunktionen eines Netzknotens (Quelle: Wikipedia CC BY-SA 3.0)

Für ihre Aufgaben müssen KNN passend strukturiert und die Gewichtungen der in ihre als »Neuronen« fungierenden Prozessoren eingehenden Signale einem bestimmten Lernalgorithmus unterworfen werden. Dabei berechnet jeder Prozessor (Netzknoten)  $j$  die in Bild 2 dargestellten Funktionen und liefert ein Aktivierungssignal, falls die Summe der gewichteten Eingabesignale einen Schwellwert  $\theta_j$  überschreitet. Das Netz als Ganzes wird über diese Festlegungen und Lerninstruktionen hinaus nicht programmiert, sondern an einer großen Vielzahl von Beispielen trainiert (zur Einführung in KNN vgl. Kriesel o.J.).

So werden etwa bei Problemen der Musteridentifikation oder der (Bild-)Klassifikation – ein Aufgabentyp, bei dem KNN besonders leistungsfähig sind – einer langen Reihe von eingegebenen Mustern (Bildern) jeweils die zugehörigen Klassen als Ausgänge zugeordnet; aus diesen Zuordnungen vermag dann das Netz automatisch in zahlreichen kleinen Anpassungsschritten angemessene Gewichtungen  $w_{ij}$  zu bestimmen (die implizit den Lernerfolg widerspiegeln). Dabei werden je Zwischenschicht von Prozessoren bzw. »Neuronen« spezifische Filter wirksam, die sukzessive kennzeichnende Merkmale aus den Bildern extrahieren können. Am Ende wird in der Ausgabeschicht jeweils genau ein Prozessor aktiviert, der jeweils der errechneten Kategorie entspricht (im Beispiel etwa ein Auto oder eine Gesicht; vgl. Bild 3).

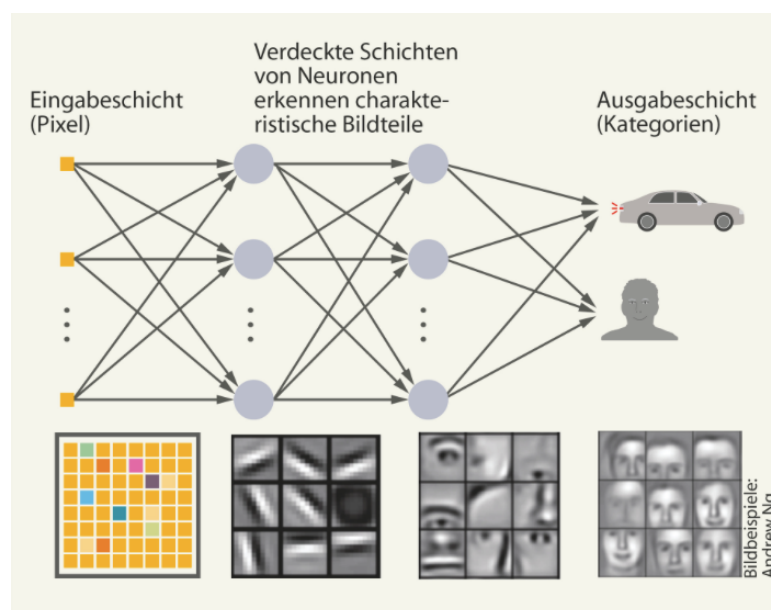


Bild 3: Kategorisierung von Bildern (Quelle: c't 6/2016)

Dementsprechend verdanken sich Erfolge mit dem Einsatz von KNN nicht tieferer Einsicht in Zusammenhänge von Ursache und Wirkung, sondern einem weitgehend theorieleeren Probieren durch Versuch und Irrtum mit unterschiedlichen Netzwerk-Strukturen und Lernverfahren zur Anpassung der Gewichte. So sind derzeit wegen ihrer besonderen Leistungsfähigkeit bei Bild- und Spracherkennungsaufgaben vor allem sog. »faltende« KNN (»Convolutional Neural Networks«) ins Zentrum des Interesses gerückt, die sich strukturell an biologische Vorbilder anlehnen. Während konzeptionell kaum Fortschritte zu verzeichnen sind, beruhen eingetretene Erfolge neben der gesteigerten Rechenleistung ironischerweise vor allem auf der Intuition, der Erfahrung und dem

Geschick der Entwickler bei der Strukturierung der KNN und der Bewältigung der zahlreichen praktischen Berechnungsprobleme – vom »schwindenden Gradienten« bis zur variablen Schrittweitensteuerung bei den Lernverfahren (Schmidhuber 2015, Wick 2017).

