

Förderliches Gestalten komplexer Mensch-Maschine-Systeme Eine disziplinenübergreifende Herausforderung

Jens ZIEGLER, Leon URBAS

*Institut für Automatisierungstechnik, Professur für Prozessleittechnik,
Technische Universität Dresden
Georg-Schumann-Str. 11, D-01187 Dresden*

Kurzfassung: Förderliches Gestalten ist ein werteorientiertes Entwurfsprinzip, das den Menschen als verantwortungsbewusstes, lernwilliges und kommunikatives Wesen begreift. Als wertvoller Teilhaber an der Funktion eines anpassungs- und widerstandsfähigen Mensch-Maschine-Systems wird der Mensch mit seinen physiologischen, kognitiven und emotionalen Leistungsvoraussetzungen und Entwicklungsmöglichkeiten bei der Gestaltung positiv berücksichtigt. Ergebnis eines förderlichen Entwurfs sind technische Systeme mit Nahtstellen, die ein effektives und effizientes Arbeiten ermöglichen, langfristige Dequalifizierungserscheinungen und Gesundheitsschäden minimieren und den Nutzern gestatten ihre Fähigkeiten im Sinne des Gesamtsystems einzubringen und weiterzuentwickeln. Dieser Beitrag beschreibt am Beispiel Cyber-Physischer Produktionssysteme die Beiträge und das Zusammenwirken aller beteiligten Forschungsdisziplinen und diskutiert die damit verbundenen Herausforderungen bei der Entwicklung eines praxistauglichen integrierten Entwicklungsprozesses.

Schlüsselwörter: Förderliches Gestalten, Cyber-Physisches System, Mensch-Maschine-System, Prozessführung

1. Motivation

Die exponentielle Entwicklung der Informations- und Kommunikationstechnologie (IKT) (Brynjolfsson & McAfee 2014) erlaubt die massenhafte Vernetzung technischer Systeme und eine umfassende Digitalisierung unserer Lebens- und Arbeitswelt. IKT wird damit zu einer *General Purpose Technology* mit dem Potenzial, die industrielle Produktion grundlegend zu verändern. Das Zukunftsprojekt Industrie 4.0 der High-Tech-Strategie der deutschen Bundesregierung adressiert diese Entwicklung und definiert als Entwicklungsziel sogenannte Cyber-Physische Produktionssysteme (CPPS). Diese sind gekennzeichnet durch eine enge Verknüpfung von realen (physischen) Artefakten (Objekte, Subjekte und Prozesse) mit informationsverarbeitenden (virtuellen) Artefakten über offene, teilweise globale und jederzeit miteinander verbundene Informationsnetze (VDI 2013). CPPS stellen dabei offene soziotechnische Systeme dar, die neben den heute häufig im Schwerpunkt betrachteten Sachsystemen auch vielfältige Handlungssysteme beinhalten.

Die Vernetzung über offene und globale Informationsnetze ist eine technisch vermeintlich kleine Innovation, hat aber große Auswirkung auf das Systemverhalten: Systeme können beliebig verkoppelt werden, Verbindungen können während der Betriebszeit verändert, beendet und neu aufgebaut werden, verfügbare Daten und Dienste können an beliebiger Stelle im CPS bereitgestellt und verwendet werden. Das ist die Basis für eine wesentlich höherwertige, dezentrale elektronische Daten-

verarbeitung. Diese ermöglicht eine zunehmende Automatisierung von komplexen regelbasierten und vermehrt auch kognitionsbasierten Informationsverarbeitungsaufgaben. In der Folge steigt der Grad der Selbstorganisation und Autonomie der Handlungssysteme kontinuierlich. Dadurch verändert sich die Rolle des Menschen in diesen Handlungssystemen. Positiv betrachtet eröffnet sich damit „die Chance, das Aufgabenspektrum der Mitarbeiter zu erweitern, ihre Qualifikation und Handlungsspielräume zu erhöhen und ihren Zugang zu Wissen deutlich zu verbessern. Um dieses Potenzial auch ausschöpfen zu können, müssen jedoch geeignete Theorien, Methoden und Technologien der Mensch-Technik-Kooperation weiterentwickelt werden (Hirsch-Kreinsen 2014, Urbas 2014).

