

Heinz-Jürgen Rothe

Mensch-Maschine-Systeme in der Industrie 4.0 – Zur Aktualität der ingenieurpsychologischen Arbeiten von Friedhart Klix

1. Allgemeine Probleme künftiger Arbeit

Der Begriff „Industrie 4.0“ ist in wenigen Jahren seit der Hannover-Messe 2013 zu einem Schlagwort mit nicht exakt definierter Bedeutung geworden. Die Zahl der Publikationen, die dieses Schlagwort im Titel führen, ist kaum noch zu übersehen.

Aus unserer Sicht lassen sich ein weiter und ein enger Bedeutungshof unterscheiden. Im weiteren Sinne umfasst Industrie 4.0 Digitalisierungsprozesse in vielen Lebensbereichen. So erwartet Bendel (2017) z.B. die Vernetzung von Fahrerassistenzsystemen in selbstständig fahrenden Autos, die Daten sammeln und zu Werkstätten und Hersteller weiterleiten oder Operations-, Pflege-, Therapie- und allgemeine Serviceroboter, die menschliche Fachkräfte ergänzen, rund um die Uhr relevante Informationen auswerten und elektronische Patientenakten anlegen. Im Kern geht es also darum, dass bisher von Menschen ausgeführte Informationsverarbeitungsprozesse und daraus resultierende Eingriffshandlungen in reale Prozesse von technischen Systemkomponenten übernommen, menschliche Arbeit ersetzt wird. Folgerichtig kommt es dadurch zu Veränderungen bezüglich der Arbeitsaufgaben und der Arbeitsbedingungen von Erwerbstätigen. In dem Maße, wie die neuen Informations- und Kommunikationstechnologien in der Wirtschaft eines Industrielandes wie Deutschland angewendet werden, sind immer mehr Arbeitsplätze von diesen Veränderungen betroffen. Das charakterisiert die „Arbeit 4.0“.

Im engeren Sinne geht es um die Automatisierung von Wertschöpfungsketten zur Herstellung von Produkten. Informations- und Kommunikationstechnologien werden mit Produktionsprozessen verknüpft, es entstehen cyberphysische Systeme (CPS). Diese sollen im günstigsten Fall ermöglichen, dass nach der Auftragserteilung die Herstellung eines Produktes von der Materialbeschaffung über den Bearbeitungsprozess bis zur Auslieferung des Produktes an den Kunden automatisiert organisiert ist. Das setzt voraus, dass es zu

einem Informationsaustausch zwischen technischen Systemkomponenten kommt. Man spricht vom sogenannten Internet der Dinge, in dem durch Cloud-Computing Datenbanken und Programme von verschiedenen Prozessen entlang der Wertschöpfungskette aufgebaut, gespeichert und untereinander vernetzt werden. Offen sind vor allem solche grundsätzlichen Fragen wie die nach den neuartigen Merkmalen von Inhalt und Struktur der geänderten Arbeitsanforderungen und deren Auswirkungen auf die Gesundheit von Erwerbstätigen sowie nach Art und Umfang der Folgen des Automatisierungsprozesses auf den Arbeitsmarkt.

2. Spezifische Probleme der Veränderung von Arbeitstätigkeiten

2.1 Technisierungsstufen

In den Arbeitswissenschaften besteht Konsens darüber, dass menschliche Arbeit nach Technisierungsstufen klassifiziert werden kann. So differenziert z.B. Luczak (1993) zwischen manuellen, mechanisierten und automatisierten Arbeitssystemen. Sie haben sich in der Menschheitsgeschichte nacheinander entwickelt und lassen sich weiter untergliedern. So ist die manuelle Arbeit durch den Gebrauch von (Hand-)Werkzeugen gekennzeichnet; die für deren Handhabung benötigte Energie muss der Mensch aufbringen. In mechanisierten Arbeitssystemen bedient der Mensch Maschinen, die wesentliche Verrichtungen des Menschen übernommen haben und die durch technische Energieformen angetrieben werden. Über die Mechanisierung von Arbeitsvollzügen hinausgehend übernimmt in automatisierten Arbeitssystemen das technische Teilsystem auch wesentliche Komponenten der Steuerung und Kontrolle der Prozesse zur Herstellung von Produkten.

