



ARBEITSPAPIERE DER NORDAKADEMIE

ISSN 1860-0360

Nr. 2014-05

Industrie 4.0: Ein humanzentrierter Ansatz als Gegenentwurf zu technikzentrierten Konzepten

Prof. Dr.-Ing. Volker Ahrens

November 2014

Eine elektronische Version dieses Arbeitspapiers ist verfügbar unter:
www.nordakademie.de/de/arbeitspapiere/



Köllner Chaussee 11
25337 Elmshorn
www.nordakademie.de

Industrie 4.0: Ein humanzentrierter Ansatz als Gegenentwurf zu technikzentrierten Konzepten

Volker Ahrens

NORDAKADEMIE – Hochschule der Wirtschaft, Elmshorn

Die Fachwelt ist sich derzeit weitgehend einig, dass Technik intelligent und autonom werden soll, um sich selbst zu organisieren. Dem wird ein humanzentrierter Ansatz entgegen gestellt, der den Menschen als intelligent und autonom begreift. Vor einem solchen Hintergrund kommt es nicht darauf an, ob Technik künstlich intelligent ist oder nicht, sondern darauf, dass sie den Menschen dabei unterstützt, seine Intelligenz und Autonomie zur vollen Geltung zu bringen. Dieser Ansatz wird mit Hilfe systemtechnischer Modelle begründet und von technikzentrierten Ansätzen abgegrenzt.

Ausgangssituation

Im Zuge der angeblichen vierten industriellen Revolution sollen technische Systeme autonom und intelligent werden und sich selbst organisieren (Auerbach et al. 2013, 561 ff.). Was genau das bedeutet, bleibt jedoch zumeist unscharf. So wird der Intelligenz-Begriff beispielsweise in der Forschungsagenda der Deutschen Akademie der Technikwissenschaften zu cyber-physikalischen Systemen (Geisberger & Broy 2012) etwa 200 Mal verwendet, jedoch kein einziges Mal definiert. In seinem Fachbuch zur Industrie 4.0 gesteht Sandler (2013, 9 f.) zwar ein, dass die Bezeichnung technischer Systeme als intelligent durchaus gewagt ist, hält dies aber dennoch für berechtigt. Oft werden sogar Smartphones als intelligente Endgeräte bezeichnet. Dies findet sich nicht nur bei Sandler, sondern beispielsweise auch im Abschlussbericht des Arbeitskreises Industrie 4.0 (Kagemann et al. 2013, 17), in der oben bereits erwähnten Forschungsagenda (Geisberger & Broy 2012, 53) und in wissenschaftlichen Aufsätzen wie dem von Auerbach et al. (2013, 561).

Die Bezeichnung von Technologien als smart suggeriert, dass es sich dabei um etwas Neues handelt. Erst wenn man diese Begriffskombination zurück übersetzt in Künstliche (Technologie) Intelligenz (smart), wird deutlich, dass es sich dabei um ein Thema handelt, das bereits mehr als 60 Jahre alt ist und längst zum Repertoire gängiger Lehrbücher gehört (vgl. z. B. Ertel 2013; Russel & Norvig 2012). Doch Hinweise auf die längst etablierte, bisher allerdings nur begrenzt erfolgreiche Künstliche Intelligenz (KI) finden sich, wenn überhaupt, nur am Rande. So wird die KI in dem oben erwähnten Abschlussbericht auf 112 Seiten gerade einmal unter zwei Spiegelstrichen erwähnt (Kagemann et al. 2013, 94 f.), was auch deshalb bemerkenswert erscheint, weil das Deutsche Institut für Künstliche Intelligenz (sic) an der Herausgabe beteiligt war. Die oben ebenfalls schon erwähnte, insgesamt 296 Seiten umfassende Forschungsagenda widmet der KI gerade einmal zwei Seiten (0,7 %) und erwähnt sie darüber hinaus nur noch an einigen weiteren Stellen. Viele wissenschaftliche Aufsätze wie z. B. der von Auerbach et al. (2013, 561 ff.) verzichten ganz auf explizite Bezüge zur KI-Forschung, andere Aufsätze wie der von Spur et al. (2012, 882) beschränken sich auf beiläufige Erwähnungen ohne Quellenangaben.

Mit anderen Begriffen wie zum Beispiel Autonomie oder Selbstorganisation verhält es sich ähnlich. Insgesamt betroffen sind scheinbar all jene Begriffe, die ihren Ursprung in sozialwissenschaftlichen Disziplinen wie Soziologie oder Psychologie haben und nun auf technische Disziplinen übertragen werden. Ansätze, die darauf abzielen, lassen sich in zwei Kategorien einteilen:

- Die Sozionik bezeichnet einen wissenschaftlichen Ansatz, der technische Systeme nach sozialem Vorbild gestaltet (Florian & Hillebrandt 2004, 10 ff.). Ausgangspunkt ist die Technik, die mit sozialen Fähigkeiten und Eigenschaften wie Intelligenz, Autonomie und Selbstorganisation ausgestattet werden soll.
- Alternativ dazu lässt sich der Mensch als Ausgangspunkt wählen (Ahrens 1996; Ahrens 1998). Entsprechende Ansätze basieren auf der Einsicht, dass der Mensch intelligent und autonom ist und sich selbst organisiert. Technik soll so umgestaltet werden, dass sie den Menschen dabei unterstützt, diese Fähigkeiten und Eigenschaften zur vollen Geltung zu bringen.