Im folgenden Kapitel wird dazu das Entwurfsprinzip des Förderlichen Gestaltens vorgestellt. Es werden die theoretischen Grundlagen beschrieben und die Kernkonzepte des Förderlichen Gestaltens erläutert. In Kapitel 3 werden die beteiligten wissenschaftlichen Disziplinen und deren Zusammenwirken erörtert. Eine Diskussion der aktuellen Herausforderungen bei der Integration all dieser Disziplinen in einen praxistauglichen Entwicklungsprozess folgt in Kapitel 4, bevor der Beitrag mit einem Ausblick auf zukünftige Arbeiten schließt.

2. Förderliches Gestalten

Förderliches Gestalten ist ein werteorientiertes Entwurfsprinzip. Es begreift den Menschen als verantwortungsbewusstes, lernwilliges und kommunikatives Wesen und unabdingbares Element eines anpassungs- und widerstandsfähigen CPPS. Wird der Mensch mit seinen physiologischen, kognitiven und emotionalen Leistungsvoraussetzungen und Entwicklungsmöglichkeiten bei der Gestaltung positiv berücksichtigt, so ergeben sich soziotechnische Systeme, die ein effektives, effizientes und flexibles Arbeiten ermöglichen, langfristige Dequalifizierungserscheinungen und Gesundheitsbeeinträchtigungen minimieren und es den beteiligten Menschen gestatten ihre Fähigkeiten vertrauensvoll im Sinne des Gesamtsystems einzubringen und weiterzuentwickeln. Das Entwurfsprinzip des Förderlichen Gestaltens verbindet die vier Kernkonzepte Kompetenzförderlichkeit, Gesundheitsförderlichkeit, Anpassungsförderlichkeit und Vertrauensförderlichkeit und deren Wechselwirkungen mit dem Ziel einer proaktiven, persönlichkeitsförderlichen und ganzheitlichen Arbeitsgestaltung bei einer gleichzeitig wirtschaftlichen und zuverlässigen Gesamtsystemgestaltung. Im Folgenden werden die Kernkonzepte in aller Kürze vorgestellt (für eine detaillierte Darstellung sei auf Urbas (2014) verwiesen).

2.1 Kompetenzförderliches Gestalten

Kompetenz ist eine wesentliche Leistungsvoraussetzung für die verantwortliche Übernahme einer Funktion in einem höherautomatisierten Mensch-Maschine-System. Der Kompetenzbegriff umfasst neben der fachlichen Qualifikation auch die Disposition zur Bewältigung der Aufgaben, die koordinierte Anwendung verschiedener Einzelleistungen, sowie die Übertragung auf funktional ähnliche Kontexte. Eine kompetenzförderliche Gestaltung eines Mensch-Maschine-Systems geht über herkömmliche Hilfe- und Unterstützungssysteme deutlich hinaus. Förderliches Gestalten von MMS umfasst unter anderem Wirksamkeitsüberzeugung und Autonomieunterstützung zur Motivationsförderung (Badura 1997, Zühlke 2004), die Berücksichtigung der Lerntheorie Interaktiver Lernumgebungen einschließlich handlungsorientierten

Unterrichts und aktivem, hypothesengeleitetem Explorieren des Systems zum Aufbau von geeigneten mentalen Modellen (Barz et al. 2008) sowie die Anwendung der Prinzipien des Ecological Interface Design (Vicente & Rasmussen 1992) zur Förderung der Übertragung von Erfahrungswissen auf funktional ähnliche Kontexte und der damit einhergehenden kompetenzbasierten Informationsverarbeitung (Urbas et al. 2012).