Beim Gebrauch dieser Systeme im praktischen Einsatz haben die Nutzer zudem mit der Ungewissheit zu kämpfen, ob die errechneten Ergebnisse auf Dauer angemessen und korrekt sind. Auch wenn sie in der großen Mehrzahl der Fälle gute Ergebnisse liefern, können sie plötzlich versagen, ohne dass das einfach erkennbar wäre. Zudem können schon kleine Störungen in den Eingabebildern zu beträchtlichen Fehlleistungen führen (Sharif et al. 2016). Mangels Durchschaubarkeit des nicht-linearen Verhaltens von KNN ist deren Zuverlässigkeit generell schwer zu beurteilen; im Grunde müssen sich die Nutzer daher blindlings auf die angemessene Funktionsweise verlassen.

Trotz dieser technikhärenten Schwierigkeiten werden die präsentierten Konzepte umstandslos propagiert, die Verheißungen von Industrie 4.0 zu verwirklichen. Das soll abschließend eine typische Stimme unter vielen (die eines Vorstandsmitglieds eines Autokonzerns) verdeutlichen:

»Superschlaue Computer, die ständig lernen, werden vieles übernehmen, was bisher Menschen erledigen: Sie antworten, wenn Kunden oder Lieferanten fragen, automatisch mit Hilfe von sogenannten Bots. Sie entscheiden selbständig, wie für mehr als 200 Modelle die Preise von Land zu Land angepasst [werden], sie entwerfen sogar Autos und rechnen aus, wie sich die Entwürfe in der Fabrik umsetzen lassen« (SZ vom 11.11.2016).

### **3 Erdung: Zurück auf dem Boden von Tatsachen**

Unverkennbar zieht sich ein roter Faden kontrafaktischen Wunschdenkens durch diese überzogenen Visionen. Von Beginn an wurzelten damit verbundene Übertreibungen und Illusionen auf unpassenden Metaphern wie etwa »Elektronengehirn«, »künstliche Intelligenz«, »Expertensysteme« oder »maschinelles Lernen«. Mit ihren Analogiebildung zu spezifisch menschlichen Fähigkeiten werden gerade die fundamentalen Unterschiede zwischen zweckgemäß hergestellten Maschinen und lebenden, autonom handelnden und zu sprachlicher Interaktion fähigen Menschen verschleiert, zudem Selbsttäuschungen über die wahre Natur von Computersystemen wie auch sozialer Interaktion hervorgerufen. Das Verhalten von Computern ist, wie die theoretische Informatik lehrt, strikt gebunden an die Ausführung berechenbarer Funktionen mittels Algorithmen; es ähnelt daher weder der Arbeitsweise eines Gehirns als Teil eines komplexen und empfindsamen lebendigen Körpers noch ist es in irgendeinem bedeutungsvollen Sinn »wissend« oder »intelligent«. Diese Prädikate bleiben den Experten, die die Algorithmen entwerfen, oder den Nutzern, die mit den Computerfunktionen etwas Sinnvolles anstellen, vorbehalten. Derart begriffliche Fehlleistungen gilt es aufzudecken, wenn trotz widriger Erfahrungen immer wieder neue Anläufe zur »smarten Fabrik« unternommen werden.

Nach Hofstadter und Sander (2013) machen Analogien den Kern von Erkenntnis aus. Analogien erlauben, neue Phänomene mittels schon vorhandener Erfahrungen zu verstehen. Sie sind Instrumente, mit deren Hilfe wir den Reichtum unserer früheren Erfahrungen auf gegenwärtige anwenden, ohne die wir hilflos in der Welt umherirrten. Sie



sind unsere ›Fenster zur Wirklichkeit‹, daher kommt es bei der Übertragung wesentlicher Kennzeichen auf neue Phänomene entscheidend darauf an, passende Analogien zu bilden. Genau das leisten die angeführten Analogien nicht, indem sie spezifisch menschliche Fähigkeiten als maschinelle Funktionen behaupten und so die Natur beider verwirren. Letztlich führt dieser Trugschluss zu einer irreführenden Gleichsetzung.