Der erstgenannte, technikzentrierte Ansatz steht zunehmend im Verdacht, an Ziele anzuknüpfen, die in den 1980er Jahren unter dem Schlagwort „Computer Integrated Manufacturing“ (CIM) verfolgt wurden und unter anderem die vollständige Verdrängung des Menschen aus der Produktion in Aussicht stellten. Genährt wird dieser Verdacht zum Beispiel von Äußerungen, die rechnerintegrierte Produktionsfabrik sei „im Sinne der bekannten ‚CIM-Visionen‘ nunmehr ein tatsächlich erreichbares technisches Ziel geworden“ (Spur 2013, 567). Und auch mit der Aufforderung, sich bei zukünftigen Produktionsszenarien fast menschenleere Fabrikhallen vorzustellen (Simon 2013, 38), werden Erinnerungen an CIM wachgerufen.

Angesichts der verbreiteten Auffassung, dass CIM seinerzeit gescheitert ist, versuchen andere, diesen Verdacht zu zerstreuen. So erklärt Bauernhansl in einem Interview, der Mensch stehe weiterhin im Mittelpunkt (Bauernhansl 2013, 573). Das wäre durchaus als Humanorientierung interpretierbar, wenn nicht sogleich betont würde, dass der Mensch angesichts der beabsichtigten technischen Entwicklungen eine neue Rolle finden müsse (ebd.), weil andere Anforderungen an ihn gestellt würden (Russwurm 2013, 33). Solche Äußerungen können leicht dahingehend verstanden werden, dass sich der Mensch der Technik zu unterwerfen hat. Daher wird im Folgenden ein systemtechnischer Ansatz vorgestellt, der einen Beitrag dazu leisten soll, das Verhältnis zwischen Mensch und Technik zu klären und auf diese Weise zu zeigen, wie technische Systeme im Sinne des zweitgenannten, humanzentrierten Ansatzes gestaltet werden müssen, damit sie Menschen dabei unterstützen, ihre Intelligenz zur vollen Geltung bringen.

Soziotechnische Systeme

Ropohl (2009, 43 f.) zeigt auf der Grundlage seiner Systemtheorie der Technik, dass diese kein isoliertes Eigenleben führt, sondern immer in soziotechnische Entstehungs- und Verwendungszusammenhänge eingebunden ist. Daher kann Technik nicht in dem Sinne autonom sein, wie Verweise auf einen soziologischen oder psychologischen Ursprung dieses Begriffs nahelegen. Beispielsweise kann Technik nicht losgelöst vom Menschen Verantwortung für die Folgen ihres Einsatzes übernehmen. Vor diesem Hintergrund erscheint es sinnvoller, Spur zu folgen, der den Kern der zukünftigen Entwicklung als weiter zunehmende Automatisierung beschreibt (2012, 879). Damit ändert sich dann auch die Rolle des Menschen nicht wesentlich: so haben Produktionsmitarbeiterinnen und -mitarbeiter schon seit langer Zeit und nicht, wie Russwurm (2013, 33) vorhersagt, erst in Zukunft weniger

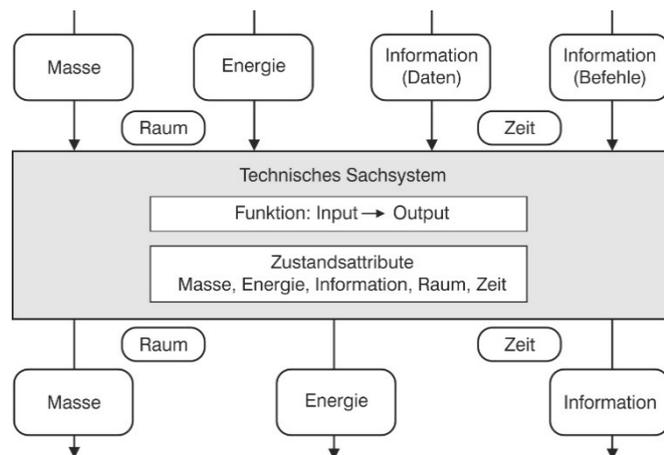


Bild 1: EVA-Modell (Eingabe - Verarbeitung - Ausgabe)

die Aufgabe, Maschinen zu bedienen, sondern mehr die Aufgabe, diese zu überwachen und nur in Ausnahmesituationen einzugreifen. Es werden allenfalls mehr Menschen davon betroffen sein.