2.2 Gesundheitsförderliches Gestalten

Die alleinige Betrachtung von Kompetenzförderlichkeit als Gestaltungsziel führt langfristig zu einer schädlichen Ausrichtung auf Effizienz, Kalkulierbarkeit und Voraussagbarkeit durch vereinheitlichte und gleichförmige Dienstleistung (Ladenthin 2010). Als Kontrapunkt wird daher eine gesundheitsförderliche Gestaltungsmaxime empfohlen, die den individuellen latenten und aktuellen Leistungsvoraussetzungen gerecht wird. Ein gesundheitsförderlich gestaltetes MMS vermeidet langfristige Gesundheitsschäden und fördert aktiv gesundheitsbewusstes Verhalten. Während ersteres durch ein elaboriertes Regelwerk, empirische Befunde und vielfältige Methoden und Werkzeuge gut unterstützt, ist das Gestaltungsziel gesundheitsbewusstes Verhalten Gegenstand aktueller Forschung. Eine weitere wesentliche Voraussetzung für die Gesundheitsförderung ist die Übereinstimmung von Anforderungen aus der Arbeitsaufgabe und der Qualifikation der Mitarbeiter (Büssing & Glaser 1993). Sowohl qualitative Unterforderung und Überforderung der Mitarbeiter führt zu Beeinträchtigungen emotionaler und letztlich gesundheitlicher Art (Schmidt & Luczak 2009).

2.3 Anpassungsförderliches Gestalten

Ein wesentliches Merkmal von CPPS ist deren Fähigkeit zur Anpassung an neue, nicht vorhergedachte oder nicht vorherdenkbare Situationen. Ein Ansatz ist die Absicherung gegen Störungen durch die Planung von Reserven und Barrieren, die Grundphilosophie des resilienten Entwurfs von Mensch-Maschine-Systemen. Einzelne Störungen oder Störungskombinationen dürfen dabei nicht zu einem Ausfall der Systemfunktion führen und müssen schnell wieder behoben werden können (in Anlehnung an Wreathall 2006). Zhang & Lin (2010) fordern darüber hinaus, dass ein System trotz Schädigung eine gewünschte Leistung erbringt. Die flexible Funktionsallokation auf Mensch und Maschine ist wesentliches Element einer anpassungsförderlichen Gestaltung, ebenso die Berücksichtigung der Veränderungsprozesse in den Lebenszyklen von Mensch, Maschine und Gesamtsystem. Dazu sind zum einen die Gestaltungsprozesse explizit auf diese Veränderlichkeiten auszurichten (Design for Evolution), zum anderen sind die wesentlichen Parameter dieser Veränderungen sowohl bei den technischen Komponenten als auch bei den menschlichen Akteuren des Systems.

2.4 Vertrauensförderliches Gestalten

Ein elementares Problem bei steigender Automatisierung und damit Autonomie technischer Systeme ist das richtige Maß an Vertrauen in das technische System. Parasuraman und Manzey (2010) zeigen die wesentlichen Faktoren für eine vertrauensförderliche Gestaltung auf. Über das Konzept der Verlässlichkeit (*dependability*, Avizienis et al. 2004) kann vertrauensförderliches Gestalten zum einen um Aspekte der Informationssicherheit im Sinne von Vertraulichkeit und der Echtheit von Nach-

richten erweitert werden, zum anderen erlauben die im Verlässlichkeitskonzept enthaltenen Elemente Zuverlässigkeit, Wartbarkeit und Verfügbarkeit die Vertrauensförderlichkeit mit der Anpassungsförderlichkeit zu vernetzen und somit zielgerichtet widerstandsfähige und flexible Mensch-Maschine-Systeme zu gestalten.