Dies kann am Beispiel der in der KI-Forschung üblichen »intentionalen Einstellung« (»*intentional stance*«, Dennett 1987) verdeutlicht werden. Neben der oben angeführten physikalisch-algorithmischen Beschreibung des Verhaltens von Computersystemen werden Agenten dabei intentionale Zustände wie Überzeugungen, Wünsche oder Absichten zugeschrieben, ausdrücklich um deren Verhalten leichter verstehen zu können:

»To ascribe beliefs, free will, intentions, consciousness, abilities, or wants to a machine is legitimate when such an ascription expresses the same information about the machine that it expresses about a person. It is useful when the ascription helps us understand the structure of the machine, its past or future behaviour, or how to repair or improve it. It is perhaps never logically required even for humans, but expressing reasonably briefly what is actually known about the state of the machine in a particular situation may require mental qualities or qualities isomorphic to them. Theories of belief, knowledge and wanting can be constructed for machines in a simpler setting than for humans, and later applied to humans. Ascription of mental qualities is most straightforward for machines of known structure such as thermostats and computer operating systems, but is most useful when applied to entities whose structure is incompletely known.« (McCarthy 1978, zitiert nach Shoham 1993: 53).

Zur formalen Beschreibung intentionaler Zustände von Agenten wird die propositionale Modallogik genutzt, in der die übliche zweiwertige Aussagenlogik (eine Aussage ist entweder wahr oder falsch) um die beiden Modalitäten der Notwendigkeit und der Möglichkeit erweitert ist: Eine Aussage ist zudem notwendiger- oder aber nur möglicherweise wahr oder falsch. Auf dieser erweiterten logischen Grundlage lassen sich dann Überzeugungen (*beliefs*), Wünsche (*desires*) oder Absichten (*intentions*) von Software-Agenten als zugeschriebene intentionale Zustände formalisieren; beispielsweise kann so die Tatsache, dass der Agent  $a$  zum Zeitpunkt  $t$  der Überzeugung ist, dass die Aussage  $\phi$  gilt, als der Ausdruck  $\mathbf{Bel}(a,\phi)(t)$  einer formalen Beschreibungssprache modelliert werden (Wooldridge 2002).

Diese durch Zuschreibung von Intentionalität gewonnene Abstraktion vom wirklichen, auf der physikalisch-algorithmischen Ebene sich vollziehenden Verhalten der MAS ist ein Versuch, dem ärgerlichen Umstand zu entkommen, dass dieses Verhalten in seinem physischen Verlauf, obgleich determiniert, i.a. nicht mehr zu durchschauen ist. Weil das Verhalten auf dieser Ebene nicht erklärbar ist, wird in der Abstraktion so getan, als ob ihm Intentionalität zugrunde läge. Diese letztlich absurde *Quasi*-Erklärung des Verhaltens von MAS gaukelt dessen Verstehbarkeit vor, der das tatsächliche Verhalten aber entzogen bleibt; statt das Problem zu erhellen oder zu lösen, wird es verschleiert.

Die mangelnde Durchschaubarkeit des Verhaltens von MAS wie auch die Zuschreibung von Intentionalität zeitigen indes fatale Konsequenzen für die Mensch-Maschine-Interaktion: Wie sollen Menschen sich solche Systeme aneignen, wie mit ihnen zweckmäßig und zielgerichtet interagieren, wenn diese sich in vergleichbaren Situationen jeweils anders und unerwartet verhalten? Das wäre ein eklatanter Verstoß gegen gegen die

Forderung nach erwartungskonformem Verhalten als einer Grundregel der Mensch-Maschine-Interaktion. Zugleich würden seitens der Nutzer überzogene Erwartungen an die »Handlungsfähigkeit« der Systeme geschürt, letztlich mit der Folge hoher psychischer Belastungen (so bereits Norman 1994).

Ähnlich beruht auch der Ausdruck »maschinelles Lernen« auf einer fehlgeleiteten Analogiebildung. Das veränderliche Verhalten des Software-Agenten wird durch algorithmische Verfahren erreicht, die dessen Anpassung an Umweltgegebenheiten steuern (tatsächlich wurden solche Systeme früher auch als *adaptive Systeme* bezeichnet). Im Gegensatz dazu beruht menschliches Lernen wesentlich auf reflexiver Handlungssteuerung und Begriffsbildung als Grundlage der Gewinnung expliziten propositionalen Wissens. Diese Verwechslung nährt die Illusion, dass vermeintlich mit »künstlicher Intelligenz« und der Fähigkeit zu »maschinellern Lernen« ausgestattete Computer menschliches Arbeitsvermögen zu ersetzen vermöchten.