Um den Unterschied zwischen Automation und Autonomie deutlich zu machen, ist eine Erweiterung des üblicherweise zugrunde liegenden Modells erforderlich. Bis heute weit verbreitet ist das EVA-Modell (Bild 1), nach dem ein System Eingangsgrößen (E) zu Ausgangsgrößen (A) verarbeitet (V). Auf dieser Grundlage werden oft auch sozio-technische Systeme modelliert, also Systeme, die neben Technik auch soziales Handeln umfassen. Bild 2 zeigt exemplarisch, wie auf diese Weise ein ganzes Unternehmen modelliert wird (Wien-

dahl 2010, 10). Dem liegt die Maschinenmetapher zu Grunde, also die Vorstellung, dass ein Unternehmen ebenso zu funktionieren hat wie eine gut geölte Maschine (Kieser & Ebers 2006, 97).

Das EVA-Modell beschreibt Systeme, die in jeder relevanten Hinsicht offen sind. Dies ist im Umgang mit technischen Systemen zwingend erforderlich, denn diese sollen – jedenfalls nach bisheriger Auffassung – stets beherrschbar sein, was voraussetzt, dass die Verarbeitungsprozesse (V), nach denen Eingangsgrößen (E) in Ausgangsgrößen (A) transformiert werden, im Sinne von Foersters (1994, 207) trivial sind. Insofern sind technische Systeme heteronome, also fremdbestimmte, nämlich durch Menschen beherrschte Systeme und damit das genaue Gegenteil von autonomen Systemen.

Soziale Systeme werden dagegen inzwischen nicht mehr als offene Systeme aufgefasst. Vielmehr setzt sich in der Soziologie die Einsicht durch, dass solche Systeme weitgehend geschlossen sind und Offenheit erstens selbst und nicht etwa von außen quasi erzwingbar, zweitens nur unter bestimmten Bedingungen und drittens nur in bestimmten Hinsichten herstellen (Luhmann 1996, 24 f.).

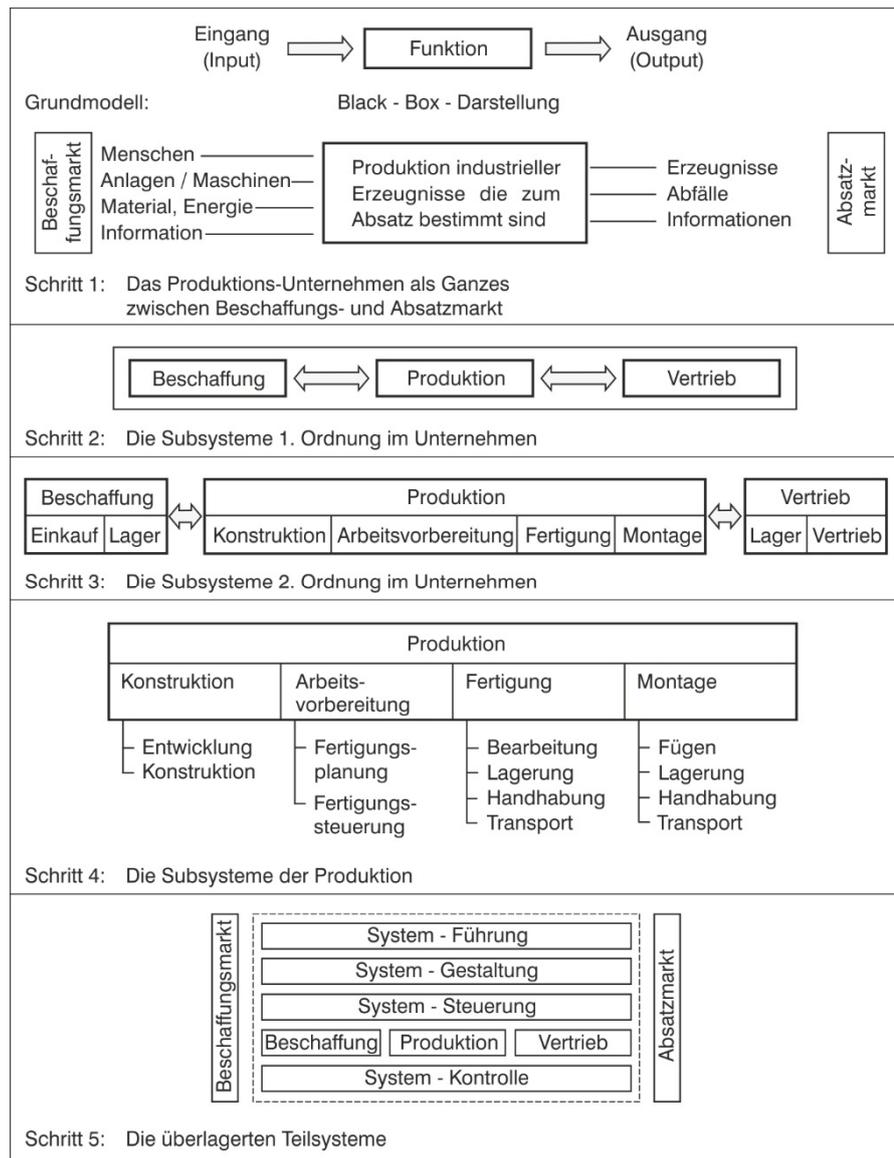


Bild 2: Ableitung eines Unternehmensmodells vom EVA-Modell [17]