2.2 Arbeit in Mensch-Maschine-Systemen

Es ist das Verdienst von Friedhart Klix, bereits 1971 auf der Grundlage einer differenzierten Analyse der damals in verschiedenen industriellen Bereichen zu findenden automatisierten Arbeitssysteme unabhängig vom jeweiligen Automatisierungsgrad, das Gemeinsame der Arbeitssituationen in Bezug auf die Anforderungen an den Menschen herausgearbeitet zu haben, indem er definierte (Klix 1971a, S. 43):

„Unter einem Mensch-Maschinen-System verstehen wir die zeitweilige Verbindung und Wechselwirkung zweier Systeme, eines biologischen, historischen und speziell gesellschaftlichen Gesetzen der Informationsverarbeitung unterworfenen steuernden Systems und eines physikalischen Gesetzen unterworfenen gesteuerten Systems mit dem Ziel, höchstmöglichen Nutzen durch die bestmöglich-

che Zusammenfassung, Kontrolle und Führung einer Vielzahl von Prozessparametern oder Operationen zu erzielen. Im Besonderen gilt: Beide Systeme nehmen für die Zeit ihrer Verbindung wechselseitig Information in kodierter Form auf. Dabei verändert das gesteuerte System je nach der aufgenommenen Information seinen momentanen Zustand, das steuernde System hingegen verändert je nach der Rückinformation über diese Zustandsänderung und der gesellschaftlichen Zielstellung seines Handelns seine Entscheidungen oder seine Entscheidungsstrategie.“

Die Relevanz dieser Definition für den aktuellen wissenschaftlichen Diskurs belegen z.B. die Ergebnisse des Forschungsprojektes. „Psychische Gesundheit in der Arbeitswelt – Wissenschaftliche Standortbestimmungen“ (vgl. Robelski 2016) und das „Handbuch Industrie 4.0“ (vgl. Vogel-Heuser et al. 2017).

Zwei Aspekte der Klix'schen Mensch-Maschine-System-Definition sind meines Erachtens für die Lösung von Problemen der aktuellen Forschung von Relevanz. Zum einen geht es um den Hinweis, dass beide Systeme wechselseitig Information in kodierter Form aufnehmen und zum anderen, dass sie unterschiedlichen Gesetzen unterliegen. Auf ersteres kommen wir noch zurück, letzteres ist zwar scheinbar trivial, hat aber meines Erachtens im Zusammenhang mit der Rolle der „künstlichen Intelligenz“ von Computern in der Industrie 4.0 große Bedeutung. Die für cyber-physische Systeme charakteristische Verbindung zwischen realen technischen Systemen und software-technischen Systemen des Internets schließt auch die Verbindung mit Multiagentensystemen ein. Darunter sind nach Brödner (2017) interagierende, autonome Software-Agenten zu verstehen, die Daten aus der Umgebung aufnehmen, proaktiv nach eigenen Algorithmen, zumeist mittels maschineller Lernverfahren, verarbeiten und resultierende Daten wieder nach außen abgeben. Diese Daten sind also das Ergebnis elektronischer Informationsverarbeitung, sie besitzen emergente Eigenschaften und deren Nutzung kann daher die vom Systementwickler vorgegebenen Algorithmen und Programme im weiteren Prozessablauf modifizieren. Aber: Emergenz ist nicht gleich Intelligenz. Intelligentes Verhalten führt zu effizienteren Problemlösungen, also zu Zeitersparnis oder Aufwandsminimierung. Ob die in einem konkreten automatisierten Produktions- oder Dienstleistungsprozess durch ein Multiagentensystem vorgeschlagenen Modifikationen des automatischen Ablaufs zu einer Effizienzerhöhung führen oder im ungünstigsten Fall die Erreichung vorgegebener Ziele verhindern, kann auf Grund des emergenten Charakters der Vorschläge nicht vorausgesehen werden. Während in der Planungsphase von Prozessabläufen die Auswirkungen emer-

gener Ereignisse beobachtet und im Falle negativer Effekte für die Zielerreichung diese eliminiert werden können, muss bei realen Prozessen beim Auftreten emergenter Informationen der Ablauf gestoppt und eine Meldung an die das Gesamtsystem kontrollierenden menschlichen Akteure erfolgen. Diese müssen dann – unter Umständen unter Einsatz von Assistenzsystemen – prüfen, welche Auswirkungen die konkreten emergenten Daten haben können und daraufhin Entscheidungen bezüglich des weiteren Prozessablaufes treffen. Das heißt, die „künstliche Intelligenz“ des technischen Systems führt nicht automatisch zu einer effizienteren Herstellung von Produkten oder Dienstleistungen, aber zu einer neuen Qualität des Informationsaustausches zwischen Mensch und Maschine. Diesbezügliche Forschungen dazu müssen verstärkt werden.