Hinsichtlich ihrer philosophischen Grundlagen wurzeln diese Metaphern im schwankenden Grund des *Funktionalismus*. Als Ansatz zur Überwindung des Behaviorismus erkennt der Funktionalismus (Putnam 1960, Fodor 1968) mentale Zustände als wesentlich für die Erklärung von Verhalten an. Allerdings werden sie ungeachtet ihrer materiellen Realisierung als rein funktionale Zustände betrachtet nach dem Vorbild der Turing-Maschine. Freilich gilt längst auch diese Sichtweise als widerlegt, da – wie Putnam als ihr Begründer später (1991) durch scharfsinnige Gedankenexperimente gezeigt hat – gleiche funktionale Strukturen ganz unterschiedliche Weltbezüge, etwa Gedanken und Erlebnisse, hervorzubringen vermögen. In seiner neuesten Variante, einer in positivistischer Attitüde verengten Interpretation von »Embodiment« (vgl. u.a. Varela et al. 1991), werden CPS umstandslos mit lebendigen und einfühlsamen, zu Empathie und Reflexion ihres kontextbezogenen Erlebens und Handelns fähigen Körpern von Menschen gleichgesetzt (so zuletzt wieder Jeschke 2015). Übersehen wird dabei erneut die naturwissenschaftlich begründete Differenz deterministischen Verhaltens von Maschinen zu intentional gesteuertem, Sinn erzeugendem menschlichen Handeln und Verstehen im Kontext sozialer Praxis.

Mit Blick auf den Einsatz von Computern in wissensintensiven Arbeits- und Wertschöpfungsprozessen, in denen Menschen mit adaptiven Systemen normalerweise interagieren sollen (was Industrie 4.0-Konzepte ausdrücklich vorsehen), sind diese Unterschiede von großer Bedeutung bei der Beurteilung der Möglichkeiten, menschliche Kompetenz und Expertise zu ersetzen. Im Kern wird von den Propagandisten der »smarten Fabrik« die fundamentale ontologische Differenz zwischen physischen Vorgängen und sozialen Fakten geleugnet: Während in der physischen Welt – in der auf der Grundlage von Halbleiter-Physik und formaler Logik Computer operieren – kausale Zusammenhänge wirken unabhängig von menschlichem Handeln, werden Gegenstände und Tatsachen (»Fakten«) der sozialen Welt der Signifikation, Bedeutungen und Institutionen einzig und allein geschaffen und aufrechterhalten durch soziale Praktiken der Kommunikation und Kooperation aufgrund geteilter kollektiver Intentionalität: Sie entstehen allein durch Deklaration, d.h. durch Sprechakte, die etwas der Fall sein lassen, indem sie es als etwas repräsentieren, was der Fall ist (Searle 2012).

Hinzu kommt, dass wir die uns umgebende und als solche gegebene Welt, gleichviel ob physischer oder sozialer Natur, nur mittelbar, vermittelt durch Sprache bzw. Zeichen, wahrzunehmen vermögen: In jedem Fall ist uns etwas Gegebenes, ein Gegenstand (›Objekt‹) – der auch ein gemachter oder bloß gedachter sein kann –, nur soweit gegeben, als wir ihn *als* etwas wahrnehmen. Dazu muss ihm für uns in einem bestimmten praktischen Handlungskontext eine Bedeutung zukommen, eben dasjenige, *als* das wir ihn wahrnehmen, seinen Begriff oder Vorstellung. Zudem müssen wir den Gegenstand, damit wir mit anderen darüber zu sprechen vermögen, bezeichnen, d.h. durch ein materielles Zeichen repräsentieren können. Um diesen komplexen Vorgang der *Signifikation* in einer sozialen Praxis begrifflich analysieren zu können, wird ein Zeichenbegriff benötigt, wie er von dem amerikanischen pragmatistischen Logiker C.S. Peirce in Gestalt einer dreistelligen Relation ausgearbeitet wurde. Er interessierte sich u.a. für die Funktionsweise »logischer Maschinen« und hat auch als erster eine Prädikatenlogik erster Stufe als einer formal-logischen Grundlage der Computertechnik geschaffen. In der logischen Analyse dieses triadischen Zeichenbegriffs unterscheidet er eine erste Entität, ein gegebenes Objekt der Welt (das gegenwärtig, abwesend oder nur gedacht sein kann) von einer zweiten, dem materiellen Zeichen namens Repräsentamen, das für das Objekt steht, es be-zeichnet oder repräsentiert. Eine dritte Entität namens Interpretant weist der Beziehung zwischen dem Zeichen als Mittel der Repräsentation und dem repräsentierten Objekt eine Bedeutung zu im Kontext einer sozialen Praxis, sie (be-)deutet diese Beziehung. Dieser Vorgang der Signifikation wird von Peirce insgesamt Semiose oder Zeichenprozess genannt (Peirce 1983, Eco 1976).