Die Abbildung sozio-technischer Systeme erfordert daher ein Modell, das das EVA-Modell zur Abbildung rein technischer Systeme in soziale Entstehungs- und Verwendungszusammenhänge einbindet und dabei der operativen Geschlossenheit sozialer Systeme Rechnung trägt. Dazu kann das von Ropohl (1979, 131) vorgeschlagene Modell sozio-technischer Handlungssysteme (Bild 3) herangezogen werden. Allerdings bedarf dieses Modell gerade in Bezug auf die Autonomie einer anderen Interpretation (Ahrens 1996, 93 ff.; Ahrens 1998, 53 ff.), denn Ropohl behandelt diese lediglich als Option (Ropohl 1979, 115) und lehnt anderslautende Erkenntnisse der soziologischen Forschung strikt ab (ebd., 49).

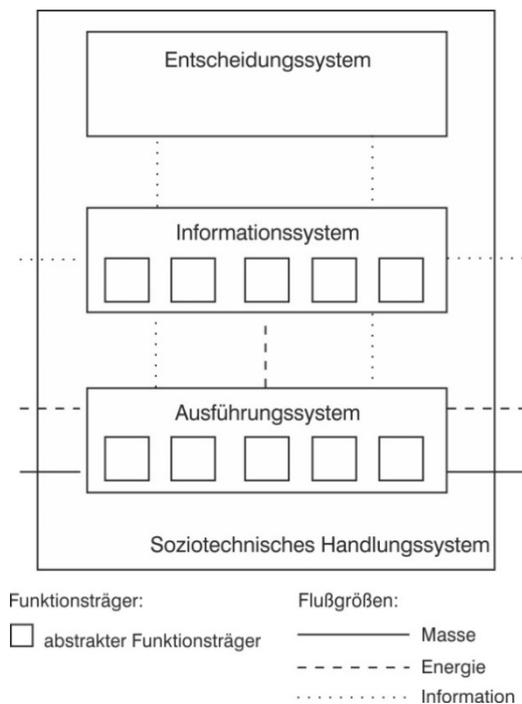


Bild 3: Modell eines abstrakten soziotechnischen Handlungssystems [11]

In seiner Außensicht gleicht das Modell sozio-technischer Handlungssysteme (Bild 3) dem EVA-Modell (Bild 1). Wie dieses verarbeitet es Energie, Masse und Information. Intern ist es jedoch funktional in drei Subsysteme ausdifferenziert: Im Ausführungssystem finden alle stofflichen und energetischen Prozesse statt. Daten und Befehle werden vom Informationssystem verarbeitet und das Entscheidungssystem gibt die Ziele des Handelns vor.

In Bezug auf die Autonomie sozio-technischer Systeme ist von besonderer Bedeutung, dass das Entscheidungssystem über keine direkte Verbindung zur Umwelt verfügt. Stattdessen kommuniziert es mit der Umwelt über den Umweg des Informations- und des Ausführungssystems, wobei diese beiden Subsysteme quasi als Filter wirken.

Dies stellt gegenüber der ursprünglichen Fassung von Ropohl (1979, 130 ff.) insofern eine modifizierte Interpretation dar, als dieser Handlungssysteme als prinzipiell offen betrachtet und ihre relative Isoliertheit lediglich als Maßnahme zur Modellvereinfachung versteht. In späteren Ausgaben des zitierten

Werks (1998, 2009) ist diese Aussage zwar ohne Angabe von Gründen entfallen, doch die Konsequenz daraus wird aufrechterhalten. So erklärt Ropohl sowohl in der ersten (1979, 115) als auch in der jüngsten Ausgabe (2009, 98), dass Handlungssysteme sowohl aufgrund vorgegebener als auch aufgrund selbst gesetzter Ziele handeln. Autonomie im Sinne von Selbstbestimmung, Unabhängigkeit und Entscheidungsfreiheit bleibt also lediglich eine Option.