3. Relevante Forschungsdisziplinen für das Förderliche Gestalten

Die steigende Komplexität, Flexibilität und Leistungsfähigkeit der Informationsverarbeitung in CPPS stellt für die Systemgestaltung eine besondere Herausforderung dar. Es ist eine ausgeprägte Mischung von Erfahrungs- und Theoriewissen erforderlich, um das Potential der erhöhten Autonomie effektiv nutzen zu können. Insbesondere sind Strategien zu unterstützen, die es den Menschen im System erlauben, die technischen Komponenten und die komplexen Handlungssysteme in CPPS korrekt und vollständig zu erfassen und diese zielgerichtet für ihre Aufgaben einzusetzen.

Damit dieser Erfahrungsschatz an situationsgerechten Handlungsstrategien ausgebildet werden kann, müssen neben den klassischen Ingenieursdisziplinen (Verfahrens- bzw. Fertigungstechnik, Informationstechnik, Automatisierungs- und Regelungstechnik, Prozessleittechnik) weitere Disziplinen in den Entwicklungsprozess und ebenfalls in den anschließenden Bewertungsprozess des Systems einbezogen werden. Im Folgenden werden verschiedene Disziplinen vorgestellt, die auf der Grundlage des aktuellen Forschungsstands als wesentlich für das Förderliche Gestalten identifiziert worden sind. Es ist davon auszugehen, dass diese Aufzählung nicht vollständig ist.

Es wird Aufgabe der Arbeitswissenschaft und der Ingenieurpsychologie sein, Strategien, Strukturen und Bewertungsmethoden der Arbeitsorganisation und Arbeitsgestaltung zukünftiger CPPS im Hinblick auf die steigende Systemdynamik und die zunehmend dynamisierte Funktionsallokation zu entwickeln. Insbesondere die potenziellen Folgen auf die Leistungsfähigkeit und Leistungsbereitschaft der Menschen im System müssen unter dem Aspekt einer evolutionären Systementwicklung und einer beständigen – auch strukturellen – Veränderung des soziotechnischen Systems wesentlich intensiver bei der Systemgestaltung betrachtet werden. Auch hängt die Adaptionfähigkeit des CPPS wesentlich vom Adaptionsvermögen und -willen der menschlichen Akteure ab. Eine geeignete Gestaltung des Arbeitssystems ist mithin ein wesentlicher Faktor des anpassungsförderlichen Gestaltens.

Zur korrekten und vollständigen Erfassung und Bewertung des Systemzustands sind auch die physiologischen Parameter der menschlichen Akteure zu erfassen und daraus deren psychologische Konstitution und Disposition abzuleiten. Da in heutigen Systemen die Entscheidungskompetenz für Systemänderungen allein bei den menschlichen Akteuren liegt, kann diese Erfassung und Interpretation ebenfalls durch Menschen erfolgen. Sollen (zumindest lokal) prozessuale und strukturelle Änderungen in den Handlungssystemen autonom durch technische initiiert werden, so müssen diese Systeme in die Lage versetzt werden, die menschlichen Akteure in diesen Systemen korrekt zu erfassen. Die Disziplinen Biopsychologie und Medizin stellen dazu in zunehmendem Maße Methoden und Werkzeuge bereit (Boucsein, 2000). Es ist Aufgabe dieser Disziplinen, eine geeignete Erfassung des Zustands der menschlichen Akteure im CPPS für eine systemtechnische Gesamtbewertung bereitzustellen, die in die (autonome) Systemanpassung einfließt.

Es ist Aufgabe der Lern- und Entwicklungspsychologie die Integration selbstregulierter, generativer Lernaktivitäten in soziotechnische Systeme zu befördern mit dem

Ziel eines kontinuierlichen Kompetenzerwerbs und Vertrauensbildung am Arbeitsplatz. Dazu gehört auch eine geeignete tutorielle Feedbackgestaltung im System zur Maximierung der Lerneffekte und der Nutzermotivation.