Anscheinend besteht eine unüberwindliche Lücke zwischen der sozialen Welt der Zuschreibung von Bedeutung als wesentlichem Teil von Zeichenprozessen und der physischen Welt der Signalverarbeitung in Computersystemen. Dabei erlaubt indes der Peircesche triadische Zeichenbegriff, die algorithmisch determinierte Signalverarbeitung als »degenerierten«, auf eine dyadische Relation reduzierten Zeichenprozess ohne ›Fenster zur Welt‹ zu verstehen, dem der Bezug zu einem erlebten Objekt, eben die Bezeichnung fehlt. Er ist nur eine »Quasi-Semiose«, die mit Signalen als »Quasi-Zeichen« operiert (Nöth 2002). Freilich kann diese reduzierte Quasi-Semiose, wie im Falle computerunterstützter Wissensarbeit, über ein beiden gemeinsames physisches Zeichen als geteiltem Repräsentamen in vollständige Zeichenprozesse sozialer Praxis eingebettet werden.

So vermag dieser Zeichenbegriff als Brücke die physische Welt, in der Computer Signale oder Daten verarbeiten, mit der sozialen Welt der Signifikation, der Zuweisung von Bedeutung durch Interpretation in einem Handlungskontext sozialer Praxis, zu verbinden. Insbesondere öffnet dieser Zeichenbegriff eine *praxistheoretische Perspektive* (Reckwitz 2003, etwa in Anlehnung an Giddens' Strukturierungstheorie (1988)) auf die genaue Analyse der Zeichenprozesse im komplexen Zusammenspiel algorithmisch determinierter physischer Datenverarbeitung mit den sozialen Vorgängen der Signifikation und Interpretation der Daten im Kontext sozialer Praktiken einer Organisation. Durch aufgabengemäße Gestaltung von Computerfunktionen und deren Aneignung für den praktischen Gebrauch wird die reduzierte Quasi-Semiose der Datenverarbeitung instrumentell eingegliedert in vollständige Zeichenprozesse sozialer Praxis, wobei die Kenntnis der algorithmischen Funktionen erlaubt, die verarbeiteten Daten angemessen zu interpretieren. So vermittelt

der triadische Zeichenbegriff zwischen physischem Signal und sozialem Sinn, und dabei zeigt sich die meist verkannte, tatsächlich semiotische Natur datenverarbeitender Maschinen (zu Einzelheiten vgl. Brödner 2008).

Mit der ständigen Rede von »Digitalisierung« und »digitaler Transformation« werden diese grundlegenden Zusammenhänge eher verstellt als aufgeklärt, insbesondere werden gerade die für den Computereinsatz wesentlichen Aktivitäten der Modellierung und Formalisierung von Aspekten sozialer Praxis als dessen Voraussetzung sowie der mühsamen und aufwendigen kollektiven Aneignung daraus entwickelter Software-Artefakte zu routinierter praktischer Verwendung verdeckt. Auch führt die ständige Verwendung des semantischen Chamäleons ›Information‹ in diesem Kontext zur Verwechslung beider Welten, wenn etwa laufend sinnfreie Daten mit bedeutungsvoller Information gleichgesetzt werden. Das wirkt sich in doppelter Hinsicht schädlich aus: In einer Hinsicht werden in reduktionistischer Attitude Menschen auf die Funktionsweise von Maschinen reduziert, während in der anderen den Nutzern Illusionen über den ihren vergleichbare Fähigkeiten vorgetäuscht werden.

So kann die Vorstellung von der »smarten Fabrik« trefflich als ideologische Offensive missbraucht werden: Mit bedrohlichen Szenarien der Ersetzung lebendiger Arbeit und technologischer Arbeitslosigkeit kann diese, wie laufend zu beobachten, unter Druck gesetzt werden, die neue »industrielle Revolution« in allen Aspekten quasi als unabwendbares Naturereignis zu akzeptieren. Die öffentliche Aufmerksamkeit wird so von politisch gewollten institutionellen Deregulierungen abgelenkt, die oft die eigentliche Bedrohung guter Arbeit sind (wie es z.B. bei vielen »Crowdsourcing«-Plattformen der Fall ist). So lassen sich schädliche Folgen bequem dem vermeintlich nicht aufzuhaltenden »technischen Fortschritt« anlasten.