Tatsächlich sind soziale Systeme jedoch immer autonom. Um dies zu demonstrieren, sei angenommen, dass das Modell soziotechnischer Handlungssysteme auf der untersten Ebene menschliche Individuen als personale Handlungssysteme abbildet (Bild 4, links). Ferner sollen an dieser Stelle die Funktionsträger eingeführt werden, die im Informations- und im Ausführungssystem bestimmte Aufgaben erledigen. So kann der Mensch Handlungen mit oder ohne technische Hilfe durchführen. Lediglich Entscheidungen sind stets dem Menschen vorbehalten und können nicht an Technik delegiert werden. Auf diese Weise bleibt die Verantwortung für die Folgen von Handlungen, insbesondere auch für den Einsatz von Technik zur Unterstützung von Handlungen, an den Menschen gebunden. Das bedeutet, dass die Ausführung von Funktionen automatisiert werden kann, jedoch nie autonom erfolgt.

Eine noch weitere Zerlegung des Modells, beispielsweise in einzelne technische Systeme, ist in diesem Kontext nicht sinnvoll, weil als Element eines Systems nur behandelt werden kann, „was für ein System als nicht weiter auflösbare Einheit fungiert (obwohl es, mikroskopisch betrachtet, ein hochkomplexes Zusammengesetztes ist)“ (Luhmann 1984, 43). In diesem Sinne

lassen sich Handlungsaspekte stets nur auf andere Handlungsaspekte beziehen. Ropohl (2009, 44) meint das Gleiche, wenn er Technik stets als Bestandteil sozio-technischer Entstehungs- und Verwendungszusammenhänge betrachtet.

Eine Anwendung des Modells auf höheren Ebenen ist dagegen möglich und sinnvoll. Bildet man damit beispielsweise ein Unternehmen ab, so kann man das Entscheidungssystem vereinfachend als Unternehmensführung, das Informationssystem als mittleres Management und das Ausführungssystem als operative Unternehmensebene interpretieren (ebd., 111 f.). Legt man nun die Deutung von Ropohl zugrunde, so lässt sich daraus zwar nicht zwingend eine hierarchische Weisungskette ableiten, aber eine solche ist durchaus möglich. Anders verhält es sich jedoch, wenn man das Modell konsequent beibehält. Dann ergibt sich für die Unternehmensebene eine Struktur, wie sie in Bild 4 rechts dargestellt ist. Darin wird deutlich, dass Befehle der hierarchisch übergeordneten Instanzen nicht direkt an die Entscheidungssysteme der untergeordneten Instanzen adressiert werden können, sondern diese nur über den Umweg und Filter der Informationssysteme erreichen, so dass die Befehle für die untergeordneten Instanzen lediglich einen Teil der Randbedingungen bilden, unter denen Entscheidungen autonom getroffen werden.

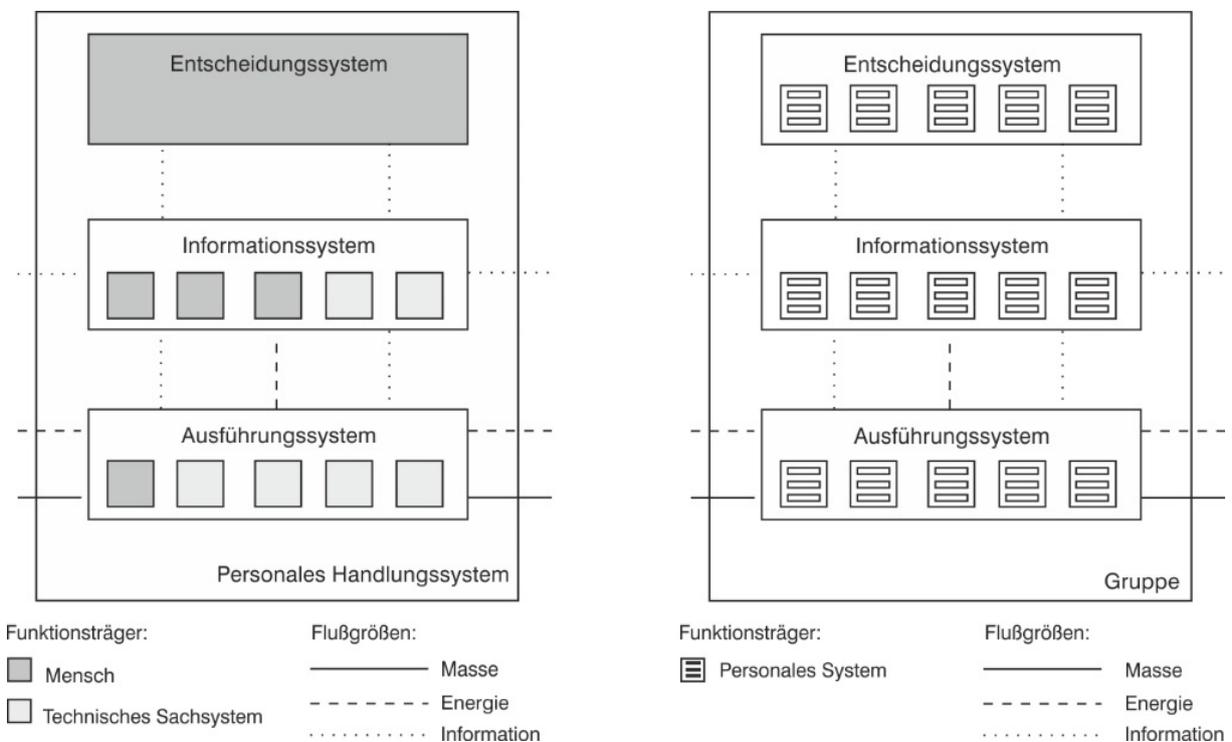


Bild 4: Modell eines personalen Handlungssystems und einer Gruppe personaler Handlungssysteme [11]

Autonomie bedeutet nicht, dass Handlungssysteme autistisch sind in dem Sinne, dass sie sich von ihrer Umwelt vollkommen abkoppeln. Allerdings werden Vorgaben nicht strikt befolgt, sondern selektiv zur Kenntnis nehmen, interpretiert und mit eigenen Vorstellungen korreliert. Das Ergebnis dieses komplexen Verarbeitungsprozesses kann, muss aber nicht mehr viel mit dem zu tun haben, was externe/hierarchisch übergeordnete (weisungsbefugte) Instanzen erwarten. Praktisch lässt sich dies in Unternehmen beispielsweise an den informellen Strukturen beobachten, die regelmäßig neben der formalen Organisation existieren und oft einen erheblichen Einfluss auf das betriebliche Geschehen nehmen (Krohn & Küppers 1990, 121).

Schlussfolgerungen

Auf der Grundlage dieses Modells lässt sich nun klären, wie technische Systeme gestaltet werden müssen, die im Sinne des humanzentrierten Ansatzes intelligente, autonome und sich selbst organisierende Menschen dabei unterstützen, ihre Fähigkeiten zu entfalten. Dabei ist es unerheblich, ob die Technik künstlich intelligent ist oder nicht. Entscheidend ist, dass sie sich dem Menschen unterordnet, dessen Autonomie respektiert und seine daraus resultierende Fähigkeit zur Selbstorganisation stärkt. Zwei konkrete Beispiele sollen zeigen, wie sich auf dieser Grundlage geeignete von weniger geeigneter Technik unterscheiden lässt.

Ein Beispiel für Technik, die den neuen Erkenntnissen der soziologischen Forschung nicht gerecht wird, sind Manufacturing Execution Systems (MES) (Kletti 2013, 36 ff.). Sie unterstellen, dass Kopf- und Handarbeit im Sinne des Scientific Management noch immer streng getrennt sind, so dass der intelligenten Führung alle Informationen verfügbar gemacht werden müssen, die für notwendig erachtet werden, um die nicht intelligenten, lediglich ausführenden Instanzen zu lenken. Betriebs- und Maschinendatenerfassung sollen dazu maximale Transparenz schaffen. Die oft geringe Akzeptanz dieser Datenerfassungssysteme bei den Betroffenen und der große Einfluss informeller Strukturen zeigen exemplarisch die praktischen Grenzen dieses Ansatzes.

Ein Beispiel für Technik, die das Potenzial hat, den humanzentrierten Ansatz zu fördern, sind sogenannte Assistenzsysteme (Ahrens 1998, 92). Solche Systeme sollen im Sinne eines Beistands Unterstützung bieten, wenn und soweit diese gewünscht wird, jedoch keine Vertretungsvollmacht haben und insoweit auch nicht von sich aus tätig werden. Dafür ist es allerdings erforderlich, die Autonomie der sozio-technischen Handlungssysteme zu wahren und nicht etwa durch das inzwischen weit verbreitete Ausspähen von Daten zu unterlaufen.

Die konkreten Funktionen, die in Assistenzsystemen automatisiert werden können und sollten, unterscheiden sich gar nicht wesentlich von denen üblicher MES, denn im Kern geht es in Produktion und Logistik immer um die gleichen Aufgaben: Allokation von Ressourcen, Distribution von Waren und Bereitstellung von Daten. Lediglich die Art der Ausführung ändert sich teilweise, wenn Funktionen wie diese dezentralisiert werden.

Die Allokation von Ressourcen erfordert im Einzelnen die Lösung von Zuordnungs- und Reihenfolgeoptimierungsproblemen. Bei einer Dezentralisierung ändert sich nur die Art der Zuordnungsoptimierung, da diese nicht mehr von zentraler Stelle aus erfolgt, sondern unter autonomen Arbeitssystemen ausgehandelt wird, beispielsweise auf der Basis von Marktmechanismen (Ahrens 1998, 70 ff.). Die Art der Reihenfolgeoptimierung kann dagegen weitgehend beibehalten werden (ebd., 131 ff.). Die Distribution von Waren erfordert im Einzelnen die Standortwahl und die Routenplanung, und auch dabei ist nur die Standortoptimierung zu dezentralisieren, da es für eine dezentrale Routenoptimierung schon heute brauchbare Lösungen wie z. B. Navigationssysteme gibt. Schließlich müssen nutzungsspezifische Daten in Echtzeit bereitgestellt und aufbereitet werden. Dabei ist nur die Zielgruppe der in diesem Fall ebenfalls als intelligent angenommenen, ausführenden Instanzen zu ergänzen und die Informationsversorgung des Managements ist so umzugestalten, dass sie die Autonomie der untergeordneten Instanzen sowie deren Fähigkeit und Bereitschaft zur Selbstorganisation im Sinne des Ganzen respektiert.