2.3 Zur Optimierung des Informationsaustausches im Mensch-Maschine-System

Als eines der Hauptprobleme zur Optimierung des Informationsaustausches in Mensch-Maschine-Systemen charakterisierte Klix (1971a) das Kodierungsproblem. Es basiert auf der von ihm (vgl. Klix 1971b) differenziert begründeten Arbeitsweise der menschlichen Sinnesorgane bei der Verhaltensregulation des Individuums in seiner Umgebung, die durch variierende spezifische Reizkonfiguration gekennzeichnet ist: Die von den Rezeptorsystemen wahrgenommenen Reizkonfigurationen müssen danach klassifiziert werden, welcher Umgebungszustand sie geprägt oder kodiert hat. Entscheidend dabei ist: Die physikalischen Reize besitzen Bedeutungen, die im Gedächtnis gespeichert sind, d.h., irgendwann erlernt worden sein müssen. Ist das nicht der Fall, sind sie für das Individuum Lichtreize, Geräusche oder Gerüche, mit denen es nichts anzufangen weiß. Oder anders gesagt, physikalische Reize sind gewissermaßen zu Codes für Objekte, Sachverhalte oder Vorgänge geworden, die bestimmte individuelle Verhaltensweisen induzieren, wenn sie in bekannten Kontexten auftreten.

In Mensch-Maschine-Systemen verkompliziert sich dieser Dekodierungsprozess (siehe Abb. 1).

„Die wesentlichen steuerbaren oder zu kontrollierenden Größen eines Fertigungsprozesses werden durch elektronische Messfühler aufgenommen, in Impulse bzw. in Spannungsschwankungen umgesetzt und auf einem Tableau sichtbar gemacht. Die physikalisch wirkenden Signale werden dort erst einer natürlichen Kodierung unterworfen und dem Wahrnehmungssystem des Operateurs zugänglich gemacht. Dessen Nervensystem muss jetzt die Reizeigenschaften am Tableau

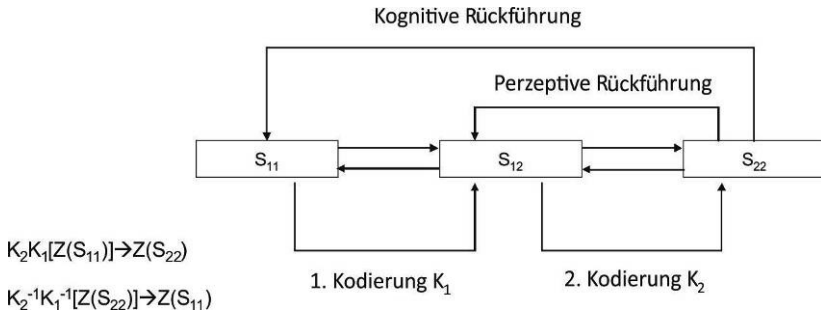


Abb. 1: Die Kodierungsstufen in Mensch-Maschine-Systemen

S_{11}, S_{12}, S_{22} : Systemzustände (vgl. Klix 1971a)

entziffern und daraus rückwärts die Zustandsgrößen des Fertigungsprozesses identifizieren. Es wird ganz klar, dass zwei Kodierungsstufen unterschieden werden müssen, nämlich (1) die Umsetzung der Prozessparameter in skalierbare physikalische Zustandsänderungen wie z.B. Potentialsprünge, Feldstärkeänderungen, Stufen variabler Lichtemission u.a., (2) die Umsetzung dieser physikalischen Zustandsänderungen in Prozessgrößen, die in der Lage sind, Erregungsveränderungen der Rezeptorfelder an den Sinnesorganen hervorzurufen. Wir müssen bei der ingenieurpsychologischen Behandlung von Mensch-Maschine-Systemen von der zweiten Kodierungsstufe ausgehen. Über sie läuft die Verbindung der Menschen für den zu steuernden Prozess. Hier kommt es darauf an, dass die physikalischen Zustandsänderungen als Kodierungen des realen Prozesses so dargestellt werden, dass jeder zu unterscheidende Zustand auch eine sensorisch eindeutig unterscheidbare Darstellung erhält und dass die Menge der zu kontrollierenden Zustandsänderungen auch die Menge der verarbeitbaren Signaländerungen nicht übersteigt.“ (Klix 1971a, S. 57/58)

Und ergänzend:

„Welche Parameter in welche physikalischen Zustandsänderungen überführt, welche miteinander verknüpft und welche unabhängig voneinander dargeboten werden, ist auch deshalb so wesentlich, weil der Operateur, von der zweiten Kodierung ausgehend, die mit dem erkannten Signal übertragene reale Prozessgröße erschließen muss.“ (Ebd., S. 59)

Seit den 70er-Jahren des vergangenen Jahrhunderts wurden insbesondere in den europäischen Ländern und den USA unzählige Studien einerseits zur Entwicklung von Kodezeichen durchgeführt, die geeignet sind, Informationen über Merkmale technischer Systeme an den Menschen im Mensch-Ma-

schine-System zu übermitteln. Sie lassen sich nach ihrer Modalität und Komplexität klassifizieren. Tabelle 1 enthält typische Beispiele.

Tab. 1: Kodes in Mensch-Maschine-Systemen

<i>Modalität</i>	<i>Beispiele</i>
Visuell	Symbole und Piktogramme digitale Anzeigen Diagramme Schaltbilder Animationen und Videos Abkürzungen, Wörter und Texte
Auditiv	Töne Klänge gesprochene Wörter und Texte

Hinsichtlich der „Signalgeber“ hat sich eine Entwicklung von maschinengebundenen Messgeräten über Displays und Tableaus bis zu computergebundenen Monitoren vollzogen. Andererseits ging es um die Gewinnung von Erkenntnissen über die Kodezeichengestaltung. Sie konzentrierten sich sowohl auf die schnelle und fehlerfreie Wahrnehmbarkeit der Zeichen als auch auf die Minimierung des kognitiven Dekodierungsaufwandes zur Ermittlung ihrer Bedeutung. Ihren Niederschlag fanden die Forschungsergebnisse in Gesetzen und Normen (vgl. z.B. DIN EN ISO 9241 2008; BMAS 1998). Durch die Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin wurde eine umfangreiche Literaturrecherche zur Standortbestimmung bezüglich der Erkenntnisse zur „Psychischen Gesundheit in der Arbeitswelt“ publiziert, die allein für das Themenfeld Mensch-Maschine-Interaktion auf der Auswertung von mehr als 20.000 Publikationen basiert. Im Ergebnis der letztlich in die inhaltliche Analyse speziell zur Gestaltung der Schnittstelle zwischen Maschine und Mensch einbezogenen 40 empirischen Studien kommt die Autorin in ihrem Abschlussbericht (vgl. Robelski 2016, S. 78) allerdings zu der Schlussfolgerung, dass

„im Hinblick auf neue Technologien und Interaktionskonzepte wie sie im Rahmen von Industrie 4.0 (z.B. Echtzeitfähigkeit, zunehmende Vernetzung) propagiert werden, das vorliegende Scoping Review nur wenige Aussagen [trifft]. Obwohl die Datenbankrecherchen den Stand von Juli 2014 ausweisen und der Großteil der extrahierten Studien aus den vergangenen 10 Jahren entstammt, werden neue Technologien von einem vergleichsweise geringen Teil der Studien im Review betrachtet.“

Aus meiner Sicht gibt es dafür vor allem zwei methodologische Ursachen:

(1) Trotz häufiger Bekundungen der Notwendigkeit waren Ingenieurpsychologen nur sehr selten in die Entwicklungsteams bei Automatisierungsvorhaben einbezogen. Die Lösung der Kodierungsprobleme auf der 1. Stufe erfolgte intuitiv und pragmatisch durch Ingenieure, Informatiker und Technologen. Der Erkenntnisgewinn bezüglich der Optimierung des Informationsaustausches im Allgemeinen und der konkreten Kodierungen im Speziellen – also auf der 2. Kodierungsstufe – erfolgte im Nachhinein im Ergebnis von „Korrektur- oder Trainingsstudien“ mittels alternativer Kodealphabete und Dialogtechniken.

(2) Felduntersuchungen experimentellen Charakters mit realen Mensch-Maschine-Systemen wurden aus ökonomischen Gründen selten durchgeführt. Es handelte sich stattdessen in der Regel um Simulationsexperimente im Labor mit Probanden, die über unterschiedliche Fachkenntnisse auf dem Gebiet des Mensch-Maschine-Systems, für das der Informationsaustausch simuliert wurde, verfügten (z.B. Überwachung der Steuerung eines Kraftwerkes, Montage eines Autos). In mehr als 50% aller Studien waren es Studenten. Daraus resultierte die Notwendigkeit zur Durchführung von vorherigen Trainings bezüglich der Bedeutung von verwendeten Kodezeichen und zur Reduzierung der mit den dekodierten Informationen zu lösenden Aufgaben auf einfache kognitive Leistungen.

Essenzielle Beiträge zur menschengerechten Umsetzung des Industrie 4.0-Konzeptes kann die Ingenieurpsychologie aber erbringen, wenn sie sich in ihren künftigen Forschungen zur Schnittstellengestaltung von Mensch-Maschine-Systemen auf die 1. Kodierungsstufe im Klix'schen Sinne konzentriert: In der einschlägigen Literatur werden die in cyber-physischen Systemen zu erwartenden Anforderungen an den Menschen nur allgemein beschrieben. So spricht Hirsch-Kreinsen (2015, S. 16) von einem „Upgrading geforderter Qualifikationen infolge der Substituierung einfacher Tätigkeiten durch computertechnische Automatisierung“. Kagermann (2017, S. 240) erwartet, dass in der Industrie 4.0 der Mensch „weniger als ‚Maschinenbediener‘ eingesetzt [wird], sondern mehr in der Rolle des Erfahrungsträgers, Entscheiders und Koordinators“. In frühen Phasen der Entwicklung konkreter cyber-physischer Systeme muss also geklärt werden, worin die Aufgaben bei der Kontrolle und Steuerung des Systems bestehen und insbesondere welche Informationen zur Aufgabenlösung benötigt werden. Diese In-

formationen betreffen Objekte, Zustände und Ereignisse des jeweiligen automatisierten Produktions- oder Dienstleistungsprozesses. Es müssen die konstituierenden Merkmale dieser zu kodierenden Informationen differenziert erfasst und davon ausgehend die Kodezeichen und deren Gestaltung bestimmt werden. Auf der 2. Kodierungsstufe ist dann zu prüfen, ob die daraus resultierenden Dekodierungsprozesse auf der Grundlage individueller Gedächtnisleistungen bewältigt werden können oder ob zusätzlich Assistenzsysteme zur Verfügung gestellt und deren Nutzung ebenfalls projiziert werden muss. Zudem ist zu gewährleisten, dass die projizierten Arbeitssituationen nicht zu Gesundheitsgefährdungen bei den Betroffenen führen. Zweifellos kann dieser Forschungsprozess nur optimal erfolgen, wenn Ingenieure, Informatiker und Psychologen kooperieren. Seitens der Arbeits- und Ingenieurpsychologie sind hierbei zunächst vor allem die Erkenntnisse über prospektive Arbeitsanalyse, Arbeitsgestaltung und Arbeitsbewertung (vgl. Hacker 1986) einzubringen. Für die Bestimmung der Kodealphabeten und für die konkrete Kodezeichengestaltung können die Erkenntnisse aus den vorliegenden Simulationsexperimenten über menschliche Dekodierungsleistungen genutzt werden.

3. Fazit

Bezüglich des Entwicklungstrends der Mensch-Maschine-Interaktion schlussfolgerte Klix vor mehr als 40 Jahren (Klix 1971a, S. 48):

„(1) Die Grundstruktur für die Entwicklung von Mensch-Maschine-Systemen bleibt erhalten: Das dem Menschen über den Prozess übertragene Informationsangebot wird zunehmend reduziert; dies aber nur relativ und nicht absolut. Die relative Senkung der rückgemeldeten Information wird durch zunehmende Komplexität des zu steuernden Prozesses aufgewogen und erhöht dadurch die ökonomische Fondsbelastung der Entscheidungshandlung von Operateuren.

(2) Das ursprüngliche informationsvermittelnde Teilsystem wird zu einem echten informationsverarbeitenden System umgewandelt. Damit werden Kontroll-, Überwachungs- und Entscheidungsfunktionen des Menschen vom Maschine-System übernommen. Es gewinnt damit den Charakter eines kybernetischen Systems.

(3) Die Kontroll- und Steuerfunktion des Menschen geht von einer mehr sensorischen und motorischen Beanspruchung mehr und mehr über in eine kognitive, vorwiegend geistige Arbeitsanforderung.

(4) In der höchsten Entwicklungsphase sind Mensch-Maschine-Systeme und Mensch-Rechner-Systeme identisch.“

Abstrahiert man von den konkreten Erscheinungsformen der Verknüpfung der neuen Informations- und Kommunikationstechnologien mit Produktions- und Dienstleistungsprozessen – die für die Industrie 4.0 charakteristisch sind – und fokussiert auf die Mensch-Maschine-Interaktion in cyber-physischen Systemen, kommt man heute im Kern zu den gleichen Schlussfolgerungen. In der Wissenschaftsgeschichte ist es nur wenigen Wissenschaftlern gelungen, in genialer Weise zu ihren Lebzeiten künftige Entwicklungen in ihrem Forschungsgebiet zutreffend vorauszusehen. Friedhart Klix gehört zweifellos dazu.

Literatur

- Bendel, Oliver (2017): Die Industrie 4.0 aus Sicht der Ethik. In: Reinheimer, Stefan (Hg.): Industrie 4.0. Herausforderungen, Konzepte und Praxisbeispiele. Wiesbaden: Springer, S. 161–171
- Brödner, Peter (2017): Die dritte Welle der „automatischen Fabrik“ – Mythos und Realität semiotischer Maschinen. In Banse, Gerhard; Busch, Ulrich; Thomas, Michael (Hg.): Digitalisierung und Transformation. Industrie 4.0 und digitalisierte Gesellschaft. Berlin: trafo Wissenschaftsverlag, S. 165–184
- Bundesministerium für Arbeit, Gesundheit und Soziales (BMAS) (1998): Bildschirmarbeitsverordnung. BGB II Nr. 124/1998
- DIN EN ISO 9241-110: 2008-09 (2008): Ergonomie der Mensch-Maschine-System-Interaktion – Grundsätze der Dialoggestaltung. Berlin: Beuth
- Hacker, Wilfried (1986): Arbeitspsychologie. Psychische Regulation von Arbeitstätigkeiten. Berlin: VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften
- Hirsch-Kreinsen, Harmut (2015): Einleitung: Digitalisierung industrieller Arbeit. In Hirsch-Kreinsen; Hartmut; Ittermann; Peter; Niehaus; Jonathan (Hg.): Digitalisierung industrieller Arbeit. Die Vision Industrie 4.0 und ihre sozialen Herausforderungen. Baden-Baden: Nomos, S. 9–30
- Kagermann, Henning (2017): Chancen von Industrie 4.0 nutzen. In: Vogel-Heuser, Brigitte; Bauernhansl, Thomas; ten Hompel, Michael (Hg.): Handbuch Industrie 4.0 Bd. 4. Allgemeine Grundlagen. Berlin: Springer Nature, S. 235–257
- Klix, Friedhart (1971a): Die Optimierung des Informationsaustausches in Mensch-Maschine-Systemen als psychologische Aufgabenstellung – Versuch einer Präzisierung des Gegenstandsgebietes der Ingenieurpsychologie in der sozialistischen Industrie. In Klix, Friedhart; Neumann, Jochen; Seeber, Andreas; Timpe, Klaus-Peter (Hg.): Psychologie in der sozialistischen Industrie. Berlin: VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften, S. 40–74
- Klix, Friedhart (1971b): Information und Verhalten. Kybernetische Aspekte der organismischen Informationsverarbeitung. Einführung in naturwissenschaftliche Grundlagen der Allgemeinen Psychologie. Berlin: VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften

- Robelski, Swantje (2016): Psychische Gesundheit in der Arbeitswelt. Mensch-Maschine-Interaktion. In: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) (Hg.): Forschung Projekt F 2353. Dortmund u.a.O.: BAuA
- Vogel-Heuser, Brigitte; Bauernhansl, Thomas; ten Hompel, Michael (Hg.) (2017): Handbuch Industrie 4.0 Bd. 4. Allgemeine Grundlagen. Berlin: Springer Nature