#### **4 Schlussfolgerung: Perspektiven künftiger Entwicklung**

Gestützt auf diese Analysen sollen abschließend noch in idealtypischer Kontrastierung mögliche Perspektiven künftiger Gestaltung von Computersystemen für den Einsatz in wissensintensiver Produktion aufgezeigt und bewertet werden. Wie der Rückblick zeigt, sind dabei schon seit jeher zwei entgegengesetzte Gestaltungsperspektiven im Spiel:

- Die *technikzentrierte Perspektive* weitestgehender Automatisierung von Wissensarbeit wie sie mit den Bestrebungen zur »künstlichen Intelligenz« – AI (*Artificial Intelligence*) – verfolgt wird: »*Smart machines*« und »*autonome Agenten*«, zu MAS vernetzt und mit Big-Data-Methoden kombiniert, sollen menschliches Arbeitsvermögen in der Produktion nachahmen und weitgehend ersetzen; deren »Lernfähigkeit« – tatsächlich nur algorithmisch gesteuerte Adaption an Umweltgegebenheiten – soll gleichwohl hinreichende Flexibilität der Anpassung an wechselnde Anforderungen gewährleisten (gemäß der »*intentional stance*«; Minsky 1988, Shoham 1993, Wooldridge 2002).
- In der *praxistheoretischen Perspektive* menschengerecht und aufgabenangemessen gestalteter, von menschlichen Experten als Werkzeug und Kooperationsmedium angeeigneter und genutzter Computersysteme – IA (*Intelligence Amplification*) – sollen

die lebendige Arbeit auf eine Weise unterstützen, dass die Entfaltung von deren Arbeitsvermögen, mithin die Steigerung ihrer Produktivkraft und Innovationsfähigkeit, ermöglicht und gefördert wird: »*Things that make us smart*« (Norman 1993; vgl. auch Ehn 1988, Winograd 1996).

Zwar hat die technikzentrierte AI-Perspektive mit der Vision der »automatischen Fabrik« bereits dreimal die Entwicklung vorübergehend bestimmt, tatsächlich beruhen aber bei evidenzbasierter Betrachtung Verbreitung und säkularer Erfolg des Einsatzes und Gebrauchs von Computersystemen ganz überwiegend auf der praxistheoretisch angeleiteten Perspektive der »Intelligenzverstärkung« und damit verbundenen Prinzipien der Organisationsentwicklung. Dabei werden menschliche Reflexions- und Lernfähigkeit mit maschineller Präzision und Geschwindigkeit verknüpft. Ihr muss daher alle Aufmerksamkeit gelten, um Flexibilität mit Effizienz zu verbinden. Dabei muss sich die soziotechnische Gestaltung ganz an den Eigenheiten und Bedürfnissen menschlichen Handelns und sozialer Praxis sowie an den Bedingungen der Entfaltung praktischen Arbeitsvermögens orientieren, um Produktivität, Kreativität und Flexibilität zugleich zu ermöglichen. Gefordert sind dauerhaft kompetenzerhaltende und lernförderliche Arbeitsaufgaben, durchschau- und beherrschbare, aufgabenangemessene Arbeitsmittel mit erwartungskonformem Verhalten sowie ausreichende Zeitressourcen zur Aneignung der Arbeitsmittel und laufenden Optimierung von Prozessen (Brödner 2008, 2010).

Von grundlegender Bedeutung ist ferner, wie Aufgaben auf die automatischen Systeme und verbleibende menschliche Experten verteilt werden. In dieser Hinsicht wurden bereits früh anhand von qualifizierten Leitwarten-Tätigkeiten fundamentale »Ironien der Automatisierung« erkannt, die mit zunehmender Komplexität der technischen Systeme noch an Bedeutung gewinnen: Automatische Systeme wie MAS sollen möglichst weitreichend menschliche Wissensarbeit ersetzen, deren Arbeitsvermögen aber im Störungs- oder Versagensfall der Systeme unersetzlich ist. Nun schwindet jedoch das Arbeitsvermögen dahin, je weniger es im automatisierten Normalbetrieb gebraucht wird. Dabei ist auf längere Sicht ein empfindlicher Verlust praktischer Handlungskompetenz zu verzeichnen, der aus ursprünglich kompetenten Nutzern am Ende hilflose, weil entwöhnte »Bediener« werden lässt (Bainbridge 1983; eindruckliche neuere Beispiele bei Carr 2013). So nehmen denn in hoch automatisierten, eng gekoppelten Systemen wie MAS immer wieder »normale Katastrophen« (Perrow 1989) ihren Lauf (so etwa beim börslichen Hochfrequenzhandel).

Der reflexiven Dynamik der Explikation von Können als Wissen und der Aneignung von Wissen zu erweitertem Können zufolge wird mit dem Einsatz von Computersystemen in Organisationen massiv in deren soziale Praktiken interveniert, oft mit überraschenden Folgen. So erweist sich etwa praktisches Können durch den Gebrauch angemessen gestalteter Artefakte wiederholt »intelligenten«, die menschliche Expertise ersetzenden Automaten als überlegen, sogar dann noch, wenn die Automaten leistungsfähiger als menschliche Experten sind. Beispielsweise hat der Schachweltmeister Kasparov ein zunächst seinem Können überlegenes Computersystem (von vergleichbarer Leistung wie »Deep Blue« von IBM, dem er unterlag) wiederum geschlagen, indem er seinerseits einen wesentlich einfacher gestalteten Computer als Werkzeug zu Hilfe nahm (Kasparov 2010).