Folgt man dem humanzentrierten Ansatz, so liegt die eigentliche Herausforderung nicht in der Technik, denn viele technische Lösungsansätze, die im Rahmen des Forschungsprogramms Industrie 4.0 gefordert werden, liegen längst vor und müssen nur noch zur Marktreife gebracht werden. Beispiele dafür sind Anwendungen der Künstlichen Intelligenz wie Agentensysteme (Göhner 2013, 3 ff.) oder Algorithmen zur Aufbereitung großer Datenmengen (Ertel 2013, 177 ff.).

Die eigentliche Herausforderung liegt darin, die Trennung von Kopf- und Handarbeit in der Tradition des Scientific Management zu überwinden und operativ tätigen Menschen zuzutrauen, dass sie unter geeigneten Bedingungen auch und gerade dann einen guten Job machen, wenn sie sich selbst organisieren. Dies ist vor allem in Systemen erforderlich, deren Komplexität das Maß übersteigt, das nach Willke (2014, 67 ff.) hierarchisch beherrschbar ist. Beispiele dafür sind große Unternehmen sowie Unternehmen, die komplexe Produkte herstellen oder Produkte mit Hilfe komplexer Fertigungstechnologien produzieren. Und dass es solche Unternehmen gibt, wird zur Begründung der Notwendigkeit des Forschungsprogramms Industrie 4.0 immer wieder betont: „Die größte Herausforderung der technologischen Entwicklung der letzten Jahrzehnte ist die ins Unendliche [sic] wachsende Komplexität der Produkte beziehungsweise Systeme, die zugleich zu einer ebenso ins Unendliche [sic] tendierenden Komplexität der industriellen Prozesse zu ihrer Entwicklung und Fertigung geführt hat“ (Sendler 2013, 16).

Die Schwierigkeit, sich Lenkung ohne Hierarchie vorzustellen, hat vermutlich zwei Ursachen: Erstens ist Hierarchie sehr erfolgreich. Das verleitet zu der Annahme, dass ein Mehr des Guten zu noch Besserem führt (Willke 2014, 68). Zweitens sind mögliche Alternativen weder hinreichend bekannt noch ausgereift. Mit der interventionistischen, der experimentellen und der transformatorischen Lenkung haben Krohn und Küppers (1990) allerdings schon in den 1990er Jahren vielversprechende Ansätze vorgestellt (Ahrens 1998, 63 ff.), die in die gleiche Richtung gehen wie die von Willke (2014, 99 f.) so genannte Kontextsteuerung. In diese Richtung weiterzudenken erscheint im Lichte des humanzentrierten Ansatzes mindestens ebenso attraktiv wie die Entwicklung von Technologien, die diesen Ansatz, beispielsweise in Form von Assistenzsystemen, unterstützen.

Staaten haben einen vergleichbaren Übergang von einer hierarchischen Lenkung zu einer Kontextsteuerung – ausgelöst durch die Amerikanische Unabhängigkeitsbewegung und die Französische Revolution – bereits vollzogen. Die Ergebnisse sind Demokratie und Marktwirtschaft. Allerdings sind Staaten einem höheren Druck ausgesetzt als Unternehmen, denn sie sind geografisch und traditionell stärker gebunden und ihre Mitglieder können das Haus nicht ohne weiteres verlassen. Daher können sich Staaten nicht einfach auflösen. Unternehmen fällt es dagegen leichter, alternativ zu einem Wandel in vergleichbarer Größenordnung den Weg der Insolvenz zu wählen, denn sie sind ersetzbar. Daher ist die Einführung nicht-hierarchischer Organisationsformen weniger ein Akt der Notwendigkeit, sondern eher ein Akt unternehmerischer Klugheit. Das wiederum spricht dafür, dass ein solcher Wandel, wenn er denn überhaupt vollzogen wird, nicht in Form einer Revolution stattfinden wird, sondern evolutionär.

Literatur

- Ahrens, V.: Unterstützung von Entscheidungsprozessen in dezentral organisierten Produktionssystemen. In: Scherer, E.; Schönsleben, P.; Ulrich, E. (Hrsg.): Werkstattmanagement – Organisation und Informatik. v/d/f. Zürich 1996, S. 83-112
- Ahrens, V.: Dezentrale Produktionsplanung und -steuerung – Systemtheoretische Grundlagen und Anwendungspotentiale. VDI. Düsseldorf 1998
- Auerbach, T.; Kamps, S.; Veselovac, D.; Klocke, F.: Digitales Technologiewissen durch intelligente Fertigungssysteme. ZWF 108 (2013) 7-8, S. 561-565
- Bauernhansl, T.: Industrie 4.0: Nur ein Medienhype oder die schöne neue Produktionswelt? Interview geführt von Nikolaus Fecht. ZWF 108 (2013) 7-8, S. 573-574
- Bretschneider-Hagemes, M.: Anforderungen an Ambient-Intelligence-Technologien aus soziologischer Sicht – Vorschlag eines Pflichtenheftes. Zeitschrift für Arbeitswissenschaft 67 (2013) 3, S. 181-186

- Ertel, W.: Grundkurs Künstliche Intelligenz – Eine praxisorientierte Einführung. 3. Aufl. Springer Vieweg. Wiesbaden 2013
- Florian, M.; Hillebrandt, F.: Einführung – Sozionische Beiträge zu Adaption und Lernen von und in Organisationen. In: Dies. (Hrsg.): Adaption und Lernen von und in Organisationen – Beiträge aus der Sozionik. VS Verlag für Sozialwissenschaften. Wiesbaden 2004
- Foerster, H. v.: Zukunft der Wahrnehmung: Wahrnehmung der Zukunft. In: Schmidt, S. J. (Hrsg.): Heinz v. Foerster: Wissen und Gewissen – Versuch einer Brücke. Suhrkamp. Frankfurt am Main 1993, S. 194-210
- Geisberger, E.; Broy, M. (Hrsg.): agendaCPS – Integrierte Forschungsagenda Cyber-Physical Systems. Berlin 2012
- Göhner, P. (Hrsg.): Agentensysteme in der Automatisierungstechnik. Springer Vieweg. Berlin, Heidelberg 2013
- Kagemann, H.; Wahlster, W.; Helbig, J. (Hrsg.): Deutschlands Zukunft als Produktionsstandort sichern – Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0. Frankfurt am Main 2013
- Kieser, A.; Ebers, M. (Hrsg.): Organisationstheorien. 6. Aufl. Kohlhammer. Stuttgart 2006
- Kletti, J.: Industrie 4.0 braucht MES-Lösungen. Interview geführt von Olaf Sauer. Productivity Management 18 (2013) 1, S. 36-37
- Krohn, W.; Küppers, G.: Selbstreferenz und Planung. In: Niedersen, U., Pohlmann, L. (Hrsg.): Selbstorganisation. Jahrbuch für Komplexität in den Natur-, Sozial- und Geisteswissenschaften. Duncker & Humboldt. Berlin 1990
- Luhmann, N.: Soziale Systeme – Grundriß einer allgemeinen Theorie. Suhrkamp. Frankfurt am Main 1996
- Ropohl, G.: Eine Systemtheorie der Technik – Zur Grundlegung der Allgemeinen Theorie. Hanser. München, Wien 1979
- Ropohl, G.: Allgemeine Technologie – Eine Systemtheorie der Technik. 2. Aufl. Hanser. München, Wien 1998
- Ropohl, G.: Allgemeine Technologie – Eine Systemtheorie der Technik. 3. Aufl. Universitätsverlag Karlsruhe. Karlsruhe 2009
- Russell, S.; Norvig, P.: Künstliche Intelligenz – Ein moderner Ansatz. 3. Aufl. Pearson Studium. München 2012
- Russwurm, S.: Software: Die Zukunft der Industrie. In: Sendler, U. (Hrsg.): Beherrschung der industriellen Komplexität mit SysLM. Springer Vieweg. Heidelberg u. a. 2013, 21-36
- Sendler, U.: Industrie 4.0 – Beherrschung der industriellen Komplexität mit SysLM (Systems Lifecycle Management). In: Ders. (Hrsg.): Beherrschung der industriellen Komplexität mit SysLM. Springer Vieweg. Heidelberg u. a. 2013, 1-19
- Simon, W.: Blick in die Zukunft: Industrie 4.0 – Die Fusion von Produktionstechnik, Informationstechnologie und Internet. Industrial Engineering (2013) 2, S. 38-40
- Spur, G.; Eßer, G.; Dörr, N.: Digitale Automatisierung – eine Herausforderung für die vernetzte Fabrik der Zukunft. ZWF 107 (2012) 12, S. 879-882
- Spur, G.: Phasensprünge in der Produktionswirtschaft – Industrie 4.0 als innovative Herausforderung. ZWF 108 (2013) 7-8, S. 566-570
- Wiendahl, H.-P.: Betriebsorganisation für Ingenieure. 7. Aufl. Hanser. München 2010
- Willke, H.: Systemtheorie III – Steuerungstheorie. 3. Aufl. UVK/UTB. München 2014