Komplexe CPPS werden mutmaßlich mit den heutigen Verfahren der signalorientierten Prozessführung bzw. Fertigungsüberwachung nicht mehr effektiv beherrschbar sein. Perspektivisch ist eine Transition hin zu einer zustandsorientierten, kennzahlbasierten Prozessführung zu erwarten, die auf einer Bewertung der Erreichung von Systemzielen und -parametern (*KPI*) statt auf der Überwachung von Prozesssignalen basiert. Da diese Systemziele jedoch maßgeblich auf der Grundlage ökonomischer (und ökologischer) Entscheidungen spezifiziert werden, ist eine deutlich stärkere Einbindung der Disziplin der Betriebswirtschaft notwendig. Diese Disziplin hat die Aufgabe, wirtschaftliche Entscheidungsprozesse zu explizieren, die systemtechnische Adaption an wirtschaftliche Vorgaben und Zielstellungen zu unterstützen sowie die Systemgestalter dabei zu unterstützen, diese Prozesse für den menschlichen Akteur im System nachvollziehbar zu gestalten.

Für eine rechtskonforme Gestaltung selbstadaptiver, (teil)autonomer Systeme ist die Disziplin der Rechtswissenschaften in die Entwicklung einzubeziehen. Aus übergeordneten sozialen Normen und Regelungszielen müssen technische Anforderungen an CPPS abgeleitet werden (Hoffmann et al. 2011). Rechtliche Belange müssen intensiver als bislang in die Technikentwicklung eingebunden werden, um anpassungsförderliche Systeme rechtskonform realisieren zu können. Rechtliche Anforderungen resultieren dabei aus der rechtlichen Interpretation sozialer Funktionen, die von einem soziotechnischen System betroffen werden, die wiederum konform zu den allgemeingültigen Rechtsregeln und den zu Grunde liegenden Rechten sein müssen. Dies ist umso schwieriger, je mehr CPPS über Ländergrenzen und damit verschiedene Rechtsräume hinweg agieren.

Die einzelnen Disziplinen können heute bereits auf einen großen Fundus an Konzepten, Methoden und Werkzeugen zurückgreifen. Teilweise existieren auch bereits etablierte Schnittstellen und Harmonisierungsbestrebungen zwischen einzelnen Disziplinen. Die geänderten Strukturen und Inhalte der Entwicklungsaufgaben in integrierten Entwicklungsprozessen für CPPS erfordern jedoch eine deutliche Weiterentwicklung und Harmonisierung dieser Vorarbeiten, um eine nachhaltige interdisziplinäre Zusammenarbeit aller Disziplinen zu ermöglichen und zu befördern.

4. Diskussion und Ausblick

Die Einführung cyber-physischer Produktionssysteme wird sicherlich schrittweise erfolgen, die Definitionen und Architekturkonzepte in den vielfältigen Veröffentlichungen zu diesem Thema weisen noch eine hohe Heterogenität auf. Der in diesem Beitrag vorgestellte werteorientierte Ansatz des Förderlichen Gestaltens von komplexen Cyber-Physischen Produktionssystemen greift verschiedene bewährte Gestaltungsansätze auf und integriert sie zu einem ganzheitlichen Entwurfsprinzip, um dieser Entwicklung frühzeitig Rechnung zu tragen. Die Ausführungen haben deutlich gemacht, dass sich das Entwurfsprinzip des Förderlichen Gestaltens mithin noch in einem frühen Entwicklungsstadium befindet und sich gemeinsam mit den vielfältigen Arbeiten zu CPPS weiterentwickeln wird. Der vorgestellte Ansatz hat den Anspruch, die Gestaltung informationsintensiver, wissensbasierter Arbeit durch die Kombination von Konzepten, Methoden und Werkzeugen verschiedenen Forschungsdisziplinen so zu unterstützen, dass komplexe CPPS ökonomisch vertretbar kompetenzförder-

lich, gesundheitsförderlich, anpassungsförderlich und vertrauensförderlich ausgestaltet sind. Es wurde aufgezeigt, welche Disziplinen dazu wesentliche Beiträge leisten können und welche Herausforderungen heute deren Zusammenwirken beschränken. Der nächste logische Schritt besteht nun darin, diese Beschränkungen und Konflikte aufzulösen und ein integriertes Vorgehensmodell sowie darauf aufbauende Entwicklungsprozesse zu erarbeiten, Konzepten, Methoden und Werkzeuge zu vereinheitlichen und das Potenzial des vorgestellten Ansatzes im praktischen Einsatz zu belegen.