Nach diesem Muster produktiven Zusammenwirkens von Menschen und Computer-Artefakten können beispielsweise an CPS laufend erfasste Daten für interaktive Assistenzsysteme mit gebrauchstauglich gestalteter Benutzungsoberfläche zur Rekonfigurierung oder Optimierung von Prozessen, zu deren Simulation und Steuerung oder auch zur datengestützten Diagnose von CPS genutzt werden. Dabei ist zwecks gelingender Interaktion wichtig, Benutzern die Möglichkeit zu bieten, in steuerbaren Graden der Detaillierung Einblick in den Verlauf von Maschinenzuständen, in gegebene Einstellungen oder verwendete Methoden zu nehmen. Nur so können sie sich, um zweckmäßig einzugreifen, ein eigenes Bild von den maschinellen Abläufen und dem Zustandekommen von Resultaten machen.

Dieser praxistheoretisch begründeten »IA«-Perspektive zu folgen, hieße, statt auf illusionäre »AI«-Hoffnungen zu setzen, höhere Flexibilität, Produktivität und Innovationsfähigkeit weit wirksamer durch soziotechnische Gestaltung »guter Arbeit« zu erreichen, auf Basis reflexiven und kreativen Zusammenwirkens kompetenter Experten mit gebrauchstauglich gestalteten Computersystemen und dadurch ermöglichter Entfaltung lebendigen Arbeitsvermögens.

## Literatur

- Bainbridge, L. 1983: Ironies of Automation, *Automatica* 19, 775-779
- Bell, D. 1975: Die nachindustrielle Gesellschaft, Frankfurt/M: Campus
- BMBF 2014: Innovationen für die Produktion, Dienstleistung und Arbeit von morgen, Bonn: BMBF
- Breadshaw, J.M. 1997: An Introduction to Software Agents, in: Breadshaw, J.M. & Hutchinson, F. (eds.): *Software Agents*, Cambridge (MA): MIT Press, 3-46
- Brödner, P., 2010: Wissensteilung und Wissenstransformation, in: Moldaschl, M. & Stehr, N. (Hg.): *Wissensökonomie und Innovation. Beiträge zur Ökonomie der Wissensgesellschaft*, Marburg: Metropolis 2010, 455-480
- Brödner, P. 2008: Das Elend computerunterstützter Organisationen, in: Gumm, D.; Janneck, M.; Langer, R.; Simon, E.J. (Hg.): *Mensch – Technik – Ärger? Zur Beherrschbarkeit soziotechnischer Dynamik aus transdisziplinärer Sicht*, Münster: Lit-Verlag, 39-60
- Brödner, P. 1997: *Der überlistete Odysseus. Über das zerrüttete Verhältnis von Menschen und Maschinen*, Berlin: edition sigma
- Brödner, P. 1990: *The Shape of Future Technology. The Anthropocentric Alternative*. London: Springer
- Brynjolfsson, E. & McAfee, A. 2014: *The Second Machine Age. Work, Progress, and Prosperity in a Time of Brilliant Technologies*, New York London: Norton & Comp.
- Carr, N. 2013: All Can Be Lost: The Risk of Putting Our Knowledge in the Hands of Machines, *The Atlantic* No. 11
- Cyranek, G. & Ulich, E. (Hg.) 1993: *CIM – Herausforderung an Mensch, Technik, Organisation*. Stuttgart: Schäffer Poeschel und Zürich: vdf
- Dennett, D.C. 1987: *The Intentional Stance*, Cambridge (MA): MIT Press - A Bradford Book
- Drucker, P.F. 1994: The Age of Social Transformation, *The Atlantic* No. 11, 53-80
- Eco, U. 1976: *A Theory of Semiotics*, Bloomington (IN): Indiana University Press
- Ehn, P., 1988: *Work-Oriented Design of Computer Artifacts*, Stockholm: Arbetslivscentrum
- Fodor, J. 1968: *Psychological Explanation*, New York: Random House
- Foerster, H.v. 1993: *Wissen und Gewissen*, Frankfurt/M: Suhrkamp

- Forschungsunion & acatech 2013: Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0, Frankfurt/M.: plattform-i40
- Giddens, A. 1988: Die Konstitution der Gesellschaft, Frankfurt/M: Campus
- Hofstadter D. & Sander, E. 2013: Surfaces and Essences: Analogy as the Fuel and Fire of Thinking, New York: Basic Books
- Hunt, V.D. 1989: Computer Integrated Manufacturing Handbook. London New York: Kluwer Academic Publishers
- Jeschke, S. 2015: Auf dem Weg zu einer »neuen KI«: Verteilte intelligente Systeme, Informatik Spektrum 38 (1), S. 4-9
- Kasparov, G. 2010: The Chess Master and the Computer, The New York Review of Books 11.02.2010
- Kriesel, D. o.J.: Kleiner Überblick über Neuronale Netze, [http://www.dkriesel.com/science/neural\\_networks](http://www.dkriesel.com/science/neural_networks) [Abruf am 12.02.2017]
- Maes, P., 1994: Agents that Reduce Work and Information Overload, CACM 37 (7), 31-41
- Minsky, M. 1988: The Society of Mind, New York: Simon & Schuster
- Nöth, W., 2002: Semiotic Machines, Cybernetics and Human Knowing 9 (1), 5-22
- Nonaka, I., 1996: A Dynamic Theory of Organizational Knowledge Creation, Organization Science 5 (1), 14-37
- Norman, D.A. 1994: How Might People Interact with Agents, CACM 37 (7), 68-71
- Norman, D.A. 1993: Things that Make Us Smart, Reading (MA): Addison-Wesley
- Peirce, C.S., 1983: Phänomen und Logik der Zeichen, Frankfurt/M: Suhrkamp
- Perrow, C. 1989: Normale Katastrophen. Die unvermeidbaren Risiken der Großtechnik, Frankfurt/M: Campus
- Polanyi, M., 1985: Implizites Wissen, Frankfurt/M: Suhrkamp
- Prasse, M. & Rittgen, P. 1998: Bemerkungen zu Peter Wegners Ausführungen über Interaktion und Berechenbarkeit, Informatik-Spektrum 21, 141-146
- Putnam, H. 1960: Minds and Machines, in: Hook, S. (ed.): Dimensions of Mind, New York: Collier Books
- Putnam, H. 1991: Representation and Reality, Cambridge (MA): MIT Press
- Reckwitz, A. 2003: Grundelemente einer Theorie sozialer Praktiken. Eine sozialtheoretische Perspektive, Zeitschrift für Soziologie 32 (4), 282-301
- Ryle, G. 1987: Der Begriff des Geistes, Stuttgart: Reclam
- Schmidhuber, J. 2015: Deep Learning in Neural Networks. An Overview, Neural Networks 61, 85–117
- Searle, J.R. 2012: Wie wir die soziale Welt machen. Die Struktur der menschlichen Zivilisation, Berlin: Suhrkamp
- Sharif, M. et al. 2016: Accessorize to a Crime: Real and Stealthy Attacks on State-of-the-Art Face Recognition, ACM Conference on Computer and Communication Security, Vienna
- Shoham, Y. 1993: Agent-Oriented Programming, Artificial Intelligence 60, 51-92
- Spur, G. 1984: Über intelligente Maschinen und die Zukunft der Fabrik, Forschung – Mitteilungen der DFG, I-VIII
- Varela, F.J.; Thompson, E. & Rosch, E., 1991: The Embodied Mind. Cognitive Science and Human Experience. Cambridge (MA): MIT Press
- WEF 2012: The Future of Manufacturing. Opportunities to drive economic growth, a World Economic Forum Report in collaboration with Deloitte Touche Tohmatsu Limited
- Wegner, P. 1997: Why Interaction is More Powerful than Algorithms, CACM 40 (5), 80-91
- Wick, C. 2017: Deep Learning, Informatik Spektrum 40 (1), S. 103-107
- Wiener, N. 1950: The Human Use of Human Beings. Cybernetics and Society, Boston (MA): Houghton Mifflin Harcourt (deutsche Übersetzung: Mensch und Menschmaschine, Frankfurt/M. 1966)
- Winograd, T. 1996: Bringing Design to Software, Reading (MA): Addison-Wesley
- Wooldridge, M. 2002: An Introduction to Multi-Agent Systems, New York: Wiley

**Autoren-Hinweis:**

Brödner, Peter, Prof. Dr.-Ing., Maschinenbauer, Honorarprofessor für  
Wirtschaftsinformatik an der Universität Siegen, Mitglied der Leibniz-Sozietät der  
Wissenschaften zu Berlin.

E-Mail: peter.broedner@t-online.de, Anschrift: Baumeisterstr. 48, 76137 Karlsruhe