5. Literatur

- Avizienis, A, Laprie, J-C, Randell, B, Landwehr, C (2004) Basic Concepts and Taxonomy of Dependable and Secure Computing. IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing 1, 11-33.
- Boucsein, W (Ed.) (2000) Engineering psychophysiology: issues and applications. CRC Press.
- Bandura, A (1997) Self-efficacy / the exercise of control. New York: Freeman.
- Barz, T, Satriadarma, B, Wozny, G, Urbas, L (2008) Visualisierung der Zuverlässigkeit modellgestützter Automatisierungslösungen. Tagungsband AUTOMATION 2008, VDI press.
- Brynjolfsson, E, & McAfee, A (2014) The second machine age: work, progress, and prosperity in a time of brilliant technologies. WW Norton & Company.
- Büssing, A, Glaser, J (1993). Qualifikationsanforderungen und Qualifikationsmöglichkeiten als gesundheits- und persönlichkeitsfördernde Merkmale in der Arbeitstätigkeit. Zeitschrift für Arbeits- u. Organisationspsychologie 37, 154–162.
- Hirsch-Kreinsen, H, Weyer, J (2014) Wandel von Produktionsarbeit–„Industrie 4.0 “. Soziologisches Arbeitspapier 38.
- Hoffmann, A, Jandt, S, Hoffmann, H, Leimeister, JM, & für Informationstechnik-Gestaltung, F (2011) Integration rechtlicher Anforderungen an soziotechnische Systeme in frühe Phasen der Systementwicklung. 6. Konferenz Mobile und ubiquitäre Informationssysteme (MMS), 72-76.
- Ladenthin, V (2010) Kompetenzorientierung als Indiz pädagogischer Orientierungslosigkeit. Vierteljahrsschrift für wissenschaftliche Pädagogik 86 (3), 346–358.
- Parasuraman, R, Manzey, DH (2010). Complacency and Bias in Human Use of Automation: An Attentional Integration. Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society 52 (3), S. 381-410
- Schmidt, L; Luczak, H (2009) Gestaltung von Arbeitssystemen nach ergonomischen und gesundheitsförderlichen Prinzipien. In: Bullinger, H-J, Spath, D, Warnecke, H-J & Westkämper, E (Eds): Handbuch Unternehmensorganisation - Strategien, Planung, Umsetzung. Berlin: Springer.
- Urbas, L, Ziegler, J, Doherr, F (2012) Produktergonomie in der Prozessautomatisierung. Zeitschrift für Arbeitswissenschaft 66(2-3), 169-182.
- Urbas, L (2014) Conducive Design. Förderliche Gestaltung von Mensch-Maschine-Systemen. Tagungsband 7. VDI/VDE Fachtagung useware 2014, VDI press, 3-10.
- VDI/VDE-Gesellschaft für Mess- und Automatisierungstechnik (2013) Cyber-Physical Systems: Chancen und Nutzen aus Sicht der Automation. VDI Thesen und Handlungsfelder. VDI press.
- Vicente, KJ, Rasmussen, J (1992) Ecological interface design: Theoretical foundations. IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics 22, 1-18.
- Wreathall, J (2006). Properties of resilient organisations: an initial view. In: Hollnagel, E, Woods, D, Leveson, N (Eds.), Resilience Engineering: Concepts and Precepts. Ashgate, Aldershot, UK
- Zhang, WJ, Lin, Y (2010) On the principle of design of resilient systems- application to enterprise information systems. Enterprise Inf. Systems 4 (2), 99-110.
- Zühlke, D (2004) Useware-Engineering für technische Systeme. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag.