

Psychische Gesundheit in der Arbeitswelt

Mensch-Maschine-Interaktion

baua: Bericht

**Forschung
Projekt F 2353**

S. Robelski

**Psychische Gesundheit
in der Arbeitswelt**

Mensch-Maschine-Interaktion

Dortmund/Berlin/Dresden 2016

Der vorliegende Bericht wurde im Rahmen des BAuA-Forschungsprojekts „Psychische Gesundheit in der Arbeitswelt - Wissenschaftliche Standortbestimmung“ erstellt und ist dem Themenfeld „Technische Faktoren“ zugeordnet. Weitere Informationen zum Projekt finden Sie unter www.baua.de/psychische-gesundheit. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei der Autorin.

Autorin: Swantje Robelski
Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin

Titelbild: eckedesign, Berlin

Titelgestaltung: eckedesign, Berlin

Herausgeber: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA)
Friedrich-Henkel-Weg 1 - 25, 44149 Dortmund
Postanschrift: Postfach 17 02 02, 44061 Dortmund
Telefon: 0231 9071-2071
Telefax: 0231 9071-2070
E-Mail: info-zentrum@baua.bund.de
Internet: www.baua.de

Berlin:
Nöldnerstr. 40 - 42, 10317 Berlin
Telefon: 030 51548-0
Telefax: 030 51548-4170

Dresden:
Fabricestr. 8, 01099 Dresden
Telefon: 0351 5639-50
Telefax: 0351 5639-5210

Nachdruck und sonstige Wiedergabe sowie Veröffentlichung, auch auszugsweise, nur mit vorheriger Zustimmung der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin.

www.baua.de/dok/7930568

DOI: 10.21934/baua:bericht20160713/4d

ISBN 978-3-88261-198-4



Abstract

Definition des Arbeitsbedingungsfaktors

Im Rahmen des Projekts „Psychische Gesundheit in der Arbeitswelt – wissenschaftliche Standortbestimmung“ ist es zunächst erforderlich, eine Definition der Arbeitsbedingungsfaktoren vorzunehmen. Für die Mensch-Maschine-Interaktion (MMI) gilt, dass diese eine Folge der zunehmenden Automatisierung ist. Bei der Automatisierung übernehmen Maschinen und Automaten (computergeführte Maschinen) Funktionen, die zuvor vom Menschen ausgeführt worden sind. Der Umfang der Funktionen, die von Maschinen und Automaten verrichtet werden, ist hoch und kann neben der Ausführung von Handlungen auch in der Übernahme von Funktionen der menschlichen Informationsverarbeitung bestehen. Grundsätzlich ist die Interaktion von Mensch und Maschine dadurch gekennzeichnet, dass der menschliche Part des Systems dem technischen Part Aufgaben, Ziele und vorhandene Einschränkungen vorgibt und in der Folge die Maschine oder den Automaten kontrolliert (Vorgabe von Start und Stopp, Modifikation der Ausführung der Aufgabe). Das Resultat der Interaktion sind bspw. Informationen, Produkte oder Energie.

Zur Erreichung der vorgegebenen Ziele ist es von Bedeutung, eine geeignete Funktionsteilung zwischen Mensch und Maschine festzulegen sowie die Schnittstellen (Ein- und Ausgabevorkehrungen) zu gestalten, da diese gemeinsam die psychischen und physischen Anforderungen für den Bediener bestimmen.

Messung des Arbeitsbedingungsfaktors

Die Messung der Mensch-Maschine-Interaktion erfolgt in vielfältiger Weise und reicht von objektiv überprüfbar und variierbaren Systemeigenschaften über die Erfassung von natürlichen Bedingungen bis hin zum Einsatz psychometrischer Messinstrumente wie Fragebögen. Zudem lassen sich enorme Unterschiede dabei feststellen, in welchem Umfang die MMI charakterisiert wird.

Insbesondere im Bereich der Funktionsteilung, bei der häufig die Interaktion von Menschen mit einem automatisierten System betrachtet wird, kann eine Definition der unabhängigen Variablen (UV) anhand objektiver Kriterien beobachtet werden (144 Einzelmessungen). Hier finden sich Studien, in denen bspw. Grad und Level der Automation variiert werden. Auch weitere Systemeigenschaften wie die Zuverlässigkeit lassen sich durch Ereignishäufigkeiten, Fehler- und Ausfallraten objektiv und numerisch beschreiben. Insbesondere in experimentellen Interventionsstudien wird die Variation dieser Bedingungen durch den Einsatz von Simulationsprogrammen erzielt, in denen verschiedene Arbeitsumgebungen (z. B. Prozesskontrolle) simuliert werden. Die experimentelle Untersuchung von Schnittstellen kann ebenfalls mithilfe von klar definierten Kriterien und abgrenzbaren Merkmalen erfolgen. Beispiele hierfür bestehen in der technischen Variation des Darstellungsmediums (z. B. Tablet-PC oder Head-Mounted Displays [HMD]) und der Darstellungsart. Studien, die im Feld durchgeführt werden, greifen meist auf deskriptive Merkmale zurück, um die vorhandenen Maschinen und Systeme verschiedenen Gruppen zuzuordnen und die stattfindende Mensch-Maschine-Interaktion zu verdeutlichen (34 Einzelmessungen). Beispielhaft sei hier die Einteilung von Produktionssystemen anhand der technischen Entwicklung und der Veränderung der Arbeitsaufgaben als manuell, teilautomatisiert und hochautomatisiert genannt. Die Operationalisierung konkreter Aspekte der Mensch-Maschine-Interaktion durch psychologisch orientierte Konstrukte erfolgt in nur wenigen Studien. Dafür werden häufig psychometrische Messinstrumente eingesetzt, die Aspekte wie den Grad der technologischen Kopplung, technologische Abstraktheit oder technologische Unsicherheit erfassen. Unter den extrahierten Studien befinden sich nur

wenige Arbeiten, in denen Selbstauskünfte der Nutzer gegeben werden (31 Einzelmessungen) oder bei denen Merkmale durch eine andere Person eingeschätzt werden (7 Einzelmessungen). Die eingesetzten Instrumente sind überwiegend nicht standardisiert, sodass kaum Aussagen zu ihren Gütekriterien getroffen werden können. Einige Studien berichten lediglich die interne Konsistenz, die von den Skalen im Rahmen der jeweiligen Untersuchungen erreicht wird.

Erkenntnisstand zu Beanspruchungen und Beanspruchungsfolgen

Die Extraktion der gesicherten Erkenntnisse zu Beanspruchung und Beanspruchungsfolgen folgt im Scoping Review einer Dreiteilung des Arbeitsbedingungsfaktors MMI in die Merkmale Funktionsteilung, Schnittstellengestaltung und Bedienung. Insgesamt ermöglicht die innerhalb des Scoping Reviews erfasste Studienlage keine Aussagen über den Zusammenhang zwischen Funktionsteilung und Merkmalen der psychischen Gesundheit. Aus den Studien kann jedoch abgeleitet werden, dass Grad (degree of automation, DOA) und Level der Automation (level of automation, LOA) sowie die Art der LOA-Zuweisung (statisch oder adaptiv) sich auf die Beanspruchung der Bediener auswirken. Ein zunehmender Automationsgrad und höhere Automationslevel können die subjektive Beanspruchung verringern. Langfristige Beanspruchungsfolgen sind anhand der vorliegenden Studienlage nicht ableitbar. Zum Zusammenhang zwischen der Funktionsteilung in komplexen Systemen und Arbeitszufriedenheit bzw. Motivation ermöglichen die extrahierten Studien keine Aussagen. Im Hinblick auf die Leistung lassen sich für hohe Automatisierungsgrade Vorteile in Routinesituationen erkennen, die jedoch in Ausnahmesituationen selten gehalten werden können. Die Art der LOA-Zuweisung und das letztlich vorhandene Automatisierungslevel wirken sich vereinzelt auf Leistungsparameter aus, jedoch ohne ein klares Muster erkennen zu lassen. Die Studien weisen zudem darauf hin, dass das ausgewählte Prinzip der Funktionsteilung als Stressor (z. B. Einschränkung der Autonomie) oder als Ressource (z. B. Fähigkeitserweiterung) in den Handlungs- und Entscheidungsspielraum der Bediener eingreifen kann. Der Handlungs- und Entscheidungsspielraum stellt somit eine Brücke zwischen dem Arbeitsbedingungsfaktor MMI und der psychischen Gesundheit dar.

Für das Merkmal Schnittstellengestaltung können bestehende Erkenntnisse zu den Vorteilen ergonomischer Gestaltung bestätigt werden. Insbesondere die funktionale und redundante Darstellung von Informationen sowie die Anwendung von Gestaltprinzipien gehen mit einer erhöhten Nutzerzufriedenheit und Leistungsvorteilen einher. Bei der Arbeit mit modernen Technologien wie HMDs kann es zu kurzfristigen körperlichen Beschwerden kommen. Über langfristige Beanspruchungsfolgen können im Rahmen des Scoping Reviews ebenso keine gesicherten Aussagen getroffen werden wie über den Einfluss der Schnittstellengestaltung auf die Arbeitszufriedenheit und Motivation.

Im Bereich der Bedienung von Maschinen und Systemen lässt sich ein negativer Effekt von enger technologischer Kopplung auf die mentale Gesundheit und die intrinsische Arbeitszufriedenheit feststellen. Auch zeigen sich Effekte für den Zusammenhang zwischen Eigenschaften des Systems (z. B. Systemzuverlässigkeit) und der Leistung sowie der Vertrauensbewertung der Bediener. Zuverlässige Systeme sind demnach mit einer höheren Leistung und einem stärkeren Vertrauen in das System verbunden. Mit vornehmlich niedrigen Effektstärken können Aspekte der Bedienung auch Einfluss auf andere Merkmale der Arbeitsaufgabe und -organisation (z. B. Zeit- und Methodenkontrolle) ausüben.

Gestaltungswissen

Die gewonnenen Erkenntnisse zum Zusammenhang zwischen dem Arbeitsbedingungsfaktor MMI und den abhängigen Variablen sollten sich in der Ableitung von konkretem Gestaltungswissen wiederfinden. Insgesamt können die Vorteile der ergonomischen Gestaltung bestätigt werden. Dies gilt sowohl für die Gestaltung von Arbeitsmitteln als auch für die Gestaltung von Schnittstellen. Die redundante Darstellung von Informationen, die Anwendung von Gestalt-Prinzipien und die qualitative Integration von Informationen sind nur einige Aspekte, die dabei eine Rolle spielen. Hier kann zudem auf das bestehende Normen- und Regelwerk verwiesen werden, das viele erprobte Gestaltungsprinzipien bereitstellt (z. B. DIN EN ISO 9241).

Ulichs Ansatz folgend, verknüpft die Arbeitsaufgabe das menschliche und das technische System miteinander (Ulich, 2005). Daher ist es von Bedeutung, die Anforderungen der Aufgabe auch bei der Gestaltung der MMI zu berücksichtigen. Darüber hinaus sollte die Passung zwischen menschlichem und technischem System im Fokus stehen. Dies kann erfolgen, indem zukünftige Nutzer in den Technologieentwicklungsprozess einbezogen werden. Auch die umfangreiche Kenntnis des Funktionsumfangs und der Eigenschaften von Systemen kann zur erfolgreichen MMI beitragen. In komplexen Systemen gestaltet sich die Ableitung von Gestaltungsempfehlungen schwierig, da zahlreiche Wechselwirkungen zwischen der Art der technischen Umsetzung und den nutzerorientierten Outcomes bestehen. Allgemein kann es in hochautomatisierten Systemen jedoch empfehlenswert sein, Nutzern einen Zugriff auf Rohdaten zu ermöglichen und sie durch verschiedene Aktivitäten „in der Schleife“ zu halten.

Bezug zum Wandel der Arbeit

Eine bedeutende Thematik, die im Rahmen des Scoping Reviews berücksichtigt wird, ist der Wandel der Arbeit. Hier ist erkennbar, dass dieser sich in den Studien zum Arbeitsbedingungsfaktor MMI widerspiegelt. Neue Technologien wie Roboter, Datenbrillen und Systeme der erweiterten Realität werden im Hinblick auf ihre gesundheits- und leistungsbezogenen Auswirkungen untersucht. Im Zuge der technologischen Entwicklung und der fortschreitenden Automatisierung kann auch eine Entwicklung der Forschungsschwerpunkte beobachtet werden. Während Studien aus den 1980er-Jahren vermehrt Aspekte der computerintegrierten Produktion und der Einführung von computergesteuerten Werkzeugmaschinen thematisieren, betrachten aktuellere Studien besonders die Einflüsse von Funktionsteilung in komplexen automatisierten Systemen.

Die demografische Entwicklung stellt eine weitere Facette des Wandels der Arbeit dar. Altersbezogene Aspekte spielen in der Mehrzahl der extrahierten Studien jedoch eine untergeordnete Rolle. Dies gilt sowohl für mögliche Unterschiede zwischen älteren und jüngeren Beschäftigten als auch für die altersdifferenzierte Gestaltung von Arbeitsmitteln.

Forschungsbedarf

Trotz der umfangreichen Literatursichtung bleiben zahlreiche offene Fragen bestehen, aus denen sich neue Forschungsfragen ableiten lassen. So zeigen sich im Scoping Review sowohl hinsichtlich der eingesetzten Forschungsdesigns als auch hinsichtlich der untersuchten Stichproben deutliche Schwerpunkte im Bereich der experimentellen Interventionsstudien sowie der studentischen Stichproben. Daher gilt es zunächst, das bestehende Wissen aus experimentellen Arbeiten vermehrt im Feld zu überprüfen und dabei auch mit Arbeitstätigen zusammenzuarbeiten.

Weiterer Forschung bedarf es zudem zu der Frage, ob bestehende Schnittstellen- und Interaktionskonzepte auch auf die Arbeit mit neuen Technologien übertragen werden können oder ob neue Formen der Zusammenarbeit gefunden werden müssen. Zudem bleibt zu prüfen, welche Arbeitsaufgaben sich tatsächlich für den Einsatz neuer Technologien eignen. Die technologiezentrierte Perspektive und die Orientierung an technologischen Aspekten des Mensch-Maschine-Systems, die sich auch im Ansatz von Industrie 4.0 widerspiegeln, sollten einer ganzheitlichen Betrachtung weichen. Diese betont das Zusammenspiel von Mensch und Maschine in einem Arbeitssystem und trägt zur Entwicklung von integrierten Konzepten der MMI bei.

Die Untersuchung der umfangreichen Wechselwirkungen zwischen der Art der Funktionsteilung und den abhängigen Variablen sowie zwischen den abhängigen Variablen untereinander stellt einen weiteren Ansatzpunkt für zukünftige Forschungsarbeiten dar. Insbesondere die Zusammenhänge zwischen dem Wunsch nach Kontrollaktivitäten, Systemvertrauen, Beanspruchung und Leistung scheinen durch die vorliegenden Arbeiten noch nicht hinreichend geklärt. Möglichst konkrete Gestaltungsansätze, die in diesem Spannungsfeld zu einer fordernden und förderlichen MMI beitragen, können nur dann abgeleitet werden, wenn Art und Umfang der Wechselwirkungen bekannt sind.

Auch bedarf es weiterer Forschung im Hinblick darauf, wie sich Aspekte der Mensch-Maschine-Interaktion auf die psychische Gesundheit und auf die Arbeitszufriedenheit auswirken. Das Scoping Review zeigt besonders für diese beiden Bereiche eine deutliche Forschungslücke auf.

Inhaltsverzeichnis

1.	Überblick über Theorien und Modelle	10
2.	Betriebliche Rahmenbedingungen	14
3.	Eckdaten zur Literaturrecherche	16
4.	Beschreibung des Zusammenhangs zwischen dem Arbeitsbedingungsfaktor Mensch-Maschine-Interaktion und den Outcomes	19
4.1.	Erkenntnisse zum Merkmal Funktionsteilung	21
4.1.1.	Erkenntnisse zum Merkmal Funktionsteilung und Gesundheit	22
4.1.2.	Erkenntnisse zum Merkmal Funktionsteilung und Befinden	23
4.1.3.	Erkenntnisse zum Merkmal Funktionsteilung und Motivation sowie Arbeitszufriedenheit	27
4.1.4.	Erkenntnisse zum Merkmal Funktionsteilung und Leistung	28
4.1.5.	Erkenntnisse zum Merkmal Funktionsteilung und Arbeitsplatzcharakteristika	30
4.2.	Erkenntnisse zum Merkmal Schnittstelle	32
4.2.1.	Erkenntnisse zum Merkmal Schnittstelle mit Fokus auf Schnittstellengestaltung	34
4.2.2.	Erkenntnisse zum Merkmal Schnittstelle mit dem Fokus auf Interaktion	42
4.2.3.	Erkenntnisse zum Merkmal Schnittstellengestaltung mit dem Fokus auf Roboter	49
4.3.	Erkenntnisse zum Merkmal Bedienung und Überwachung	53
4.3.1.	Erkenntnisse zum Merkmal Bedienung/Überwachung und Gesundheit	53
4.3.2.	Erkenntnisse zum Merkmal Bedienung/Überwachung und Befinden	56
4.3.3.	Erkenntnisse zum Merkmal Bedienung/Überwachung und Motivation sowie Arbeitszufriedenheit	61
4.3.4.	Erkenntnisse zum Merkmal Bedienung/Überwachung und Leistung	63
4.3.5.	Erkenntnisse zum Merkmal Bedienung/Überwachung und Arbeitsplatzcharakteristika	68

5.	Bewertung und Diskussion der Ergebnisse zum Zusammenhang zwischen dem Arbeitsbedingungsfaktor Mensch-Maschine-Interaktion und den Outcomes	69
5.1.	Bewertung der Ergebnisse zum Zusammenhang zwischen Funktionsteilung und den Outcomes	69
5.2.	Bewertung der Ergebnisse zum Zusammenhang zwischen Schnittstellengestaltung und Outcomes	72
5.3.	Bewertung der Ergebnisse zum Zusammenhang zwischen Bedienung/Überwachung und den Outcomes	73
6.	Zusammenfassende Bewertung aller Merkmale des Arbeitsbedingungsfaktors, Schlussfolgerungen und Forschungsbedarf	74
7.	Aktuelles Gestaltungswissen auf Basis des bisherigen Literaturüberblicks	80
7.1.	Gestaltungswissen aus dem Normen- und Gesetzeswerk	80
7.2.	Gestaltungsempfehlungen	81
7.3.	Allgemeine Gestaltungsaussagen	85
8.	Suchstrings zum Arbeitsbedingungsfaktor Mensch-Maschine-Interaktion	87
9.	Literatur zum Arbeitsbedingungsfaktor Mensch-Maschine-Interaktion	93
10.	Normen- und Gesetzesverzeichnis	103
11.	Tabellenverzeichnis	104
12.	Abbildungsverzeichnis	104

1. Überblick über Theorien und Modelle

Für die Betrachtung der Mensch-Maschine-Interaktion erfolgt zunächst eine Definition des Begriffs Maschine. In der Maschinenrichtlinie heißt es dazu: Eine Maschine ist „[...] eine mit einem anderen Antriebssystem als der unmittelbar eingesetzten menschlichen oder tierischen Kraft ausgestattete oder dafür vorgesehene Gesamtheit miteinander verbundener Teile oder Vorrichtungen, von denen mindestens eines bzw. eine beweglich ist und die für eine bestimmte Anwendung zusammengefügt sind [...]“ (2006/42/EG). Grundsätzlich ist die Interaktion von Mensch und Maschine dadurch gekennzeichnet, dass der menschliche Part des Systems dem technischen Part Aufgabe, Ziele und vorhandene Einschränkungen vorgibt und in der Folge die Maschine oder den Automaten kontrolliert (Vorgabe von Start und Stopp, Modifikation der Ausführung der Aufgabe). Im Anschluss an die Interaktion erhält er ein Resultat wie bspw. Informationen, Produkte, Energie (Sheridan & Parasuraman, 2005). Im industriellen Arbeitskontext übernehmen Maschinen oder technische Hilfsmittel dabei zunehmend Funktionen, die zuvor vom Menschen ausgeführt wurden, was auch als Mechanisierung oder Automatisierung bezeichnet wird. Die Bandbreite der Aufgaben, die von Maschinen verrichtet werden, ist hoch. Laut Parasuraman, Sheridan und Wickens übernehmen Maschinen neben der Ausführung von Handlungen auch zunehmend Funktionen der menschlichen Informationsverarbeitung (Parasuraman, Sheridan, & Wickens, 2000). Dazu zählen die Autoren die Aufnahme und Analyse von Informationen sowie die Entscheidungsfindung und Handlungsauswahl. Jedoch bleibt auch die Ausführung von Aufgaben ein wichtiger Bestandteil der übernommenen Tätigkeiten (Parasuraman et al., 2000).

Die Zusammenarbeit von Mensch und Maschine wird durch viele grundlegende psychologische Prozesse bestimmt. Dazu gehören Aufmerksamkeits- und Wahrnehmungsprozesse sowie kognitive Prozesse wie Gedächtnisfunktionen oder Informationsverarbeitung. Die Integration dieser Funktionen in ein Modell der Interaktion von Mensch und Maschine wurde von verschiedenen Autoren angestrebt. Beispielsweise entwickelt Rasmussen basierend auf seinem Verständnis von fähigkeits-, regel- und wissensbasiertem Verhalten ein Modell der Leistung von Operateuren, das in Abb. 1 dargestellt ist (Rasmussen, 1983).

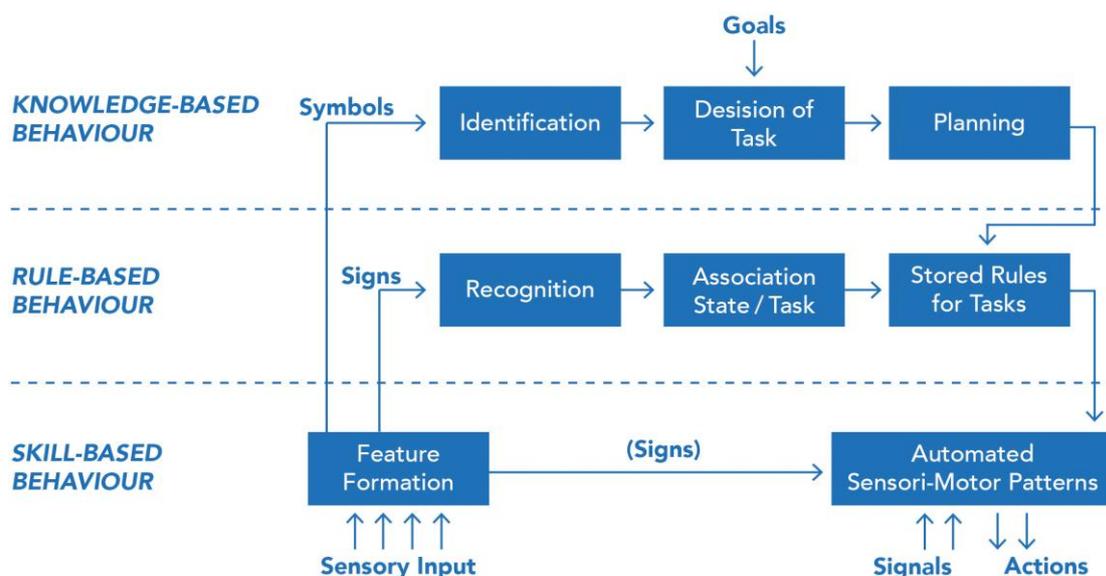


Abb. 1 Modell der Leistung von Operateuren in Anlehnung an Rasmussen (1983)

Dabei basiert die Leistung auf der Interaktion der Verhaltensstufen mit Umweltreizen (Signalen, Zeichen, Symbolen), die mentale Modelle aktivieren und im Hinblick auf die Ziele verschiedene Handlungen auslösen (Rasmussen, 1983). Auch einstellungsbezogene Vorgänge sind bei der Mensch-Maschine-Interaktion von Bedeutung. Hier sind bspw. das Vertrauen in die Maschine oder das System (Lee & See, 2004) sowie die Technikakzeptanz zu nennen (Davis, 1993). Diese Faktoren wirken sich vor allem darauf aus, in welchem Umfang und wie die Maschinen später genutzt werden.

Ein zentraler Aspekt der Interaktion von Mensch und Maschine, der vor allem im Anwendungskontext eine bedeutende Rolle spielt, liegt in der Funktionsteilung zwischen diesen. Hierfür wurden im Laufe der Zeit zahlreiche Ansätze entwickelt, von denen wesentliche im Folgenden kurz beschrieben werden sollen. Die Ausgestaltung der Automatisierung kann maximal (left-over) sowie partiell erfolgen. Die maximale Automatisierung zielt kategorisch darauf ab, möglichst alle Prozesse technisch umzusetzen und nur die Aufgaben beim Menschen zu belassen, die nicht oder nur mit einem sehr hohen Aufwand automatisiert werden können. Dies geht häufig mit dem Einsatz von statischer Automation einher, bei der die Aufgabenaufteilung zwischen Mensch und Maschine bereits in der Designphase festgelegt wird und fix ist (Parasuraman, Mouloua, & Hilburn, 1999). Hingegen richtet sich die Zuweisung von Aufgaben an Mensch und Maschine bei der partiellen Automatisierung an anderen Aspekten wie ökonomischen Überlegungen oder komparativen Kriterien (wer kann was besser) aus. Insbesondere dem Ansatz, die Verteilung von Funktionen anhand komparativer Kriterien vorzunehmen, wurde in der Vergangenheit auch Kritik entgegengebracht. Dekker und Woods argumentieren, dass derartige Einteilungen auf starren Vorannahmen bezüglich der Stärken und Schwächen von Maschinen und Menschen beruhen, wodurch eine Aufteilung der Arbeit lediglich quantitativ erfolgt (Dekker & Woods, 2002). Die Funktionsteilung kann weiterhin mithilfe eines menschenzentrierten Ansatzes verfolgt werden. Dabei findet eine komplementäre Aufgabenzuweisung statt, bei der menschliche Schwächen kompensiert und der Mensch unterstützt werden soll. Ähnlich dem sozio-technischen Ansatz geht es auch hier um den Versuch, die Zusammenarbeit von Mensch und Maschine unter Einbeziehung aller beteiligten Prozesse so reibungslos wie möglich zu gestalten (Sheridan, 2002). Menschenzentrierte Automation orientiert sich somit an den operationalen Bedürfnissen und Anforderungen des Menschen, um diesen zu unterstützen, anstatt ihn zu ersetzen.

Ein Modell, das beschreibt, wie bei der Automatisierung von Prozessen vorgegangen werden sollte, wurde von Parasuraman et al. (2000) entwickelt. Die Autoren betonen, dass zunächst entschieden werden sollte, welche Funktionen durch die Automation übernommen werden sollen. Wie bereits erläutert, kann sich dieser Grad der Automatisierung (degree of automation, DOA) an den Stufen der menschlichen Informationsverarbeitung orientieren. Weiterhin ist zu berücksichtigen, welches Level der Automatisierung (level of automation, LOA) gewählt wird. Dieses gibt an, in welchem Ausmaß die jeweilige Funktion durch das automatisierte System übernommen wird. Dieses Kontinuum wird in der Regel durch die Pole „manuelle Aufgabendurchführung“ und „vollautomatisierte Aufgabendurchführung“ beschrieben. Als Beispiel sei hier eine Produktionsplanungssoftware genannt, die die Entscheidungsfindung bei der Maschinenbelegung unterstützt (DOA). Das LOA kann dabei verschiedenartig gewählt werden. Entweder muss der Bediener sich selbst für eine der vorgeschlagenen Lösungen entscheiden (niedriges LOA) oder das System wählt eine Lösung nach vorgegebenen Kriterien aus (hohes LOA). Das in Abb. 2 dargestellte Modell zeigt, dass der Prozess der Automatisierung iterativ erfolgen sollte, wobei sich die jeweiligen Evaluationskriterien sowohl an den Folgen für die menschliche Leistung (Situations-

bewusstsein, Fähigkeitsverlust) als auch an wirtschaftlichen und prozessbezogenen Aspekten orientieren sollten.

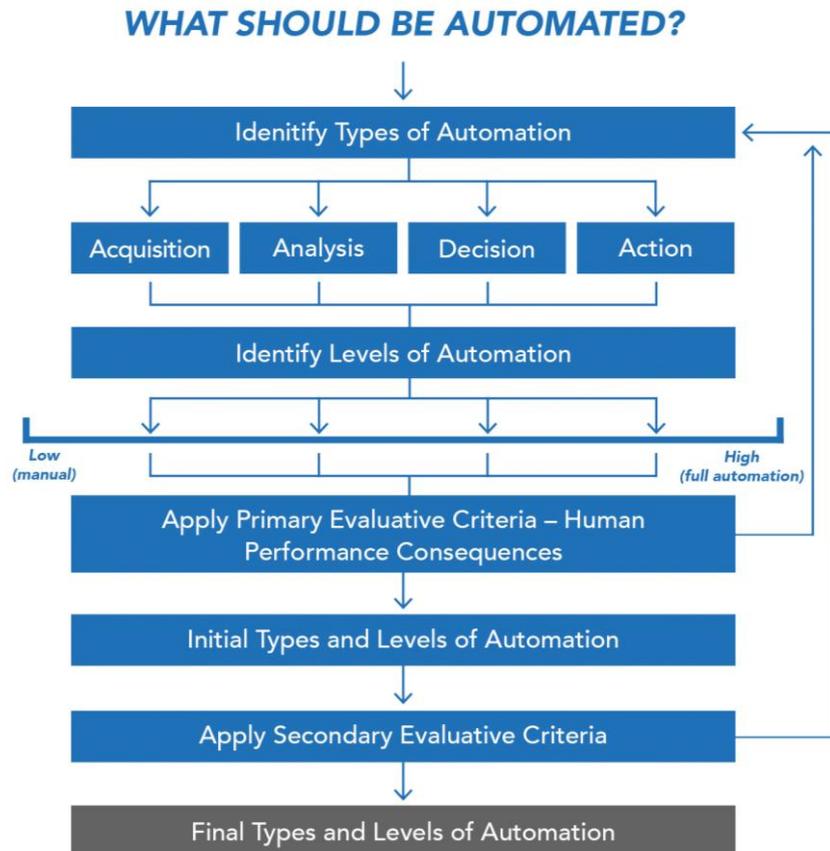


Abb. 2 Arten und Level der Automation nach Parasuraman et al. (2000)

Üblicherweise wird das Automationslevel im Rahmen der Systementwicklung zugewiesen. Dieses Prinzip, bei dem die Funktionsteilung zwischen Mensch und Maschine fest eingestellt ist und nicht mehr variiert werden kann, wird auch als statische Automation bezeichnet. Daneben bestehen auch anpassbare Formen der LOA-Zuweisung. Abb. 3 zeigt, dass sich die Funktionsteilung in komplexen Systemen häufig dadurch auszeichnet, dass das Level der Automation durch eine zwischengeschaltete Instanz bestimmt wird. Die Funktion dieser Instanz ist laut Sheridan von der Ausübung der eigentlichen Kontrolle zu unterscheiden (Sheridan, 2011). Dieses Prinzip kann als adaptive Automation bezeichnet werden. Die LOA-Auswahl erfolgt dabei durch den Menschen oder systemgesteuert. Im Falle der systemgesteuerten adaptiven Automation können weitere Möglichkeiten der Ausgestaltung differenziert werden. Der ereignisbasierte Ansatz wechselt das Automationslevel in Abhängigkeit von bestimmten vordefinierten Ereignissen. Ein Wechsel des LOA, basierend auf der Leistung des Bedieners, wird in dem leistungsbasierten Modus angestrebt. Zuletzt besteht die Möglichkeit, dass das System das Automationslevel anhand von psychophysiologischen Daten bestimmt. Insbesondere bei der systemgesteuerten adaptiven Automation ist eine konstante Erfassung verschiedener Parameter (Leistungsdaten, Beanspruchung, Aktivierung) erforderlich. Die Umsetzung dieser Ansätze erfolgt bereits in empirischen Studien, wie auch in Kapitel 4. berichtet wird. Das Gestaltungspotenzial, das

bspw. mit dem Modell von Parasuraman et al. (2000) verbunden ist, wird in Kapitel 7. aufgegriffen.

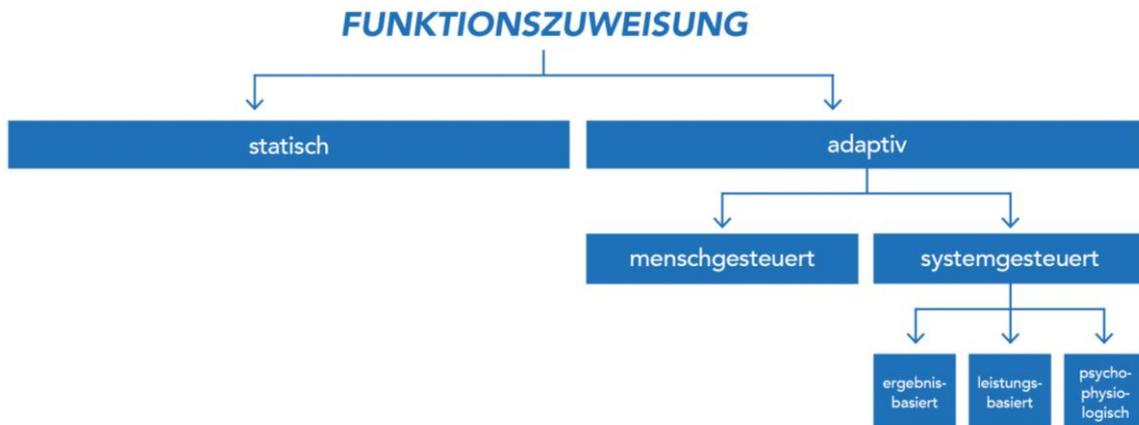


Abb. 3 Umsetzungsformen des LOA

Bei allen Versuchen, zu einer optimalen Funktionsteilung von Mensch und Maschine zu gelangen, bleibt die Herausforderung bestehen, dass mit der Einführung von Maschinen oder Automation häufig eine qualitative Veränderung der Arbeit einhergeht. Dabei stellen Parasuraman und Riley fest, dass diese Veränderungen oft andere Formen annehmen, als von den Entwicklern beabsichtigt (Parasuraman & Riley, 1997). Eine dieser neuen Herausforderungen besteht in der überwachenden Kontrolle (*supervisory control*). Obwohl die überwachende Kontrolle eine andere Tätigkeitsform darstellt als die Bedienung von Maschinen, ist sie dennoch häufig eine Folge der Funktionsteilung und eng mit der MMI verknüpft. Ein Beispiel für Arbeitsprozesse, in den Überwachungsvorgänge bedeutsam sind, sind Tätigkeiten in Leitwarten und Kontrollzentren. Sheridan (2011) beschreibt die überwachende Kontrolle als eine äußere Kontrollschleife, bei der ein menschlicher Überwacher durch ein zwischengeschaltetes System, das in eine direkte Kontrollschleife eingebunden ist, Rückmeldungen erhält. Wie Sheridan und Parasuraman (2005) in ihrer Überblicksarbeit darlegen, ist die überwachende Kontrolle durch folgende fünf Funktionen, die dem Menschen übertragen werden, gekennzeichnet: 1) Offline-Planung; 2) Einstellen der Automation; 3) Überwachung der Ausführung durch die Automation; 4) Eingriff und Kontrollübernahme, wenn nötig, und 5) aus den Erfahrungen lernen. Insbesondere die Überwachung der Ausführung (3) sowie die Kontrollübernahme in Notfällen (4) stellen für den Menschen eine große Herausforderung dar: Einerseits wird von dem menschlichen Bediener eine hohe Daueraufmerksamkeit verlangt. Andererseits werden gerade in Notsituationen auch Fähigkeiten gefordert (z. B. manuelle Systemkontrolle), die im Normalbetrieb nur noch selten eingesetzt werden. Dabei besteht die Gefahr, dass die benötigten Fähigkeiten des Bedieners wenig geübt, aber für die sichere Prozesssteuerung von essenzieller Bedeutung sind (Bainbridge, 1983).

Im vorliegenden Scoping Review werden sowohl Studien berichtet, die sich mit der Bedienung von Maschinen befassen, als auch Studien, die in denen Überwachungs- und Kontrollprozesse thematisiert werden. Beide Formen der Interaktion von Mensch und Maschine sind relevant bei der Gestaltung von technologieunterstützten Arbeitsprozessen.

2. Betriebliche Rahmenbedingungen

Im Jahr 2012 waren nach Angaben des Statistischen Bundesamtes etwa sieben Millionen Menschen in der Industrie und im verarbeitenden Gewerbe beschäftigt (Statistisches Bundesamt, 2012a). Das Statistische Bundesamt erfasste in seinem 2012 durchgeführten Mikrozensus auch die Arbeitsbedingungen, die in verschiedenen Branchen vorherrschen. Für den Bergbau und das verarbeitende Gewerbe konnte dabei festgestellt werden, dass die Beschäftigten häufig Samstags-, Sonntags- und Feiertagsarbeit sowie Nacht- und Schichtarbeit ausgesetzt sind (Statistisches Bundesamt, 2012b), was mit zusätzlichen Belastungen verbunden ist.

Die repräsentativen Daten der regelmäßig durchgeführten Befragung des Bundesinstituts für Berufsbildung (BIBB) und der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) wurden von der Europäischen Agentur für Sicherheit und Gesundheit bei der Arbeit herangezogen, um weitere Informationen – insbesondere für die Arbeit der Maschinenbediener – zu extrahieren. Die Auswertungen zeigen, dass die Population der Maschinenbediener in stärkerem Maße repetitiver Arbeit, Arbeit in einer aufrecht stehenden Haltung sowie dem Tragen schwerer Lasten ausgesetzt ist als die allgemeine Population der Berufstätigen (Flaspöler et al., 2009). Zudem sehen sich mehr Maschinenbediener ungünstigen Umgebungsfaktoren wie Stäuben, Gasen, Lärm, Hitze oder gefährlichen Substanzen ausgesetzt und müssen häufiger Schutzausrüstung tragen. In Bezug auf die psychosozialen Risikofaktoren, die für Maschinenbediener eine Rolle spielen, kann besonders auf einen geringen Handlungs- und Entscheidungsspielraum hinsichtlich der Arbeits- und Pausenorganisation hingewiesen werden. Auch haben Maschinenbediener weniger die Möglichkeit, ihre Arbeitsmenge zu bestimmen (Flaspöler et al., 2009). Für den Umgang mit Maschinen lässt sich feststellen, dass diese einerseits an Geschwindigkeit, Stärke und Flexibilität gewinnen und dass andererseits in einigen Bereichen auch komplexe, automatisierte Systeme eine zunehmend große Rolle spielen. Letztere richten andere Anforderungen an die Bediener als „klassische“ Maschinen. So stellt die Europäische Agentur für Sicherheit und Gesundheit bei der Arbeit bei einer ihrer regelmäßig durchgeführten Risikobeobachtungen fest, dass die Komplexität neuer Technologien, Arbeitsprozesse und Mensch-Maschine-Schnittstellen zu erhöhter emotionaler und mentaler Belastung führen kann und somit als Risikofaktor einzustufen ist (ebd.).

Neue Technologien spielen insbesondere beim Thema Industrie 4.0 eine bedeutende Rolle und sind in der aktuellen, politischen Debatte präsent. Das Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation (Fraunhofer IAO) beschreibt Industrie 4.0 als ein Produktionsumfeld, „das aus intelligenten, sich selbst steuernden Objekten besteht“ (Ganschar, Gerlach, Hämmerle, Krause, & Schlund, 2013, p. 22). Wird dieser Ansatz konsequent umgesetzt, bedeutet dies, dass sich Aufträge eigenständig durch Wertschöpfungsketten steuern, ihre Bearbeitungsmaschinen buchen und die Organisation des Materials sowie die Auslieferung zum Kunden übernehmen. Die Grundlage dieser Entwicklungen liegt in der Verfügbarkeit von Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT), die so die technische Infrastruktur bereitstellen. In diesem Zusammenhang hat sich in den vergangenen Jahren der Begriff der cyber-physischen Systeme (CPS) durchgesetzt. Diese umfassen die Integration von computergesteuerten und physischen Prozessen, wodurch Computer und Netzwerke physische Prozesse überwachen und steuern können. Dabei bestehen verschiedene Feedback-Schleifen, in denen physische Prozesse computergesteuerte Prozesse beeinflussen und umgekehrt (Lee, 2008).

Das Fraunhofer IAO konnte hinsichtlich der Entwicklungen in der Produktion mithilfe einer Befragung von produzierenden Unternehmen folgende Kernpunkte extrahieren: Obwohl Automatisierung für zunehmend kleinere Serien möglich wird und die Anforderungen des Markts steigen, bleibt der Mensch aufgrund seiner hohen Flexibilität ein zentraler Bestandteil der Produktion. Es wird angenommen, dass die Aufgaben traditioneller Produktions- und Wissensarbeiter weiter zusammenwachsen. Weiterhin stellt die Qualifizierung von Mitarbeitern einen wichtigen Baustein dar, da mit einer Zunahme von kurzfristigen und weniger planbaren Arbeitstätigkeiten *on-the-job* zu rechnen ist (Ganschar et al., 2013). In diesem Zusammenhang stellen auch Deuse, Weisner, Hengstebeck und Busch fest, dass sowohl die Handlungsfähigkeit der Mitarbeiter im Produktionssystem als auch ihr Prozess- und Systemverständnis erhalten bleiben sollten (Deuse, Weisner, Hengstebeck, & Busch, 2015). Die Autoren sprechen sich für den Aufbau von Systemkompetenz bei den Mitarbeitern aus. „Diese beinhaltet die Fähigkeit, Funktionselemente eines Produktionssystems zu erkennen, Systemgrenzen zu identifizieren, Funktionsweisen und Zusammenhänge zu verstehen und letztlich Vorhersagen über das Systemverhalten treffen zu können.“ (Deuse et al., 2015, S. 103). Auch Hirsch-Kreinsen fasst zusammen, dass im Hinblick auf die Beschäftigung in der Industrie 4.0 zwei Entwicklungsrichtungen möglich sind: Zum einen geht die Schwarmhypothese darauf ein, dass „Facharbeiteringenieure“ eine Tätigkeitsanreicherung erleben, die sie mit mehr Kontroll- und Koordinationsfunktionen ausstattet, wodurch sie ihre Aufgaben flexibel und situationsbestimmt innerhalb eines vorgegebenen Handlungsrahmens bearbeiten. Niedrig qualifizierte Tätigkeiten werden weitestgehend durch automatisierte Systeme ersetzt. Unter der Polarisierungsthese fasst der Autor die Tendenz zusammen, dass wenige Resttätigkeiten wie Kontroll- und Überwachungstätigkeiten, die nicht substituiert werden können, von Produktionsmitarbeitern übernommen werden. Wohingegen eine andere Gruppe von Spezialisten entsteht, die höher qualifizierte Aufgaben im Rahmen des Produktionsmanagements wahrnimmt (Hirsch-Kreinsen, 2014a). Diese industriesoziologische Perspektive verdeutlicht darüber hinaus, dass das Konzept von Industrie 4.0 sehr interdisziplinär diskutiert wird und die möglichen Veränderungen von Arbeitsplätzen und Arbeitsmitteln nicht zu vernachlässigen sind. Hirsch-Kreinsen schreibt diesen Entwicklungen insgesamt einen disruptiven und strukturverändernden Charakter zu, der mit „schwer überwindbaren technischen, ökonomischen und sozialen Einführungsbarrieren“ konfrontiert ist und sieht dadurch deutliche Grenzen für die Anwendungsperspektiven des Konzepts (Hirsch-Kreinsen, 2014b, p. 427). Moderne Produktionssysteme sind bereits durch einen hohen Grad an Komplexität gekennzeichnet, mit dem auch Herausforderungen für die Gestaltung der MMI einhergehen. Darüber hinaus weist eine Studie des Fraunhofer IAO darauf hin, dass „die Mensch-Technik Schnittstellen in der Produktion heute weit über die bloße Steuerung von Maschinenfunktionen hinaus[gehen]. Sie dienen u. a. der Visualisierung von Prozessfortschritten, der Instruktion bei manuellen Tätigkeiten, der Verwaltung von Rezepturen und Produktionsprogrammen, der Unterstützung vielfältiger Überwachungsaufgaben bis hin zum integrierten Management des gesamten Produktionsgeschehens.“ (Peisser & Hipp, 2013, S. 6). Insbesondere für Maschinenbediener ergeben sich daraus neue Anforderungen (Peisser & Hipp, 2013). Das veränderte Produktionsumfeld erfordert auch neue Lösungsansätze für die Gestaltung der Mensch-Technik-Interaktion. Die Übertragung von Ansätzen aus der *Human-Computer Interaction* stellt dabei eine Möglichkeit dar, den Herausforderungen zu begegnen. „Andere Ansätze wie etwa die multimodale Interaktion oder adaptive Benutzungsschnittstellen müssen sich hingegen noch stärker an aktuellen Forschungsergebnissen orientieren.“ (Peisser & Hipp, 2013, S. 38) Dies zeigt, dass es in der Praxis an wissenschaftlich fundierten Lösungsansätzen für die Gestaltung der MMI im modernen Produktionsumfeld mangelt und ein Bedarf an praxisgerechten Ideen und Gestaltungswissen besteht.

3. Eckdaten zur Literaturrecherche

Der Suchstring für die Literaturrecherche besteht aus vier Bestandteilen, mit denen das Suchfeld möglichst genau abgebildet werden soll. Das Set der unabhängigen Variablen (UV-Set) ergibt sich einerseits aus der Ableitung von Begriffen aus den Thesauren und erfolgt andererseits theoriebasiert, wobei sowohl spezielle Systeme als auch daraus resultierende Arbeitscharakteristika berücksichtigt werden. Die abhängigen Variablen (AV) wurden entsprechend einer vorgegebenen Liste gesucht. Das AV-Set dient der umfangreichen Erfassung von gesundheitlichen, motivationalen und leistungsbezogenen Variablen und wurde durch weitere MMI-spezifische Variablen (z. B. *false alarms, accidents, vigilance, fatigue, monotony*) ergänzt. Im Sinne des PEO-Schemas (*Population, Exposure, Outcome*) wurde bei den Suchen ein Set an Kontextvariablen zusammengestellt, das die Eingrenzung auf die Zielpopulation und den industriellen Kontext erleichtern soll. Da die Begriffe zur MMI eine Vielzahl an Themengebieten anschneiden, diente ein zweites Set an Ausschlussvariablen (z. B. Rehabilitation, Pflege, Militär, Fahrzeug-Kontext) dazu, den Industriefokus zu verstärken. Die Suche in den Datenbanken EBSCO und PubMed ergab schließlich eine Gesamttrefferzahl von 21.642 Studien. Aufgrund der hohen Titelzahl wurde ein zweistufiges Vorgehen gewählt, bei dem zunächst auf Basis der Titel über den Ein- oder Ausschluss der Studien entschieden wurde. Zur weiteren Reduktion der Treffermenge wurden zudem weitere Studien mithilfe der Suchfunktion in EndNote ausgeschlossen. Wie in Abb. 4 ersichtlich, wurden Begriffe wie *genetics, radiography* oder *commerce* entweder durch ihr Vorkommen im Titel oder in den Schlagwörtern ausgeschlossen, sodass 19.027 Titel zur Durchsicht verblieben. Der manuelle Ausschluss der Studien erfolgte durch den Abgleich der Titel mit dem Variablenset (unabhängige Variable, abhängige Variable sowie Kontext), wodurch bspw. Studien aus dem Bereich Luftfahrt, Transportwesen oder Gesundheitswesen ausgeschlossen wurden.

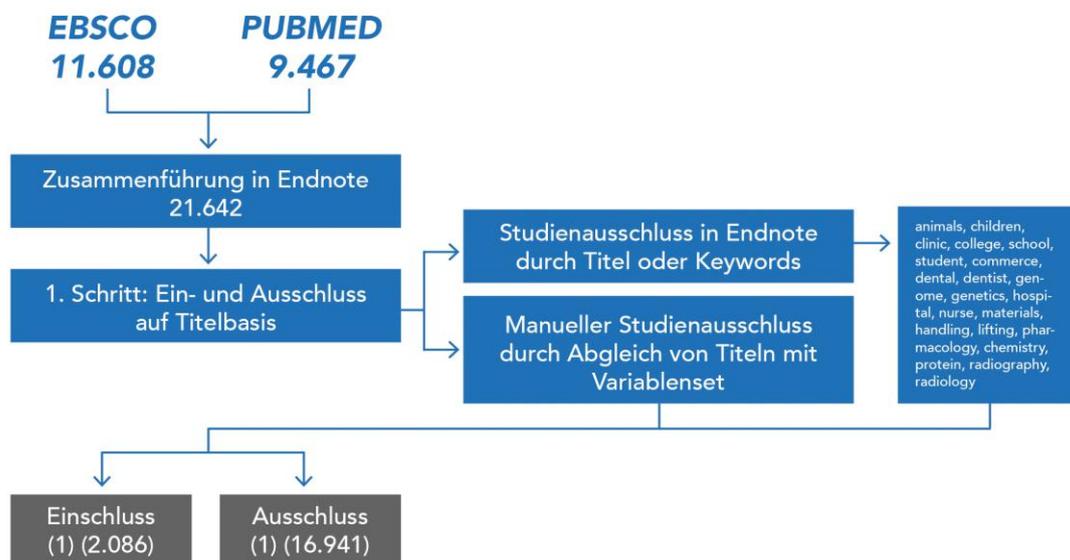


Abb. 4 Ein- und Ausschluss der Studien auf Titelbasis

In einem zweiten Schritt wurden die 2.086 Abstracts, die nach der Titelsichtung eingeschlossen wurden, gelesen. Dabei wurden die Studien in die Kategorien Einschluss und Ausschluss sortiert. Die Sichtung der Abstracts ergab den vorläufigen Einschluss von 269 Studien und den Ausschluss von 1.779 Studien, wie auch in Abbildung 5 ersichtlich ist. Weitere neun Studien wurden durch eine Handsuche ergänzt. Die geringen Abweichungen zwischen den Zahlen sind darauf zurückzuführen, dass Doubletten gelöscht wurden. Außerdem wurden manche Studien (z. B. bei der Abstract-Sichtung) komplett verworfen.

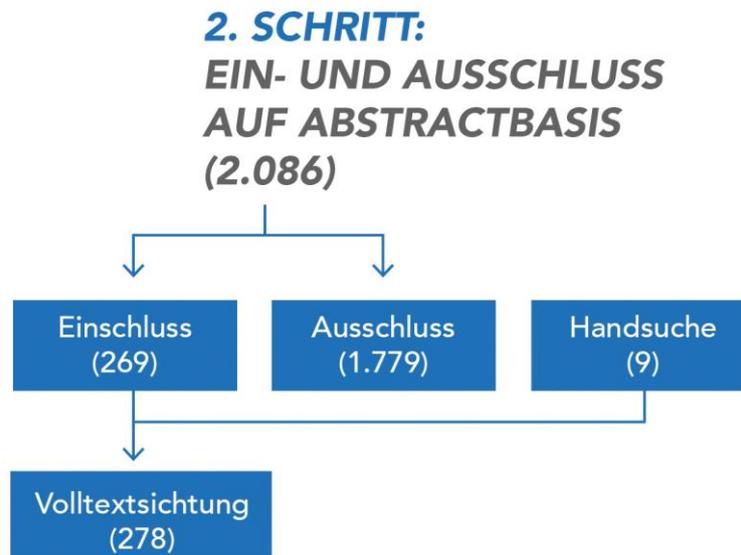


Abb. 5 Ein- und Ausschluss der Studien auf Basis der Abstracts

Die in EndNote integrierte Volltextsuche diente dazu, die ersten Studien für die Extraktion zu gewinnen. Weitere Volltexte konnten im Rahmen einer Internetrecherche gefunden und ergänzt werden. Die verbleibenden Studien wurden in einer Liste zusammengefügt, um die Bestellung durch die Bibliothek zu veranlassen.

Im Rahmen der Datenextraktionsphase wurden 278 Studien gesichtet. Auch nach dem zweistufigen Vorgehen der Titel- und Abstract-Sichtung wurden weitere 186 Texte ausgeschlossen. Diese Ausschlüsse waren zunächst durch die Veröffentlichungsart begründet. Bücher ($n = 13$) und Dissertationen ($n = 12$) wurden nicht für die Datenextraktion vorgesehen und auch Buchkapitel wurden ($n_{\text{Ausschluss}} = 26$, $n_{\text{Einschluss}} = 5$) ausgeschlossen, wenn sie nur zusammenfassende Abhandlungen verschiedener Themenbereiche darstellten oder Untersuchungsergebnisse nicht hinreichend nachvollziehbar berichtet wurden. Somit wurden vornehmlich Journalartikel extrahiert. Doch auch hier mussten im Verlauf der Datenextraktion weitere Studien ausgeschlossen werden. Der Ausschluss basierte auf folgenden Kriterien: Die Branche oder die untersuchte Stichprobe stimmt nicht mit dem gesuchten Kontext überein, Daten werden nicht ausreichend berichtet oder die untersuchten unabhängigen Variablen stellen keinen ausreichenden Zusammenhang zum AV-Set her. Viele Studien verzichteten zudem auf eine ausführliche Beschreibung der Tätigkeit und der Interaktion von Mensch und Maschine, sodass zur eigentlichen Fragestellung kaum Aussagen möglich sind. Abweichungen vom gewählten Kontextset treten nur dann auf, wenn

von einer hohen Übertragbarkeit der Inhalte oder einer validen Operationalisierung (bspw. in Simulationsstudien) ausgegangen werden kann.

Im Ergebnis wurden 104 Studien extrahiert, die aus einer Zeitspanne von 1965 bis 2014 stammen. Im Rahmen der Studienausswahl für das Scoping Review wurde darauf verzichtet, einen zeitlichen Filter anzusetzen. Dies kann damit begründet werden, dass viele ältere Arbeiten wichtige Erkenntnisse liefern, die bis heute nicht an Aktualität verloren haben. Abbildung 6 kann die Verteilung der Studien auf die Dekaden entnommen werden. Ein deutlicher Schwerpunkt – mit etwa 46 Prozent der extrahierten Arbeiten – liegt zwischen 2005 und 2015.

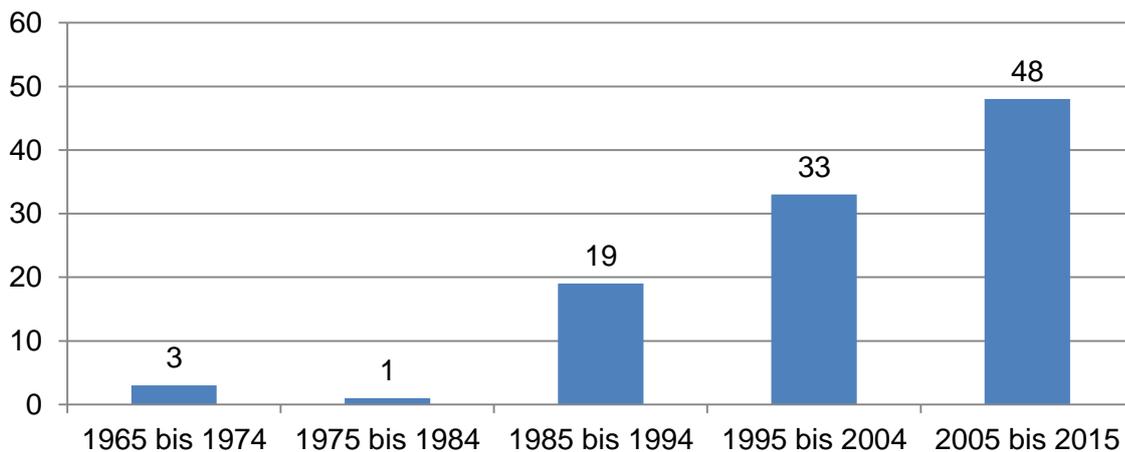


Abb. 6 Anzahl der Studieneinschlüsse pro Dekade

Bei den Herkunftsländern der Studien kann ein deutlicher Schwerpunkt im nordamerikanischen Raum erkannt werden, aus dem 35 (\approx 34 Prozent) extrahierte Studien stammen. Das am zweithäufigsten auftretende Herkunftsland stellt mit 25 Studien Deutschland dar, wie auch Abb. 7 zu entnehmen ist. An der dritten Stelle der Ursprungsländer steht das restliche Europa mit einer Anzahl von 20 Studien. Hierunter fallen alle europäischen Länder mit Ausnahme des skandinavischen Raums (Schweden, Norwegen, Dänemark, Finnland). Diesem entstammen weitere zehn Studien. Andere Herkunftsregionen wie Asien oder der Nahe Osten sind mit einstelligen Häufigkeiten in das Review eingegangen. Es wurde keine Studie aus dem südamerikanischen Raum extrahiert.

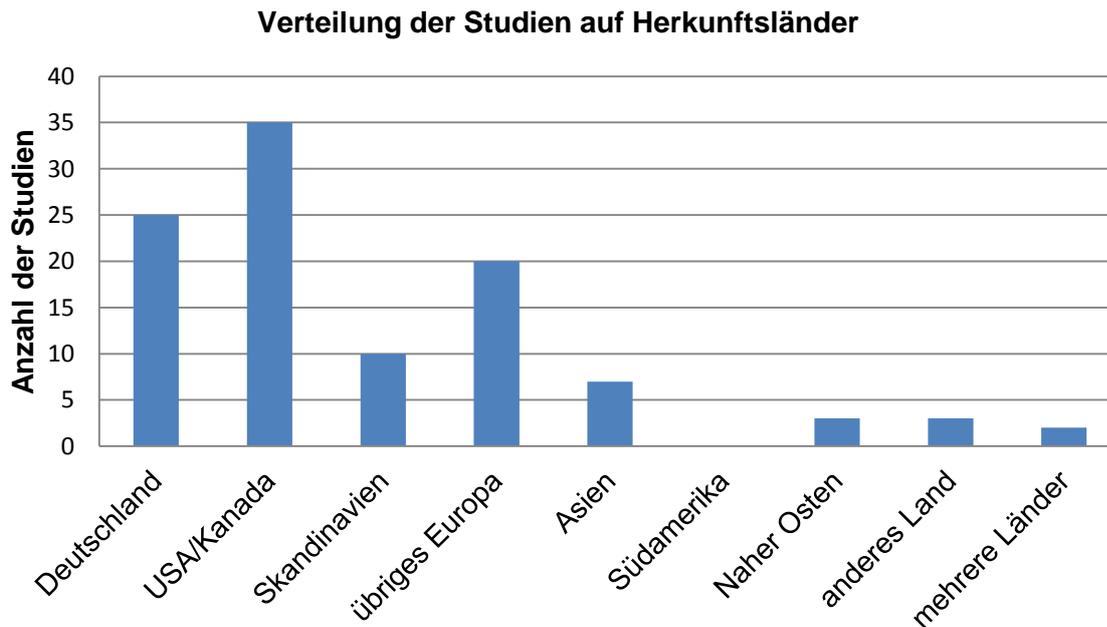


Abb. 7 Übersicht über die Herkunftsländer der extrahierten Studien

Die in den extrahierten Studien beschriebenen Stichproben bestehen in etwa gleichem Maße aus Erwerbstätigen ($n = 47$) und Studenten ($n = 49$). Gemischte Stichproben (Erwerbstätige und Studenten) sind nur in acht Untersuchungen zu finden. Weitere 19 Studien entsprechen zwar den Anforderungen aus UV- und AV-Set, machen jedoch keine genaueren Angaben zu der untersuchten Stichprobe. Insgesamt wurden mehr Stichproben untersucht, als Studien in die Extraktion eingegangen sind. Dies ist darauf zurückzuführen, dass experimentelle Studien häufig aus mehreren Untersuchungen bestehen, die jeweils mit einer neuen Stichprobe durchgeführt werden. Außerdem werden die Sekundärstudien in dieser Zählung nicht berücksichtigt.

4. Beschreibung des Zusammenhangs zwischen dem Arbeitsbedingungsfaktor Mensch-Maschine-Interaktion und den Outcomes

Die Zuordnung der Studien zu den verschiedenen Studiendesigns unterliegt beim Faktor Mensch-Maschine-Interaktion einer Besonderheit. Diese besteht darin, dass eine Vielzahl der Arbeiten der Kategorie Interventionsstudie zugeordnet wurde. Im Rahmen des vorliegenden Scoping Reviews wird unter einer Interventionsstudie eine Studie verstanden, in der eine Manipulation einer oder mehrerer Variablen erfolgt. Damit einher geht die Annahme, dass der manipulierende Eingriff bei der unabhängigen Variablen (z. B. Abbildung verschiedener Zuverlässigkeitsstufen) auch zu Veränderungen in der abhängigen Variablen führt. Weitere Kriterien wie das Vorhandensein einer Kontrollgruppe und Prä-Post-Test-Messungen werden zunächst vernachlässigt, sind in einigen Studien jedoch gegeben. Die Begründung für dieses Vorgehen liegt darin, dass insbesondere im Bereich der Mensch-Maschine-Interaktion viele experimentelle Studien durchgeführt werden, um die Wirkungen verschiedener Systemeigenschaften zu überprüfen. Im Rahmen des Scoping Reviews wurden derartige Studien – auch wenn sie häufig nicht direkt an den Kontext der

Erwerbsarbeit angelehnt sind – nicht ausgeschlossen, da sie wichtige Hinweise für die Gestaltung von Systemen oder Mensch-Maschine-Beziehungen beinhalten können.

Unter Querschnittstudien werden hier Studien verstanden, die mit natürlichen Gruppen arbeiten. Das bedeutet, dass keine zufällige Zuordnung der Probanden in die verschiedenen Bedingungen erfolgte. Zudem sind in Querschnittstudien die Studien summiert, in denen die Gruppen anhand von verschiedenen Merkmalsausprägungen (z. B. Alter, Einteilung anhand von Antwortverhalten in Fragebögen) eingeteilt wurden.

Für die Studiendesigns Interventionsstudie, Längsschnittstudie und Querschnittstudie kann zudem die Unterteilung in Feld- und Laborstudien getroffen werden. Beide Formen wissenschaftlicher Arbeit können für den Arbeitsbedingungsfaktor Mensch-Maschine-Interaktion relevant sein. So beschreiben Lee und Seppelt (2009) in ihrem Überblickskapitel zu „Human Factors in Automation Design“, dass insbesondere Simulationsstudien, die häufig unter Laborbedingungen durchgeführt werden, automationsbezogene Probleme bei der Interaktion von Mensch und Technik aufdecken können (Lee & Seppelt, 2009). Zudem dienen Simulationsprogramme der Analyse von Mensch-Automation-Systemen und ermöglichen Einschätzungen darüber, welche Auswirkungen mit der Einführung von Automation in komplexen Systemen verbunden sind. Es bleibt zu berücksichtigen, dass mit den abgeleiteten Aussagen eine unterschiedliche Praxistauglichkeit einhergehen kann. Deshalb wurden die jeweiligen Verteilungen in den Übersichtstabellen ergänzt, um ein klareres Bild der Studienlage zu zeichnen. Feld- und Laborstudien sind dabei unter den jeweiligen Studiendesigns durch die Buchstaben F und L gekennzeichnet.

Im nachfolgenden Teil erfolgt die Darstellung der extrahierten Studien. Aufgrund der hohen Bandbreite, die der Arbeitsbedingungsfaktor MMI innehat, werden Inhalt und Ergebnisse der Studien kurz umrissen. Wo möglich, wird die Effektstärke der Ergebnisse anhand der Einteilung von Cohen bewertet (Cohen, 1988).

Merkmale der Mensch-Maschine-Interaktion

Da das Themenfeld Mensch-Maschine-Interaktion ein sehr breites Themenspektrum abdeckt, wurden die extrahierten Studien verschiedenen Merkmalen zugeordnet. Durch dieses Vorgehen werden einerseits die Unterschiede deutlich, andererseits können innerhalb eines Merkmals inhaltliche Ähnlichkeiten aufgezeigt und analysiert werden.

Das Primat der Arbeitsaufgabe stellt die Arbeitsaufgabe bei der Gestaltung von Arbeitstätigkeiten in den Mittelpunkt. Außerdem verknüpft die Arbeitsaufgabe innerhalb eines soziotechnischen Systems das soziale mit dem technischen Teilsystem. Die „Aufgabenverteilung zwischen Mensch und Technik, die Mensch-Maschine-Funktionsteilung also, [spielt] die entscheidende Rolle für die Entwicklung und Konstruktion von Produktionssystemen“ (Ulich, 2005). Basierend auf dieser Annahme wird zunächst die durch die Arbeitsaufgabe bestehende Funktionsteilung betrachtet. Auch für Hacker und Sachse gilt, dass die Funktionsteilung zwischen Mensch und Maschine einen wesentlichen Bestandteil der psychischen Anforderungen, die sich im Rahmen der Arbeitstätigkeit ergeben, darstellt (Hacker & Sachse, 2014). Laut Hollnagel und Woods führt die Veränderung der Aufgabenzuweisung zu einer qualitativen Veränderung der Schnittstellen, da die zugrundeliegenden kognitiven Funktionen beeinflusst werden (Hollnagel & Woods, 1983).

Schnittstellen – also die „Eingabemöglichkeiten und die Ausgabevorkehrungen in die bzw. aus der Maschine“ (Hacker & Sachse, 2014, S. 109) – werden daher als weiteres Merkmal gebildet, da sie sich auf die psychischen Anforderungen auswirken können. In diesem Zusammenhang betont auch Lee, dass es selbst bei einer guten Übereinstimmung zwischen Aufgabe und menschlichen Fähigkeiten problematisch sein kann, das Verhalten eines automatisierten Systems nachzuvollziehen. Dies führt er vor allem auf Umstände zurück, in denen Feedback, Kontext, Abstraktionsniveau oder Integration – die durch Schnittstellen abgebildet werden – in unzureichender Form vorliegen (Lee, 2006). Das Merkmal Schnittstellengestaltung umschließt somit klassische Fragen des ergonomischen Designs sowie die Betrachtung von Interaktionskonzepten – auch im Rahmen neuer Technologien. Da diese Aspekte auch weiterhin eine zentrale Herausforderung bei der Interaktion von Mensch und Maschine darstellen.

Das letzte Merkmal befindet sich schließlich auf der operationalen Ebene und betrachtet die Bedienung von Maschinen bzw. die von einem Operateur durchzuführende Prozesskontrolle. Die Maschinenbedienung ist dabei durch bestimmte Systemeigenschaften gekennzeichnet. Diese sind häufig nicht in der Funktionsteilung oder der Schnittstellengestaltung begründet, sondern stellen inhärente Merkmale der Maschine oder des Automaten dar, wodurch sie die Bedienung beeinflussen können. Darüber hinaus finden sich unter diesem Merkmal auch Studien, die sich nicht auf bestimmte Aspekte der Funktionsteilung oder von Schnittstellen fokussieren, sondern konkrete Einsatzszenarien und Kontexte betrachten, um die gegebene Interaktion von Mensch und Maschine zu untersuchen.

4.1. Erkenntnisse zum Merkmal Funktionsteilung

Tabelle 1 stellt Anzahl und Art der extrahierten und im Folgenden betrachteten Studien zum Themenfeld Funktionsteilung und Mensch-Maschine-Interaktion dar. Dabei sind Mehrfachnennungen möglich, da Studien häufig mehr als ein Outcome betrachten. Die letzte Zeile der Tabelle bildet die Gesamtanzahl der Studien eines Studiendesigns ab. Der Summenwert dieser Zeile entspricht damit der Anzahl der Studien, die insgesamt für das Merkmal extrahiert wurden.

Tab. 1 Übersicht über die Studien zum Zusammenhang zwischen dem Merkmal Funktionsteilung und den Outcomes

	Sekundärstudien	Primärstudien						
		Interventionsstudien		Nicht-Interventionsstudien				
				Längsschnitt		Querschnitt		Sonstige
		F	L	F	L	F	L	
Gesundheit						3		
Befinden	2		9			3		1
Motivation sowie Arbeitszufriedenheit						2		1
Leistung	1		10					
Sonstige (Arbeitsplatzcharakteristika)						7		
Gesamt	2		11			11		1

4.1.1. Erkenntnisse zum Merkmal Funktionsteilung und Gesundheit

Aussagen zur Gesundheit können aus drei Studien abgeleitet werden. Bei allen drei Studien handelt es sich um Querschnittstudien, deren Untersuchungen im Feld stattgefunden haben.

Bereits 1989 beschrieben Claussner und Müller die Einführung eines Druckgussautomaten in einer Fertigungsanlage. Die zuvor bestehende Schwere der körperlichen Arbeit kann mit der neuen Maschine deutlich reduziert werden (Claussner & Müller, 1989). Die Auswirkung von technologischen Entwicklungen auf die körperliche Gesundheit steht auch in einer späteren Studie im Vordergrund: In einer Holzverarbeitungsfabrik findet eine stetige technologische Weiterentwicklung statt, sodass eine Forschergruppe die Möglichkeit hat, Erwerbstätige zu untersuchen, die an drei Produktionssystemen unterschiedlichen Mechanisierungsgrads arbeiten. Der Entwicklungsstand reicht dabei von einer manuell orientierten Fertigungslinie über ein halbautomatisiertes System bis hin zu einer vollautomatisierten Fertigungslinie. Auf der Ebene des Muskel-Skelett-Systems stellen die Autoren fest, dass eine Weiterentwicklung der manuellen Produktionslinie zur halbautomatisierten Linie mit einer Verringerung der muskulären Aktivität und mehr Möglichkeiten für die muskuläre Erholung verbunden ist, zugleich kommt es jedoch zu einer Verringerung der möglichen Haltungen und Bewegungen (Balogh, Ohlsson, Hansson, Engström, & Skerfving, 2006).

Die beiden zuvor genannten Studien betrachten den zunehmenden Mechanisierungsgrad des Arbeitsplatzes und die daraus resultierende Funktionsteilung. Die zunehmende Über-

nahme von Funktionen durch Maschinen und automatische Systeme kann in der Folge zu einer vermehrten Technologieexposition an einer Vielzahl von Arbeitsplätzen führen. In diesem Kontext verfolgen Salanova und Schaufeli (2000) die Frage, ob die zunehmende Exposition zur Informationstechnologie sich auf das Auftreten von Burnout auswirkt und ob dieser Einfluss durch die Bewertung der Technologie mediiert wird. Im Ergebnis kommen die Autoren zu dem Schluss, dass eine intensive Technologieexposition zu einer besseren Bewertung derselben führt. Dies können sie jeweils mit einem schwachen korrelativen Effekt nachweisen (Dauer der Technologienutzung – Bewertung der Technologie $r = ,18$, $p < ,001$; Häufigkeit der Technologienutzung – Bewertung der Technologie $r = ,18$, $p < ,01$). Die Technologiebewertung wird zudem tatsächlich als Mediator für die Exposition und Burnout identifiziert. Der Zusammenhang zwischen diesen beiden Variablen wird also besonders durch die Technologiebewertung vermittelt. Die Autoren zeigen zudem, dass die Burnout-Dimensionen Zynismus, Zielerreichung und Selbstbewusstsein stärker für den bestehenden Zusammenhang mit der Technologieexposition verantwortlich sind als die affektive Burnout-Komponente Erschöpfung (Salanova & Schaufeli, 2000).

Die Literaturlauswahl bleibt im Hinblick auf die Folgen der Funktionsteilung für die Gesundheit somit eher begrenzt. Von den drei extrahierten Studien befassen sich zwei Studien mit der körperlichen Gesundheit. Beide kommen zu dem Schluss, dass die Übernahme von Funktionen mit einer Reduktion der körperlichen Belastung verbunden sein kann. Eine Studie betrachtet vornehmlich die mentale Gesundheit von Beschäftigten und stellt dabei fest, dass ein Zusammenhang zwischen Technologieexposition und Burnout besteht, der durch Technologiebewertung mediiert wird. Deutlich mehr Aussagen für mögliche Zusammenhänge zwischen dem Merkmal Funktionsteilung und dem AV-Set sind für die unter „Befinden“ gefassten Outcome-Variablen möglich.

4.1.2. Erkenntnisse zum Merkmal Funktionsteilung und Befinden

Insgesamt 15 Studien berichten Erkenntnisse zum Befinden. Bis auf Längsschnittstudien sind alle Studiendesigns in dieser Kategorie vertreten. Zunächst soll auf die Erkenntnisse, die aus den beiden Sekundärstudien gewonnen wurden, eingegangen werden.

Ein Review aus dem Jahr 1989 von Edwards befasst sich qualitativ mit den Veränderungen des Arbeitsplatzes, die mit der Einführung von computergestützter Produktionstechnologie einhergehen. Edwards kommt dabei zu dem Schluss, dass der Einsatz von computer-aided manufacturing (CAM)-Technologien zur Reduktion von schwerer und gefährlicher Arbeit beitragen kann. Dennoch bleibt die Arbeit häufig anstrengend und nicht zufriedenstellend für die Mitarbeiter. Die Ursachen für den Stress liegen laut Edwards in dem begrenzten Raum an Aktivitäten, in der geringen Interaktion mit anderen Mitarbeitern sowie an Sicherheitsgefahren, die durch unvorhersehbares/unkontrollierbares Systemverhalten ausgelöst werden können. Die Einbeziehung der Mitarbeiter in Programmier- und Instandhaltungsaufgaben wird von vielen Mitarbeitern als ein herausforderndes Element betrachtet, das sich positiv auf ihr Wohlbefinden auswirkt, sofern die organisationalen Bedingungen dies zulassen (Edwards, 1989).

Während zu Zeiten Edwards die Effekte der erstmaligen Einführung von neuen Technologien diskutiert wurden, befassen sich aktuellere Studien eher mit der konkreten Ausgestaltung der Funktionsteilung in komplexen Systemen. So auch die Sekundärstudie von Onnasch, Wickens, Li und Manzey (2014), die mit einem quantitativen Ansatz die automationsinduzierten Leistungskonsequenzen bei der Zusammenarbeit zwischen Mensch und automatisiertem System untersuchen und dabei besonders den Grad der jeweiligen Auto-

omatisierung berücksichtigen. Hinsichtlich der Befindensmaße untersuchte die Metaanalyse auch die subjektive Beanspruchung der Bediener (i. d. R. gemessen über den NASA-TLX nach Hart und Staveland [1988]). Diese wird in 12 von den insgesamt 18 in die Analyse eingeschlossenen Studien betrachtet. Trotz gegenläufiger Ergebnisse in den Einzelstudien konnte für den Zusammenhang zwischen dem Grad der Automatisierung und der Beanspruchung ein leicht negativer Trend gefunden werden (Kendalls Tau = $-,24$, $p = ,05$). Dieser bestätigt die Annahme, dass ein höherer Automationsgrad mit einer Beanspruchungsreduktion aufseiten der Bediener einhergehen kann (Onnasch, Wickens, Li, & Manzey, 2014).

Die neun Interventionsstudien, die zu dem Zusammenhang von Funktionsteilung und Befinden extrahiert wurden, beziehen sich zum größten Teil auf die Ausgestaltung der Funktionsteilung in komplexen Systemen und wurden allesamt unter Laborbedingungen durchgeführt. Wie bereits in den Vorbemerkungen erläutert, handelt es sich auch bei den hier als Interventionsstudien vorgestellten Studien vorrangig um experimentelle Arbeiten, die unter kontrollierten Bedingungen die Einflüsse verschiedener Formen der Funktionsteilung untersuchen.

In Anlehnung an das vorgestellte Modell der Funktionsteilung von Parasuraman et al. (2000) betrifft eine der ersten Entscheidungen bei dem Aufbau von Mensch-Maschine-Systemen die Frage danach, welcher Grad der Automatisierung gewählt werden soll. Dies kann sich auf verschiedene Funktionen der Informationsverarbeitung, aber auch auf die Entscheidungsfindung oder die Handlungsausführung beziehen. Drei Studien kommen zu Aussagen darüber, wie sich diese Entscheidung auf das Befinden auswirken kann. Hinsichtlich der subjektiven Beanspruchung finden sowohl Röttger et al. als auch Manzey et al. einen positiven Effekt für einen hohen Automationsgrad (Manzey, Reichenbach, & Onnasch, 2012; Röttger, Bali, & Manzey, 2009). Beispielsweise weist die Studie von Röttger et al. (2009) auf eine Beanspruchungsreduktion hin, wenn das automatisierte Assistenzsystem sowohl die Informationsanalyse als auch die Handlungsauswahl unterstützt. Auch Rovira, McGarry und Parasuraman (2007) untersuchen die Effekte verschiedener Automationsgrade auf das subjektive Befinden und finden dabei einen bedeutsamen Effekt ($F(3,51) = 4,66$, $p = ,006$). Dieser besagt, dass die geringsten Beanspruchungswerte bei einer Automation der Entscheidung (\triangleq hohem DOA) mit einem niedrigen Level der Automation zu finden sind (Rovira, McGarry, & Parasuraman, 2007). Wie das Modell von Parasuraman et al. (2000) zeigt, entspricht eine automationsunterstützte Entscheidungsfindung bereits einem höheren Automationsgrad. Eine andere Facette des subjektiven Befindens spiegelt sich jedoch in den Vertrauensbewertungen wider. Wie bereits von Lee und See (2004) dargestellt, spielt das Vertrauen in automatische Systeme eine bedeutende Rolle und kann auch das Verhalten und die Leistung beeinflussen. Hinsichtlich der Vertrauensbewertung finden Rovira et al. (2007) ebenfalls einen signifikanten Effekt ($F(3,51) = 3,39$, $p = ,025$) und zeigen, dass die Funktionsteilung, die auch mit der geringsten Beanspruchung einherging, die höchste Vertrauensbewertung bei den Probanden erzielt. Insbesondere in komplexen Systemen mit hohem Automatisierungsgrad sind auch die Folgen möglicher Systemausfälle zu beachten. Dieser Fall wurde in der Studie von Manzey et al. (2012) ebenfalls simuliert und die darauf folgenden Effekte auf das Vertrauen der Probanden analysiert. Es zeigt sich, dass sowohl der Zeitpunkt des Systemausfalls als auch der weitere zeitliche Verlauf einen Einfluss auf die Vertrauensbewertung ausüben. So führen bspw. sehr frühe Ausfälle des Systems zu starken Verringerungen der Vertrauensbewertung, die auch im Verlauf der Zeit kaum mehr das Ausgangsniveau erreichte. Zudem

scheinen negative Erfahrungen mit dem automatisierten Assistenzsystem sich stärker auf das Vertrauen auszuwirken als positive (Manzey et al., 2012).

Bei Systemen, in denen die Wahl des Automatisierungsgrades bereits getroffen wurde, spielt laut Parasuraman et al. (2000) die nachfolgende Ausgestaltung des Automatisierungslevels (LOA) ebenfalls eine entscheidende Rolle. Das bedeutet, dass Systementwickler eine Entscheidung darüber treffen müssen, ob eine Funktion komplett manuell oder vollautomatisiert durchgeführt werden soll. Zwischen diesen beiden Polen spannt sich eine Skala auf, die in der Literatur mit verschiedenen Stufen gefüllt wird, wie bspw. die zehnstufige Einteilung nach Endsley und Kaber (1999) zeigt. Zudem bezieht sich ein zentraler Punkt bei der Festlegung des Automationslevel darauf, ob dieses Level eine statische Größe darstellen soll oder ob eine adaptive zu bevorzugen ist (zu den verschiedenen Umsetzungsformen siehe Kapitel 1). Das Automationslevel kann somit auch als ein Indikator für das Ausmaß der Kontrolle des menschlichen Bedieners betrachtet werden. Zu diesem Aspekt der Funktionsteilung und möglichen Zusammenhängen zum Befinden der Bediener konnten fünf Studien extrahiert werden, deren Ergebnisse im Folgenden beschrieben werden. Bezüglich der Frage, welcher Ansatz der LOA-Gestaltung mit einer Beanspruchungsreduktion verbunden ist, besteht eine unterschiedliche Befundlage.

Lin, Yenn und Yang (2010) stellen für ein statisches System fest, dass ein höheres LOA in Anlehnung an die Taxonomie von Endsley und Kaber (Endsley & Kaber, 1999) zu einer signifikant geringeren mentalen Beanspruchung und Frustration führen kann als ein mittleres LOA, das mehr Aktivität des Operators erfordert (Lin, Yenn, & Yang, 2010).

Zunächst ist festzustellen, dass auch innerhalb der verschiedenen Umsetzungsformen des LOA unterschiedliche Gestaltungsformen bestehen. So untersuchen Sauer, Kao, Wastell und Nickel (2011) bei einem menschengesteuerten adaptiven System, wie sich eine freie, ermunterte und gezwungene LOA-Wahl auf das Befinden und die Leistung auswirken. Die Studie kommt zu dem Ergebnis, dass sowohl mit subjektiven Beanspruchungsmaßen als auch mit psychophysiologischen Maßen (Herzratenvariabilität) kein signifikanter Unterschied in Abhängigkeit von dem Modus der menschengesteuerten adaptiven Automation nachgewiesen werden kann (Sauer, Kao, Wastell, & Nickel, 2011). Auch die anderen untersuchten Befindensmaße *Anxiety* und *Fatigue* zeigen keine Veränderung, die auf den Automationsmodus zurückgeführt werden kann. Vergleichbare Ergebnisse erzielen Sauer, Nickel und Wastell auch in einer späteren Studie, bei der die unabhängige Variable Automationsmodus durch ein statisches und ein menschengesteuertes adaptives System (jeweils mit LOA 1, 3 und 5) operationalisiert wird (Sauer, Nickel, & Wastell, 2013).

Im Gegensatz dazu zeigt die Studie von Sauer, Kao und Wastell (2012) für ein systemgesteuertes adaptives System, das leistungs basiert das LOA variiert, dass dieses eine höhere Beanspruchung sowie stärker ausgeprägte *Fatigue*- und *Anxiety*-Wertungen bei den Bedienern hervorruft als eine ereignisbasierte LOA-Zuweisung oder eine menschengesteuerte adaptive Automation (Jürgen Sauer, Kao, & Wastell, 2012). Eine ähnliche Fragestellung wird von Bailey, Scerbo, Freeman, Mikulka und Scott (2006) verfolgt, wobei hier die menschengesteuerte Form der LOA-Zuweisung mit der systemgesteuerten LOA-Zuweisung verglichen wird. In zwei Teiluntersuchungen wird das systemgesteuerte adaptive System jeweils mit einer anderen Ausprägung versehen: In der einen Bedingung erfolgt eine Zuweisung des LOA basierend auf psychophysiologischen Daten mittels EEG-Messung, während in der anderen Bedingung die LOA-Stufen basierend auf den EEG-Daten eines anderen Probanden gespiegelt werden. Es kann ein signifikanter Effekt der Automationsbedingung auf die subjektive Beanspruchung gefunden werden. Sowohl bei der Arbeit mit

dem EEG-basierten System als auch unter der gespiegelten Bedingung erleben die Probanden eine geringere Beanspruchung, als wenn sie mit dem adaptiven System selbst für die Wahl des LOA verantwortlich sind (Bailey, Scerbo, Freeman, Mikulka, & Scott, 2006), was im Gegensatz zu den Ergebnissen von Sauer et al. (2012) steht. Eine mögliche Ursache dafür könnte in der verschiedenartigen Umsetzung der systemgesteuerten Adaptivität liegen.

Ein möglicher Vorteil von menschengesteuerten adaptiven Systemen liegt laut Sauer et al. (2012) jedoch darin, dass diese zu höheren Bewertungen der eigenen Fähigkeiten und Selbstvertrauen führen, was womöglich durch die eigenständige Kontrolle bedingt ist. Eine ähnliche Vermutung stellen Sauer und Kollegen auch in ihrer Studie aus dem Jahr 2013 auf. Im menschengesteuerten Automationsmodus wählten die Probanden eher niedrige LOA, was eine Tendenz zum Wunsch nach manueller Kontrolle andeuten kann.

Im Rahmen der Untersuchung eines Entscheidungsunterstützungssystems (*Decision Support System*) ermöglichen Kahai, Solieri und Felo (1998) ihren Probanden die Arbeit mit unterschiedlichen Automationslevels. Ein niedriges Automationslevel, bei dem die Bildung und Ausführung von Entscheidungsmodellen beim Menschen verbleibt, geht dabei mit höherer Beteiligung einher als höhere Automationslevel, die lediglich die Ausführung bestehender Modelle erfordern (Kahai, Solieri, & Felo, 1998). Die höhere Beteiligung führt sodann auch zu höheren Erfolgserwartungen, die wiederum mit höherer Zufriedenheit und positiver Stimmung verbunden sind. Ein möglicherweise kritischer Aspekt der positiven Stimmung liegt jedoch darin, dass weniger Modelle/Lösungswege in Betracht gezogen werden und die Situation weniger überdacht wird (Kahai et al., 1998).

Die Outcome-Variable Befinden wird zudem von drei Querschnittstudien, die im Feld durchgeführt werden, thematisiert. Die Arbeit von Hockey und Maule (1995) umfasst eine Stichprobe von 52 Operateuren, die in der Prozesskontrolle eines Chemieunternehmens tätig sind. Im Fokus stehen einerseits die beiden Betriebsarten der Anlage, andererseits die Eingriffsmöglichkeiten der Operateure. Hinsichtlich der Betriebsart weisen die Ergebnisse darauf hin, dass der Modus, in dem manuelle Eingriffe vorgesehen sind, mehr Besorgnis und Ängstlichkeit bei den Operateuren auslöst als der automatische Betrieb. Auch wurden diese Phasen als anstrengender wahrgenommen. Dieses Ergebnis zeigt eine andere Facette der geteilten Kontrolle auf: Während auf der einen Seite häufig der Wunsch nach manueller Kontrolle besteht (s. o.), kann dieser auf der anderen Seite mit einer erhöhten Beanspruchung einhergehen. Wie auch das Kapitel zum Merkmal Funktionsteilung und Leistung zeigt, ist die subjektive Präferenz für mehr manuelle Kontrolle in der Umsetzung nicht nur mit Leistungsvorteilen und positiven Auswirkungen auf das Befinden verbunden. Dieses Spannungsfeld wird in der Ergebnisbewertung (siehe Kapitel 5) weiter thematisiert.

Die beiden weiteren Querschnittstudien, die Aussagen über das Befinden treffen, werden in demselben Umfeld durchgeführt wie die bereits erwähnte Studie von Balogh et al. (2006) und beziehen sich auf die zunehmende Mechanisierung einer Produktionsanlage. Der Unterschied zwischen dem manuellen und dem hochautomatisierten Produktionssystem liegt vor allem darin, dass sich verschiedene Indikatoren einer Aktivierung verringern. Diese Aktivierung wird jedoch i. d. R. als positiv erlebt. In Übereinstimmung mit diesem Ergebnis berichten die befragten Produktionsmitarbeiter/-innen zudem eine erhöhte Schläfrigkeit. Die erlebte physische Anstrengung hingegen zeigt keine Unterschiede zwischen der Arbeit an den Produktionssystemen (Persson, Garde, Hansen, Ørbæk, &

Ohlsson, 2003). Zur Verstärkung der Aussagekraft der subjektiven Befindensmaße werden in einer weiteren Studie vor allem physiologische Variablen erhoben. So dient die Messung der Adrenalin- und NoradrenalinKonzentration im Urin dazu, die Aktivierung auf einem endokrinen Niveau zu erfassen. Die Arbeit an dem vollautomatisierten Produktionssystem führt laut den Ergebnissen zu einer niedrigeren Konzentration von Adrenalin und Noradrenalin im Urin, was auf eine geringe Aktivierung des sympathischen Nervensystems schließen lässt. Den Autoren zufolge bestätigt dies die Hypothese, dass die höhere Automation zu einem verringerten physiologischen *Arousal* führt (Garde, Hansen, Persson, Ohlsson, & Ørbæk, 2003).

In einer breiter angelegten Datenanalyse (Studiendesign „Sonstiges“) untersuchen Tielsch und Hofmann (1992) den Einfluss des zunehmenden Technologieniveaus und von Zukunftserwartungen auf die subjektive Beurteilung der Arbeitssituation. Die Analyse der Daten von knapp 750 Beschäftigten führt zu dem Ergebnis, dass das Technologieniveau zwar einen Einfluss auf das Belastungserleben ausübt, sich jedoch nicht in einem signifikanten Effekt für die erlebte Beanspruchung niederschlägt (Tielsch & Hofmann, 1992). In dem vorangegangenen Kapitel wurden 15 Studien beschrieben. Zwei Sekundärstudien, neun Interventionsstudien, drei Querschnittstudien und eine Datenanalyse verweisen darauf, dass zunächst unterschieden werden muss, ob eine Funktionsteilung im Sinne einer Mechanisierung stattfindet oder ob automatisierte Systeme Tätigkeiten in komplexen Arbeitsumgebungen übernehmen. Mechanisierung kann mit einer Verringerung des Aktivitätsniveaus verbunden sein. In komplexen Arbeitsumgebungen liefern die Ergebnisse ein widersprüchliches Bild. Generell können höher automatisierte Systeme mit einer Beanspruchungsreduktion zusammenhängen, jedoch bestehen Unterschiede im Hinblick auf die verschiedenen Umsetzungsformen von Grad und Level der Automatisierung. Einschränkungen des Entscheidungsspielraums durch die LOA-Wahl können negativ erlebt werden. Eine weitere Facette des Befindens – das Vertrauen in das System – scheint in engem Zusammenhang zur erlebten Beanspruchung zu stehen.

4.1.3. Erkenntnisse zum Merkmal Funktionsteilung und Motivation sowie Arbeitszufriedenheit

Zu Aussagen darüber, ob und wie sich die Funktionsteilung bei der Mensch-Maschine-Interaktion auf die Motivation sowie Arbeitszufriedenheit der Mitarbeiter auswirkt, kommen lediglich drei Studien.

Kemp und Clegg (1987) ziehen aus einer feldbasierten Querschnittstudie mit 23 Bedienern von CNC-Maschinen (*Computer Numerical Controlled*) den Schluss, dass der Großteil der Befragten (78 Prozent) sich nach Einführung der Maschinen als zufrieden mit den Möglichkeiten, ihre Fähigkeiten einzusetzen, bezeichnet. Allgemein empfinden die CNC-Operateure ihre Tätigkeit als verantwortungs- und bedeutungsvoll (Kemp & Clegg, 1987). Leider können die Autoren diese Ergebnisse nicht mit empirischen Kennzahlen unterstützen, sodass auch keine Vergleichswerte für Maschinenbediener, die nicht an CNC-Geräten arbeiten, vorliegen. Auch die Prozesskontrolloperateure aus der Studie von Hockey und Maule (1995) werden hinsichtlich ihrer Arbeitszufriedenheit befragt. Diese unterscheidet sich nicht in Abhängigkeit von der Betriebsart ($t(29) = 2,01, p > ,05$). Die erhöhte Beanspruchung, die mit der Arbeit im Modus der vorwiegend manuellen Bedienung (*loop activity*) einhergeht, kann somit nicht durch höhere Zufriedenheitswerte kompensiert werden. Tielsch und Hofmann (1992), die keinen Einfluss des Technologieniveaus auf das Beanspruchungserleben nachweisen können, zeigen in ihrer Studie weiterhin, dass auch kein

statistisch signifikanter Effekt zwischen dem Technologieniveau und der Arbeitszufriedenheit besteht.

Die schmale Datenbasis von drei Studien, die aus dem Selektionsprozess der Studien resultiert, weist darauf hin, dass Einführung von neuen Technologien wie CNC-Maschinen mit positiven Effekten auf die Arbeitszufriedenheit verbunden sein kann. Für bestehende Systeme lässt sich aufgrund der unzureichenden Studienlage keine gesicherte Aussage darüber treffen, wie die Funktionsteilung zwischen Mensch und Maschine sowie das Technologieniveau die Arbeitszufriedenheit beeinflussen.

4.1.4. Erkenntnisse zum Merkmal Funktionsteilung und Leistung

Eine zentrale Fragestellung, die häufig im Rahmen von Studien zur MMI untersucht wird, besteht darin, wie sich die Gestaltung der Funktionsteilung auf die Leistung des Bedieners bzw. auf die Gesamtleistung des Systems auswirkt. Mit elf Studien, die Aussagen zu dieser Frage treffen, stellt die AV-Kategorie Leistung den zweitgrößten Outcome-Block zum Merkmal Funktionsteilung dar. Leistungsmerkmale werden in den extrahierten Studien auf vielfältige Weise operationalisiert. Insbesondere in Simulationsstudien wird auf Log-Daten zurückgegriffen, anhand derer die Fehlerzahl, Reaktionszeiten oder Genauigkeitswerte bestimmt werden können. Doch auch die Anzahl bearbeiteter Aufgaben oder das Situationsbewusstsein werden in diesem Outcome-Block thematisiert. Dabei bestätigen die Studien in der Regel die Annahme, dass die Einführung von Automation mit Leistungsvorteilen verbunden ist.

Zum Thema Leistung konnte im Rahmen des Vorgehens eine Sekundärstudie gefunden und extrahiert werden. Das Review von Onnasch et al. aus dem Jahr 2014, das bereits im Kapitel zur AV-Kategorie Befinden beschrieben wurde, legt einen weiteren Fokus auf die Leistungsfolgen, die mit verschiedenen Automationsgraden einhergehen. Die Metaanalyse konnte für 16 Studien den Zusammenhang zwischen dem Grad der Automation und der Leistung in der Hauptaufgabe berechnen. Der Rangkorrelationskoeffizient Kendalls Tau liegt hier bei $\tau = ,51$ ($p < ,001$), was positive Auswirkungen der Automatisierung auf die Leistung belegt (Onnasch et al., 2014). Ein weiteres Leistungsmaß ist die Leistung in der Hauptaufgabe im Falle eines Automationsausfalls. Die Metaanalyse schließt für diesen Zusammenhang neun Studien ein, die zusammen zu einem negativen Rangkorrelationskoeffizienten führen ($\tau = -,34$, $p = ,03$). Das bedeutet, dass bei Ausfällen des automatisierten Systems mit Leistungseinbußen zu rechnen ist (ebd.). Somit kann insgesamt der sog. „*lumberjack*“-Effekt bestätigt werden. Bei diesem Effekt wird davon ausgegangen, dass mit zunehmendem Automationsniveau in Routinesituationen eine Leistungsverbesserung zu verzeichnen ist, der Ausfall des automatisierten Systems jedoch mit negativen Leistungsfolgen verbunden ist. Der Effekt scheint besonders ausgeprägt zu sein, wenn der Bediener der Automation zuvor nicht „in der Schleife“ gehalten worden ist und mit einem hohen Automationsgrad (z. B. Handlungsauswahl) gearbeitet hat. Bei den Ergebnissen dieser Studie ist jedoch zu berücksichtigen, dass bei der Studienauswahl keine Eingrenzung auf Basis des Kontextes getroffen wird, wodurch auch Forschungsarbeiten aus dem Transport-, Luftfahrt- oder Militärbereich in die Metaanalyse eingehen.

Im Bereich der experimentellen Interventionsstudien konnten zehn Journalartikel gefunden werden, die zu Aussagen hinsichtlich des Zusammenhangs von Funktionsteilung und Leistung kommen. Alle Studien wurden in Laborumgebungen angefertigt und hatten Stichproben mit einem $n > 100$. Zudem basieren die Ergebnisse bei neun von zehn Studien auf

studentischen Stichproben. Die Herkunft einer Stichprobe konnte anhand der Angaben im Text nicht nachvollzogen werden.

Insgesamt weisen viele Studien darauf hin, dass automatisierte Systeme, die den Bediener unterstützen, mit einem Leistungsvorteil verbunden sind. Auf der Ebene des Automationsgrads finden sowohl Manzey et al. (2012) als auch Röttger et al. (2009) heraus, dass ein höherer Automationsgrad mit besserer Leistung einhergeht.

Die Entscheidung darüber, welcher Ansatz zur Gestaltung des Automationslevels verwendet werden soll, scheint keine starken Auswirkungen auf die Leistung der Bediener zu haben. Der Vergleich statischer und menschgesteuerter adaptiver Automation (Sauer et al., 2013) zeigt vergleichbare Leistungen in den beiden Modi und lediglich für die Reaktionszeit in einer Zweitaufgabe einen leichten Vorteil für die statische Zuweisung des Automationslevels. Der Vergleich von mensch- und systemgesteuerter adaptiver Automation lässt keine Unterschiede in der allgemeinen Leistung erkennen. Jedoch führen die Teilnehmer unter der selbst gesteuerten Automation deutlich mehr Kontrollhandlungen und Anpassungen des LOA durch als die Versuchspersonen, die mit einem systemgesteuerten adaptiven System arbeiten, obwohl die Gruppe mit dem selbst gesteuerten adaptiven System durchschnittlich sogar ein höheres LOA wählt (Sauer et al., 2012). Ein gemischtes Bild zeichnet auch die Studie von Sauer et al. aus dem Jahr 2011, in der verschiedene Modi menschgesteuerter adaptiver Automation miteinander verglichen werden. Während sich in der Fehlerentdeckungszeit keine Unterschiede zwischen den drei Versuchsbedingungen finden lassen, erkennt die Gruppe mit dem „erzwungenen“ LOA-Wechsel (*forced choice*) mehr Fehler als die anderen beiden Gruppen ($F(2, 57) = 4,91, p = ,011, \eta^2 = ,147$). Dieser Effekt bewegt sich im hohen Effektstärkenbereich. Auch die Zweitaufgabe wird von den Versuchsteilnehmern in der „forced-choice“-Bedingung besser bewältigt als von den Versuchsteilnehmern in den anderen beiden Modi ($F(1,57) = 27,71, p < ,001, \eta^2 = ,327$). Das gewählte LOA unterscheidet sich mit einer mittleren Effektstärke bedeutsam zwischen den drei Modi der menschgesteuerten adaptiven Automation: Die Probanden in der „forced-choice“-Bedingung wählen durchschnittlich ein höheres LOA ($F(1,57) = 3,49, p = ,037, \eta^2 = ,109$). Die Ergebnisse weisen somit darauf hin, dass die Entscheidung darüber, wie die Zuweisung des LOA erfolgt, nur mit geringen Leistungsunterschieden verbunden ist und keine eindeutigen Vor- oder Nachteile identifiziert werden können. Eine ähnliche Fragestellung wird von Bailey et al. (2006) verfolgt. Doch während sie in einem ersten Experiment keine bedeutsamen Unterschiede zwischen einem systemgesteuerten adaptiven System und einem gespiegelten System finden, können sie in einem zweiten Experiment signifikante Unterschiede zwischen einem menschgesteuerten adaptiven und dem gespiegelten System nachweisen. Dabei zeigt sich mit einer mittleren Effektstärke, dass die Probanden in einer Teilaufgabe schlechtere Leistungen erzielen, wenn sie mit dem System, dessen Einstellung sie selbst kontrollierten, arbeiteten ($F(1,28) = 11,82, p < ,01, d = 0,91$).

Für das Automationslevel empfehlen Sauer et al. (2013) mittlere LOA, da diese eine gute Kombination aus Leistungsvorteilen und subjektiven Kosten darstellen. Für die Fehlererkennung in einem simulierten System ergibt sich ein signifikanter Effekt mit einer hohen Effektstärke ($F(3,36) = 6,81, p < ,001, \eta_p^2 = ,36$) für das Automationslevel, wobei die Probanden in der Bedingung mit einem mittleren LOA (LOA 5) die Fehler am schnellsten erkennen. Die Kraftwerkssimulation von Lin et al. (2010), bei der ein niedriges Automationslevel (LOA 2, Handlungsunterstützung) einem hohen Automationslevel (LOA 9, Systemüberwachung) gegenübergestellt wird, führt zu dem Ergebnis, dass die Antwortzeiten in

einer Zweitaufgabe unter der LOA-2-Bedingung langsamer sind als mit der höheren automatischen Unterstützung. Die Probanden in beiden Bedingungen zeigen jedoch ein vergleichbares Situationsbewusstsein (Fremdeinschätzung mithilfe der *Situation Awareness Global Assessment Technique*), was ebenfalls einen Leistungsindikator darstellt.

Positive Leistungseffekte, die mit einem automatisierten System einhergehen können, sollten jedoch nicht isoliert betrachtet werden. Auch Rovira et al. (2007) stellen in ihrer Studie fest, dass sich die Leistung der Probanden mit einem automatischen Unterstützungssystem verbessert. Entscheidend für das Eintreten dieses Effekts sind jedoch auch die Eigenschaften des Systems. Beispielsweise finden Rovira et al., dass ein unzuverlässiges Unterstützungssystem zu einer Verringerung der Leistung beitragen kann. Auf den Einfluss von speziellen Systemeigenschaften wird in einem späteren Kapitel (UV-Merkmal Bedienung/Überwachung) näher eingegangen. Weiterhin sind die Anforderungen der Aufgabe von großer Bedeutung dafür, ob und wie ein automatisches System die Leistung unterstützen kann. Tattersall und Morgan finden, dass bei der Entscheidung für ein statisches oder ein menschgesteuertes adaptives System auch die Aufgabenanforderungen beachtet werden sollten. Denn während sich die Leistung der Probanden bei mittleren Anforderungen kaum unterscheidet, tragen höhere Aufgabenanforderungen dazu bei, dass die Probanden mit dem menschgesteuerten adaptiven System bessere Ergebnisse erzielen (Tattersall & Morgan, 1997). Auch Sheik-Nainar, Kaber und Chow (2005) betonen in ihrer Untersuchung, bei der die Fernsteuerung von Robotern im Fokus steht, dass eine geteilte Kontrolle von Mensch und Automation (*telerobotic mode*) in zeitkritischen und beanspruchenden Situationen Vorteile bieten kann. Die ausschließliche Kontrolle durch den Menschen (*teleoperation mode*) kann hingegen in fehlersensiblen Situationen vorteilhaft sein (Sheik-Nainar, Kaber, & Chow, 2005).

Zusammenfassend kann aus den elf extrahierten Studien geschlossen werden, dass der Einsatz eines automatischen Unterstützungssystems in der Regel mit Leistungsvorteilen für den Systembediener verbunden sein kann. Dabei ist im Kontext der zu bearbeitenden Aufgabe und der dadurch entstehenden Anforderungen jedoch zu beachten, dass ein angemessenes DOA und LOA gewählt werden. Sowohl die Gestaltung des Automationsgrades (DOA) als auch die Art der Zuweisung des Automationslevels kann bei einzelnen Leistungsparametern unterschiedliche Effekte hervorrufen, wobei sich jedoch kein eindeutiges Muster erkennen lässt. Zudem bestehen enge Wechselwirkungen zwischen der Leistung, die in einer Aufgabe erbracht wird, und den Befindenzuständen. Beispielsweise können mit adaptiver Automation Leistungsvorteile erzielt werden, aber Aspekte wie Selbstvertrauen, Beanspruchung und der Wunsch nach Kontrolle werden nicht in der gleichen Weise beeinflusst. Diese Verknüpfungen sollten bei der Gestaltung der Funktionsteilung berücksichtigt werden.

4.1.5. Erkenntnisse zum Merkmal Funktionsteilung und Arbeitsplatzcharakteristika

Eine weitere Besonderheit, die mit der Einführung von Maschinen und automatischen Systemen sowie der darauf folgenden Funktionsteilung verbunden ist, besteht darin, dass sich Merkmale des Arbeitsplatzes und auch der Arbeitsaufgabe verändern können. Da sich diese Veränderungen nicht mithilfe der vorgegebenen AV-Kategorien abbilden lassen, wurde eine weitere Kategorie ergänzt. Unter Arbeitsplatzcharakteristika werden alle die Studien beschrieben, aus denen Veränderungen der Arbeitsplatzmerkmale hervorgehen, die in der Folge womöglich indirekt Einfluss auf die psychische Gesundheit nehmen.

Für das Merkmal Funktionsteilung konnten sieben Feldstudien extrahiert werden, die auf veränderte Arbeitsplatzcharakteristika hinweisen. Die Studien werden größtenteils mit Erwerbstätigen durchgeführt und beziehen sich auf Situationen, in denen eine Mechanisierung – also eine Funktionsteilung auf einer sehr basalen Ebene – stattfindet.

Im Kontext der häufig geäußerten Annahme, dass die Automatisierung von Arbeitsplätzen mit einem Fähigkeitsverlust einhergeht, führt Zicklin 1987 eine qualitativ angelegte Interviewstudie mit zwölf NC-Operateuren (*Numerically Controlled*) in der Metallverarbeitung durch. Im besonderen Fokus stehen für ihn die Fähigkeiten und Anforderungen, die bei der Arbeit mit NC-Maschinen im Vergleich zur Arbeit an konventionellen Maschinen bestehen. Zicklin kommt zu dem Schluss, dass die Arbeit an NC-Maschinen tatsächlich den Fähigkeitsmix der Bediener beeinflusst. Die Ergebnisse wiesen dabei einerseits auf positive Aspekte wie ein höheres technisches Verständnis, bessere Maschinenkenntnis und Verantwortungsempfinden gegenüber der Maschine hin. Andererseits sind auch negative Aspekte mit der Arbeit an NC-Maschinen verbunden wie bspw. Langeweile und Monotonieerleben (Zicklin, 1987). Die bereits erwähnte Studie von Kemp und Clegg (1987) untersucht ebenfalls Bediener von CNC-Maschinen und findet, dass die Bediener ihre Tätigkeit trotz der Einführung von CNC-Maschinen als variabel einschätzen. Zudem erhalten sie durch ihren Job Feedback und Identität sowie die Möglichkeit, eigene Arbeitsmethoden anzuwenden (ebd.). Majchrzak, Collins und Mandeville (1986) untersuchen CAD-Operateure (*Computer-Aided Design*) und finden bei diesen gleichermaßen eine höhere Identifikation mit den Aufgaben als bei deren Kollegen, die nicht mit dem CAD-System arbeiten ($t = 2,06$, $df = 32$, $p < ,05$). Im Gegensatz zu den Ergebnissen von Kemp et al. (1987) weisen die Autoren jedoch mit einer mittleren Effektstärke nach, dass ein Zusammenhang zwischen der zeitlichen Zunahme der CAD-Nutzung und einer Formalisierung von Regeln besteht (Korrelation zwischen prozentualem Anteil der Zeit mit CAD-Nutzung und Deformalisierung von Regeln: $r = -,47$, $p < ,05$ (Majchrzak, Collins, & Mandeville, 1986). Die von Claussner und Müller (1989) beschriebene Einführung eines Druckgussautomaten erfasst neben gesundheitlichen Aspekten auch die Veränderung des Arbeitsplatzes. Mithilfe der Subjektiven Arbeitsanalyse (Udris & Alioth, 1980) stellen die Autoren fest, dass die Werkstätigen ihre Arbeit als verantwortungsvoll und vielseitig empfinden, obwohl nur geringe Möglichkeiten der Einflussnahme auf den Tätigkeitsverlauf (Autonomie) gegeben sind.

Ein überwiegend positives Bild zeichnet die Studie von Zikiye und Zikiye (1992), die 98 Erwerbstätige in verschiedenen Produktionsunternehmen befragen. Die zunehmende Automation von Funktionen führt zu einem erhöhten Koordinationsaufwand und zu einer Ausweitung der Fähigkeiten. Negative Effekte auf die Arbeitsgeschwindigkeit können nicht festgestellt werden, obwohl eine Steigerung dieser zu verzeichnen ist.

Die nachfolgenden Studien verfolgen einen sehr ähnlichen Forschungsansatz und zeigen, dass eine zunehmende Automatisierung von Produktionstätigkeiten unterschiedliche Folgen auf die Merkmale des Arbeitsplatzes und der Arbeitstätigkeit haben kann: Balogh et al. (2006) finden im Zusammenhang mit den gesundheitlichen Folgen der zunehmenden Mechanisierung in der Holzverarbeitung auch Auswirkungen auf Arbeitsplatzcharakteristika. Demnach verändern sich die Arbeitsorganisation und die Arbeitstätigkeiten insbesondere mit der Einführung der vollautomatischen Produktionslinie. Die Autoren kommen zu dem Schluss, dass die Anlage trotz des hohen Automationsgrads ein profundes Expertenwissen von den Mitarbeitern erfordert. Zudem gewinnen neue Kompetenzen – unabhängig von der manuellen Arbeit – an Bedeutung. Dazu gehören die computergestützte

Arbeit und der Umgang mit Prozessbeeinträchtigungen (ebd.). Insgesamt schließen Balogh et al. (2006) aus ihren Ergebnissen, dass die Automatisierung der Produktionslinie zu einer komplett neuen Arbeitssituation führt, die eine Erweiterung der Tätigkeit darstellt und neue Qualifikationsanforderungen mit sich bringt.

Einen ähnlichen Ansatz verfolgen auch Rafnsdottir und Gudmundsdottir (2004), die Mitarbeiter in drei Fischverarbeitungsbetrieben untersuchen. Aus der Befragung der etwa 350 Beschäftigten ergibt sich, dass mit einer zunehmenden technologischen Entwicklung der Produktionsanlagen eine Verringerung der Entscheidungshoheit verbunden ist. Dies zeigt sich insbesondere bei der Aussage „Ich kann meine Arbeitsgeschwindigkeit nicht reduzieren, ohne mein Gehalt zu verringern“, die von den Mitarbeitern der drei Fabriken unterschiedlich beantwortet wurde. Die Unterschiede in den Antworten waren statistisch bedeutsam: $\chi^2 = 6,494$, $p = ,0339$ (Rafnsdottir & Gudmundsdottir, 2004). Auch andere Arbeitsplatzmerkmale und -anforderungen zeigen signifikante Unterschiede zwischen den drei Entwicklungsstufen. Dazu gehören bspw. eine körperlich monotone Tätigkeit ($\chi^2 = 6,587$, $\beta = ,037$), hohe Konzentrationserfordernis ($\chi^2 = 14,181$, $p = ,001$) sowie eine mental beanspruchende Tätigkeit ($\chi^2 = 8,536$, $p = ,014$).

Zusammenfassend weisen die sieben Feldstudien darauf hin, dass mit der Funktionsteilung zwischen Mensch und Maschine Veränderungen von Arbeitsplatzmerkmalen stattfinden. Diese Veränderungen wirken sich häufig auf den Handlungs- und Entscheidungsspielraum (HEAV) der Beschäftigten aus, wodurch eine Verbindung der beiden Arbeitsbedingungsfaktoren MMI und HEAV deutlich wird. Insbesondere die Einführung neuer Technologien, mit denen aktiv interagiert wird, kann mit einem Fähigkeitszuwachs verbunden sein. Die jeweilige Gestaltung der Systeme kann jedoch auch in bestimmte Tätigkeitsmerkmale wie Autonomie eingreifen und den Entscheidungsspielraum von Beschäftigten begrenzen. Weitere Erkenntnisse zu diesem Zusammenhang werden im Kapitel zum Merkmal Bedienung/Überwachung beschrieben.

4.2. Erkenntnisse zum Merkmal Schnittstelle

Die Erkenntnisse zur Schnittstelle können in verschiedene Unterfacetten eingeteilt werden. Auf der einen Seite stehen dabei Gestaltungsaspekte der Schnittstelle selbst wie Informationsdarstellung oder Farbauswahl (vgl. Kapitel 4.2.1. ff.). Laut Heinecke kann die Mensch-Computer-Interaktion auf verschiedenen Ebenen betrachtet werden, von denen eine auch die Ein- und Ausgabeschnittstelle darstellt. Diese „umfasst alle Informationsdarstellungen und Eingaben“ (Heinecke, 2012, S. 19).

Auf der anderen Seite können verschiedene Interaktionskonzepte gefunden werden, die die MMI beeinflussen (vgl. Kapitel 4.2.2. ff.). Diese Interaktion zwischen Mensch und System kann auch als Dialogbetrieb bezeichnet werden. Dieser „zeichnet sich dadurch aus, dass ein ständiger Wechsel der Aktivität zwischen Mensch und Rechnersystem vorhanden ist“ (Heinecke, 2012, S. 3) und verschiedene Rückmeldeprozesse bestehen. Weiterhin beschreibt der Autor, dass interaktive Systeme dadurch gekennzeichnet sind, dass Benutzer durch Bedienhandlungen einen Einfluss auf den Arbeitsablauf des Systems ausüben können. Auch die direkte Manipulation von Inhalten mithilfe von Eingabegeräten wird vom Begriff der Interaktion umfasst. Im Zuge der technologischen Entwicklung können zudem Informationen vielfältig dargestellt werden und es entwickeln sich neue Arten der Interaktion. „Für die Ein- und Ausgabe wurden so immer mehr verschiedene Medien benutzt.“ (Heinecke, 2012, S. 10) Laut Heinecke können Medien, also spezifische Darstellungsfor-

men von Informationen, unterschiedlich klassifiziert werden. So auch nach deren Perzeption (Heinecke, 2012), sodass in dem Kapitel zu Interaktionskonzepten auch verschiedene Rückmeldemodalitäten betrachtet werden.

Beide Facetten können gemeinsam als Benutzungsschnittstelle bezeichnet werden. Laut DIN EN ISO 9241-110 umfasst die Benutzungsschnittstelle „alle Bestandteile eines interaktiven Systems (Software oder Hardware), die Informationen und Steuerungselemente zur Verfügung stellen, die für den Benutzer notwendig sind, um eine bestimmte Arbeitsaufgabe mit dem interaktiven System zu erledigen“. (DIN EN ISO 9241-110:2008-09)

Im Rahmen der Schnittstellengestaltung sollen zudem Roboter als eine besondere Form der Schnittstelle hervorgehoben werden. Sie sind Darstellungs- und Interaktionsmedium zugleich. Neue Technologien im Bereich der Sensorik und Aktorik haben in den vergangenen Jahren zudem die Entwicklung von Robotern mit umfangreichen Fähigkeiten beschleunigt. Mit diesen gehen teilweise neue Anforderungen an Gestaltung und Einsatz einher. Doch auch die Zusammenarbeit mit Industrierobotern bleibt ein wichtiger Aspekt der Mensch-Maschine-Interaktion. Die Mensch-Roboter-Interaktion zeichnet sich dadurch aus, dass die Interaktionen zwischen einem oder mehreren Menschen und einem oder mehreren Robotern verstanden und geformt werden soll. Wichtige Aspekte dabei beziehen sich auf die Autonomie; die Art des Informationsaustauschs; die Struktur des Teams; Anpassung, Lernen und Training von Mensch und Roboter; sowie die Art der Aufgabe (Goodrich und Schultz, 2007).

Im Sinne der besseren Lesbarkeit werden im nachfolgenden Kapitel zunächst alle Studien, die sich auf die Schnittstelle selbst beziehen, vorgestellt. Im Anschluss daran erfolgt die Darstellung der Studien, die Interaktionsaspekte fokussieren. Abschließend wird auf die Studien zur Mensch-Roboter-Interaktion eingegangen. Für die drei Unterfacetten folgt die Struktur den Outcome-Bereichen. Tabelle 2 stellt summiert für alle Unterfacetten Anzahl und Art der extrahierten und im Folgenden betrachteten Studien zum Themenfeld Schnittstelle und Mensch-Maschine-Interaktion dar. Dabei sind Mehrfachnennungen möglich, da Studien häufig mehr als ein Outcome betrachten.

Tab. 2 Übersicht über die Studien zum Zusammenhang zwischen dem Merkmal Schnittstelle und den Outcomes

	Sekundärstudien	Primärstudien						
		Interventionsstudien		Nicht-Interventionsstudien				
				Längsschnitt		Querschnitt		Sonstige
		F	L	F	L	F	L	
Gesundheit			1			1	1	
Befinden			19					
Motivation sowie Arbeitszufriedenheit		1						
Leistung		2	28			2		
Sonstige (Arbeitsplatzcharakteristika)								
Gesamt		2	35			3	1	

4.2.1. Erkenntnisse zum Merkmal Schnittstelle mit Fokus auf Schnittstellengestaltung

Erkenntnisse zum Merkmal Schnittstellengestaltung und Gesundheit

Gesundheitliche Aspekte der Schnittstellengestaltung können aus drei Studien gewonnen werden. Die experimentelle Studie von Kampmeier, Cucera, Fritzsche, Brau, Duthweiler und Lang aus dem Jahr 2007 dient der Analyse möglicher ophthalmologischer und arbeitspsychologischer Ursachen für unbestimmte körperliche Beschwerden, die von Probanden beim Tragen von *Head-Mounted Displays* (HMD) berichtet werden (Kampmeier et al., 2007). Die Stichprobe für die Untersuchung besteht aus 45 Studenten, die in drei Gruppen eingeteilt werden. Eine Gruppe führte die zu bearbeitende Aufgabe in Papierform mit konventionellen Hilfsmitteln durch, die andere Gruppe trägt ein ausgeschaltetes HMD und führt die Aufgabe ansonsten ebenfalls in Papierform durch. Nur die letzte Gruppe bearbeitet die Aufgabe vollständig mit der Unterstützung durch das HMD (ebd.). Die ophthalmologischen Kennwerte werden per Fremdeinschätzung in einer Augenklinik bestimmt. Zudem geben die Probanden im Rahmen einer Nachbefragung ihre erlebten Beschwerden an. Die Autoren stellen bei den ophthalmologischen Untersuchungen „keinerlei morphologische oder funktionelle Veränderungen der relevanten augenmedizinischen Parameter durch die Arbeit mit dem AR Gerät“ (Kampmeier et al., 2007, S. 593 f.) fest. In der Probandengruppe, die mit dem angeschalteten HMD arbeitete, wurden von etwa 20 Prozent der Probanden physische Mehrbelastungen wie Augenbeschwerden berichtet. Aspekte der Hardwareergonomie wie Tragekomfort und Gewicht sind für subjektive Beschwerden wie Kopfschmerzen mitverantwortlich.

Auch die Studie von Ames, Wolffsohn und McBrien (2005) untersucht visuelle und nicht visuelle Symptome, die bei der Arbeit mit HMDs auftreten können. Die querschnittsbasierte Laborstudie mit 16 studentischen Probanden ist so aufgebaut, dass die Versuchsteilnehmer zunächst ein 20-minütiges Video mit dem HMD ansehen sollen und anschließend den *Virtual Reality Symptom Questionnaire*, der im Rahmen der Studie entwickelt wurde, beantworten. Der Fragebogen wird nach dem Ende des Videos über eine Dauer von 20 Minuten im Zwei-Minuten-Takt dargeboten, um die Zeitstabilität möglicher Beschwerden zu erkennen. Häufig aufgetretene nicht visuelle Beschwerden sind Fatigue, Benommenheit, allgemeines Unwohlsein und Kopfschmerzen. Zu den visuellen Beschwerden, die berichtet werden, gehören müde Augen sowie Augenbelastung. Die Autoren beobachten, dass die Beschwerdesymptome nach wenigen Minuten wieder abflachen, sodass bereits nach acht Minuten keine Effekte mehr bestehen (Ames, Wolffsohn, & McBrien, 2005).

Neben diesen beiden Studien zur HMD-Nutzung konnte eine weitere Studie extrahiert werden, in der die Untersuchung gesundheitlicher Auswirkungen der Schnittstellengestaltung im Fokus steht. In einer Querschnittstudie im Feld gehen Hsu und Wang (2003) der Frage nach, welcher Zusammenhang zwischen ergonomischen und psychosozialen Risikofaktoren und visuellem und muskulärem Diskomfort bei Nutzern von Bildschirmgeräten (*visual/video display terminal*, VDT) besteht. Für die 119 Mitarbeiter eines Halbleiterherstellers zeigt sich mit einer mittleren Effektstärke, dass mit zunehmender Dauer der Bildschirmnutzung eine höhere Chance für Schulterschmerzen besteht (OR = 1,62, CI 95% = 1,21-2,16, $p < ,001$). Gleiches gilt für das Auftreten von Schmerzen im oberen Arm (OR = 1,74, CI 95% = 1,08-2,78, $p < ,05$) (Hsu & Wang, 2003). Die Prävalenz für Diskomfort in den oberen Extremitäten war außerdem bei Vollzeit-VDT-Nutzern höher ausgeprägt als bei Teilzeit-VDT-Nutzern (ebd.).

Aus der Interventions- und den zwei Querschnittstudien zeigt sich, dass der Einsatz von Bildschirmgeräten und Displays mit verschiedenen körperlichen Beschwerden verbunden sein kann. Die Nutzungsdauer und ergonomische Aspekte der Gestaltung der jeweiligen Geräte scheinen dabei Einflussfaktoren für das Auftreten der Beschwerden darzustellen.

Erkenntnisse zum Merkmal Schnittstellengestaltung und Befinden

Bei der Datenextraktion konnte festgestellt werden, dass insbesondere bei Studien, die die Darstellung von Informationen und die Gestaltung von Displays zum Thema haben, Variablen wie Nutzerzufriedenheit oder die Einfachheit der Bedienung Teil des erhobenen Variablensets sind. Diese Variablen beziehen sich auf die Bewertung des entsprechenden Systems oder der Interaktionsqualität und stellen mit ihrer Valenzorientierung eine zusätzliche Befindensfacette dar. Insbesondere das Zusammenspiel von Leistung und Nutzerfreundlichkeit kann relevante Hinweise für die Gestaltung von Maschinen und Systemen beinhalten. Daher werden auch diese Ergebnisse berichtet.

Insgesamt sind neun Studien zum Zusammenhang zwischen der Schnittstellengestaltung und dem Befinden extrahiert worden. Bei allen Studien handelt es sich um Interventionsstudien nach dem oben beschriebenen Verständnis, die unter Laborbedingungen durchgeführt wurden.

Zunächst sollen Ergebnisse zu verschiedenen Darstellungsformen von Schnittstellen vorgestellt werden. Van Laar und Deshe (2007) untersuchen die Abbildung von Prozessdaten mithilfe verschiedener Displayformate und Farbkodierungen. Die Daten werden dabei mit-

hilfe der Displayformate Balkendiagramm, Blindschaltbild und Trenddiagramm abgebildet. Während sich die erlebte Beanspruchung – hier gemessen mit dem NASA-TLX (Hart & Staveland, 1988) – nicht zwischen den verschiedenen Abbildungsformaten unterscheidet, kann ein signifikanter Unterschied hinsichtlich der subjektiven Nutzerzufriedenheit beobachtet werden ($F(3,69) = 5,2, p < ,01$): Die Probanden bevorzugen Blindschaltbilder und Trenddiagramme gegenüber Balkendiagrammen. Hinsichtlich der Farbgestaltung ist zunächst die von den Autoren verwendete Methode des *Visual Layering* zu beschreiben. Diese zeichnet sich dadurch aus, dass aufgabenrelevante Informationen durch eine Farbkodierung vermittelt werden. Beispielsweise sind weniger wichtige Informationen durch eine weniger stark gesättigte Färbung gekennzeichnet. Die Autoren können feststellen, dass die Farbkodierung sich signifikant auf die subjektiv empfundene Arbeitsbelastung der 24 Versuchsteilnehmer auswirkt ($F(2,46) = 4,03, p = ,024$) (Van Laar & Deshe, 2007). Im Versuch schätzen die Probanden die Aufgabe als weniger beanspruchend ein, wenn sie mit dem Display arbeiten, das mithilfe der *Visual-Layering*-Methode gestaltet wurde, als wenn das Display auf eine maximale Diskriminierbarkeit ausgelegt ist. Der Vergleich von *Visual Layering* und monochromer Darstellung kann keinen solchen Effekt aufweisen. Die Studie findet zudem signifikante Unterschiede in den subjektiven Bewertungen der Nutzerzufriedenheit zwischen den verschiedenen Varianten der Farbkodierung, wobei das *Visual Layering* am besten bewertet wird, gefolgt von der maximal diskriminierbaren und der monochromen Farbgestaltung ($F(1,8,41,7) = 56,7, p < ,001$) (ebd.). In einer ähnlichen Studie können die Autoren zudem aufzeigen, dass 83 Prozent ihrer Versuchsteilnehmer das *Visual-Layering*-Display als am einfachsten zu bedienen einschätzen (Van Laar & Deshe, 2002). Bei der Frage danach, wie gern die Teilnehmer der Studie mit den verschiedenen Farbkonfigurationen arbeiten würden, lässt sich mit einer Zustimmung von 83 Prozent der Befragten ebenfalls eine hohe subjektive Präferenz für das *Visual-Layering*-Display erkennen (ebd.). Auch Zülch und Stowasser untersuchen in einer Studie mit 15 Probanden den Einfluss einer Farbkodierung (monochrom oder farbig) auf die Leistung und das subjektive Empfinden der Probanden in einer Aufgabe, die an die Auftragsplanung im Fertigungsbereich angelehnt war. Die Autoren können dabei eine subjektive Präferenz ihrer Probanden für das farbige Display feststellen (Zülch & Stowasser, 2003). Neben der farblichen Repräsentation von Informationen auf Displays wurde auch die Art der Darstellung in vielen Studien untersucht. So befassen sich Skjerve und Skraaning (2004) mit dem Vergleich einer konventionellen Benutzerschnittstelle für die Überwachung in einer Leitzentrale mit einer experimentellen Schnittstelle. Diese zeichnet sich dadurch aus, dass der Systemzustand durch eine explizite Repräsentation leichter zu überwachen sein soll. Um dieses Ziel zu erreichen, werden einerseits Gestaltprinzipien eingesetzt, andererseits wird visuelles und auditives Feedback bei wichtigen Bediensritten und bei Abweichungen dargeboten. Für ihre Studie, die aus zwei Experimenten besteht, können die Autoren 16 und 18 lizenzierte Operateure (100 Prozent männlich) gewinnen. Die Zusammenarbeit der Operateure mit dem System wird mit dem Halden Human-Automation Cooperation Questionnaire (Skjerve, 2002) gemessen. Dieser erfordert von den Operateuren eine Bewertung der Aktivität des automatisierten Systems, z. B. im Hinblick auf Kommunikation, Normen und gemeinsame Ziele. Die Auswertung der Versuche zeigt mit einer mittleren Effektstärke, dass die Kooperation zwischen Mensch und Automation mit der experimentellen Benutzerschnittstelle besser eingeschätzt wird als mit dem konventionellen Abbildungsformat ($F(1,7) = 10,94, p < ,013, \omega^2 = ,24$) (Skjerve & Skraaning, 2004).

Im Kontext der Fernsteuerung eines Roboters untersuchen Eliav, Lavie, Parmet, Stern und Edan (2011) wie sich verschiedene Arten der Informationsdarstellung und der Steuerung auf die Leistung und das Befinden der Bediener auswirken. Die Autoren wählen drei Dar-

stellungsformen, um die Sensordaten des Roboters abzubilden: Beim Blockdisplay ist das Videofeld von farbigen Blöcken umrahmt, die die Informationen der Sensoren enthalten. Das Head-up-Display (HUD) bildet die Sensorinformationen an ihrer tatsächlichen Position am Roboter ab. In einem zweiten Versuch wird zudem eine radarähnliche Darstellungsform gewählt, bei der der Roboter durch ein weißes Dreieck in der Mitte des Radars dargestellt wird. Dieses Dreieck wird von drei Kreisen umrundet, die die Abstandsbereiche zu möglichen Hindernissen anzeigen. Der erste Versuch mit 26 Studenten führt zu dem Ergebnis, dass keine Unterschiede in der subjektiven Präferenz für das Blockdisplay oder das Head-up-Display bestehen. Im zweiten Versuch, an dem 20 Studenten teilnehmen, wird das Head-up-Display gegenüber dem Radar-Display vor allem hinsichtlich der Nutzerzufriedenheit ($F(1,28) = 6,35, p < ,05$) und der wahrgenommenen Effizienz ($F(1,28) = 4,4, p < ,05$) bevorzugt (Eliav, Lavie, Parmet, Stern, & Edan, 2011).

Die Integration von verschiedenen Informationen sowie die Frage danach, welche Inhalte in einem Display untergebracht werden sollen, stehen im Fokus weiterer Studien. Im Rahmen einer Montageaufgabe überprüft die Studie von Gerace und Gallimore (2001), ob ein Snapshot-Diagramm, das Bilder der zu montierenden Teile in Diagrammknoten integriert, mit Leistungsverbesserungen und subjektiver Präferenz im Vergleich zu einer konventionellen Abbildungsform einhergeht. Eine zweite Fragestellung der Studie besteht darin, zu erfassen, inwieweit die Hinzugabe von Kontextinformationen und verbaler Kodierung weitere Leistungs- und Präferenzvorteile ermöglicht. Die Auswertung der Versuchsdaten zeigt, dass integrierte Displays von den 24 studentischen Versuchsteilnehmern bevorzugt werden (Gerace & Gallimore, 2001).

Tharanathan, Bullemer, Laberge, Reising und McLain (2012) befassen sich damit, ob die Darstellung von Informationen mit einem schematischen Display oder mit einem funktionalen Display zu unterschiedlichen Wahrnehmungen der Beanspruchung und der Leistung führt. Funktionale Überblicksdisplays zeichnen sich dadurch aus, dass dynamische Daten in qualitativer Form abgebildet werden. Außerdem werden die Anzeigen nach einer vordefinierten funktionalen Ordnung angeordnet, die die Prozessflüsse und Beziehungen zwischen den Parametern berücksichtigt. Im Gegensatz dazu bilden schematische Überblicksdisplays die Informationen eher statisch ab (z. B. Darstellung von Materialflüssen als Linien zwischen den Betriebsmitteln; Abbildung dynamischer Daten in quantitativer Form durch numerische Indikatoren). Die Messung der Beanspruchung erfolgt anhand einer Einschätzung auf einer zehnstufigen Skala, bei der 1 für geringe Beanspruchung und 10 für starke Beanspruchung steht. Im Ergebnis zeigt sich, dass kein signifikanter Unterschied zwischen den beiden Abbildungsformen im Hinblick auf die Beanspruchung festgestellt werden kann. Von den Erwerbstätigen wird jedoch auch eine Einschätzung der Nutzerfreundlichkeit gefordert. Diese wird mithilfe von elf Statements, die sich an die Software Usability Scale von Brooke (Brooke, 1996) anlehnen, abgegeben. Bei der Analyse der Angaben zur Nutzerfreundlichkeit kann sodann ein signifikanter Vorteil für das funktionale Übersichtsdisplay nachgewiesen werden ($t(17) = 2,46, p \leq ,025$).

Die Ergebnislage zum Zusammenhang zwischen Schnittstellengestaltung und Befinden ist vielseitig und bestätigt im Grundsatz die Vorteile der Anwendung ergonomischer Gestaltungsrichtlinien. Einerseits ist erkennbar, dass Farbdarstellungen und die integrierte Darstellung von Informationen häufig subjektiv präferiert werden und mit einer höheren Nutzerzufriedenheit verbunden sind. Andererseits kann in Abhängigkeit von der Aufgabe jedoch ein Vorteil für schematische Displays bestehen, wie die Studie von Eliav et al. (2011) zeigt.

Erkenntnisse zum Merkmal Schnittstellengestaltung und Leistung

Auch bei der Betrachtung des Merkmals Schnittstellengestaltung zeigt sich ein deutlicher Schwerpunkt hinsichtlich der Leistung. Von den 32 Studien, die mindestens einen Zusammenhang in diesem Bereich erfassen, beziehen sich 18 Studien auf konkrete Aspekte der Schnittstellengestaltung und die entsprechenden Leistungsfolgen. Der Großteil der Studien (15) ist als Interventionsstudie klassifiziert worden, da unter Laborbedingungen gezielte experimentelle Manipulationen stattfanden. Nur zwei Querschnittstudien, die im Feld durchgeführt wurden, konnten extrahiert werden. Viele dieser Studien wurden bereits im Kapitel „Befinden“ erwähnt, weshalb die Hintergrundinformationen nur noch verkürzt dargestellt werden.

Ein thematischer Fokus, der in vielen Studien im Mittelpunkt steht, bezieht sich auf die Art der Repräsentation von Informationen und daraus resultierende Leistungsfolgen. Das von Van Laar und Deshe (2007) untersuchte UV-Set bezieht sich nicht nur auf die Farbkodierung der Displays, sondern auch auf das eingesetzte Displayformat. Die Informationen wurden anhand folgender Formate dargestellt: Trenddiagramm, Blindschaltbild, Tabellenform, Balkendiagramm. In der Versuchsauswertung kann ein signifikanter Effekt des Displayformats auf die Reaktionszeit nachgewiesen werden ($F(1,96,45.16) = 75,51, p < ,001$). Die Zeit, die für die Entdeckung des Ziels in der Suchaufgabe benötigt wird, ist mit dem Balkendiagramm am kürzesten (Van Laar & Deshe, 2007). Hinsichtlich der Farbgestaltung untersuchen Van Laar und Deshe (2002, 2007) die Effekte einer speziellen Farbkodierung – dem *Visual Layering*. Die von den Autoren eingesetzte Suchaufgabe dient der Erfassung der Leistungsdaten. Aus den Ergebnissen der ersten Studie der Autoren lässt sich ableiten, dass die Reaktionszeit für die Entdeckung eines Ziels einen signifikanten Effekt für die farbliche Kodierung aufweist ($F(2,1284) = 7,38, p = ,001$) (Van Laar & Deshe, 2002). Dieser Effekt wird in einer späteren Studie erneut nachgewiesen ($F(1,75,40.23) = 15,45, p < ,001$), wobei die Reaktionszeit in beiden Studien am geringsten ist, wenn die Probanden mit einem Display arbeiten, das mit der *Visual-Layering*-Methode gestaltet wurde (Van Laar & Deshe, 2007). Zülch und Stowasser (2003) berichten von einer Studie, in der ebenfalls der Einfluss einer farblichen Kodierung untersucht wird. Hier werden jedoch keine Unterschiede in der Leistung zwischen einem farblichen und einem monochromen Display entdeckt (Zülch & Stowasser, 2003). Laut den Autoren sind angemessene Helligkeit und Kontrast entscheidender für die Aufgabenlösung als eine Farbgestaltung (ebd.).

Die bereits beschriebene Studie von Gerace und Gallimore (2001) untersucht verschiedene Darstellungsformen von Informationen für eine Montageaufgabe. Das experimentelle Setting erfordert von den Probanden die Bearbeitung vereinfachter Produktionsplanungsaufgaben, bei denen bspw. die Verletzung von Regeln erkannt werden muss und räumliches Denkvermögen verlangt wird. Der Vergleich der beiden Displaytypen (integrierte Abbildung „Snapshot“ vs. nicht integrierte Darstellung) zeigt, dass die Probanden mit dem integrierten Snapshot-Display kürzere Reaktionszeiten aufweisen als mit dem nicht integrierten Display ($F(1,16) = 15,64, p < ,0011$). Auch weitere Leistungsindikatoren deuten auf einen Vorteil für das integrierte Snapshot-Display hin. Neben den beiden Displayformen stehen auch die Hinzugabe von Kontextinformationen und die verbale Kodierung der Informationen im Fokus der Betrachtung. Die Ergänzung der reinen Abbildungen durch verbale Informationen führt laut den Autoren ebenfalls zu einem Leistungsvorteil, der sich in einer kürzeren Antwortzeit äußert ($F(1,16) = 10,48, p = ,0052$) (Gerace & Gallimore, 2001).

Die Untersuchung verschiedener Darstellungsformen in der Prozesskontrolle steht auch in der Studie von Coury und Pietras (1989) im Zentrum der Betrachtung. Die Autoren untersuchen mit einer Stichprobe von 30 Probanden die Handhabung verschiedener Systemparameter in einer simulierten, flüssigkeitsverarbeitenden Anlage. Die Informationen für die Steuerung des Systems werden entweder grafisch, alphanumerisch oder grafisch und alphanumerisch (multiples Display) dargeboten. Die Ergebnisse zeigen, dass Aufgaben wie Systemoptimierung von dem multiplen Display profitieren konnten ($F(2,27) = 9,31$, $p = ,0008$), während die Anzahl der entdeckten Fehler sich bei den verschiedenen Darstellungsformen nicht unterscheidet ($F(2,27) = 0,6638$, $p = ,523$, n.s.) (Coury & Pietras, 1989). Bemerkenswert ist jedoch, dass die Anzahl der Iterationen, die innerhalb der Prozesssimulation vollzogen werden, um einen Fehler zu entdecken, mit dem multiplen Display den geringsten Wert annahm ($F(2,27) = 3,491$, $p = ,0448$) (Coury & Pietras, 1989). Weitere Unterstützung für die Annahme, dass Displays mit grafischen Inhalten Leistungsvorteile schaffen können, bietet eine weitere Laborstudie: In einer Kapazitätsplanungsaufgabe erreichen 16 Probanden geringere Abweichungen vom Zielwert und verringerte Bearbeitungszeiten, wenn eine grafische Informationsdarstellung genutzt wird (Zülch, Grieser, & Reuß, 1992). Auch Skjerve und Skraaning (2004) können mit ihrer experimentellen Benutzerschnittstelle, die die explizite Repräsentation des Systemzustands anstrebt, einen mittelstarken Effekt für Leistungsvorteile zeigen. Diese äußern sich in einer besseren Entdeckung kritischer Ereignisse ($F(1,7) = 10,94$, $p < ,013$, $\omega^2 = ,24$).

Während die soeben vorgestellten Studien besonders die Abbildung von Prozessdaten fokussieren, stellt die Studie von van Hoe, Poupeye, Vandierendonck und de Soete (1990), in der die Menüstruktur von Systemen untersucht wird, eine weitere wichtige Facette der Schnittstellengestaltung dar. In drei Laborexperimenten mit 96, 80 und 56 Studenten gehen die Autoren der Frage nach, welche Menüstrukturen und Unterstützungsfunktionen die Leistung in einer simulierten Aufgabe verbessern. Es zeigt sich, dass flache hierarchische Strukturen mit breiten Menüs zu bevorzugen sind. Jedoch schränken van Hoe et al. ein, dass eine Verallgemeinerbarkeit der Ergebnisse kritisch zu betrachten ist, da weitere Faktoren die Leistung der Probanden beeinflussen können. Zudem trägt die Möglichkeit, das Menü durch einen Knopfdruck verlassen zu können, zu schnelleren Entscheidungen bei ($F(1,70) = 3,99$, $p < ,05$). Ein drittes Experiment zeigt, dass verschiedene Formen von Hilfsinformationen ebenfalls die Entscheidungszeit beeinflussen. Diese nimmt bei strukturellen sowie bei kategorialen Informationen kürzere Zeiten an als bei der Anzeige von Standardinformationen oder der kombinierten Informationsanzeige ($F(3,48) = 7,17$, $p < ,001$) (Van Hoe, Poupeye, Vandierendonck, & de Soete, 1990).

Ein weiterer zentraler Aspekt bei der Art der Informationsdarstellung umfasst die Frage danach, welche Inhalte abgebildet werden sollen. Bereits in den 1990er-Jahren entwickelte sich das Konzept des *ecological interface design*. Die Zielsetzung der Gestaltung von Displays nach diesem Prinzip liegt darin, die Wahrnehmungs- und Handlungsfähigkeiten von Operateuren effektiv zu unterstützen sowie ihnen bei Problemlöseaktivitäten zu helfen (Vicente, Christoffersen, & Perekhita, 1995). Ökologisches Bedienschnittstellendesign umfasst demnach verschiedene Regeln, um mit einem Interface unterschiedliche Level kognitiver Kontrolle zu unterstützen.

Die Arbeit von Vicente et al. aus dem Jahr 1995 untersucht die Leistung und das Problemlöseverhalten beim Einsatz verschiedener Displaytypen mit einer studentischen Stichprobe. In ihrem gemischten faktoriellen Design variieren sie sowohl das Interface als auch den Erfahrungsgrad der Probanden. Das physische Display bildet 16 Variablen ab, die den

Zustand des Systems anzeigen. Das physisch-funktionale Display zeichnet sich dadurch aus, dass sogar 34 Variablen abgebildet werden, die sowohl physische und funktionale Zustände als auch funktionale Informationen höherer Ordnung abbilden. Die Genauigkeit der Probanden bei der Zuordnung verschiedener Zustände stellt die abhängige Leistungsvariable dar. Aus den Ergebnissen schließen die Autoren, dass das Interface mit den physisch-funktionalen Darstellungen für die Experten (hier Studenten im Aufbaustudium) zu tendenziell besseren Leistungen führt, wohingegen für Novizen keine Unterschiede gefunden werden (Vicente et al., 1995). Eine mögliche Begründung für diesen Effekt sehen Vicente et al. (1995) darin, dass eine Benutzerschnittstelle, die die Arbeitsdomäne basierend auf einer Abstraktionshierarchie darstellt, „wissende“ Mitarbeiter besser mit relevanten Informationen für wissensbasiertes Verhalten versorgt, als dies durch eine Benutzerschnittstelle, die nur physische Variablen abbildet, möglich ist.

In der Untersuchung von Tharanathan et al. (2012) wird eine Abbildung, die einen schematischen Überblick der Systemzustände bietet, einer Abbildungsform gegenübergestellt, die einen funktionsorientierten Überblick ermöglicht. Auf der Leistungsseite steht das Situationsbewusstsein als abhängige Variable im Vordergrund. Die Autoren zeigen mit einer hohen Effektstärke, dass die Studienteilnehmer (Erwerbstätige aus der Prozessindustrie) mit dem funktionalen Überblicksdisplay ein höheres Situationsbewusstsein auf Stufe 1 (Wahrnehmung) ($F(1,17) = 94,45, p < ,0001, \eta^2 = ,85$) erreichen können (Tharanathan, Bullemer, Laberge, Reising, & McLain, 2012). Dieses wird in der Studie als prozentualer Anteil der korrekt identifizierten Prozessabweichungen operationalisiert. Das Verständnis der Situation stellt die zweite Stufe des Situationsbewusstseins dar. Auch hier finden die Autoren mit einer hohen Effektstärke ein verbessertes Situationsverständnis bei der Arbeit mit dem funktionalen Display im Vergleich zum schematischen Überblicksdisplay ($F(1,17) = 4,74, p < ,05, \eta^2 = ,22$) (ebd.). Die Operationalisierung erfolgt hier mithilfe einer *multiple-choice*-Befragung, deren Fragen sich auf den Zustand des simulierten Systems beziehen.

Die Art der Abbildung ist auch für Sanderson, Pipingas, Danieli und Silberstein (2003) die zentrale unabhängige Variable in der Studie, die zudem die Leistung der Probanden sowie die Einsatzfähigkeit bildgebender neuronaler Verfahren im Rahmen experimenteller Fragestellungen überprüft. In einer experimentellen Aufgabe, in der die Durchflussmenge von zwei eingehenden Zuflussströmen simuliert wird, sollen die 33 Versuchsteilnehmer die beiden Zuflüsse und ihre Durchschnittstemperatur überwachen. Dafür stehen ihnen verschiedene Abbildungsformen zur Verfügung. Eine dieser Abbildungsformen wird von den Autoren als *Shape Display* bezeichnet. Dabei handelt es sich um eine integrierte Darstellung der Eingangs- und Ausgangsparameter. Die anderen Abbildungsformen bestehen aus einer digitalen Anzeige und einem Balkendiagramm, bei denen die Darstellung der Parameter jeweils getrennt erfolgt. Die Autoren finden, dass das *Shape Display* im Vergleich zu einem Balkendiagramm und einer digitalen Anzeige zu schnelleren Reaktionszeiten ($F(2,34) = 19,82, p < ,001$) und einem besseren Gesamtergebnis (Verhältnis von Reaktionszeit und Genauigkeit) ($F(2,34) = 19,82, p < ,001$) führt. Andererseits verweisen sie auch auf die Bedeutung einer angemessenen semantischen Zuordnung der jeweiligen Parameter innerhalb der Abbildung. Diese kann sich ebenfalls positiv auf die Leistung auswirken (Sanderson, Pipingas, Danieli, & Silberstein, 2003).

Insbesondere die Darstellung von Prozessinformationen in Kernkraftwerken, wo eine Vielzahl an Parametern überwacht werden muss, stellt eine Herausforderung für die Gestaltung von Displays dar. Vicente et al. (1996) evaluieren verschiedene Darstellungsformen des *Rankine*-Kreisprozesses, der die vier Zustandsänderungen innerhalb des thermody-

namischen Prozesses der Energieerzeugung beschreibt. Die untersuchten Displaytypen entsprechen der schematischen Darstellung des *Rankine*-Kreisprozesses (diagrammartige Abbildung des Druck-Temperatur-Verhältnisses), einem *Single-Sensor-Single-Indicator* (SSSI)-Display, bei dem jeder Sensorwert einzeln von einer Anzeige abgebildet wird und die Integration der Werte mental erfolgt, sowie einem hybriden Display, das eine Kombination des *Rankine*- mit dem SSSI-Display darstellt. In dem *between-subjects*-Design fokussieren die Autoren insbesondere die Leistungseffekte, die mit den verschiedenen Displaytypen verbunden sind. Die Ergebnisse zeigen, dass sowohl die Erkennung einer Störung ($F(2,108) = 5,77, p < ,004$) als auch die Diagnose von Störungen ($F(2,108) = 20,9, p < ,0001$) mit dem *Rankine*-Display besser ist als mit den beiden anderen Displaytypen (Vicente et al., 1996). Da das *Rankine*-Display eine sehr bildhafte Darstellung des Druck-Temperatur-Verhältnisses ist, unterstreichen die Autoren mit diesen Ergebnissen die Vorteile der Nutzung von *Mapping*-Prinzipien in Displays.

Ein weiterer Aspekt der Gestaltung von Schnittstellen wird von Besnard und Cacitti (2005) untersucht. Sie verfolgen den Ansatz, dass Veränderungen von Interfaces zu Unfällen führen können, wenn es zu einem negativen Transfer kommt. Unter negativem Transfer werden Situationen verstanden, in denen bekannte Prinzipien und Schemata auf nicht mehr gültige Situationen oder Handlungen angewandt werden. Die Laborstudie mit 20 Studenten variiert die Tastenbelegung der Bedienschnittstelle und die Darstellung auf dem Bildschirm nach einer Übungsphase. Dabei zeigt sich, dass signifikant mehr Fehlhandlungen mit der veränderten Bedienschnittstelle einhergehen ($F(1,18) = 9,40, p = ,006$) (Besnard & Cacitti, 2005). Die Autoren kommen zu dem Schluss, dass Änderungen an Schnittstellen entweder deutlich gekennzeichnet werden sollten oder dass die Durchführung von nicht mehr gültigen Aktionen durch Barrieren verhindert werden sollte (ebd.).

In verschiedenen Arbeitssituationen kann zudem die Entscheidung darüber, mit welchem physischen Display gearbeitet werden soll, von Bedeutung sein. Hinweise dazu kann die Studie von Odenthal, Mayer, Kabuß und Schlick (2014) liefern, welche die Präsentation von Produktionsinformationen durch ein HMD mit einem tischbasierten Anzeigegerät vergleicht. Die Laborstudie mit 48 Teilnehmern analysiert zudem verschiedene Darstellungsformen auf den jeweiligen Displays. In einer simulierten Montageaufgabe finden die Autoren keinen signifikanten Effekt für die durchschnittliche Fehlerentdeckungszeit ($F(1,45) = 3,001, p = ,09$). Anhand der Daten können sie jedoch feststellen, dass das tischbasierte Display tendenziell mit kürzeren Entdeckungszeiten verbunden ist. Die Qualität der Fehlerentdeckung und die Identifikation des Fehlertyps sind jedoch mit dem HMD besser. Womöglich zeigt sich in diesen Daten ein *trade-off* zwischen Schnelligkeit und Genauigkeit (Odenthal et al., 2014). Darüber hinaus können die Autoren einen Leistungsvorteil für den Einsatz einer perspektivischen Darstellung zeigen. Die durchschnittliche Fehlerentdeckungszeit ist mit der perspektivischen Darstellung deutlich kürzer als mit der statischen Darstellung ($F(1,45) = 8,854, p = ,005$) (Odenthal, Mayer, Kabuß, & Schlick, 2014).

Die Studie von Eliav et al. (2011) nutzt ebenfalls einen Roboter, jedoch steht in der Studie nicht dessen Aussehen, sondern dessen Steuerung mittels verschiedener Displaytypen im Vordergrund. Die Leistungsmessung erfolgt anhand der Situationseinschätzung durch die Probanden. Die Analyse der Daten kommt zu dem Ergebnis, dass die Zeit zur Beantwortung der situationsbezogenen Fragen sich nicht signifikant zwischen den Displays unterscheidet. Unter Hinzunahme einer weiteren UV Blickwinkel wird jedoch ein statistisch bedeutsamer Interaktionseffekt gefunden, der darauf hinweist, dass die Beantwortungszeit

am kürzesten ist, wenn die Probanden den Roboter mit einem Head-up-Display und einem 90-Grad-Winkel steuern ($F(1,148) = 7,5, p < ,01$). Mithilfe eines logistischen Regressionsmodells weisen die Autoren außerdem nach, dass die Chancen einer richtigen Antwort (korrekte Distanzschätzung von Objekten in der Umgebung) höher sind, wenn die Darstellung der Situation über ein Head-up-Display erfolgt. Auch der Vergleich von HuD und Radardisplay, den die Autoren im zweiten Versuch durchführen, weist auf keine statistisch nachweisbaren Leistungsunterschiede zwischen den Displays hin (Eliav et al., 2011).

Li, Powell und Horberry (2012) berichten von verschiedenen Beobachtungsstudien, die mit Operateuren in der Metallurgie im Feld durchgeführt werden. Im Ergebnis stellen die Autoren fest, dass die Gestaltung der Leitwarten einen entscheidenden Faktor für die menschliche Leistung darstellt. Sie betonen, dass unzureichendes Training und mangelhaftes Verständnis der ablaufenden Prozesse in Kombination mit schlecht gestalteten Anzeigen und Alarmen zu reaktivem Operateurverhalten führen können. Das bedeutet, dass Operateure die Systemzustände nicht proaktiv regeln, sondern nur schadensbegrenzend auf das Auftreten von Alarmen und Zwischenfällen reagieren (Li, Powell, & Horberry, 2012).

Die Bedeutung der Gestaltung von Leitwarten stellt auch in der Studie von Liao und Chang (2011) ein zentrales Ergebnis dar. Die Autoren erproben einen Fragebogen und leiten daraufhin ein faktorenanalytisches Modell ab, das Aufschluss darüber geben soll, welche Faktoren zum Auftreten von menschlichen Fehlern in Kernkraftwerken beitragen. Eine Stichprobe von 190 erwerbstätigen Männern, die im Bereich der Energiegewinnung tätig sind, füllt den Fragebogen zu schnittstellenbezogenen Fehlern in Leitwarten aus. Dieser umfasst sowohl Beschreibungen von operativen Fehlerursachen als auch die Beschreibung von Fehlern, die auf dem Design der Eingabegeräte und Anzeigen sowie auf widersprüchlichen Anzeigen basieren. Als abhängige Variable dient einerseits die Einschätzung der Operateure darüber, ob es sich bei den beschriebenen Fehlern um Handlungs- oder Entscheidungsfehler handelt. Andererseits sollen sie einschätzen, wie hoch die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten der Fehler ist. Nach Ansicht der Operateure beinhalten die inkorrekte Bedienung der Ausrüstung und Behelfslösungen (*workarounds*) die höchste Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von menschlichen Fehlern. Die Faktorenanalyse des Fragebogens führt zu einer Varianzaufklärung von 73,7 Prozent und einer Fünf-Faktoren-Lösung. In den einzelnen Faktoren zeigt sich die Prominenz der Schnittstellengestaltung: Die Faktoren „Unsichtbarkeit des Systemstatus“ (19 Prozent aufgeklärte Varianz) und „inkorrekte Schnittstellengestaltung“ (17 Prozent aufgeklärte Varianz) sind für nahezu 50 Prozent der Varianzaufklärung mitverantwortlich.

Die dargestellten Ergebnisse zeigen, dass insbesondere die Integration von Informationen und ihre Abbildung mit funktionalen Displays leistungsförderlich sein können. Die Darstellung sollte jedoch den Aufgabenzielen dienen

4.2.2. Erkenntnisse zum Merkmal Schnittstelle mit dem Fokus auf Interaktion

Nachdem im vorangegangenen Teil die Effekte der Schnittstellengestaltung auf die verschiedenen Outcome-Kategorien beschrieben wurden, dient dieses Kapitel der Darstellung der Ergebnisse zum Zusammenhang zwischen verschiedenen Interaktionsaspekten und den abhängigen Variablen Befinden, Arbeitszufriedenheit und Motivation sowie Leistung. Variablen, die einen Zusammenhang zur Gesundheit erfassen, wurden von den extrahierten Studien nicht abgedeckt.

Erkenntnisse zum Merkmal Schnittstelleninteraktion und Befinden

Aussagen, die sich auf das Befinden bei verschiedenen Interaktionskonzepten auswirken, werden in neun Studien getroffen, die im Folgenden beschrieben werden. Bei der Interaktion mit verschiedenen Maschinen und Systemen kann die Gestaltung der Rückmeldung als zentrales Element betrachtet werden. Der Inhalt und die Formulierung der Rückmeldung stellen dabei eine Möglichkeit dar, wie die Interaktion beeinflusst werden kann. Djamasbi und Loiacono (2008) untersuchen, wie sich computerbasierte Rückmeldung bei der Nutzung von Entscheidungsunterstützungssystemen auf männliche und weibliche Personen auswirkt und deren Stimmung beeinflusst. An der experimentellen Laborstudie nehmen 63 Studenten teil, die bei der Bearbeitung einer Aufgabe entweder stark negativ oder weniger negativ geprägte Rückmeldungen erhalten. Als abhängige Variablen werden die Leistung in der Aufgabe sowie die Stimmung erhoben. Zur Stimmungsmessung setzen die Autoren jeweils drei positive und drei negative Adjektive ein, die auf einer siebenstufigen Skala eingeschätzt werden sollen. Entsprechend der Hypothesen der Autoren zeigt sich, dass die Stimmung der männlichen Teilnehmer sich vor und nach der Aufgabebearbeitung nicht unterscheidet. Die Stimmung der weiblichen Teilnehmer war nach der Aufgabendurchführung schlechter als davor. Die Autoren geben einen moderaten Einfluss ($d = 0,46$) der Ergebnismrückmeldung auf die Stimmung der weiblichen Probanden an (Djamasbi & Loiacono, 2008).

Eine andere Möglichkeit, die Interaktion zu beeinflussen, liegt in der Vermittlung von Rückmeldungen anhand verschiedener Modi. Rückmeldung kann durch alle Sinne vermittelt werden, doch insbesondere im Kontext der MMI werden hauptsächlich visuelle oder auch auditive Kanäle genutzt. Vitense, Jacko und Emery (2003) führen eine laborbasierte Interventionsstudie durch, in der sie der Frage nachgehen, wie sich multimodale Rückmeldungen bei einer direkten Manipulationsaufgabe auf die Leistung und die erlebte Beanspruchung auswirken. Dabei werden 32 Studenten für die Teilnahme gewonnen. Insgesamt nutzen die Autoren drei Kanäle zur Vermittlung der Rückmeldung: Haptische Rückmeldungen werden durch ein Eingabegerät mit Vibrationsfunktion ausgegeben, auditive Rückmeldungen erfolgen durch Töne und visuelle Rückmeldungen werden durch optische Hervorhebungen vermittelt. Zu beachten ist dabei, dass alle drei Formen der Rückmeldungen miteinander gekoppelt werden können. Die abhängige Variable Beanspruchung wird mit dem NASA-TLX gemessen (Hart & Staveland, 1988). Im Ergebnis kommen die Autoren zu dem Schluss, dass multimodale Rückmeldung mit einer Beanspruchungsreduktion verbunden sein kann. Dabei scheint insbesondere bimodales Feedback (z. B. haptisch und visuell) vorteilhaft zu sein. Bei der Entscheidung über den Einsatz von multimodaler Rückmeldung sind jedoch stets die Aufgabe und die Anforderung an die Nutzer zu beachten, da nicht alle Rückmeldungskombinationen dieselbe Wirkung entfalten (Vitense, Jacko, & Emery, 2003). Weitere Ergebnisse dazu, wie sich verschiedene Formen der Rückmeldungen auf Arbeitszufriedenheit und Leistung auswirken, finden sich in den nachfolgenden Kapiteln.

Ähnlich der Studie von Djamasbi und Loiacono (2008) untersucht Hone (2006), wie sich affektive Agenten auf die Interaktion von Mensch und Computer auswirken und wie derartige Agenten gestaltet sein sollten, damit sie zu einer Frustrationsreduktion beitragen können. Die Laborstudie besteht aus drei Telexperimenten, die jeweils mit kleinen studentischen Stichproben ($n = 7$ bis 10) durchgeführt werden. Auf Seiten der UV wird ein virtueller Agent variiert. Die abhängige Variable ist in allen drei Experimenten die Frustrationsbewertung der Probanden während und nach dem Spiel. Der erste Teilversuch zeigt, dass

die Interaktion mit einem affektiven Agenten das Frustrationslevel signifikant reduzieren kann. Diese Reduktion ist stärker im Vergleich zu einem nonaffektiven Agenten. Das zweite Experiment setzt einen vermenschlichten und einen textbasierten Agenten ein. Laut Hone tragen beide Agenten zu einer Frustrationsreduktion bei, doch der abmildernde Effekt ist mit dem vermenschlichten Agenten sogar größer (Hone, 2006). Im dritten Experiment besteht die Variation des Agenten darin, dass dieser entweder eine männliche oder eine weibliche Gestalt besitzt. Die Ergebnisse weisen darauf hin, dass sowohl weibliche als auch männliche Agenten zu einer Frustrationsreduktion führen können, wobei der Effekt bei weiblichen Agenten stärker ausgeprägt ist. Zudem zeigt sich eine leichte (nicht signifikante) Tendenz dahingehend, dass die Frustrationsreduktion bei weiblichen Probanden stärker ist als bei männlichen Probanden. Das Geschlecht des Agenten interagiert jedoch nicht mit dem Geschlecht des Probanden (Hone, 2006).

Eine weitere Systemfacette, die Einfluss auf die Interaktion nimmt, ist die Dauer von Verzögerungszeiten sowie Antwortzeiten des Systems (*System Response Time*, SRT). Letztere werden in einer Studie von Thum, Boucsein, Kuhmann und Ray (1995) in einer Laborstudie mit 40 studentischen Probanden untersucht. Es wird überprüft, ob sich die entweder 0,5, 1,5 oder 4,5 Sekunden betragenden Antwortzeiten des Systems auf die psychophysiologische und selbst berichtete Beanspruchung der Probanden auswirkt. Mithilfe einer multivariaten Varianzanalyse kommen die Autoren zu dem Ergebnis, dass die Antwortzeit des Systems mit einer signifikanten Veränderung der Herzrate verbunden ist ($F(2,35) = 22,26, p < ,0001$). Die Post-hoc-Analyse der Daten zeigt, dass der Unterschied zwischen einer SRT von 1,5 und 4,5 Sekunden mit einer Abnahme der Herzrate verbunden ist, wohingegen die Herzrate beim Wechsel der SRT von 0,5 auf 1,5 Sekunden steigt (Thum, Boucsein, Kuhmann, & Ray, 1995). Aufseiten der subjektiven Beanspruchung finden die Autoren ebenfalls einen signifikanten Effekt für die Antwortzeit des Systems ($F(2,35) = 5,27, p < ,01$). Die Probanden geben eine verringerte Anspannung beim Wechsel der SRT von 1,5 auf 4,5 Sekunden an. Auch der wahrgenommene Zeitdruck verringert sich bei der Veränderung der Systemantwortzeit von 1,5 auf 4,5 Sekunden ($F(2,35) = 18,06, p < ,0001$). Jedoch ist insbesondere der Unterschied zwischen einer SRT von 1,5 und 4,5 Sekunden auch mit einem abnehmenden Interesse verbunden ($F(2,35) = 16,43, p < ,0001$) (Thum et al., 1995).

Eine ähnliche Fragestellung verfolgt die Arbeit von Schaefer, Schäfer und Boucsein (2000), wobei hier die Prozesslaufzeit im Fokus der Betrachtung steht. Die Versuchsaufgabe wird unter Laborbedingungen von 48 Studenten bearbeitet. Im Kontext einer *Multitasking*-Aufgabe beträgt die Prozesslaufzeit bei einer Datenabfrage entweder 10 oder 30 Sekunden. Eine erhöhte Beanspruchung (gemessen als elektrodermale Aktivität) kann für die kürzere Prozesslaufzeit nachgewiesen werden. Die subjektiven Beanspruchungsmaße waren jedoch nicht durch die Prozesslaufzeit beeinflusst (Schaefer, Schäfer, & Boucsein, 2000).

Die vorausgegangenen Ausführungen zeigen, dass verschiedene Interaktionsaspekte sich auf das Befinden auswirken können. Interaktionen treten dabei auf verschiedenen Ebenen auf und können sich im Systemverhalten (z. B. Antwortzeiten), aber auch in unterschiedlichen Formen der Rückmeldung äußern.

Erkenntnisse zum Merkmal Schnittstelleninteraktion und Motivation sowie Arbeitszufriedenheit

Im Bereich der Arbeitszufriedenheit und der Motivation konnte nur eine Studie extrahiert werden, die diese Outcome-Faktoren mit der interaktionsbezogenen Gestaltung von Schnittstellen in Zusammenhang bringt. Die Studie von Berger und Ludwig (2007) fokussiert interaktionsbezogene Effekte im Logistikkontext: In einem Warendepot wird eine neue Technologie eingeführt, die durch ein sprachunterstütztes System direkte Rückmeldung an die Beschäftigten gibt. Dieses System bestimmt die Reihenfolge der Warenauswahl und verlangt anschließend an den jeweiligen Regalen die Angabe eines Bestätigungscodes durch die Mitarbeiter, ohne den nicht ohne Weiteres mit der Warenaufnahme fortgefahren werden kann. An der Interventionsstudie nehmen 132 Erwerbstätige aus drei Abteilungen teil, wobei zwei Abteilungen als Experimental- und eine Abteilung als Kontrollgruppe dient. Die Zufriedenheit der Mitarbeiter wird mithilfe eines Fragebogens einen Monat vor und drei Monate nach der Einführung der sprachunterstützten Technologie erhoben. Im Vergleich der beiden Zeitpunkte zeigt sich für die Experimentalgruppe, dass die durchschnittliche Zufriedenheit signifikant abnahm. Im Detail waren besonders folgende Aspekte negativ betroffen: Die Motivation, täglich zur Arbeit zu kommen ($M_{t1} = 3,72$, $M_{t2} = 3,38$, $t = 2,22$, $p < .05$), Erhalt von konstruktivem Feedback ($M_{t1} = 3,77$, $M_{t2} = 3,41$, $t = 2,25$, $p < .05$), Möglichkeit der Entscheidung über die Reihenfolge der auszuwählenden Produkte ($M_{t1} = 3,55$, $M_{t2} = 2$, $t = 4,97$, $p < .05$) und die Möglichkeit der Interaktion mit Kollegen während der Arbeit ($M_{t1} = 3,54$, $M_{t2} = 3,14$, $t = 2,18$, $p < .05$) (Berger & Ludwig, 2007). Die Autoren ermitteln zudem die Leistung der Beschäftigten mit der sprachgestützten Technologie. Diese Ergebnisse werden im nachfolgenden Kapitel erläutert (Berger & Ludwig, 2007).

Die soeben vorgestellte Interventionsstudie zeigt, dass technologisch vermittelte Rückmeldung mit negativen Folgen für die Arbeitszufriedenheit verbunden sein kann. Dies scheint insbesondere dadurch bedingt zu sein, dass die Rückmeldung nicht als konstruktiv verstanden wird und mit einer wahrgenommenen Einschränkung der Entscheidungsfreiheit einhergeht. Die Ergebnisse einer Studie lassen jedoch keinen verallgemeinerbaren Schluss über den Zusammenhang zwischen der Schnittstellengestaltung und der Arbeitszufriedenheit zu.

Erkenntnisse zum Merkmal Schnittstelleninteraktion und Leistung

Veränderungen der Leistung in Abhängigkeit von den eingesetzten Interaktionskonzepten stellen einen zentralen Untersuchungsgegenstand in vielen Studien dar. Im Rahmen der Datenextraktion wurden elf Studien ausgewertet, die sich auf diesen Zusammenhang beziehen. Das bevorzugte Studiendesign ist auch hier die experimentelle Interventionsstudie unter Laborbedingungen.

Die Art der Informationsdarstellung und des Interaktionskonzepts spielt nicht nur bei der Durchführung geübter Aufgaben eine Rolle, sondern kann sich auch bei dem Erlernen neuer Tätigkeiten und der erstmaligen Durchführung von Aufgaben auf die Leistung auswirken, wie die nachfolgenden Studien zeigen.

Alexander, Pfendler, Thun und Kleiber (2012) untersuchen, wie sich verschiedene Modalitäten der Telekooperation auf die Leistung in einer Montageaufgabe auswirken. Die 30 erwerbstätigen Probanden haben die Aufgabe, einen Bausatz zusammenzubauen, und

erhalten dabei entweder direkte Unterstützung (face-to-face) oder müssen über ein Videokonferenzprogramm angeleitet werden, das nur Videokooperation oder Audiokooperation ermöglicht. Die Leistungsvariablen bestehen in der Zeit, die die Probanden für den Zusammenbau des Modells benötigen sowie in dem Zeitanteil, der mit Kommunikationstätigkeiten verbracht wird. Während die Autoren keine Effekte aufseiten der Beanspruchung finden, lassen sich signifikante Unterschiede in den Leistungsvariablen erkennen. Hinsichtlich der Bearbeitungszeit deuten die Ergebnisse auf einen Leistungsvorteil für die direkte Kooperation hin ($F(2,18) = 3,930$, $p = ,038$), da mit diesem Modus die Bearbeitungszeit deutlich kürzer ist als mit der audiobasierten Kooperation. Auch bei der Konversationszeit zeigen sich signifikante Unterschiede zwischen den Modalitäten ($F(2,18) = 10,436$, $p < ,001$). Die Konversationszeit ist in der auditiven Bedingung deutlich höher als bei der direkten Kooperation. Die Leistungsmaße zwischen der video- und der audiobasierten Kooperation unterscheiden sich nicht signifikant (Alexander, Pfendler, Thun, & Kleiber, 2012).

Der Einsatz verschiedener Unterstützungssysteme steht auch in der Studie von Wiedenmaier, Oehme, Schmidt und Luczak (2003) im Fokus. Die Autoren untersuchen die Montageleistung von 36 Probanden, die durch eine papierbasierte Instruktion, ein kombiniertes *Augmented Reality*-System (AR, mit Datenbrille) oder eine Expertenanleitung in die Aufgabe eingeführt werden. Das Ergebnis der Autoren zeigt, dass die Leistung (im Sinne von Bearbeitungszeit) am besten ist, wenn die Probanden Unterstützung durch einen Experten erhalten. Jedoch kann Unterstützung durch *Augmented-Reality*-Systeme bei schwierigeren Aufgaben vorteilhaft gegenüber papierbasierten Unterstützungen sein. Bei intuitiven und repetitiven Tätigkeiten besteht kein Leistungsunterschied zwischen AR- und papierbasierter Unterstützung (Wiedenmaier, Oehme, Schmidt, & Luczak, 2003).

Soll die Unterstützung bei einer Aufgabe durch ein automatisches System erfolgen, kann die Art der Instruktion weiter differenziert werden. So wird in der Studie von Watson, Butterfield, Curran und Craig (2010) mit einer gemischten Stichprobe von 30 Personen untersucht, wie sich textuelle (statische) und animierte (dynamische) Instruktionen auf die Zeit zur Bearbeitung einer simulierten Montageaufgabe auswirken. Insbesondere bei dem ersten Zusammenbau eines Modells zeigt sich ein Vorteil der animierten Instruktion gegenüber der textbasierten Instruktion hinsichtlich der Geschwindigkeit des Zusammenbaus ($F(2,27) = 3,53$, $p < ,05$, $\eta_p^2 = ,21$). Die Unterschiede zwischen den Instruktionsgruppen nehmen jedoch mit zunehmender Erfahrung (nach mehrmaligem Zusammenbau) deutlich ab (Watson, Butterfield, Curran, & Craig, 2010).

Bei der Interaktion mit einem System hat auch die Rückmeldung einen Einfluss auf das Befinden und die Leistung der Bediener. Djamasbi und Loiacono (2008) untersuchen in ihrer Studie nicht nur, ob sich die Stimmung der Probanden durch unterschiedlich gefärbte Rückmeldung verändert, sondern ermitteln auch mögliche Leistungsfolgen. Eine Varianzanalyse zeigt dabei einen signifikanten Interaktionseffekt zwischen dem Geschlecht der Versuchsteilnehmer und der Form der Rückmeldung (weniger negativ geprägt, stärker negativ geprägt): Die Entscheidungsgenauigkeit bei Männern und Frauen unterscheidet sich nicht, wenn die Rückmeldung weniger negativ geprägt ist. Wenn die Rückmeldung jedoch stärker negativ geprägt ist, weisen Frauen eine signifikant höhere Entscheidungsgenauigkeit auf als Männer (hohe Effektstärke, $d = 0,89$) (Djamasbi & Loiacono, 2008).

Die Frage danach, ob sich die Leistung in Abhängigkeit von verschiedenen Formen der Informationsdarstellung verändert, steht auch in den beiden Untersuchungen von Baber, Usher, Stammers und Taylor (1992) im Mittelpunkt. Der Aufgabenkontext besteht zwar in

einer Spracherkennungsaufgabe, bei der das Feedback verschiedenartig auf einem Display abgebildet wird. Die Autoren nehmen an, dass textuelles Feedback zunächst zu einer schnelleren Reaktion führt als symbolisches Feedback, was sich auch in ihren Ergebnissen bestätigt ($F(1,10) = 75, p < ,00001$) (Baber, Usher, Stammers, & Taylor, 1992). Die Autoren finden weiterhin, dass sich der Grad der Konkretetheit bei verschiedenen Formen symbolischen Feedbacks auf die Reaktionszeit auswirkt. Der Effekt nimmt im Lauf der Versuchsdauer jedoch stark ab (Baber et al., 1992). Das zweite Experiment greift die zuvor gewonnenen Ergebnisse in einer simulierten Prozesskontrollaufgabe auf, wobei die Eingabe der Probanden entweder als textliche Darstellung in Satzform, als Symbol an der entsprechenden Stelle des Displays oder als Kombination aus Text und Symbol wiedergegeben wird. In der Auswertung des Versuchs zeigt sich, dass kein Unterschied in den Reaktionszeiten zwischen den Feedback-Bedingungen besteht. Weiterhin können keine Unterschiede in der Anzahl der verarbeiteten Kommandos verzeichnet werden. Eine Differenz zwischen den drei Feedback-Bedingungen finden Baber et al. (1992) für die Fehler – also falsch verstandene Antworten des Systems und nicht wahrgenommenes Feedback. Die Anzahl der Fehler ist bei textlichem Feedback für beide Fehlerarten signifikant höherer ($F(2,18) = 9, p < ,001$). In ihrer Schlussfolgerung betonen Baber et al., dass die Art des Feedbacks in Abhängigkeit von seiner Funktion sowie von den Anforderungen an die Informationsverarbeitung des Operateurs gewählt werden sollte (Baber et al., 1992). Dies bestätigt sich auch durch die Studie von Te'eni (1991), in der die Spezifität von Rückmeldungen (prozess- oder ergebnisbezogen) untersucht wird. Laut dem Autor werden ergebnisbezogene Rückmeldungen von den Nutzern zwar viel beachtet. Jedoch ist diese Form der Rückmeldung nicht hinreichend genau, um Anpassungen an den Prozess vornehmen zu können, wodurch die Konsistenz der Entscheidungsfindung eingeschränkt sein kann (Te'eni, 1991).

Eine andere Form der Rückmeldung steht im Mittelpunkt der Studie von Liu, Helfenstein und Wahlstedt (2008). Die Autoren versuchen die Frage zu beantworten, inwieweit persuasive Agenten die Leistung bei einer Entscheidungsaufgabe beeinflussen können. In der Untersuchung wird die Leistung von 30 Probanden im Kontext eines Content-Management-Systems verglichen, wobei die Unterstützung durch verschiedene persuasive Agenten als unabhängige Variable dient. Der persuasive Agent zeichnet sich dadurch aus, dass er seine Vorschläge besonders freundlich und unterstützend vorträgt und die jeweiligen Vorschläge rechtfertigt. Der nicht persuasive Agent hingegen bleibt stets neutral und trägt lediglich seine Vorschläge vor. Mit einer Varianzanalyse können die Autoren einen signifikanten Effekt für die Art des Agenten nachweisen ($F(2,19) = 13,63, p < ,011$) (Liu et al., 2008). Post-hoc-Tests deuten darauf hin, dass die Probanden signifikant mehr korrekte Entscheidungen treffen, wenn sie mit dem persuasiven Agenten arbeiten, als wenn sie ohne die Unterstützung des Agenten die Aufgabe bearbeiten. Die Unterstützung durch einen nicht persuasiven Agenten bleibt somit ohne Effekt. Die Interaktion mit den persuasiven Agenten nimmt in der Regel jedoch mehr Zeit ein (Liu, Helfenstein, & Wahlstedt, 2008).

Die Ergebnisse einer feldbasierten Studie, die mit neun Mitarbeitern eines Holzverarbeitungsunternehmens durchgeführt wird, werden von Stansfield und Longenecker (2006) berichtet. Die Rückmeldung erfolgt hier entweder durch die Vorgesetzten oder durch ein Informationssystem. Die Autoren kommen zu dem Schluss, dass die Einführung von Informationssystemen in der Produktion, die der Zielsetzung und der Rückmeldung von Produktivität dienen, zur Produktivitätssteigerung beitragen kann. Die Produktivität mit dem Informationssystem war 4,8 Prozent höher als bei verbalen Rückmeldungen und als bei

Zielsetzungen durch den Vorgesetzten (Stansfield & Longenecker, 2006). Zudem ist die Repräsentation des Feedbacks durch das Informationssystem besser als die verbale Repräsentation, da es eine genauere Erfassung der Leistungsdaten durch die Mitarbeiter selbst erlaubt und (insbesondere in numerischer Form) ein besserer Indikator für die Leistung ist als verbale Beschreibungen (Stansfield & Longenecker, 2006).

Technisch vermittelte Rückmeldung kann somit viele Formen annehmen und einen bedeutenden (meist positiven) Einfluss auf die Leistung ausüben. Doch auch kleinere Interaktionseffekte wie bspw. Verzögerungszeiten und Systemantwortzeiten können sich auf die MMI auswirken, wie die nachfolgend beschriebenen Studien zeigen.

Die Arbeiten von Thum et al. (1995) sowie Schaefer et al. (2000) wurden bereits erwähnt und berichten über die Befindenseffekte hinausgehend auch von Leistungsfolgen. Thomaschke und Haering (2014) untersuchen ebenfalls die Auswirkungen von Verzögerungen auf die Leistung von Systembedienern. Die Laborstudie vergleicht dabei probabilistisch und deterministisch vorhersagbare Verzögerungszeiten im Hinblick darauf, ob sie mit unterschiedlichen Antwortzeiten verbunden sind. 122 Studenten bearbeiten dafür eine computerbasierte Reiz-Reaktions-Aufgabe. Der Zielreiz wird mit Verzögerungszeiten von 400 ms oder 1.000 ms präsentiert, die jeweils mit einer unterschiedlichen Vorhersagbarkeit verknüpft sind. In den drei Bedingungen ist die Vorhersage des Zielreizes entweder nicht möglich, mit einer probabilistischen Wahrscheinlichkeit verbunden oder deterministisch an die vorherige Verzögerungszeit gekoppelt. Eine Varianzanalyse für die verschiedenen Bedingungen und die jeweiligen absoluten Reaktionszeiten zeigt einen signifikanten Effekt ($F(3,118) = 9,484$, $p = ,001$). Durch einen Post-hoc-Test können die Autoren den Effekt weiter aufschlüsseln: Die Probanden, die mit der deterministischen Verzögerungszeit arbeiten, weisen die kürzesten Reaktionszeiten auf (Thomaschke & Haering, 2014). Hinsichtlich der Fehler können die Autoren keinen Effekt der Verzögerungsbedingung nachweisen ($F(3,118) = 0,351$, $p = ,788$) (ebd.).

Thum et al. (1995) können für alle drei untersuchten Systemantwortzeiten (0,5, 1,5 und 4,5 Sekunden) signifikante Effekte auf die Leistung – gemessen als Auslassungsfehler – finden ($F(2,35) = 24,99$, $p < ,0001$). Die durchschnittliche Anzahl der Auslassungsfehler nimmt demnach mit steigender SRT zu (Thum et al., 1995). Im Kontext von Multitasking-Aufgaben finden Schaefer et al. (2000) hingegen Leistungssteigerungen bei längeren Prozesslaufzeiten. Die Ergebnisse zeigen, dass mit unterschiedlichen Verzögerungs- und Systemantwortzeiten verschiedene Effekte verbunden sind. Zudem muss bei der Bewertung der jeweiligen Erkenntnisse berücksichtigt werden, ob die Aufgabe eher eine schnelle Reaktion oder eine genaue Reaktion erfordert.

Zusammenfassend kann aus den elf Studien geschlussfolgert werden, dass Leistungsunterschiede bei verschiedenen Interaktionskonzepten bestehen. Während die direkte Kooperation häufig die besten Ergebnisse erzielt, ist der Mehrwert des Einsatzes automatischer Systeme meist an die Anforderungen der Aufgabe gebunden. Bei digitalen Rückmeldungen nehmen zudem die valenzbezogene Färbung des Feedbacks als auch die Spezifität der Rückmeldung Einfluss auf die Leistung. Wie die Studien zu Verzögerungs- und Systemantwortzeiten zeigen, können bereits minimale Aspekte der Interaktion die Leistung beeinflussen. Die Herausforderung besteht hier darin, die Interaktionszeiten und -konzepte so zu wählen, dass eine sorgfältige Durchführung der Aufgabe möglich ist.

4.2.3. Erkenntnisse zum Merkmal Schnittstellengestaltung mit dem Fokus auf Roboter

Innerhalb der extrahierten Studien findet sich keine Studie, in der die Zusammenarbeit von Mensch und Roboter im Hinblick auf die Gesundheit thematisiert wird. Studien zum Sicherheitserleben und zur Akzeptanz finden sich im Abschnitt zum Befinden. Auch Arbeitszufriedenheit und die Motivation werden von der im Scoping Review abgebildeten Studienlage nicht erfasst. Erkenntnisse im Bereich der Leistung finden sich bei der Mensch-Roboter-Zusammenarbeit nur in geringem Umfang.

Erkenntnisse zum Merkmal Schnittstellengestaltung - Roboter und Befinden

Im Kontext der Interaktion von Mensch und Roboter lassen sich verschiedene Studien finden, in denen das Befinden der Bediener untersucht wird. Die Schnittstellengestaltung spielt nicht nur bei der Informationsdarstellung auf Displays eine Rolle, sondern ist auch für die Gestaltung komplexerer Systeme – wie Robotern – bedeutsam. Die dabei untersuchten Outcome-Variablen sind vornehmlich im Bereich der Nutzerzufriedenheit angesiedelt und werden somit unter Befinden berichtet. Lee, Lau und Hong (2011) untersuchen in mehreren Experimenten mit studentischen Stichproben, wie sich das Aussehen und die Funktionszuschreibung von Robotern auf deren Sympathiebewertung auswirken. Insgesamt werden zehn Roboter miteinander verglichen, die entweder ein maschinenartiges Aussehen (keine tierischen oder menschlichen Eigenschaften), tierähnliches oder humanoides Aussehen (mindestens zwei menschliche Eigenschaften) haben. Die Sympathiebewertung der Roboter erfolgt auf einer siebenstufigen Skala und zeigt, dass zunächst keine signifikanten Unterschiede für die verschiedenen Roboter bestehen. Von den Probanden wird jedoch auch die Zuschreibung von Fähigkeiten gefordert, die entweder auf einer affektiven Dimension (Emotion, Motivation, Kognition) oder der Dimension Kompetenz (Informationsverarbeitung, Kommunikation, sensorische Fähigkeiten) angesiedelt sind. Die Autoren finden mit einer hohen Effektstärke, dass humanoiden und tierähnlichen Robotern mehr kommunikative ($F(2,30) = 4,89, p < ,05, \eta_p^2 = ,25$) und emotionale Fähigkeiten ($F(2,30) = 4,83, p < .05, \eta_p^2 = .24$) zugewiesen werden (Lee, Lau, & Hong, 2011). In einem weiteren Experiment sollen die Probanden die Erscheinung verschiedener Roboter mit einer Einschätzung ihrer Fähigkeiten versehen und zudem angeben, ob sie die Roboter als geeignet für bestimmte Berufsgruppen ansehen. Die Ergebnisse weisen darauf hin, dass in Abhängigkeit von der beruflichen Kategorie, in der ein Roboter tätig sein soll, verschiedene Fähigkeiten als angemessen betrachtet werden. So geben die Probanden an, dass für Tätigkeiten im *blue-collar*-Bereich besonders Informationsverarbeitung und Kommunikation ($\beta = .48, t(146) = 4,66, p < ,05, \eta_p^2 = ,13$) bedeutsam sind, was durch eine mittlere Effektstärke unterstrichen wird. Im Gegensatz dazu werden sensorischen Fähigkeiten ($\beta = ,06, t(146) = 0,72, n. s.$) und Emotion/Motivation/Kognition ($\beta = .10, t(146) = 1,30, n. s.$) eine geringere Bedeutung zugeschrieben. Eine weitere Frage bezieht sich darauf, welche Fähigkeiten Roboter innehaben sollen, wenn sie allein oder mit einem Menschen zusammenarbeiten. Hier ist erkennbar, dass bei der Zusammenarbeit mit einem Menschen emotionale/motivationale und kognitive Fähigkeiten (affektive Dimension) als relevant betrachtet werden (Lee et al., 2011). Aus dieser Studie wird deutlich, dass sowohl mit der Gestaltung von Robotern als auch mit dem antizipierten Einsatzgebiet verschiedene Erwartungen an die Fähigkeiten von Robotern einhergehen, die bei der Planung und Implementation solcher Technologien berücksichtigt werden sollten. Gleiches gilt für geschlechtsspezifische Aspekte wie das zugeschriebene Geschlecht des Roboters und geschlechtsstereotype Aufgaben, die in einer anderen Studie untersucht werden (Kuchenbrandt, Häring, Eichberg, & Eyssel, 2012).

Eine Studie im Kontext des industriellen Einsatzes von Robotern wurde 1986 von Nagamachi (1986) veröffentlicht. Die Laborstudie beinhaltet drei Experimente mit kleineren Stichproben ($n = 10$ bis 11) und prüft in verschiedenen Situationen, wie Menschen mit einem Roboter interagieren. In einem ersten Experiment untersucht der Autor, inwieweit ein von einem Roboter gehaltenes Werkstück korrigiert werden würde. Die Ergebnisse zeigen, dass mit zunehmender Geschwindigkeit des Roboters die Probanden einen Eingriff für weniger möglich halten. Zudem scheint die Vor-und-zurück-Bewegung des Roboters (x-Achse) in ihrer Gefahr unterschätzt zu werden. Dies ist möglicherweise darauf zurückzuführen, dass die Geschwindigkeitseinschätzung der Bewegung (zum Menschen und von ihm weg) besonders schwer ist (Nagamachi, 1986). Ein zweites Experiment untersucht, wie hoch die Probanden die Gefahr beim Passieren eines Roboterarms einschätzen. Dabei zeigt sich, dass bereits eine Dauer von vier Sekunden, in der die Bewegung des Roboterarms stoppt, dazu führt, dass fast alle Probanden ein Passieren des Arms für gut möglich halten und dies nahezu unabhängig von der vorherigen Geschwindigkeit des Roboters. Es zeigen sich sogar Tendenzen, dass Probanden bereits ab einer Wartezeit von zwei Sekunden und bei einer Geschwindigkeit von etwa 220 mm/s den Roboterarm passieren, was einer unsicheren Handlung entspricht. Ein drittes Experiment verfolgt ebenfalls die Fragestellung, welchen Einfluss die Wartezeit und die Geschwindigkeit des Roboters auf die eingenommene Distanz ausüben. Nagamachi findet, dass die Wartezeit des Roboters sich nicht auf die Annäherung bzw. die als sicher empfundene Distanz auswirkte, wohingegen für die Geschwindigkeit ein solcher Effekt bestand. Demnach kommt es bei einer geringeren Geschwindigkeit zu einer dichteren Annäherung als bei einer höheren Geschwindigkeit. Beispielsweise näherten sich Probanden bei der 50-Prozent-Geschwindigkeit-Bedingung (ca. 250 mm/s) bis auf $22,5 \text{ cm}$ dem Roboterarm, was als sicherheitskritisch betrachtet werden kann. Dieses Verhalten ist laut Nagamachi jedoch auch kulturell bedingt (Nagamachi, 1986).

Eine Annäherung daran, wie Menschen mit Robotern zusammenarbeiten, stellt auch eine deutsche Studie dar, in der das Bewegungsverhalten bei der Interaktion mit Robotern sowie die dabei bestehende Gefahren- und Sicherheitswahrnehmung untersucht wird (Bortot, Ding, Antonopolous, & Bengler, 2012). In der Studie wird ein Laborexperiment mit 15 Probanden durchgeführt, die in der Nähe eines Industrieroboters verschiedene Tätigkeiten ausführen und von diesem auch Teile angereicht bekommen. Die Ergebnisse der Autoren zeigen, dass sich das Bewegungsverhalten in Abhängigkeit von der Art des Zusammentreffens von Mensch und Roboter verändert, wobei im Durchschnitt ein Abstand von etwa $0,5 \text{ Metern}$ von der Werkzeugspitze des Roboters gewählt wird. Im durchgeführten Experiment gab der Großteil der Teilnehmer (80 Prozent) zudem an, kein Unsicherheitserleben bei der Zusammenarbeit mit dem Roboter zu empfinden (Bortot et al., 2012).

Eine weitere Untersuchung, die die Zusammenarbeit von Mensch und Roboter analysiert, wird von Karwowski und Rahimi durchgeführt. Die Autoren untersuchen die Frage, wie potenziell gefährliche Arbeitsplätze mit Robotern wahrgenommen werden und welche Charakteristika hinsichtlich der Geschwindigkeit und der Leerlaufzeit eines Roboters beachtet werden müssen, damit der Roboter als sicher wahrgenommen wird (Karwowski & Rahimi, 1991). Als Stichprobe dienen den Autoren 24 Erwerbstätige, die zunächst die Geschwindigkeit eines Roboters so einstellen sollen, dass diese noch als sicher empfunden wird. Das Ergebnis zeigt, dass die Größe des Roboters einen Einfluss darauf hat, welche Maximalgeschwindigkeit von den Probanden gewählt wird. Für den kleinen Roboter wählen die Probanden eine Durchschnittsgeschwindigkeit von $63,75 \text{ cm/s}$, wohingegen sie für den großen Roboter eine Durchschnittsgeschwindigkeit von $51,25 \text{ cm/s}$ einstellen. Der

statistische Unterschied der Untersuchung ist signifikant ($F(1,20) = 8,1, p = ,01$). Auch für die Anfangsgeschwindigkeit, mit der der Roboter betrieben wird, ergibt sich ein statistisch signifikanter Unterschied ($F(1,20) = 18,89, p = ,0001$). Dieser deutet darauf hin, dass bei einer höheren Anfangsgeschwindigkeit des Roboters eine höhere Durchschnittsgeschwindigkeit gewählt wird als bei einer geringeren Anfangsgeschwindigkeit (Karwowski & Rahimi, 1991). Die Studie von Or, Duffy und Cheung (2009) stellt eine Replikation der Arbeit von Karwowski und Rahimi (1991) dar, die jedoch in einer virtuellen Umgebung durchgeführt wird. Auch hier kann festgestellt werden, dass sich die Probanden dem Roboter langsamer nähern, wenn dieser groß ist (+ 50 Prozent der Normalgröße: Wartezeit = 18,13 s, normalgroßer Roboter: Wartezeit = 23,61 s) ($F(1,28) = 32,85, p < ,001$). Ein signifikanter Effekt findet sich zudem für die Geschwindigkeit des Roboters: Die Annäherung an zuvor schnell arbeitende Roboter erfolgt ebenfalls langsamer. Die Autoren befragen die 32 Probanden auch zu ihrer Gefahrenwahrnehmung bei der Interaktion mit dem Roboter. Dabei stellen sie fest, dass die Größe des Roboters einen signifikanten Effekt auf das Akzeptanzlevel ausübt ($F(1,28) = 10,88, p = ,003$), wobei große Roboter weniger akzeptiert werden. Die bestimmenden Einflussgrößen auf das wahrgenommene Gefahrenlevel liegen sowohl in der Geschwindigkeit des Roboters ($F(1,28) = 45,01, p < ,001$, geringeres Gefahrenlevel bei langsamen Robotern) als auch in der simulierten Unfallexposition ($F(1,28) = 14,10, p = ,001$, höherer Gefahrenlevel nach simulierter Unfallexposition) (Or, Duffy, & Cheung, 2009). Auch das Geschlecht wird von Or et al. als mögliche Einflussgröße auf das Verhalten untersucht, jedoch können diesbezüglich keine signifikanten Haupteffekte aufgedeckt werden (Or et al., 2009).

Ein weiterer Aspekt, der bei der Bedienung von Maschinen zu berücksichtigen ist, liegt in der Anzahl der zu bedienenden Elemente. Adams (2009) untersucht die Leistung und Beanspruchung von zwölf Studenten, deren Aufgabe in der Steuerung eines oder mehrerer Roboter liegt. Die statistische Auswertung der Daten deutet darauf hin, dass die Steuerung von vier Robotern mit einer signifikant höheren Beanspruchung für die Bediener einhergeht als die Bedienung von einem oder zwei Robotern. Hingegen lassen sich im Vergleich zwischen einem und zwei Robotern keine bedeutsamen Unterschiede in der Beanspruchung erkennen (Adams, 2009).

Aus den sieben Querschnittstudien, die das Befinden bei der Mensch-Roboter-Interaktion betrachten, lässt sich ableiten, dass subjektive Sympathiepräferenzen zunächst kaum bestehen. Werden dem Roboter jedoch verschiedene Merkmale (Geschlecht, Kompetenz) zugeschrieben, kann sich dies auf die Akzeptanz auswirken. Zudem spielen auch hier die Erfordernisse der Aufgabe eine Rolle. Auch sollten Einflüsse auf das Befinden und besonders auf die Akzeptanz, die bspw. durch Größe und Geschwindigkeit des Roboters auftreten, berücksichtigt werden.

Erkenntnisse zum Merkmal Schnittstellengestaltung - Roboter und Leistung

Die bereits erwähnte Studie von Adams (2009) betrachtet nicht nur die Beanspruchung, die mit der Steuerung von Robotern einhergeht, sondern auch die damit verbundenen Leistungsmerkmale. Laut dem Autor gelingt den zwölf untersuchten Studenten die Bearbeitung von weniger Aufgaben, wenn sie vier Roboter und nicht nur einen Roboter bedienen. Zudem machen die Probanden bei der Steuerung von vier Robotern mehr Fehler als bei der Steuerung von zwei oder einem Roboter. Somit scheint insbesondere die Erhöhung der zu bedienenden Elemente von zwei auf vier mit einer Leistungsverringerung verbunden zu sein.

Auch die Studie von Kuchenbrandt et al. (2012) verweist nicht nur auf die Bedeutung des zugewiesenen Geschlechts des Roboters im Hinblick auf dessen Akzeptanz, sondern auch auf die damit verbundene Leistung in der Versuchsaufgabe. So bleibt die Leistung der Probanden nicht unbeeinflusst davon, ob sie mit einem als männlich oder weiblich wahrgenommenen Roboter zusammenarbeiten. Ein marginal signifikanter Interaktionseffekt zwischen dem Geschlecht des Roboters und dem Geschlecht des Probanden ($F(1,65) = 2,84$, $p = ,10$, $\eta^2 = ,04$) weist mit einer geringen Effektstärke darauf hin, dass Männer die im Versuchssetting gestellte Aufgabe schneller bearbeiten, wenn sie mit einem als männlich wahrgenommenen Roboter zusammenarbeiten, wohingegen das Geschlecht des Roboters bei Frauen keinen Einfluss auf die Bearbeitungsgeschwindigkeit ausübt. Sowohl die Fehler als auch die Auswahl von Alternativen weisen auf keinen Effekt des Roboter Geschlechts hin (Kuchenbrandt et al., 2012).

Basierend auf einer Datenbasis von nur zwei Studien, die sich mit Leistungsaspekten bei der Mensch-Roboter-Interaktion befassen, können kaum Schlussfolgerungen gezogen werden. Im Allgemeinen sind jedoch mögliche Effekte auf die Leistung – vor allem bei zunehmenden Steuerungserfordernissen – auch bei der Gestaltung von Mensch-Roboter-Systemen zu berücksichtigen.

4.3. Erkenntnisse zum Merkmal Bedienung und Überwachung

Tabelle 3 stellt Anzahl und Art der extrahierten und im Folgenden betrachteten Studien zum Themenfeld Bedienung und Überwachung dar. Dabei sind Mehrfachnennungen möglich, da Studien häufig mehr als ein Outcome betrachten.

Tab. 3 Übersicht über die Studien zum Zusammenhang zwischen dem Merkmal Bedienung/Überwachung und den Outcomes

	Sekundärstudien	Primärstudien						
		Interventionsstudien		Nicht-Interventionsstudien				Sonstige
				Längsschnitt		Querschnitt		
		F	L	F	L	F	L	
Gesundheit						5		1
Befinden	1		4			5	2	
Motivation sowie Arbeitszufriedenheit			1			7		
Leistung	1		9			2	2	2
Sonstige (Arbeitsplatzcharakteristika)						4		
Gesamt	2		10			17	4	3

4.3.1. Erkenntnisse zum Merkmal Bedienung/Überwachung und Gesundheit

Das Thema Gesundheit wird – wie bei den vorherigen UV-Bereichen – auch im Merkmal Bedienung und Überwachung von nur wenigen Studien betrachtet. Insgesamt lassen sich fünf Studien finden, die in ihren abhängigen Variablen einen Zusammenhang zu gesundheitsbezogenen Aspekten untersuchen.

Im Fokus der Studie von Landsbergis, Janevic, Rothenberg, Adamu, Johnson und Mirer (2013) stehen Erkrankungsraten von Angestellten in der Automobilproduktion in Abhängigkeit von der Jobkategorie. Sie untersuchen dafür die Daten von etwa 9.200 Vorfällen von Produktionsmitarbeitern und Facharbeitskräften mit höheren Qualifikationsanforderungen hinsichtlich Herzerkrankungen und psychischer Störungen. Die ICD-9-Klassifikation von Bluthochdruck (401.0 bis 404.9) zeigt 1.215 Anspruchsfälle in sechs Jahren für Produktionsmitarbeiter und nur 102 Anspruchsfälle in demselben Zeitraum für Höherqualifizierte (Rate Ratio = 2.93 in 1.000 pro Jahr). Ein ähnliches Bild zeigt sich für Herzkrankheiten (ICD-9 410.0 bis 414.9, 427.0 bis 427.9, 440.0 bis 445.9) und Herzinfarkt (ICD-9 430.0 bis 436.9), wo ebenfalls ein erhöhtes Auftreten für Produktionsmitarbeiter besteht (Landsbergis et al., 2013). Im Bereich der psychischen Störungen untersuchen Landsbergis et al. (2013) Stimmungsstörungen (ICD-9 296.0 bis 298.0), neurotische Störungen (ICD-9 300.0 bis 300.9), Anpassungsstörungen (ICD-9 309.0 bis 309.9) und Reak-

tionen auf Stress (ICD-9 308.0 bis 308.9). Während Höherqualifizierte nur eine Auftretensrate von 3.61 in 1.000/Jahr aufweisen, liegt dieser Wert bei Produktionsmitarbeitern bei 13.12 in 1.000/Jahr, woraus sich eine relative Differenz der Auftretensraten (Rate Ratio) von 3.64 ergibt (Landsbergis et al.). Die Autoren kommen somit zu dem Schluss, dass Produktionsmitarbeiter gegenüber Höherqualifizierten ein vermehrtes Risiko für das Auftreten von Herzkrankheiten und psychischen Störungen haben.

Unterschiede zwischen älteren und jüngeren Beschäftigten in der Automobilindustrie stehen in der Studie von Frieling, Buch und Weichel (2008) im Vordergrund. Die feldbasierte Querschnittstudie wird mit ca. 400 Mitarbeitern aus zwei Produktionswerken durchgeführt. Hinsichtlich der subjektiven Beschwerden am Bewegungsapparat, die mit dem Nordischen Fragebogen gemessen werden (Kuorinka et al., 1987), finden die Autoren in der altersdifferenzierten Betrachtung keine Unterschiede in den Beschwerden zwischen den Altersgruppen.

Im Hinblick auf die Belastung durch Körperhaltungen (OWAS-Verfahren; (Spelten, Schaub, & Landau, 2004)) konnten die Autoren sogar einen negativen Zusammenhang aufzeigen, der auf eine altersabhängige Zuordnung der Mitarbeiter zu den verschiedenen Arbeitsplätzen schließen lässt (Frieling, Buch, & Weichel, 2008). Das bedeutet, „ältere Mitarbeiter sind im Durchschnitt an den Arbeitsstationen, an denen sie eingesetzt sind, einer geringeren Gesamtbelastung durch dysfunktionale Körperhaltungen in den Bereichen Ganzkörper-, Rücken und Beinhaltung ausgesetzt als jüngere Mitarbeiter. Die Zuordnung der Mitarbeiter zu den Arbeitsstationen erfolgt somit altersdifferenziert.“ (Frieling et al., 2008, S. 125) Lediglich im Bereich der Arm- und Kopfhaltungen sind ältere Mitarbeiter vergleichbaren Körperhaltungen ausgesetzt wie jüngere Mitarbeiter. Diese Ergebnisse sprechen dafür, dass in der Produktionsarbeit dem vermehrten Auftreten von Beschwerden mit zunehmendem Alter durch eine altersdifferenzierte Zuweisung von Arbeitsplätzen entgegengewirkt werden kann.

Eine andere Betrachtungsweise zur Erfassung des Zusammenhangs zwischen der Bedienung von Maschinen und Gesundheitsfolgen wird von Corbett (1987) gewählt. Corbett nutzt das Konzept der „technologischen Kopplung“ zur Untersuchung der Auswirkungen von *Advanced-Manufacturing Technology* (AMT, fortgeschrittene Fertigungstechnologien) auf die Gesundheit und Zufriedenheit der Mitarbeiter. Der Grundgedanke der technologischen Kopplung liegt darin, dass mithilfe dieser technologieorientierten Variablen die integrative Natur von Technologien beschrieben werden kann. In dem eingesetzten Fragebogen wird die technologische Kopplung über vier Dimensionen operationalisiert und durch eine Fremdeinschätzung erfasst. Die von dem Fragebogen abgedeckten Dimensionen sind die folgenden: Synchronizität, Rigidität des Arbeitsablaufs, Einheitlichkeit von Methoden, Interdependenz (*Slack*). In Abhängigkeit von der Ausprägung der einzelnen Skalenwerte kann in einem bestehenden Arbeitssystem sodann eine enge oder eine lose technologische Kopplung von Mensch und Maschine erfasst werden. Corbetts (1987) Querschnittstudie untersucht 31 Erwerbstätige in der Elektronikherstellung mit dem General Mental Health Questionnaire (Goldberg, 1978), bei dem hohe Werte für einen schlechteren Gesundheitszustand sprechen, und dem Fragebogen zur technologischen Kopplung. Die Ergebnisse der Datenanalyse zeigen einen mittleren Effekt für den korrelativen Zusammenhang zwischen den beiden Instrumenten ($r = ,45$, $p < ,05$). Das bedeutet, dass ein negativer Zusammenhang zwischen der technologischen Kopplung und der mentalen Gesundheit besteht. (Corbett, 1987). Die Verbindung zwischen den beiden Variablen wird sodann im Rahmen einer Regressionsanalyse weiter quantifiziert. Diese weist auf eine

signifikante Varianzaufklärung mit einem Koeffizienten von $\beta = ,77$ ($p < ,02$) hin (ebd.). Somit erklären die Aspekte der technologischen Kopplung in dem von Corbett untersuchten Kontext einen deutlichen Anteil an den hier erzielten Ergebnissen für die mentale Gesundheit.

Auch Dvash und Mannheim (2001) setzen das Konzept der technologischen Kopplung ein, um in einer querschnittsbasierten Feldstudie 216 Erwerbstätige aus dem Fertigungsbereich zu untersuchen. Mit denselben Fragebögen waren sie in der Lage, auch für ihre Stichprobe einen korrelativen Zusammenhang zwischen Kopplung und mentaler Gesundheit zu finden ($r = ,37$, $p < ,001$), der ebenfalls negativ zu interpretieren ist (Dvash & Mannheim, 2001). Die Daten der Regressionsanalyse weisen darauf hin, dass technologische Kopplung 10 Prozent der Varianz mentaler Gesundheit aufklären kann ($\beta = ,29$, $p < ,01$) (Dvash & Mannheim, 2001).

Die Studien von Corbett (1987) und Dvash und Mannheim (2001) weisen somit in dieselbe Richtung und lassen vermuten, dass eine enge Anbindung der Mitarbeiter an die von ihnen zu steuernden Maschinen (enge technologische Kopplung) mit Gesundheitsbeeinträchtigungen verbunden sein kann. Leider machen die eingesetzten Methoden nicht deutlich, welche Aspekte der mentalen Gesundheit besonders betroffen sind. Auch erfolgt in beiden Studien kein Gruppenvergleich von Mitarbeitern mit enger und niedriger technologischer Kopplung. Weitere Ergebnisse aus beiden Studien werden in den Kapiteln zu Arbeitszufriedenheit und Motivation sowie Arbeitsplatzcharakteristika berichtet.

Technologische Unsicherheit und technologische Abstraktheit dienen in der Studie von Mullarkey, Jackson, Wall, Wilson und Grey-Taylor (1997) dazu, die Interaktion zwischen Mensch und Maschine zu beschreiben. In einer Untersuchung mit 72 Bedienern von CNC-Maschinen aus der Elektronikindustrie wird der Frage nachgegangen, wie sich diese Technologieeigenschaften auf die Jobkontrolle und die mentale Gesundheit auswirken. Das Potenzial möglicher Funktionsprobleme und Bedienfehler wird durch das Konstrukt der technologischen Unsicherheit beschrieben, welches in der Studie anhand von vier Items operationalisiert wird (Cronbachs $\alpha = ,72$). Technologische Abstraktheit – als das Ausmaß, in dem die Bedienung eines Systems schwer zu verstehen und zu interpretieren ist – wird mit fünf Items erhoben (Cronbachs $\alpha = ,75$). Zudem werden Zeit- und Methodenkontrolle in dieser Arbeit ebenfalls als unabhängige Variable eingesetzt. Die abhängige Variable mentale Gesundheit wird mithilfe des General Mental Health Questionnaire (Goldberg, 1978) untersucht, dessen interne Konsistenz im Rahmen der Versuchsdurchführung hoch ist (Cronbachs $\alpha = ,91$). Die Ergebnisauswertung macht jedoch deutlich, dass kein statistischer Zusammenhang zwischen technologischer Unsicherheit sowie technologischer Abstraktheit und Gesundheit zu finden war ($r = -,23$, n. s.; $r = ,01$, n. s.). Auch für arbeitsbezogene Depressivität, die mit dem Fragebogen von Warr (1990) gemessen wird, lässt sich kein Zusammenhang zu technologischer Unsicherheit ($r = -,04$, n. s.) oder technologischer Abstraktheit ($r = -,02$, n. s.) nachweisen. Die technologischen Faktoren weisen in diesem Kontext keine nachweisbaren Effekte auf Gesundheit und Depressivität auf, jedoch bestehen Interaktionseffekte mit der Zeit- und Methodenkontrolle der Mitarbeiter. Diese scheinen somit einen entscheidenden Einfluss auf die Wirkung technologischer Abstraktheit und Unsicherheit auszuüben.

Diese Ergebnisse verdeutlichen, dass ein entscheidender Unterschied darin bestehen kann, ob lediglich die Eigenschaften der Maschine im Fokus der Untersuchung stehen, oder ob das Zusammenspiel von Mensch und Maschine in einem System betrachtet wird. Das bedeutet, dass die objektive Beschreibung von Technologiemerkmale eine andere

Aussagekraft besitzen kann als die kombinierte Betrachtung beider Systemelemente, bei der auch das subjektive Erleben der Bediener berücksichtigt wird. Außerdem zeigen die vorgestellten Arbeiten, dass ein unterschiedlicher inhaltlicher Fokus auf das Mensch-Maschine-System (technologische Kopplung vs. technologische Unsicherheit/ Abstraktheit) mit verschiedenartigen Ergebnissen verbunden sein kann. Für möglichst vollständige Aussagen darüber, welche Aspekte der MMI mit gesundheitlichen Folgen zusammenhängen, empfiehlt sich somit eine umfassende Messung verschiedener Merkmale in dem jeweiligen Arbeitssystem.

Eine andere Facette von Gesundheit und der Bedienung von Maschinen wird von Vieitez, de la Torre Carcía und Vega Rodríguez (2001) betrachtet. Sie untersuchen auf einer allgemeineren Ebene, ob die Einführung neuer Technologien im Zusammenhang mit wahrgenommener Arbeitsplatzunsicherheit und gesundheitlichen Aspekten sowie dem Befinden der Mitarbeiter steht. In einer Feldstudie mit 148 Erwerbstätigen aus der Automobilindustrie können sie mit einer geringen Effektstärke eine negative Korrelation zwischen der mit einem Fragebogen gemessenen Wahrnehmung der Technologie (Chao & Kozlowski, 1986) und Depression ($r = -,18$, $p < ,05$) feststellen. Auch in der Regressionsanalyse wird dieser negative Zusammenhang bestätigt ($\beta = -,24$, $F(1,127) = 7,67$, $p = ,00$). Das Ergebnis der multivariaten Varianzanalyse weist darauf hin, dass die Wahrnehmung technologischer Veränderung 15 Prozent der Varianz des Wohlbefindens (zusammengefasst aus den Variablen Depression, *State-* und *Trait-Anxiety* sowie Stress) aufklärt (Hotellings $F(4,124) = ,17$, $p = ,00$; $d = 0,15$) und somit einen bedeutenden Einfluss ausübt. Eine weitere Vermutung der Studie besteht darin, dass die Wahrnehmung technologischer Veränderungen besonders durch persönliche und situative Charakteristika geprägt ist. Tatsächlich weisen Unbehagen und Ängstlichkeit, die mit der State-Trait Anxiety Inventory Scale (Spielberger, Gorsuch, Lushene, & Press, 1970) untersucht werden, einen signifikanten Zusammenhang mit der Wahrnehmung technologischer Veränderung auf (trait anxiety $r = -,31$, $p < ,01$, state anxiety $r = -,18$, $p < ,05$). Das Ergebnis weist auf mittlere und niedrige Effektstärken für die gefundenen Zusammenhänge hin. Auch für die soziale Position, Training und Erfahrung mit neuen Technologien kann der Zusammenhang bestätigt werden, wohingegen das Alter die Einstellung gegenüber neuen Technologien nicht zu beeinflussen scheint (Vieitez, de la Torre Carcía, & Vega Rodríguez, 2001).

Aus den fünf Querschnittstudien und der Datenanalyse lassen sich folgende Schlüsse ziehen: Grundsätzlich scheint ein höheres gesundheitliches Risiko mit Produktionsarbeit verbunden zu sein. Dem vermehrten Auftreten von körperlichen Beschwerden bei älteren Mitarbeitern kann durch die altersdifferenzierte Zuweisung von Arbeitsplätzen entgegen gewirkt werden. Eine mögliche Ursache für gesundheitliche Beeinträchtigungen scheint einerseits das Maß der technologischen Kopplung zwischen Mensch und Maschine zu sein, das die wechselseitige Abhängigkeit zwischen beiden beschreibt. Andererseits spielen auch Einstellungen und die Wahrnehmung der technologischen Entwicklung eine Rolle bei dem Einfluss von Maschinenbedienung auf die Gesundheit.

4.3.2. Erkenntnisse zum Merkmal Bedienung/Überwachung und Befinden

Für den AV-Bereich Befinden wurden 13 Studien extrahiert, die sich auf verschiedene Aspekte der Bedienung und Überwachung von Maschinen beziehen.

Im Produktionsumfeld lässt sich eine zunehmende Verbreitung von Informationstechnologien erkennen (Council, 1995). Daher wurde auch die Studie von Mahmood, Burn, Geemoets und Jaquez (2000) in die Datenextraktion aufgenommen, die im Rahmen einer Me-

taanalyse untersucht, welche Aspekte von Informationstechnologien sich auf die Nutzerzufriedenheit – als eine valenzorientierte Facette des Befindens – auswirken. Nutzerzufriedenheit selbst hängt sodann auch mit der tatsächlichen Nutzung des Systems zusammen (Bokhari, 2005). Aus der Analyse von 45 Studien, die in die Sekundärstudie eingegangen waren, ergibt sich, dass alle untersuchten Variablen einen signifikanten Einfluss auf die Nutzerzufriedenheit haben. Die Autoren bilden entsprechend ihrer Modellvorstellung verschiedene Variablengruppen, die ein möglichst vollständiges Bild der Einflussfaktoren auf die Nutzerzufriedenheit generieren sollen. Eine Variablengruppe umfasst die wahrgenommenen Vorteile der Technologienutzung, die sich aus den Systemeigenschaften ergeben. Dazu gehören die wahrgenommene Nützlichkeit (kombinierte Effektgröße $r = ,580$), die wahrgenommene Einfachheit der Bedienung (kombinierte Effektgröße $r = ,404$) und Nutzererwartungen (kombinierte Effektgröße $r = ,458$), die sich alle signifikant auf die Nutzerzufriedenheit auswirken. Die Eigenschaften und Vorgeschichte der Nutzer stellen eine zweite Variablengruppe dar. Hierunter fassen die Autoren Aspekte wie Erfahrungen des Nutzers (kombinierte Effektgröße $r = ,565$), Fähigkeiten des Nutzers (kombinierte Effektgröße $r = ,443$) und Einbeziehung des Nutzers in die Systementwicklung (kombinierte Effektgröße $r = ,661$), die alle einen bedeutsamen Einfluss auf die Nutzerzufriedenheit ausüben. Die dritte Variablengruppe, die Mahmood et al. (2000) bilden, besteht aus organisationalen Unterstützungsfaktoren. Diese umfassten die Einstellungen des Nutzers gegenüber Informationssystemen (kombinierte Effektgröße $r = ,524$), organisationale Unterstützung (kombinierte Effektgröße $r = ,525$) sowie die wahrgenommene Einstellung des Managements gegenüber dem Projekt (kombinierte Effektgröße $r = ,462$). Auch hier wird für alle Aspekte ein signifikanter Zusammenhang zur Nutzerzufriedenheit festgestellt. Aus der Stärke der Effektgrößen leiten die Autoren ab, dass insbesondere die Beteiligung der Nutzer an der Systementwicklung ein Schlüsselement für Nutzerzufriedenheit darstellt (Mahmood, Burn, Gemoets, & Jacquez, 2000). Die Studie verbindet zahlreiche Aspekte, die bei der Bedienung von Maschinen von Bedeutung sein können. Dazu gehören bspw. die Eigenschaften des Systems, die im nachfolgenden Kapitel ausführlicher beschrieben werden. Es zeigt sich zudem, dass die Wahrnehmung verschiedener Systemeigenschaften, die nicht mit den objektiv bestehenden Eigenschaften im Einklang stehen muss, ebenfalls von Bedeutung ist. Darüber hinaus sind auch Eigenschaften des Nutzers nicht zu vernachlässigen, da sie sich ebenfalls auf die Bedienung auswirken können.

Fünf Studien zum Zusammenhang zwischen der Bedienung von Maschinen und dem Befinden der Bediener lassen sich auf der Ebene der Interventionsstudie finden. Alle Studien wurden unter Laborbedingungen durchgeführt. Die Eigenschaften der Maschine bzw. des Systems und die dadurch entstehenden Auswirkungen auf die Bedienung wurden in drei Interventionsstudien thematisiert.

Die Systemzuverlässigkeit steht sowohl bei McFadden, Vimalachandran und Blackmore (2004) als auch Bailey und Scerbo (2007) und Antwarg, Lavie, Rokach, Shapira und Meyer (2013) im Fokus. Bailey und Scerbo (2007) untersuchen die Systemzuverlässigkeit in zwei Experimenten als unabhängige Variable, indem sie ein automatisches Unterstützungssystem bei einer Überwachungsaufgabe einsetzen, das entweder eine nahezu perfekte Zuverlässigkeit (0,3 Prozent Ausfallrate), hohe Zuverlässigkeit (2 Prozent Ausfallrate) oder niedrige Zuverlässigkeit aufwies (13 Prozent Ausfallrate). Im Hinblick auf die Vertrauensbewertung der Probanden zeigt eine Varianzanalyse einen starken Effekt der Systemzuverlässigkeit ($F(2,120) = 20,23$, $\eta^2 = ,25$) (Bailey & Scerbo, 2007). Das bedeutet, dass sich die Vertrauensbewertung mit zunehmender Systemzuverlässigkeit erhöht.

McFadden et al. untersuchen ein automatisches Assistenzsystem, das entweder mit einer Genauigkeit von 75 Prozent oder 90 Prozent arbeitet. Als abhängige Variable steht neben Leistungsmaßen auch die Beanspruchung im Fokus der Studie. Hier können die Autoren feststellen, dass mit einer zunehmenden Zuverlässigkeit des Assistenzsystems eine Verringerung der Beanspruchung verbunden war (McFadden, Vimalachandran, & Blackmore, 2004).

Antwarg et al. (2013) beschreiben in einer Studie mit 64 studentischen Probanden den Einsatz eines Assistenzsystems, das entweder 60 Prozent, 80 Prozent oder 100 Prozent zuverlässig agiert. Das Assistenzsystem hebt mit der jeweiligen Zuverlässigkeit die nächsten Schritte bei der Arbeit mit einem computerbasierten Programm hervor. Als abhängige Variable dienen sowohl Leistungsmaße als auch die subjektive Einschätzung der Aufdringlichkeit des Systems sowie des Vertrauens. Hinsichtlich der Aufdringlichkeit finden die Autoren einen signifikanten Effekt der Systemzuverlässigkeit ($F(1,42) = 3,12, p = ,05$), wobei das am wenigsten zuverlässige System als das aufdringlichste empfunden wird. Auch die Vertrauensbewertung wird signifikant von der Systemzuverlässigkeit beeinflusst ($F(1,28) = 7,92, p < ,05$) und nimmt deutlich zwischen einer Zuverlässigkeit von 80 Prozent und 60 Prozent ab (Antwarg, Lavie, Rokach, Shapira, & Meyer, 2013).

Diese Ergebnisse ähneln den bei der Funktionsteilung gefundenen Zusammenhängen: Ebenso wie eine Funktionsteilung auf einem höheren Niveau zu einer Beanspruchungsreduktion und einer Vertrauensstärkung beitragen kann, können auch Systemeigenschaften, die sich auf die Funktionstüchtigkeit auswirken, das Befinden der Bediener beeinflussen. Eine zentrale Systemeigenschaft scheint dabei die Zuverlässigkeit des Systems zu sein. Unzuverlässige Systeme werden als aufdringlich und beanspruchend empfunden und führen zu einer geringeren Vertrauensbewertung.

Die bei der Gestaltung von Arbeitstätigkeiten festgelegte Funktionsteilung wirkt sich bei der nachfolgenden Bedienung von Maschinen und Systemen auf das Erleben der Nutzer aus. So stellen Überwachungstätigkeiten eine häufige Folge der Funktionsteilung und zunehmenden Automatisierung dar und zeigen auf, dass die Bedienung von Maschinen mit strukturell unterschiedlichen Tätigkeiten einhergeht, wie bereits im Kapitel „Überblick über Theorien und Modelle“ (1.) erläutert wurde. Dennoch besteht auch bei Überwachungstätigkeit das Bestreben, sie möglichst leistungs- und beanspruchungsförderlich zu gestalten. Um dieses Ziel zu erreichen, besteht der Ansatz von Johansson, Cavalini und Pettersson (1996) darin, aktive und passive Überwachungstätigkeiten hinsichtlich ihrer Folgen für das Erleben zu untersuchen. In ihrer Studie nutzen sie eine simulierte Überwachungsaufgabe, bei der der Zustand von zwei Variablen mithilfe von Markern abgebildet wird. Die Aktivität bzw. Passivität der Überwachung wird durch die Anzahl und Geschwindigkeit der Abweichungen der Marker operationalisiert. Die eigentliche Herausforderung des Versuchsaufbaus liegt darin, dass die 24 Probanden zu einem bestimmten Zeitpunkt auf eine aufmerksamkeitsfordernde Aufgabe reagieren müssen. Die Auswertung der Ergebnisse lässt erkennen, dass die Probanden in der aktiven Überwachungsbedingung sich aktiver, angestrenzter und gehetzter fühlten als die Probanden in der passiven Überwachungsbedingung. Die grafische Skala, die nur mit den Endpunkten „überhaupt nicht“ und „maximal“ versehen ist, lässt jedoch darauf schließen, dass sich die Einschätzungen der Probanden in der aktiven Überwachungsbedingung auf einem mittleren Level bewegen, wohingegen die Probanden in der passiven Überwachungsbedingung sehr niedrige Werte aufweisen. Auf einem endokrinen Level können die Autoren mittels der Erfassung der Katecholaminausschüttung keine Unterschiede zwischen den Überwachungsbedingungen nachweisen

(Johansson, Cavalini, & Pettersson, 1996). Insgesamt kommen Johansson et al. zu dem Schluss, dass die passive Überwachung einen moderaten Einfluss auf die psychophysiologische Erregung hat und mit mehr negativen Befindensbeschreibungen verbunden ist als die aktive Überwachung (Johansson et al., 1996). Weitere Ergebnisse der Studie werden im Kapitel zu den Leistungsfolgen beschrieben.

Weiterhin wurden im Bereich der Querschnittstudien die Daten aus fünf Feldstudien und zwei Laborstudien extrahiert, die sich mit der Auswirkung von Maschinen- und Systembedienung und der Überwachung auf das Befinden der Bediener befassen.

Auf einem ebenfalls höheren Level und unabhängig von dem speziellen Einsatz von Maschinen beschäftigen sich Shu, Tu und Wang (2011) sowohl mit personen- als auch situationsbezogenen Faktoren, die sich auf den erlebten Technostress auswirken. 289 Erwerbstätige beantworten Fragen zur computerbezogenen Selbstwirksamkeit und zur computerbezogenen Technologieabhängigkeit. Aus den Ergebnissen der Korrelationsanalyse lässt sich schließen, dass eine höhere Technologieabhängigkeit auch mit einem verstärkten Erleben von Technostress verbunden ist ($r = ,26$, $p < ,01$). Ebenso führt eine niedrige computerbezogene Selbstwirksamkeit zu Technostress ($r = -,17$, $p < ,05$) (Shu, Tu, & Wang, 2011). Beide Effekte bewegen sich im niedrigen Effektstärkenbereich. Das höchste Erleben von Technostress ergibt sich aus der Kombination von geringer computerbezogener Selbstwirksamkeit und hoher Technologieabhängigkeit. Daraus zeigt sich, dass sich sowohl personen- als auch situationsbezogene Faktoren sowie deren Kombination auf das Wohlbefinden im Arbeitskontext auswirken können. Da im hiesigen Verständnis jedoch die Verhältnisprävention vor der Verhaltensprävention steht, kann womöglich die Technologieabhängigkeit als Gestaltungsmaßstab dienen.

Einen konkreten Anwendungsfall, in dem die Bedienung von Maschinen untersucht wird, stellt die Arbeit von Salvendy, Shodja, Sharit und Etherton (1983) dar. Die Studie vergleicht zwei verschiedene Schutzeinrichtungen (beidhändige Kontrolleinrichtung und selbstauslösendes elektronisches System) bei einer großen Presse in der industriellen Fertigung im Hinblick auf die damit verbundenen physiologischen und subjektiven Stressindikatoren. Die Varianzanalyse der Daten zeigt, dass die Art der Schutzeinrichtung weder den mittleren Blutdruck noch die Herzrate der untersuchten Mitarbeiter beeinflusst. Zudem treten auch bei der subjektiven Einschätzung mit der Feeling Tone Checklist (Pearson & Byars Jr, 1956) keine Unterschiede zwischen den beiden Kontrolleinrichtungen auf (Salvendy, Shodja, Sharit, & Etherton, 1983). Dies zeigt, dass Veränderungen eines Arbeitssystems – wie im hiesigen Fall durch die Einführung der elektronischen Kontrolleinrichtung – auch ohne Auswirkungen auf das (Stress-)Erleben der Beschäftigten stattfinden können.

Die bereits beschriebene Aktivität und Passivität von Überwachungstätigkeit kann auch in bestehenden Systemen beobachtet werden. So beschreiben Persson, Wanek und Johansson (2001) die Ergebnisse einer Feldstudie, in der sie 16 im Energiesektor tätige Operateure untersuchen. Die Verteilertätigkeit der Dispatch-Operateure zeichnet sich augenscheinlich durch eine höhere Aktivität aus als die eher passive Tätigkeit des Grid-Operateurs, der für die Netzüberwachung zuständig ist. Zur tatsächlichen Erfassung der Aktivierung der Operateure wird eine visuelle Skala eingesetzt, die den umgekehrt u-förmigen Zusammenhang zwischen Aktivierung und Leistung abbildet und auf der die Operateure ihre Aktivierung in normalen und kritischen Situationen angeben sollen. Die Auswertung der Daten zeigt, dass die von den Operateuren selbst angegebene Aktivierung in kri-

tischen und normalen Situationen keine bedeutsamen Unterschiede erkennen lässt (Persson, Wanek, & Johansson, 2001). Eine mögliche Erklärung dafür und zugleich weiteres Ergebnis wird im Kapitel zu den Erkenntnissen zum Merkmal Bedienung/Überwachung und Arbeitsplatzcharakteristika ausgeführt.

In einer Feldstudie mit 145 Operateuren aus der chemischen Industrie untersuchen Sonnenberg und Thämelt (1985), inwieweit ein unterschiedliches Beanspruchungserleben mit aktiven Bedientätigkeiten (Kontrolle und Überwachung) und Bereitschaftszeiten verbunden ist. Unter Kontrolltätigkeiten werden regelmäßige oder zielgerichtete Kontrollen, das Protokollieren von Prozessparametern sowie Kontrollen von Analysewerten verstanden, wohingegen Bedientätigkeiten vor allem die Regulierung innerhalb des Grenzbereichs sowie Bedienhandlungen für die Störungsbeseitigung umfassen. Im Rahmen der Studie wird das Befinden mittels der Beanspruchungsmessskala (Plath & Richter, 1978) operationalisiert. Für die aktiven Tätigkeitsbestandteile Kontrolle und Überwachung ergibt sich mit der erlebten Sättigung eine Maßkorrelation von $r = ,50$ ($p < ,05$). Die aktiven Tätigkeiten korrelieren zudem positiv mit dem Stresserleben der Bediener ($r = ,45$, $p < ,05$). Die gesonderte Betrachtung der beiden Tätigkeitsbestandteile führt zu hohen Korrelationen zwischen Kontrolltätigkeiten und Stresserleben ($r = ,41$) sowie zwischen Bedientätigkeiten und Sättigung $r = ,55$ ($p < ,01$) (Sonnenberg & Thämelt, 1985). Diese Ergebnisse erscheinen im Hinblick auf die gewählten Operationalisierungen unerwartet und es wäre eher ein Zusammenhang zwischen Bedientätigkeiten und Stresserleben sowie zwischen Kontrolltätigkeiten und Sättigung zu erwarten gewesen. Dieser Eindruck verstärkt sich durch den von den Autoren angegebenen Zeitanteil von 5,7 Prozent, der für Bedientätigkeiten aufgewendet wird. Die Bereitschaftszeit wird von den Autoren als passive Tätigkeit bezeichnet. Diese zeigt auf einem Signifikanzniveau von $\alpha = ,05$ eine negative Korrelation mit der erlebten Sättigung ($r = -,45$) (Sonnenberg & Thämelt, 1985).

Zwei Laborstudien mit Operateuren, die in der Leitwarte eines Energieversorgungsunternehmens tätig sind, stellt zudem fest, dass sich verschiedene Teiltätigkeiten (Störungsbearbeitung geplanter Eingriff, Überwachung) innerhalb der Systembedienung sowohl im subjektiven Erleben der Befragten als auch physiologisch differenzieren lassen (Rau, 1996a, 1996b). Für die Operateure stellt die Teiltätigkeit Störungsbearbeitung die komplexeste Aufgabe dar, die entsprechend von dem höchsten psychophysiologischen Aufwand (Herzfrequenz, systolischer Blutdruck sowie erlebte geistige und körperliche Anspannung) begleitet wird. Entsprechend dem Modell von Karasek (Karasek, 1990) sollte die Störungsbearbeitung eine „aktive Tätigkeit“ darstellen und somit mit einer Beanspruchungsreduktion verbunden sein. Die Ergebnisse von Rau (1996b) widersprechen dem und zeigen, dass mehr mentale Anforderungen und höherer Entscheidungsspielraum die Beanspruchung der Operateure nicht reduzieren, sondern sie sogar erhöhen können.

Die drei soeben beschriebenen Studien erlauben den Schluss, dass sich innerhalb von Überwachungs- und Bedientätigkeiten verschiedene Teiltätigkeiten identifizieren lassen, die mit unterschiedlichen, differenzierbaren Erlebenszuständen verbunden sind.

Insgesamt zeichnen die 13 Studien ein diffuses Bild von Bedientätigkeiten. Es zeigt sich in der Metaanalyse, dass viele wahrgenommene Aspekte von Systemen, aber auch der Prozess der Systementwicklung entscheidend für die nachfolgende Nutzerzufriedenheit sind. Die Interventionsstudien verweisen besonders darauf, dass sich Systemeigenschaften wie Zuverlässigkeit auf die Beanspruchung (Reduktion dieser durch zuverlässige Systeme) und das Vertrauen der Bediener auswirken können. Zudem beeinflussen sowohl Überwa-

chungs- als auch Kontrolltätigkeiten das Befinden der Bediener, jedoch kann hier kein klares Bild gezeichnet werden: Während eine Interventionsstudie auf moderate Beanspruchung und eher negative Befindensbeschreibungen durch passive Überwachungstätigkeiten hinweist, finden Querschnittstudien, dass vermeintlich aktive und passive Überwachungstätigkeiten im Erleben nicht differenzierbar sind und dass auch Kontrolltätigkeiten mit einem erhöhten Stresserleben einhergehen können. In den Querschnittstudien finden sich zudem Hinweise darauf, dass ein Mehr an aktiven Tätigkeiten nicht mit einer Beanspruchungsreduktion verbunden sein muss.

4.3.3. Erkenntnisse zum Merkmal Bedienung/Überwachung und Motivation sowie Arbeitszufriedenheit

Für den Zusammenhang zwischen der Bedienung und Überwachung von Maschinen und der Motivation sowie Arbeitszufriedenheit lassen sich die Ergebnisse aus acht Studien berichten.

Eine Interventionsstudie, die experimentell unter Laborbedingungen durchgeführt wird, beschäftigt sich mit der Umgestaltung einer Standbohrmaschine nach ergonomischen Prinzipien. Die Autoren können bei den 16 Studenten, die an der Studie teilnehmen, eine höhere Arbeitszufriedenheit nach der Umgestaltung feststellen (Das, Shikdar, & Winters, 2007). Das Potenzial von ergonomischer Gestaltung und darauf basierenden Verbesserungen der Arbeitssituation scheint somit noch nicht ausgeschöpft. Die Anwendung ergonomischer Prinzipien stellt eine zentrale Grundlage für die Durchführung von Gestaltungsmaßnahmen in Mensch-Maschine-Systemen dar.

Weiterhin lassen sich sieben Querschnittstudien finden, von denen einige bereits im vorherigen Kapitel zur abhängigen Variablen „Befinden“ beschrieben wurden.

Mit dem Veröffentlichungsjahr 1965 stellt die Studie von Kaufman die älteste in das Review eingeschlossene Studie dar. Eine Stichprobe von 45 Erwerbstätigen soll zunächst angeben, wie viel Zeit sie mit verschiedenen Tätigkeiten (Überwachung, Instandhaltung) verbringt. Anschließend wird sie zu ihrer Arbeitszufriedenheit befragt. Das Ergebnis der Studie weist mit einer mittleren Effektstärke darauf hin, dass die Zeit, die mit Überwachungs- und Kontrollaufgaben verbracht wird, negativ mit der Arbeitszufriedenheit korreliert ($r = -,44$, $p < ,005$) (Kaufman, 1965). Zudem besteht ein signifikanter Zusammenhang zwischen der Überwachungszeit und Langeweile ($r = ,33$, $p < ,05$) (ebd.). Diese Studie zeigt, dass Überlegungen zur Gestaltung von Arbeit bereits früh in der Forschung thematisiert worden sind. Aktuellere Studien lassen erkennen, dass diese Thematik bis heute nicht an Relevanz verloren hat und noch immer eine Herausforderung für die Arbeitsgestaltung darstellt.

Auch die Arbeit von Fried, Weitman und Davis aus dem Jahr 1972 liefert Erkenntnisse, die auch aus Sicht aktueller Arbeitsgestaltung relevant sind. Die Autoren untersuchen innerhalb einer zufällig ausgewählten Periode von sechs Monaten die Absentismusrate von 230 Beschäftigten, die in der Herstellung von Papierprodukten tätig sind. Die unabhängige Variable wird mit einem selbst entwickelten Fragebogen erhoben und umfasst Aspekte der Mensch-Maschine-Interaktion wie die Kontrolle des Materialflusses, Anpassungen der Maschine im Produktionsprozess, Manipulation der Kontrollgeräte, Durchführung von Korrekturen und selbst gewählte Geschwindigkeit. In den Ergebnissen zeigt sich, dass die Möglichkeit zur selbstständigen Wahl der Geschwindigkeit und zur eigenständigen Durchführung von Korrekturen und Anpassungen der Maschine mit einer geringeren Absentismus-

rate verbunden sind (Fried, Weitman, & Davis, 1972). In dem Artikel finden sich jedoch keine weiteren Angaben zur Operationalisierung der Variablen und zu den statistischen Ergebnissen, weshalb die Aussagen einen eher deskriptiven Charakter haben. Im Allgemeinen ist die Erfassung des Absentismuskonstrukts nicht unproblematisch: Häufig werden dafür Krankendaten genutzt, bei denen jedoch nicht zwischen tatsächlichen Krankentagen und dem Fernbleiben der Arbeit aufgrund von Absentismus unterschieden werden kann.

Die bereits im Kapitel über Gesundheit beschriebenen Studien von Corbett (1987) sowie von Dvash und Mannheim (2001) erfassen neben gesundheitsbezogenen Aspekten auch die Arbeitszufriedenheit der Maschinenbediener in Abhängigkeit vom Konzept der technologischen Kopplung. Corbett kann einen negativen Zusammenhang mit mittlerer Effektstärke zwischen technologischer Kopplung und der intrinsischen Arbeitszufriedenheit nachweisen ($r = -,48$, $p < ,01$). Die mit einer multiplen Regressionsanalyse berechneten Beta-Gewichte der technologischen Kopplung liegen bei $\beta = -,79$ ($p < ,009$) für intrinsische Arbeitszufriedenheit und bei $\beta = -,46$ ($p = n. s.$) für die allgemeine Arbeitszufriedenheit (Corbett, 1987). Wie bei den Gesundheitsvariablen liegen auch in der Studie von Dvash und Mannheim (2001) die Zusammenhänge für Arbeitszufriedenheit in einem vergleichbaren Bereich. Die Korrelation zwischen technologischer Kopplung und intrinsischer Arbeitszufriedenheit ($r = -,36$, $p < ,001$) sowie zwischen technologischer Kopplung und allgemeiner Arbeitszufriedenheit ($r = -,13$, $p < ,05$) zeigen ebenfalls einen negativen Zusammenhang mit mittlerer und kleiner Effektstärke.

Corbett, Martin, Wall und Clegg (1989) replizieren Corbetts Arbeit aus dem Jahr 1987 mit 32 Erwerbstätigen in der Computerherstellung, wobei sie sich aufseiten der abhängigen Variablen jedoch auf die Arbeitszufriedenheit fokussieren. Diese wird wie in der vorherigen Studie mit der Intrinsic Job Satisfaction Scale (Warr, Cook, & Wall, 1979) erhoben. Auch in dieser Untersuchung kann mit einer mittleren Effektstärke ein negativer Zusammenhang festgestellt werden ($r = -,46$, $p < ,001$), der dafür spricht, dass eine enge technologische Kopplung mit einer geringeren Arbeitszufriedenheit verbunden ist. Im Hinblick auf die Subskalen des Kopplungskonzepts, auf die bereits im Kapitel 4.3.1. eingegangen wurde, zeigt sich im Rahmen einer multiplen Regressionsanalyse, dass die Dimensionen „Synchronizität“ und „Interdependenz“ (*Slack*) gemeinsam einen signifikanten Anteil an der Varianzaufklärung haben ($\Delta R^2 = ,12$, $p < ,05$), während die Dimensionen „Einheitlichkeit der Methode“ und „Rigidität des Arbeitsflusses“ nicht bedeutsam zur Aufklärung beitragen (Corbett, Martin, Wall, & Clegg, 1989).

Die drei beschriebenen Studien zeigen somit deutliche Hinweise darauf, dass eine enge Kopplung von Mensch und Maschine nicht nur mit gesundheitlichen Folgen verbunden sein kann, sondern sich auch auf die Arbeitszufriedenheit der Beschäftigten auswirkt. Liegt der Fokus jedoch auf Maschineneigenschaften wie technologischer Unsicherheit und technologischer Abstraktheit, kann kein Zusammenhang zur Arbeitszufriedenheit festgestellt werden. Dies zeigt die Studie von Mullarkey et al. (1997), die ebenfalls den Fragebogen von Warr et al. (1979) zur Messung der intrinsischen Arbeitszufriedenheit einsetzen und weder für technologische Unsicherheit ($r = ,4$, $n. s.$) noch für technologische Abstraktheit ($r = -,12$, $n. s.$) signifikante Korrelationen finden. Weitere Erkenntnisse zu diesen Konstrukten werden im Kapitel über Arbeitsplatzcharakteristika beschrieben.

Den letzten Hinweis über das Zusammenwirken von der Maschinenbedienung und der Arbeitszufriedenheit liefert die bereits erwähnte Studie von Frieling et al. (2008). Neben

den gesundheitlichen Aspekten der Produktionsarbeit werden die Produktionsmitarbeiter aus zwei Werken auch hinsichtlich ihrer subjektiven Arbeitsfähigkeit mit der Kurzversion des Work Ability Index (Nübling, Hasselhorn, Seitsamo, & Ilmarinen, 2004) befragt. Die Ergebnisse weisen darauf hin, dass mit zunehmendem Alter (> 35 Jahren) eine abnehmende Arbeitsfähigkeit (Werk A: $r = -,28$, $p < ,001$, Werk B: $r = -,31$, $p < ,001$) angegeben wurde. Gleiches gilt für die offensive Problembewältigung, die ebenfalls negativ mit dem Alter korreliert. Die Studie ermöglicht somit Einblicke, wie auch personenbezogene Faktoren die MMI beeinflussen können.

Zusammenfassend zeichnen die Ergebnisse der acht Studien in diesem Kapitel ein eher negativ geprägtes Bild der Arbeitszufriedenheit bei der Bedienung von Maschinen. Die Interventionsstudie weist darauf hin, dass sich die Arbeitszufriedenheit durch die ergonomische Gestaltung von Maschinen erhöhen kann. Die sechs Querschnittstudien setzen zudem weitere Schwerpunkte: Eine enge Kopplung von Mensch und Maschine kann mit einer verringerten Arbeitszufriedenheit verbunden sein, während technologische Unsicherheit und technologische Abstraktheit keinen Einfluss auf die Arbeitszufriedenheit nehmen. Auch ein hoher zeitlicher Anteil, der mit Kontroll- und Überwachungstätigkeiten verbracht wird, korreliert negativ mit der Arbeitszufriedenheit. Eine andere Facette stellt die Absentismusrate dar. Diese kann reduziert werden, wenn die Mitarbeiter die Möglichkeiten zur selbstständigen Wahl der Geschwindigkeit und zur eigenständigen Durchführung von Anpassungen und Korrekturen der Maschinen haben. Auch scheint das Alter einen Anteil daran zu haben, wie die subjektive Einschätzung von Arbeitsfähigkeit ausfällt.

4.3.4. Erkenntnisse zum Merkmal Bedienung/Überwachung und Leistung

Auch im UV-Komplex Bedienung und Überwachung stellen Leistungsvariablen die prominenteste AV-Kategorie dar. Neben einer Sekundärstudie finden sich vor allem experimentelle Interventionsstudien sowie Querschnittstudien und zwei Datenanalysen, sodass insgesamt 16 Studien zu leistungsbezogenen Aussagen kommen.

Zunächst soll auf das Ergebnis der Sekundärstudie eingegangen werden. Das von Wickens und Dixon (2007) durchgeführte Review befasst sich mit der Frage, wie weit die Vorteile von unzuverlässigen automatischen Diagnosesystemen reichen. Dafür schließen sie vor allem Studien ein, bei denen ein automatisches System die Informationsaufnahme und -analyse übernimmt. Weitere Kriterien liegen darin, dass mindestens zwei Zuverlässigkeitsstufen miteinander verglichen werden, der Systembediener über die Unzuverlässigkeit informiert ist und auf die vermeintlichen Rohdaten zugreifen kann sowie eine Variation der Arbeitsbelastung innerhalb der Studien erfolgt. Insgesamt werden 22 Studien (teilweise mit mehreren Werten) in die Analyse integriert. Mit einer Regressionsanalyse kommen die Autoren zu dem Ergebnis, dass die Systemzuverlässigkeit 41 Prozent der Varianz der Effektivität einer Automation (Kosten-Nutzen-Verhältnis) aufklärt (Wickens & Dixon, 2007). Die Regressionsgleichung weist zudem auf einen Umkehrpunkt bei einer Zuverlässigkeit von 70 Prozent hin. Das bedeutet, dass Systeme, deren Zuverlässigkeit unter 70 Prozent liegt, die eigentlichen Vorzüge von Automation (Leistungsverbesserung, Entlastung des Operators) aufheben. Weiterhin scheint sich dieser Effekt besonders unter hoher Arbeitsbelastung zu manifestieren (Wickens & Dixon, 2007).

Zunächst soll auf die Ergebnisse der experimentellen Interventionsstudien eingegangen werden. Hier lassen sich zehn Studien finden, die einen Bezug zwischen der Bedienung von Maschinen und der Leistung herstellen. Wie bereits an anderer Stelle berichtet (siehe Kapitel 4.3.2.) und auch durch die Ergebnisse von Wickens und Dixon (2007) bestätigt,

stellen Systemeigenschaften eine wichtige Variable dar, die die Bedienung von Maschinen beeinflussen kann. Die im Folgenden beschriebenen Studien untersuchen mit unterschiedlichen Ansatzpunkten den Einfluss der Systemzuverlässigkeit. In der Arbeit von Rice und Geels (2010) wird der Frage nachgegangen, ob Bediener von unzuverlässigen Systemen eine komponentenspezifische oder eine systemweite Vertrauensstrategie anwenden. Die Laborstudie mit 99 Studenten untersucht neben dem Informationslevel auch die Systemzuverlässigkeit. Diese wird durch das Zusammenspiel von vier Anzeigen operationalisiert. Als abhängige Variable dient die Genauigkeit der Entscheidung darüber, ob die angezeigten Werte in dem definierten Bereich lagen. Eine Varianzanalyse führt mit einer hohen Effektstärke zu dem Ergebnis, dass die Probanden mit dem zuverlässigen System eine bessere Genauigkeitsleistung erreichen als mit dem weniger zuverlässigen System ($F(3,267) = 97,84, p < ,001, \eta^2 = ,52$) (Rice & Geels, 2010). Hinsichtlich der eingesetzten Vertrauensstrategie kommen die Autoren zudem zu dem Schluss, dass Probanden tendenziell eine systemweite Vertrauensstrategie einsetzen. Dabei kann es auch zu „Ansteckungseffekten“ von unzuverlässigen auf zuverlässige Elemente des Unterstützungssystems kommen (*pull down effects*) (ebd.) Dies ist von Bedeutung bei der Arbeit in komplexen Systemen, da unzuverlässige Teilsysteme das Verhalten der Bediener – auch in anderen Teilsystemen – beeinflussen können.

McFadden et al. (2004) untersuchen die Zuverlässigkeit eines automatischen Tracking-Systems und finden dabei, dass der Anteil der nachverfolgten Ziele mit einer höheren Systemzuverlässigkeit ansteigt ($F(2,14) = 16,5, p < ,01$). Mithilfe von Post-hoc-Tests werden die Zusammenhänge genauer betrachtet und es zeigt sich, dass eine Verbesserung der Leistung vor allem von der Veränderung von der manuellen Bedingung (ohne Assistenzsystem) zur Bedingung mit moderater Zuverlässigkeit (75 Prozent) erfolgt. Zwischen den beiden Zuverlässigkeitsbedingungen (75 Prozent und 90 Prozent) fallen die Leistungsverbesserungen eher gering aus. Ein weiteres Leistungsmaß – die Zeit für die Bearbeitung der Ziele – weist ebenfalls einen signifikanten Effekt auf ($F(2,14) = 203,1, p < ,01$), der für den Vergleich aller Bedingungen miteinander gilt. Neben diesen eher allgemeinen Leistungsdaten analysieren die Autoren auch weitere spezifische Variablen der Zielverfolgung in Abhängigkeit von der Systemzuverlässigkeit. Dabei zeigen sich zwar zahlreiche signifikante Effekte, jedoch ist kein konsistentes Muster erkennbar.

Bailey und Scerbo (2007) finden keinen Effekt der Systemzuverlässigkeit eines Unterstützungssystems, das die Probanden bei einer Überwachungsaufgabe unterstützt, auf die Leistung in der Hauptaufgabe. Jedoch zeigt sich, dass die Probanden in der Bedingung mit hoher Systemzuverlässigkeit einen geringeren Anteil an Abweichungen, die nicht vom System angezeigt werden, entdecken als die Probanden, die mit einem weniger zuverlässigen System arbeiten ($F(1,30) = 4,28, \eta^2 = ,04$). Dieser Effekt besitzt jedoch nur eine geringe Effektstärke. In einem zweiten Experiment erhöhen die Autoren die Systemzuverlässigkeit auf 99,7 Prozent, sodass nur eine einzige Abweichung nicht von dem System erkannt wird. Die Anzahl der Probanden, die die Abweichung dennoch erkennt, verringert sich weiter im Vergleich zu den beiden Zuverlässigkeitsbedingungen des ersten Experiments ($F(2,102) = 14,67, \eta^2 = ,22$). Dieser Effekt ist mit einer hohen Effektstärke verbunden.

Auch bei Antwarg et al. (2013) kann die Systemzuverlässigkeit die Leistung signifikant beeinflussen ($F(3,56) = 11,63, p < ,01$). Die Bearbeitungszeit nimmt in der experimentellen Aufgabe deutlich zu, wenn die Probanden mit einem unzuverlässigen System arbeiten, und ist am kürzesten mit einem zu 100 Prozent zuverlässigen System.

Aus den Ergebnissen wird deutlich, dass mit der Unterstützung eines zuverlässigen Systems eine Leistungsverbesserung einhergehen kann. Jedoch zeigen sich auch Risiken, da andere Leistungsvariablen – wie die Erkennung seltener Fehler und Abweichungen – beeinträchtigt werden können.

Ein anderer Fokus auf Systemeigenschaften wird von Cegarra und Hoc (2008) gewählt. Für die Produktionsplanung mit einem automatischen Planungssystem untersuchen die Autoren, ob sich die Verständlichkeit des eingesetzten Algorithmus und die Verständlichkeit des Planungsergebnisses auf die Leistung der Probanden auswirken. Die Laborstudie mit neun Studenten hat zum Ergebnis, dass bei der Nutzung von Algorithmen, die zu einem unverständlichen Ergebnis führen, weniger Aufmerksamkeit für die Berücksichtigung weiterer Aufgabeneinschränkungen bereitgestellt wird, sodass die Leistung zwar zufriedenstellend, aber nicht optimal ist. Zudem kann das Verständnis eines Algorithmus zu verminderter Leistung führen. Die Autoren vermuten, dass die Kenntnis der Funktionsweise des Algorithmus dazu führt, dass die Probanden weniger optimale Lösungen wählen, da sie sich nicht imstande sehen, alle Zusammenhänge und Einschränkungen zu berücksichtigen (Cegarra & Hoc, 2008). Das bedeutet, dass die umfassende Kenntnis komplexer Algorithmen – und damit von Systemeigenschaften – nicht in jeder Arbeitssituation mit Leistungsverbesserungen einhergeht. Die Empfehlungen, die die Autoren aus dieser Feststellung ableiten, werden im Kapitel „Gestaltungsempfehlungen“ (7.2.) weiter ausgeführt.

Weitere Ergebnisse aus Interventionsstudien beziehen sich auf ein breites Themenspektrum. Beispielsweise untersuchen McBride, Rogers und Fisk (2011), wie sich unterschiedlich hohe Arbeitsbelastungen und ein unzuverlässiges automatisches Unterstützungssystem auf die Leistung in einer logistiknahen Aufgabe auswirken. Sowohl für eine jüngere als auch für eine ältere Probandengruppe finden die Autoren einen Effekt der Arbeitsbelastung auf die Leistung in einer Aufgabe, bei der ein Datenabgleich vorgenommen werden musste. Dabei verringerte sich die Leistung bei hoher Arbeitsbelastung (jüngere Probandengruppe: $F(2,39) = 58,01$, $p < ,01$, $\eta^2 = ,74$ [hohe Effektstärke]; ältere Probandengruppe: $F(2,39) = 10,4$, $p < ,01$, $\eta^2 = ,35$ [hohe Effektstärke]). Zudem scheinen Unterschiede im Umgang mit der Unzuverlässigkeit zu bestehen (McBride, Rogers, & Fisk, 2011).

Neben der Systembedienung stellt auch die Systemüberwachung eine zentrale Tätigkeit bei der Arbeit mit Maschinen und Systemen dar. Im Kapitel „Befinden“ (4.3.2.) wurde bereits erläutert, dass auch Überwachungsaufgaben unterschiedliche Formen aufweisen können, die sich auf das Befinden der Bediener auswirken. Johansson et al. (1996) stellen im Umfeld der aktiv und passiv gestalteten Überwachungsaufgabe fest, dass diese auch die Leistung der Probanden beeinflusst. Im Rahmen der Überwachung werden die Anzahl der Anpassungen von Systemparametern, die Anzahl der Bildschirmwechsel und die Anzahl von ausgegebenen Alarmen als Leistungsvariablen erfasst. Laut den Ergebnissen der Autoren werden alle diese Aktivitäten von den Probanden in der passiven Überwachungsbedingung seltener durchgeführt als von den Probanden in der aktiven Überwachungsbedingung. Zudem zeigt die Leistung der Versuchsteilnehmer in der passiven Überwachung eine höhere Variabilität. Die Leistung in der nachfolgenden aufmerksamkeitsfordernden Aufgabe blieb von der Aktivität bzw. Passivität der vorherigen Aufgabe unbeeinflusst.

Eine Verbesserung der Mensch-Maschine-Interaktion – vor allem im Hinblick auf die Steuerungserfordernisse – kann durch die ergonomische Gestaltung der Maschinen erreicht werden. Dies zeigte die Studie von Das, Shikdar und Winters (2007) bereits für die Zufriedenheit der Untersuchungsteilnehmer. Darüber hinaus können derartige Maßnahmen

auch eine leistungssteigernde Wirkung entfalten. Die Neugestaltung der Standbohrmaschine führt laut den Autoren zu einer besseren Produktivität: Quantitativ lässt sich eine Erhöhung der Anzahl an Bohrlöchern um 22 Prozent feststellen und auch die Qualität der Bohrlöcher steigt um 50 Prozent. Darüber hinaus können Trainingsmaßnahmen dazu dienen, bestehende Mensch-Maschine-Systeme zu optimieren. Doch auch Trainings können in Umfang und Inhalt unterschiedlich gestaltet und somit auch unterschiedlich wirksam sein. Bergmann untersucht 2001 in einer Laborstudie mit einer gemischten Stichprobe von etwa 100 Teilnehmern, wie sich verschiedene Trainingsarten auf die Störungsdiagnosekompetenz in modernen Fertigungssystemen auswirken. Die Autorin vergleicht multiples Strategietraining mit wissensbasiertem Training und Übungstraining im Hinblick darauf, wie gut die Versuchsteilnehmer Störungen an handelsüblichen Modellanlagen finden. Die Ergebnisse zeigen, dass alle drei Trainingsarten zu einer verbesserten Leistung gegenüber der Kontrollgruppe, in der kein Training absolviert wurde, führen. Eine genauere Analyse der Ergebnisse verdeutlicht jedoch den Vorteil des multiplen Strategietrainings bei Störungen mit einer hohen Transferdistanz. Das bedeutet, dass diese Trainingsform besonders bei neuartigen Diagnoseaufgaben, die eine Übertragung erlernter Prozeduren erfordern, Leistungsvorteile birgt (Bergmann, 2001).

Die feldbasierte Querschnittstudie, die sich mit den Leistungsfolgen der Bedienung von Maschinen und Systemen befasst, ist qualitativer Art. Ogle, Morrison und Carpenter (2008) beschreiben sechs Fallstudien, in denen es aufgrund der Komplexität von automatisierten Systemen zu Unfällen kommt. Komplexität kann als eine weitere Systemeigenschaft betrachtet werden, die von den Autoren zunächst als dichotomes Konstrukt dargestellt wird. Unter niedriger Komplexität werden dabei einfache Regelkreise verstanden, wohingegen hohe Komplexität mit der simultanen Kontrolle von und Interaktion mit mehreren Regelkreisen verbunden ist. Die Studie kommt zu dem Fazit, dass Fehler bei niedriger Automationskomplexität meist auf unbeabsichtigten Handlungen basieren, für deren Korrektur in der Folge nur wenig Zeit besteht. Die Operateure würden in diesen Situationen zwar merken, dass ein Problem vorhanden ist, jedoch fehlte ihnen die angemessene Handlungsstrategie. Im Fall der hohen Automationskomplexität beobachteten die Autoren, dass die Operateure intentionale, aber fehlerhafte Handlungen ausführen. In solchen Situationen wäre zwar mehr Zeit zur Fehlerbehebung vorhanden, jedoch fehlen oft Daten und Alarme, die die abnormalen Zustände anzeigen. Insgesamt betonen die Autoren die Bedeutung der Kombination aus angemessenen mentalen Modellen der Operateure und der Ausstattung der Systeme mit adäquaten Prozess- und Alarmdaten (Ogle, Morrison, & Carpenter, 2008). Ein angemessener Datenzugriff kann demnach zur Vermeidung von Fehlern beitragen.

Zwei weitere Querschnittstudien wurden unter Laborbedingungen durchgeführt und fokussieren mit dem Alter als unabhängiger Variablen eine eher personenbezogene Eigenschaft. Im Rahmen der Fragestellung des Reviews wird das Alter jedoch als moderierende Variable berücksichtigt, weshalb die Studien in die Datenextraktion eingeschlossen wurden. Arning und Ziefle untersuchen einerseits, welche Aspekte der Gestaltung von persönlichen, digitalen Assistenten (*personal digital assistant*, PDA) Barrieren für eine altersübergreifende Nutzung darstellen können (2007), andererseits verfolgen sie die Frage, wie sich das Alter und weitere persönlichkeitsorientierte Faktoren auf die Leistung bei Navigationsaufgaben mit dem PDA auswirken (2009). In der ersten Studie aus dem Jahr 2007 stellen die Autoren fest, dass das Alter einen signifikanten Einfluss auf die Leistung bei verschiedenen Navigationsaufgaben haben kann. Mögliche Hindernisse für eine erfolgreiche Aufgabenleistung sind Probleme mit der Nutzerfreundlichkeit wie bspw. eine nicht optimale

Verortung von Funktionen, die zu Desorientierung und schlechter Erinnerbarkeit führt. Eine weitere zentrale Feststellung der Studie besteht darin, dass Alter eine Art „Trägervariable“ darstellt. Das bedeutet, dass Leistungsunterschiede zwischen den Altersgruppen zu einem großen Teil auf geringeren räumlichen Fähigkeiten und geringerer Computerexpertise beruhen (Arning & Ziefle, 2007). Auch die zweite Studie der Autoren bestätigt diese Ergebnisse. Das Alter wirkt sich demnach signifikant auf die Aufgabeneffektivität, die als prozentualer Anteil korrekt gelöster Aufgaben operationalisiert wird, aus ($F(1,31) = 41,4$, $p < ,01$). Auch die Effizienz der Aufgabenbearbeitung, die bspw. die Dauer der Bearbeitungszeit umfasst, zeigt signifikante Unterschiede zwischen den Altersgruppen ($F(1,31) = 56,5$, $p < ,01$) (Arning & Ziefle, 2009). Ebenso wurde auch die Trägerfunktion des Alters bestätigt: Viele andere Variablen – wie bspw. räumliches Vorstellungsvermögen – verändern sich über die Lebensspanne und diese Abnahme von Fähigkeiten spiegelt sich im Alter wider (ebd.).

Im Bereich der Leistung lassen sich zudem zwei Studien finden, die nicht den zuvor erwähnten Studiendesigns entsprechen. Dabei handelt es sich einerseits um die Arbeit von Backström und Döös (1997), die in einer Analyse von Unfalldaten aus 21 schwedischen Unternehmen feststellen, dass etwa 9 Prozent der Betriebsunfälle auf Unfälle in Verbindung mit einem automatisierten System entfallen. Als einen besonderen Unfallschwerpunkt identifizieren die Autoren dabei das Zerspanen und Fügen von Teilen. Zudem zeigt die Analyse, dass Maschinenbediener im Vergleich zu anderen Berufsgruppen (Instandhalter, Maschineneinrichter, Ausbilder, Führungskräfte) ein relatives Risiko von $RR = 2.6$ haben, an einem Automationsunfall beteiligt zu sein ($CI\ 95\% = 1.1-6.0$, $\chi^2 = 4,39$, $p < ,05$) (Backström & Döös, 1997). Andererseits dient auch die prospektive Studie von Holcroft und Punnett (2009) der Identifikation von Risikofaktoren für das Auftreten von Unfällen im Umfeld der Holzverarbeitung. Neben hoher physischer Beanspruchung scheinen besonders die maschinengesteuerte Arbeitsgeschwindigkeit und die nicht vorhandene Möglichkeit, Pausen zu machen, mit einer erhöhten Chance für Unfälle einherzugehen ($OR = 2$, $CI\ 95\% = 1.1-4$) (Holcroft & Punnett, 2009). Darüber hinaus weisen die Daten auf ein höheres Unfallrisiko für Männer hin (ebd.).

Zusammenfassend kann für die umfassende Studienlage, die mit einer Sekundärstudie, zehn Interventionsstudien, drei Querschnittstudien und zwei weiteren Studiendesigns insgesamt 16 extrahierte Texte umfasst, festgestellt werden, dass zwischen der Bedienung von Maschinen und der Bedienung von Systemen zu differenzieren ist. Die Maschinenbedienung ist mit höheren Unfallrisiken verbunden als andere Tätigkeiten. Zudem ist die Leistung der Bediener bei der Zusammenarbeit mit der Maschine einerseits von der ergonomischen Gestaltung dieser abhängig, andererseits spielen personenbezogene Faktoren wie das Alter eine Rolle. In der Arbeitssituation selbst kann die Anzahl der zu steuernden Elemente die Leistung der Bediener beeinflussen. Die Optimierung der MMI in bestehenden Arbeitssystemen kann mithilfe von Trainings erfolgen. Steht die Bedienung und Überwachung von komplexen Systemen im Vordergrund, ist es wichtig, dass die Systemeigenschaften wie bspw. Komplexität oder die Systemzuverlässigkeit den Aufgabenanforderungen entsprechen, damit Leistungsvorteile erzielt und Fehler reduziert werden können.

4.3.5. Erkenntnisse zum Merkmal Bedienung/Überwachung und Arbeitsplatzcharakteristika

Ein letztes Kapitel zum Thema Bedienung und Überwachung von Maschinen befasst sich mit deren Einflüssen auf Arbeitsplatzcharakteristika. Wie bereits im Kapitel zur Funktionsteilung (4.1.5.) beschrieben, kann eine enge Verbindung zwischen der Mensch-Maschine-Interaktion und dem Arbeitsbedingungsfaktor Handlungs- und Entscheidungsspielraum bestehen. Auch die Bedienung von Maschinen kann – je nachdem, wie die Maschine gestaltet ist – dazu führen, dass sich Merkmale des Arbeitsplatzes oder der Arbeitsaufgabe verändern. Die vier im Folgenden beschriebenen Querschnittstudien verdeutlichen diesen Zusammenhang.

Dvash und Mannheim (2001) weisen nicht nur negative Effekte der technologischen Kopplung auf gesundheitliche Aspekte und Arbeitszufriedenheit nach, sondern können zudem zeigen, dass Arbeitsplatzmerkmale ebenfalls im Zusammenhang mit technologischer Kopplung stehen. Die Arbeitsplatzmerkmale werden in der Studie mit einem Fragebogen ermittelt. Die Dimension Zeit- und Methodenkontrolle korreliert negativ mit der technologischen Kopplung ($r = -,23$, $p < ,001$) und weist dabei eine kleine Effektstärke auf. Das bedeutet, dass eine enge technologische Kopplung die erlebte Zeit- und Methodenkontrolle verringert. Corbett (1987) findet keine signifikanten Korrelationen zwischen technologischer Kopplung und der Komplexität der Tätigkeit sowie Rollenbreite. Eine hohe positive Korrelation mit einer hohen Effektstärke zeigt sich jedoch zwischen technologischer Kopplung und dem Einfluss der Führungskraft ($r = ,60$, $p < ,01$), der mit einer eigenen Skala erhoben worden war. Diese erfasst Aspekte wie die Beeinflussung von Arbeitszielen, durch die Führungskraft ausgeübten Produktionsdruck und Kontrolle der Methoden.

Weitere Facetten, die bei der Bedienung von Maschinen und Systemen bedeutend sein können, sind technologische Unsicherheit und technologische Abstraktheit. Genauere Informationen zu der Studie von Mullarkey et al. (1997) wurden bereits an anderer Stelle gegeben (siehe Kapitel 4.3.1., 4.3.3.). Während sowohl technologische Unsicherheit als auch technologische Abstraktheit keinen Zusammenhang mit dem Großteil der untersuchten abhängigen Variablen aufweisen, besteht eine negative Korrelation zwischen technologischer Unsicherheit und Zeitkontrolle ($r = -,26$, $p < ,05$) (Mullarkey, Jackson, Wall, Wilson & Grey-Taylor, 1997). Durch eine Uminterpretation der Dimension Zeitkontrolle hin zu Maschinentakt können die Autoren zudem einen Zusammenhang zwischen technologischen Charakteristika und Maschinentakt herstellen (ebd.). Mithilfe eines Vier-Felder-Schemas sind sodann Aussagen darüber möglich, wie die verschiedenen Kombinationen aus hoher und niedriger technologischer Unsicherheit und Abstraktheit sowie Maschinentakt das Erleben der Bediener beeinflussen können. Daraus ergibt sich die Vermutung, dass ein schneller Maschinentakt und hohe Unsicherheit zu Ablenkungen führen können, die Stress induzieren. Bei einem niedrigen Maschinentakt hingegen kann eine hohe Unsicherheit eher eine Herausforderung darstellen, die mit einer geringeren Beanspruchung verbunden wäre.

Den Abschluss dieses Kapitels soll die Studie von Persson et al. (2001) darstellen, die bereits im Kapitel zum Zusammenhang zwischen Bedienung/Überwachung und Befinden erwähnt wurde. Die Studie beinhaltet auch die Erhebung von Aspekten der psychosozialen Arbeitsumgebung wie bspw. Arbeitsbelastung, Einstellungen gegenüber der Arbeit und Unsicherheit bei der Problemlösung. Der Vergleich der beiden Operateurguppen, die entweder für die Stromverteilung oder die Netzüberwachung tätig sind, zeigt keine statistisch bedeutsamen Unterschiede. Obwohl die Tätigkeit der Stromverteilung von den Auto-

ren als die aktivere bezeichnet wird und die Netzüberwachung vor allem Elemente passiver Überwachung beinhaltet, werden die quantitativen Arbeitsanforderungen von den Operateuren nicht unterschiedlich wahrgenommen. Die Autoren erklären dies damit, dass insbesondere die Operateure, die für die Netzüberwachung verantwortlich sind, neben ihren überwachungsintensiven Tätigkeiten auch Zusatzaufgaben innehaben. Dadurch nehmen sie ihre Tätigkeit insgesamt weniger passiv wahr (Persson et al., 2001). Diese Ergebnisse lassen den Schluss zu, dass negative Effekte passiver Überwachungs- und Steuerungsaufgaben vermieden werden können, wenn eine ganzheitliche Gestaltung der Arbeitsaufgaben angestrebt wird.

Im vorangegangenen Kapitel wurde von vier Querschnittstudien berichtet, die deutlich machen, dass Eigenschaften des Mensch-Maschine-Systems einen Einfluss auf die Wahrnehmung von Arbeitsplätzen ausüben und bspw. die erlebte Zeitkontrolle verringern. Jedoch gibt es auch Situationen, in denen keine Unterschiede zwischen Arbeitsplatzinhabern dafür sprechen, dass eine erfolgreiche Systemsteuerung stattfindet, wie die Arbeit von Persson et al. (2001) zeigt.

5. Bewertung und Diskussion der Ergebnisse zum Zusammenhang zwischen dem Arbeitsbedingungsfaktor Mensch-Maschine-Interaktion und den Outcomes

5.1. Bewertung der Ergebnisse zum Zusammenhang zwischen Funktionsteilung und den Outcomes

Die Funktionsteilung zwischen Mensch und Maschine spiegelt sich auf zwei Ebenen wider: Einerseits können die erstmalige Einführung einer Maschine und die entsprechende Funktionsübernahme die körperliche Belastung reduzieren. Im psychischen Erleben kann dies mit einem verminderten Aktivierungsniveau verbunden sein. Die Mechanisierung von Arbeitsplätzen trägt zudem zu der Veränderung von Aufgabenmerkmalen bei und wirkt sich häufig auf den Handlungs- und Entscheidungsspielraum aus. In der positiven Ausprägung kann es dadurch zu einer Weiterentwicklung von Fähigkeiten und Fertigkeiten kommen, was sich auch positiv auf die Arbeitszufriedenheit auswirken kann. Negative Folgen können Eingriffe in die Autonomie der Beschäftigten umfassen. Das Erleben technologischer Veränderungen ist dabei womöglich durch den zeitlichen Verlauf – von der Einführung neuer Systeme bis hin zu ihrem standardmäßigen Einsatz – geprägt. Mit der Betrachtung von elf Querschnittstudien können die Erkenntnisse aus diesem Bereich jedoch nicht als abschließend gesichert betrachtet werden.

Andererseits stellen komplexe, hochautomatisierte Systeme neue Anforderungen an die Arbeitsgestaltung, wie die Extraktion von 13 Studien zeigt. Gesundheitsbezogene Aussagen zu diesem Merkmal der MMI können kaum getroffen werden und werden von den Studien in der Regel nicht fokussiert. Lediglich ein positiver Zusammenhang zwischen der Technologieexposition und Burnout weist auf mögliche Gefährdungen hin. Zudem kann davon ausgegangen werden, dass die zunehmende Automatisierung von Systemen mit einer Beanspruchungsreduktion einhergeht. Aussagen zu einer Beanspruchungsoptimierung können jedoch nicht getroffen werden, obwohl insbesondere eine Balance zwischen Aktivierung und Monotonie in Situationen, die ein Eingreifen erfordern könnten, relevant ist (Manzey et al., 2012). Aufseiten des Befindens sind darüber hinaus Zusammenhänge zwischen dem Automatisierungsniveau, der Beanspruchung und dem erlebten Vertrauen in

die Systeme zu vermuten. Die Richtung dieser Zusammenhänge wird jedoch von der jeweiligen Ausgestaltung des automatisierten Systems sowie von Systemeigenschaften beeinflusst. Im Hinblick auf die Leistung lassen sich für hohe Automationsgrade Vorteile in Routinesituationen erkennen, die jedoch in Ausnahmesituationen selten gehalten werden können. Darüber hinaus beeinflussen auch die adaptive Funktionszuweisung und das letztlich vorhandene Automationslevel verschiedene Leistungsparameter, ohne dass dabei ein klares Muster deutlich wird. Die verschiedenen Outcomes bilden zudem ein Spannungsfeld, in dem sich einerseits der Wunsch nach manueller Kontrolle und andererseits die automationsbedingte Beanspruchungsreduktion und Leistungsverbesserung widerspiegeln. Aussagen darüber, wie eine optimale Kombination dieser Aspekte erreicht werden kann, lassen sich aus dem bisherigen Erkenntnisstand nicht ableiten.

Die Abbildung der vorliegenden Studien in dem erweiterten Modell von Parasuraman et al. (2000) macht zudem deutlich, dass für die Funktionsteilung zwischen Mensch und Maschine eine Vielzahl an Gestaltungsmöglichkeiten besteht, die durch die technologischen Entwicklungen der vergangenen Jahre noch erweitert wurden (z. B. Echtzeiterfassung von Leistungsparametern). Entscheidend scheint dabei, welche Instanz (Mensch oder System) die Zuweisung der Funktionen vornimmt. In Abb. 8 wurden die Untersuchungsschwerpunkte der extrahierten Studien farblich markiert. Dies verdeutlicht die unterschiedlichen „Pfade“, über die Funktionsteilung untersucht wird. Dieser Überblick über die verschiedenen Gestaltungsformen bei der Funktionsteilung zeigt, dass eine begrenzte Vergleichbarkeit zwischen den Studien besteht, da selten übereinstimmende Ansätze zur Funktionsteilung betrachtet werden.

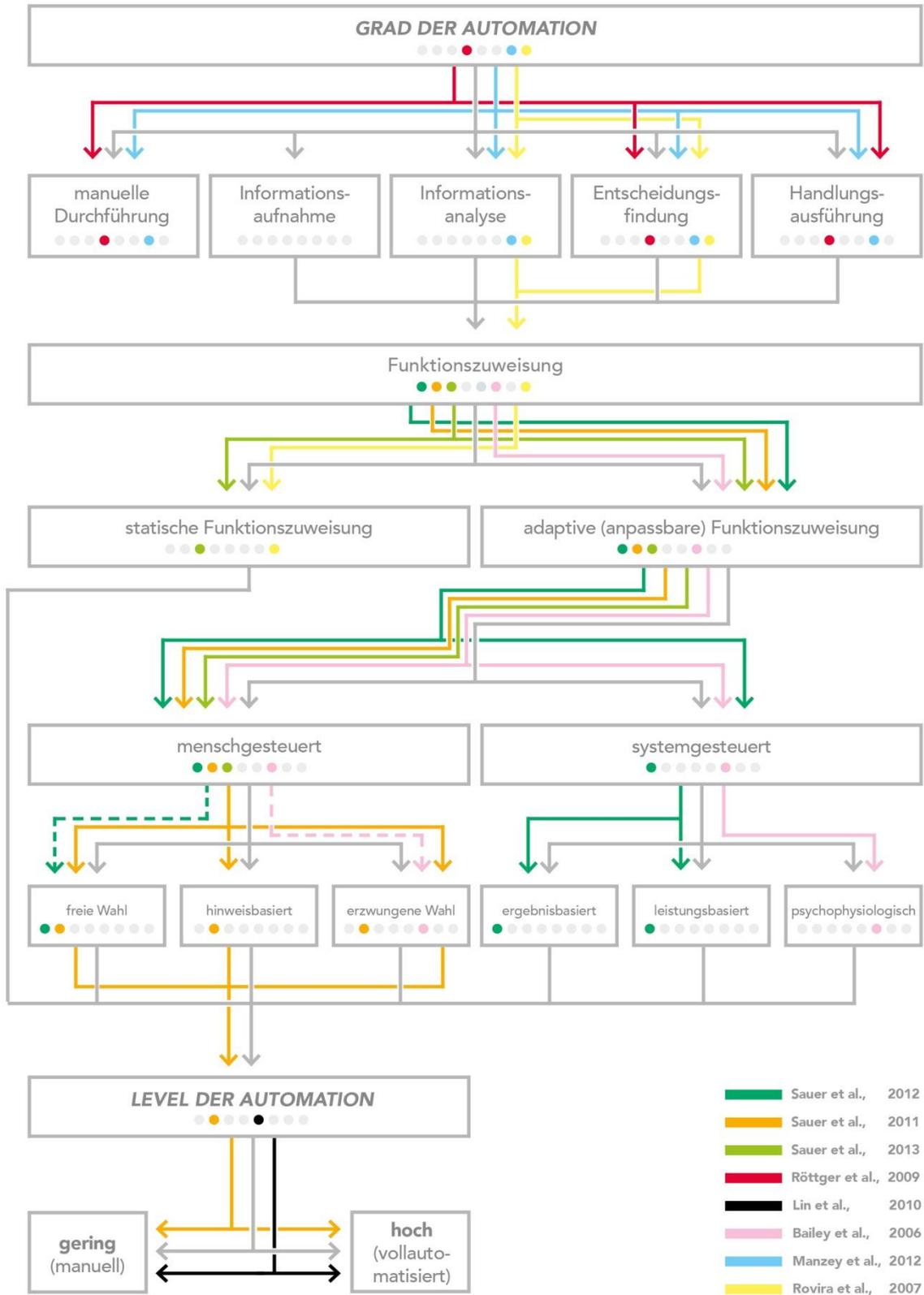


Abb. 8 Erweitertes Modell der Funktionsteilung (vgl. Parasuraman et al., 2000)

Insgesamt stellen die Ausgestaltung automatisierter Systeme und die Entscheidung darüber, anhand welcher Charakteristika die Aufgabenzuweisung zwischen Mensch und Maschine erfolgt, Aspekte der MMI dar, die weiterer Forschung bedürfen. Die vorwiegende Extraktion von Interventionsstudien verweist zudem darauf, dass die bestehenden Erkenntnisse auf experimentellen Arbeiten beruhen und somit keine Aussagen darüber möglich sind, ob sich die gefundenen Zusammenhänge auch im Arbeitskontext widerspiegeln.

5.2. Bewertung der Ergebnisse zum Zusammenhang zwischen Schnittstellengestaltung und Outcomes

Im Hinblick auf die Gestaltung von Schnittstellen konnten bestehende ergonomische Erkenntnisse weitestgehend bestätigt werden. Die Datenextraktion von 23 Studien zeigt jedoch auch, dass insbesondere Aspekte der psychischen Gesundheit bei der Gestaltung von Schnittstellen kaum berücksichtigt werden. Untersuchungen der gesundheitlichen Auswirkungen der Arbeit an und mit Bedienschnittstellen beziehen sich vorwiegend auf physische Erkrankungen und Beschwerden. Dabei zeigt sich eine Tendenz zu kurzfristigen physischen Beschwerden, bspw. beim Einsatz von AR-Systemen wie HMDs (Kampmeier et al., 2007). Die Umsetzung ergonomischer Erkenntnisse bei neuen Technologien und die Identifikation von passenden Einsatzszenarien stellen somit eine aktuelle und zukünftige Herausforderung dar, wie auch die Eigenforschung der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) in diesem Themenbereich zeigt (Grauel, Terhoeven, & Wischniewski, 2015). Dies gilt sowohl für die Vermeidung von körperlichen Fehlbelastungen als auch für die Entwicklung von Interaktionskonzepten, die die Fähigkeiten der neuen Technologien ausschöpfen und gleichzeitig leistungsförderlich und beanspruchungsoptimierend sind. Die Ergebnisse aus dem Outcome-Bereich Befinden weisen darauf hin, dass die Gestaltung von Schnittstellen nach ergonomischen Prinzipien auch mit einer starken subjektiven Präferenz und höherer Nutzerzufriedenheit verbunden ist. Aussagen über die Arbeitszufriedenheit und Motivation, die sich aus der Schnittstellengestaltung ergeben, können im Rahmen des Scoping Reviews nicht getroffen werden. Die Gestaltung von Schnittstellen anhand ergonomischer Prinzipien kann mit Leistungsvorteilen verbunden sein. Allerdings sollte sich die Darstellung an den Aufgabenzielen orientieren.

Roboter können als eine besondere Form der Schnittstelle betrachtet werden, bei deren Gestaltung zahlreiche Aspekte zu berücksichtigen sind. Dazu gehören bspw. die Erwartungskonformität und geschlechtsspezifische Stereotype der Bediener. Zudem spielen auch die eingesetzten Interaktionskonzepte eine Rolle bei der Zusammenarbeit von Mensch und Roboter. Vor dem Hintergrund des technologischen Wandels und Industrie 4.0 kann mit einer zunehmenden Bedeutung von Mensch-Roboter-Teams gerechnet werden. Über Aspekte der Schnittstellengestaltung hinaus ergeben sich weitere Fragen, zum Beispiel hinsichtlich möglicher Inkongruenzen zwischen der Befugnis und der Verantwortung, die Robotern bei neuen Formen der Zusammenarbeit übertragen wird.

Das MMI-Merkmal Schnittstellengestaltung umfasst zudem die Gestaltung der Interaktion zwischen dem Menschen und der Maschine bzw. dem Automaten. Die Vielschichtigkeit dieses Konzepts (von Systemantwortzeiten bis hin zu Formen der digitalen Rückmeldung) wurde durch die Extraktion von 18 Studien deutlich. Aussagen darüber, inwieweit verschiedene Interaktionskonzepte die psychische und physische Gesundheit beeinflussen, können aus den extrahierten Studien nicht abgeleitet werden. Das Befinden der Bediener scheint bei der Interaktion von Mensch und Maschine davon zu profitieren, wenn technologisch vermittelte Rückmeldungen nicht negativ gefärbt sind und mit affektiven

oder gar persuasiven Botschaften übertragen werden. Hingegen können technologisch vermittelte Rückmeldungen, die mit einer wahrgenommenen Einschränkung der Entscheidungsfreiheit einhergehen und die als nicht konstruktiv verstanden werden, einen negativen Einfluss auf die Arbeitszufriedenheit ausüben. Letzterer Aspekt wird im Scoping Review jedoch nur durch eine Studie gestützt, sodass keine hinreichende Datenbasis für eine finale Einschätzung vorliegt. Bei der technologisch vermittelten Rückmeldung ist zudem festzustellen, dass deren Spezifität und affektive Färbung die Leistung beeinflussen. Des Weiteren spielen auch hier die Anforderungen der Aufgabe eine zentrale Rolle dafür, ob Leistungsvorteile erzielt werden können. Insgesamt erschwert es die Heterogenität der vorliegenden Studien, verallgemeinerbare Aussagen zu treffen, sodass die vorgestellten Ergebnisse nur Schlaglichter auf einzelne Erkenntnisse werfen können.

5.3. Bewertung der Ergebnisse zum Zusammenhang zwischen Bedienung/Überwachung und den Outcomes

Auch die Bedienung von Maschinen ist durch ein sehr heterogenes Bild geprägt. Mit sechs Studien, die sich auf gesundheitsbezogene Aspekte beziehen, finden sich in diesem UV-Merkmal allerdings die meisten Aussagen zu gesundheitlichen Folgen von Bedientätigkeiten. Hierbei kann herausgestellt werden, dass die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von gesundheitlichen Folgen im Herz-Kreislauf-System sowie im Bereich der psychischen Erkrankungen bei Produktionsarbeitern höher ist als bei Facharbeitern (Landsbergis et al., 2013). Für die Charakterisierung der MMI sind zudem die Arbeiten von Corbett (1987) und Corbett et al. (1989) herauszuheben, in denen die technologische Kopplung von Mensch und Maschine in den Fokus gerückt wird. Mit den Dimensionen Synchronizität, Rigidität des Arbeitsablaufs, Einheitlichkeit von Methoden und Interdependenz können verschiedene Mensch-Maschine-Systeme untersucht und das jeweilige Ausmaß der Kopplung identifiziert werden. Die Arbeiten zeigen, dass eine enge technologische Kopplung mit einer verminderten erlebten Gesundheit und verminderter Arbeitszufriedenheit einhergeht. Offen bleibt jedoch die Frage, ob die Population der Maschinenbediener mit diesem Konstrukt tatsächlich von anderen Produktionsmitarbeitern abgegrenzt werden kann. Fraglich ist auch, inwieweit Gestaltungsempfehlungen von dem Prinzip der technologischen Kopplung abgeleitet werden können, da in bestehenden Produktionsprozessen häufig nur wenige Eingriffspunkte bestehen. Jedoch können diese Aspekte bereits bei der Planung von Produktionssystemen berücksichtigt werden, um negative Effekte von zu enger Kopplung zu vermeiden.

Im Hinblick auf das Befinden bei der Bedienung von Maschinen und Systemen kann zunächst zwischen Bedien- und Überwachungstätigkeiten unterschieden werden. Jedoch zeigen die extrahierten Studien keine eindeutigen Beanspruchungsmuster auf. Entscheidenden Einfluss auf das Befinden und die Leistung der Bediener nehmen zudem Systemeigenschaften wie Zuverlässigkeit und Komplexität. Zuverlässige Systeme können die Leistung verbessern, zu einer verringerten Beanspruchung der Bediener führen und ihr Vertrauen stärken. Insbesondere beim Vertrauen ist jedoch zu beachten, dass es sich hierbei um einen schmalen Grat zwischen Über- und Untervertrauen handelt (Lee & See, 2004), der jeweils mit anderen Verhaltenskonsequenzen verbunden ist.

Auch die Arbeitszufriedenheit wird von der Maschinenbedienung beeinflusst. Hierbei zeigt sich, dass Überwachungstätigkeiten mit einer verminderten Arbeitszufriedenheit zusammenhängen können. Allerdings bieten Möglichkeiten der Beeinflussung (wie bspw. die Wahl der Geschwindigkeit sowie die Durchführung von Korrekturen) einen Ansatzpunkt dafür, wie die Zufriedenheit gestärkt werden kann.

Insgesamt zeigt sich, dass die Bedienung von Maschinen und Eigenschaften des Mensch-Maschine-Systems sich auf Merkmale der Arbeitsaufgabe auswirken können. Diese umfassen bspw. eine Veränderung des Handlungs- und Entscheidungsspielraums. Im Zuge der Systementwicklung sollte daher beachtet werden, wie die Zusammenarbeit mit Maschinen die Tätigkeitsstruktur und das Qualifikationsprofil der Benutzer verändert. Darüber hinaus wird das Zusammenspiel von Mensch und Maschine auch durch weitere situative (quantitative Arbeitsbelastung) und personale Faktoren (z. B. Alter) beeinflusst.

6. Zusammenfassende Bewertung aller Merkmale des Arbeitsbedingungsfaktors, Schlussfolgerungen und Forschungsbedarf

Für den Faktor MMI zeigt sich ein enormer Forschungsbedarf im Bereich der psychischen Gesundheit. Gesundheitsbezogene Aspekte, die sich sowohl auf die psychische als auch auf die physische Gesundheit und Beschwerden beziehen, wurden in nur zwölf extrahierten Studien betrachtet. Einschränkend muss dabei jedoch festgestellt werden, dass bspw. Studien zur Fließbandarbeit, die einen rein physischen/muskuloskelettalen Fokus hatten, nicht in das Scoping Review eingeschlossen wurden. Dennoch scheint es, dass im Kontext von Produktionsarbeit gesundheitliche Aspekte – und insbesondere Aspekte der psychischen Gesundheit – nur eine untergeordnete Rolle spielen. Andererseits stellt sich die Frage, in wie weit ein direkter Zusammenhang zwischen Merkmalen der Mensch-Maschine-Interaktion und der psychischen Gesundheit erwartet werden kann. Womöglich bestehen hier eher mittelbare Zusammenhänge, die sich langfristig über vielschichtige Wirkungspfade (vermittelt über Aspekte des Wohlbefindens und der Zufriedenheit) äußern. So ist beispielsweise bei schlechter Gestaltung der Mensch-Maschine-Interaktion damit zu rechnen, dass diese als Stressor wirkt und somit mit negativen Auswirkungen verbunden ist. Insgesamt ist der Risikobeitrag von der Mensch-Maschine-Interaktion im Hinblick auf psychische Erkrankungen derzeit unbekannt und der vermutete Wirkungspfad als indirekt zu charakterisieren.

Mehr Erkenntnisse lassen sich auf der Ebene des Befindens finden. Dieses wird in 47 Studien betrachtet, wobei inhaltlich ein großer Schwerpunkt auf der erlebten Beanspruchung liegt. Insbesondere in experimentellen Studien wird dabei versucht, durch verschiedene Messverfahren zu differenzierten Aussagen zu gelangen. Dazu gehören sowohl Maße der subjektiven Beanspruchung, die i. d. R. mit dem NASA-TLX erfasst werden als auch psychophysische Beanspruchungsmessungen oder indirekte Messungen wie bspw. die Ableitung der Beanspruchung aus der Leistung in Zweitaufgaben. Im Hinblick auf die Vielzahl an Parametern und Zusammenhängen zwischen den Variablen erscheint die Ableitung von Gestaltungsaussagen jedoch schwierig. Zudem wird Beanspruchung häufig nur im Sinne von „viel“ und „wenig“ erfasst. Die Suche nach einem Optimum, das zugleich mit guten Leistungen einhergeht, wird kaum thematisiert. Auch Hart erkennt, dass bei der Beanspruchungsmessung mit dem NASA-TLX noch keine Konvention bzw. Erkenntnisse darüber bestehen, wo eine „rote Linie“ liegt, die mit einer zu hohen Beanspruchung verbunden ist (Hart, 2006).

Weitere Aspekte wie Nutzerzufriedenheit und valenzorientierte Variablen finden sich insbesondere bei Studien zur Schnittstellengestaltung. Für den Arbeitsbedingungsfaktor MMI können auch diese Aspekte eine besondere Rolle spielen, da Studien zeigen, dass die Nutzerzufriedenheit eng an andere Befindensmerkmale und die Leistung geknüpft ist (z.B.

Gelderman, 1998). Auch Konstrukte wie Technologieakzeptanz, die eine lange Forschungstradition haben (z. B. Venkatesh & Davis, 2000), finden sich im Scoping Review. Diese Forschungsrichtung und besonders die damit verbundenen Messinstrumente beziehen sich vor allem auf Informationstechnologien; es können aber auch Adaptionen in den Bereich der Mensch-Maschine-Interaktion beobachtet werden. Künftige Forschung sollte sich auf die Akzeptanz neuer Funktionalitäten von Technologien, beispielsweise im Rahmen der Mensch-Roboter-Zusammenarbeit, beziehen. Wie reagieren Beschäftigte auf Roboter als Teamkollegen? Werden Roboter als Entscheidungsträger akzeptiert? Dies sind mögliche Fragen, die es zu beantworten gilt.

Outcome-Variablen zur Arbeitszufriedenheit und zur Motivation werden lediglich in zwölf Studien thematisiert. Somit können im Rahmen des Scoping Reviews auch zu diesem Outcome-Bereich keine hinreichend gesicherten Annahmen getroffen werden. Aspekte von Arbeitszufriedenheit und Motivation wurden im Suchstring durch eine umfangreiche Zusammenstellung von Begriffen erfasst. Dazu gehören auch Schlagworte wie Lebensqualität, Arbeitsqualität und Zufriedenheit oder positive Gefühle. Im Zusammenhang mit MMI und Arbeit im industriellen Kontext scheinen diese Begrifflichkeiten jedoch wenig untersucht zu werden. Um den Komplex der Zufriedenheit mit der Tätigkeit stärker abzubilden, sind ergänzend auch Konstrukte wie Sinnerleben und Stolz denkbar. Psychosoziale Aspekte wie diese wurden durch die im Scoping Review vorliegende Literaturlage jedoch nicht abgebildet.

Mit 58 extrahierten Zusammenhängen stellen Leistungsvariablen einen deutlichen Studienfokus dar. Insbesondere in der neueren Forschung, die sich mit der MMI in komplexen Systemen befasst, werden in einem sehr umfangreichen Maß leistungsbezogene Daten erhoben. Die vornehmlich im Rahmen von Experimenten stattfindenden Arbeiten bieten für dieses Vorgehen einen förderlichen Kontext, da die Messung zahlreicher Leistungsparameter in Prozesssimulationen möglich ist. Diese reichen von der Genauigkeit bei der Aufgabenbearbeitung über Fehler bis hin zu Reaktionszeiten. Somit kann zwar ein möglichst ganzheitliches Bild der Leistung gezeichnet werden, aber allgemeine Empfehlungen lassen sich kaum ableiten. Bei der Ausrichtung der MMI sollten daher auch die Anforderungen der Aufgabe beachtet werden, um dementsprechend die Leistungsparameter zu berücksichtigen, die für eine erfolgreiche Aufgabendurchführung kritisch sind (bspw. falls die Leistungsvariablen auf einen *speed-accuracy trade-off* hindeuten).

Ein Aspekt, der insbesondere bei der Betrachtung von Leistungsvariablen zu berücksichtigen ist, ist Kompensation. Bereits 1997 schlägt Hockey ein Modell vor, dass kompensatorische Kosten bei der Durchführung von Aufgaben und der Aufrechterhaltung von Leistung berücksichtigt (Hockey, 1997). Viele Studien – besonders im Bereich adaptiver Automation – versuchen, dieses Phänomen zu kontrollieren, indem sie beispielsweise die Leistung in Zweitaufgaben erheben (z. B. Rovira, McGarry & Parasuraman, 2007; Sauer, Kao, & Wastell, 2012). Wie Lorenz und Parasuraman (2003) betonen, reicht es häufig nicht aus, nur anhand der Effektivität bei der Aufgabenbearbeitung auf Kompensationseffekte zu schließen. Vielmehr kann die Effizienz – also die Art und Weise, wie das Ergebnis erzielt wird – Auskunft über mögliche Kompensationsstrategien geben (Hockey, 1997; Lorenz & Parasuraman, 2003). Experimentelle Studien ermöglichen zudem die Durchführung von Beanspruchungsmessungen zu verschiedenen Messzeitpunkten, sodass es im Versuchsverlauf möglich ist, ein gesteigertes Anstrengungserlebens zur Aufrechterhaltung der Leistung abzubilden. Unklar ist jedoch, in wie weit Kompensationseffekte erst im weiteren Zeitverlauf beobachtet werden können. Die Durchführung von Querschnittstudien, die vor allem

kurzfristige Effekte aufzeigen, vermag hier womöglich nicht den vollen Umfang kompensatorischen Verhaltens zu erfassen. Wie ebenfalls von Hockey (1997) beschrieben, können sich neben erhöhter mentaler Anstrengung auch Ermüdungseffekte nach der Durchführung der Aufgabe einstellen. Versuchsdesigns mit mehreren Messzeitpunkten, die auch über die Versuchsdurchführung hinausgehen, könnten dazu beitragen, zu genaueren Erkenntnissen im Bereich kompensatorischer Erfordernisse zu gelangen. Auch der Einsatz psychophysiologischer Messverfahren (bspw. EEG-Messungen) könnte zur Erklärung von Kompensationseffekten beitragen (Lorenz & Parasuraman, 2003).

Im Rahmen des Reviews konnte eine weitere Outcome-Facette identifiziert werden, die für die Mensch-Maschine-Interaktion bedeutsam ist. Sowohl die gewählte Funktionsteilung als auch die Bedienung und Überwachung von Maschinen verändern Merkmale des Arbeitsplatzes und der Tätigkeit. Im Scoping Review können 13 Studien zeigen, dass die Gestaltung der MMI sich auf Merkmale des Handlungs- und Entscheidungsspielraums auswirken kann (z. B. wahrgenommene Autonomie). Um gesicherte Aussagen über diese Zusammenhänge treffen zu können, wird jedoch eine breitere Datenbasis benötigt. Die Veränderung von Arbeitsplatzmerkmalen und von Aufgabencharakteristika wie dem Handlungs- und Entscheidungsspielraum scheint jedoch in zweierlei Hinsicht bedeutsam: Auf der einen Seite stehen sie für ein sich wandelndes Arbeitssystem und können als Folge von Gestaltungsentscheidungen im Bereich der Mensch-Maschine-Interaktion betrachtet werden. Auf der anderen Seite ist diese Outcome-Facette womöglich Bindeglied und vermittelnder Faktor bei der Suche nach komplexen Wirkungspfaden, anhand derer der Einfluss der Mensch-Maschine-Interaktion auf die Gesundheit nachgewiesen werden kann.

Eine wichtige Frage, die im Rahmen des Reviews nicht beantwortet werden kann, betrifft den zeitlichen Verlauf der Auswirkungen von MMI auf die betrachteten Outcome-Variablen. In Bezug auf die im Scoping Review analysierten Studien fällt eine starke Betonung eines kurzfristigen Zeithorizontes durch querschnittbezogene Studiendesigns auf. Dadurch liegen kaum Erkenntnisse zu mittel- und langfristigen Effekten vor. In den analysierten Studien finden sich prä-post-Designs (z. B. Berger und Ludwig, 2007) und der Vergleich natürlicher Bedingungen (z. B. Rafnsdottir & Gudmundsdottir, 2004). Diese Erkenntnisse stellen zwar wichtige Ansatzpunkte für die Gestaltung von Veränderungsprozessen dar und entstammen häufig auch aus praxisnahen Feldstudien, sie geben jedoch wenig Auskunft darüber, welche langfristigen Effekte mit vorhandenen Gestaltungsoptionen einhergehen. Längsschnittstudien, wie sie beispielsweise von Majchrzak und Cotton (1988) durchgeführt wurden, können auch über den Zeitverlauf zeigen, welche Auswirkungen mit technologischen Veränderungen verbunden sind.

Im Kontext der Funktionsteilung, zu der 25 Studien analysiert wurden, bestätigen zahlreiche Studien, dass eine höhere Automatisierung mit einer Verbesserung der Leistung einhergehen kann. Zu den Vorteilen einer höheren Automatisierung scheint zudem eine verringerte Beanspruchung der Nutzer zu gehören. Diese Vorteile stehen jedoch in einer engen Abhängigkeit zu den Eigenschaften des Systems wie bspw. der Zuverlässigkeit: Unterschreitet die Zuverlässigkeit eine „kritische“ Grenze, können die Vorteile hoher Automation nicht mehr zum Tragen kommen (Wickens & Dixon, 2007). Außerdem muss bei einer zunehmenden Automatisierung berücksichtigt werden, dass manuelle Eingriffe im Falle eines Ausfalls der Automation mit Leistungseinbußen und einer erhöhten Beanspruchung verbunden sind (Manzey et al., 2012; Onnasch et al., 2014). Darüber hinaus kann insbesondere in hochautomatisierten Systemen der Wunsch nach manueller Kontrolle bestehen (z. B. Sauer, Nickel & Wastell, 2013). Entscheidend für das Auffinden einer optimalen

Funktionsteilung und somit auch für die Gestaltung einer optimalen Kombination aus Leistung und Beanspruchung ist die Analyse der jeweiligen Aufgaben(-anforderungen). Insbesondere bei den vielseitig operationalisierten Leistungsvariablen kann es hilfreich sein, den Arbeitskontext und die Aufgabe zu berücksichtigen und darauf basierend festzulegen, ob bspw. eine hohe Genauigkeit bei der Aufgabebearbeitung wichtiger ist als eine schnelle Aufgabebearbeitung.

Im Hinblick auf das Merkmal Funktionsteilung zeigt sich außerdem, dass sich mit den zunehmenden Fähigkeiten von Automation eine hohe Bandbreite an Möglichkeiten eröffnet, wie die Funktionen zwischen Mensch und Maschine bzw. System aufgeteilt werden können. Wie bereits betont, sollte sich die Aufteilung stets an den Anforderungen der Aufgabe orientieren und die starken Interdependenzen von Befinden und Leistung berücksichtigen. Die Funktionsteilung bietet darüber hinaus eine Vielzahl an offenen Fragen. So bleibt weitestgehend offen, inwieweit Aspekte der psychischen Gesundheit von der Funktionsteilung beeinflusst werden. Auch die Erprobung bestehender Erkenntnisse mit Arbeitstätigen in der Praxis sollte vertieft werden. Dies gilt jedoch nicht nur für das Merkmal Funktionsteilung sondern für Gestaltungsformen der Mensch-Maschine-Interaktion allgemein. Derzeit lässt sich hier eine Übertragungslücke feststellen: Aus umfangreichen und wohlkontrollierten Laborstudien lassen sich zahlreiche Gestaltungsempfehlungen ableiten. Diese werden jedoch selten im Feld erprobt.

Der Themenbereich der adaptiven Automation stellt einen weiteren Schwerpunkt dar, der zukünftig durch weitere Forschung begleitet werden sollte. Denn neue Technologien und das Bestreben, hochvernetzte und echtzeitfähige Produktionssysteme zu schaffen, werden die Produktionslandschaft verändern und zu einer Komplexitätssteigerung beitragen. Der dabei zu erwartende Grad an Vernetzung erfordert neue Fähigkeiten von den Mitarbeitern im Fertigungsbereich, wie auch Brettel, Friedrichsen, Keller und Rosenberg (2014) aus ihrer Analyse derzeitiger Forschungsströme zum Thema Industrie 4.0 schlussfolgern. Adaptive Assistenzsysteme können in der Vielzahl ihrer Umsetzungsformen (Wandke, 2005) von Mitarbeitern genutzt werden, um die zunehmende Komplexität zu bewältigen. Wie das Scoping Review zeigt, ist dabei einerseits ein sinnvoller Aufgabenbezug bedeutsam, andererseits spielt auch das Kontrollerleben eine wichtige Rolle. Weiterhin eröffnen sich neue Forschungsfragen hinsichtlich der Umsetzung der Funktionsteilung anhand von psychophysiologischen Parametern des Bedieners im Rahmen adaptiver Automation. Neben der technischen Umsetzbarkeit stehen hier besonders rechtliche Fragen des Datenschutzes und der Verantwortung im Vordergrund, wie das Beispiel von intelligenter Schutzkleidung zeigt (Roßnagel, 2012; Thüsing, 2014).

Das Merkmal Schnittstellengestaltung, das mit 42 analysierten Studien einen Schwerpunkt innerhalb des Reviews darstellt, wird bereits seit langer Zeit im Rahmen arbeitswissenschaftlicher Untersuchungen betrachtet. Es bestehen zahlreiche gesicherte Erkenntnisse zur ergonomischen Gestaltung von Bedienschnittstellen, die zum Teil Eingang in die Normung sowie Rechts- und Regelsetzung gefunden haben (siehe Kapitel 7.). Die im Scoping Review enthaltene Studienauswahl unterstützt viele dieser Erkenntnisse. So kann insbesondere die integrierte und redundante Darstellung von Informationen zur Zufriedenheit der Nutzer beitragen und die Leistung verbessern. Neben der Gestaltung der Schnittstelle sind auch angemessene Interaktionskonzepte für die Zusammenarbeit von Mensch und Maschine bedeutsam. Metriken wie die Verfolgung von Bewegungsverhalten oder Abstandsmaße (Bortot et al., 2012) sowie Sicherheitseinschätzungen (Karwowski & Rahimi, 1991; Nagamachi, 1986) können dazu beitragen, die Intentionserkennung in automatisier-

ten Systemen zu verbessern (Bengler, Zimmermann, Bortot, Kienle & Damböck, 2012). Die Erfassung von Zusammenhängen zwischen der psychischen Gesundheit und Aspekten der Bedienschnittstelle steht insbesondere im Produktionskontext nicht im Vordergrund.

Im Hinblick auf neue Technologien und Interaktionskonzepte, wie sie im Rahmen von Industrie 4.0 (z.B. Echtzeitfähigkeit, zunehmende Vernetzung) propagiert werden, kann das vorliegende Scoping Review nur wenige Aussagen treffen. Obwohl die Datenbankrecherchen den Stand von Juli 2014 aufweisen und der Großteil der extrahierten Studien aus den vergangenen zehn Jahren entstammt, werden neue Technologien, wie beispielsweise die Zusammenarbeit mit Robotern, von einem vergleichsweise geringen Teil der Studien im Review betrachtet. Womöglich besteht hier eine zeitliche Verzögerung von der technologiegetriebenen Entwicklung dieser Systeme bis hin zur Durchführung von Probandenversuchen und entsprechenden Veröffentlichungen. Außerdem ist anzumerken, dass das Scoping Review vorrangig empirische Arbeiten betrachtet und Studien zur Theorie- und Methodenentwicklung (bspw. Entwicklung von Taxonomien der Mensch-Roboter-Zusammenarbeit) ausgeschlossen wurden. Überlegungen zu diesen Aspekten wurden in den vergangenen Jahren von zahlreichen Autoren mit unterschiedlicher Schwerpunktsetzung angestellt (z. B. Bengler et al., 2012, Yanco & Drury, 2004) und sind auch Thema aktueller Forschungsprojekte der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, wie das 2014 gestartete Projekt „Team-Mental-Models in Mensch-Roboter-Teams: Einsatzszenarien und Stand der Technik“ zeigt.

Zukünftige Forschung sollte außerdem die Frage adressieren, in wie weit bisherige ergonomische Gestaltungskriterien auf neue Technologien übertragen werden können oder ob neue Kriterien zu entwickeln sind. Zudem findet mit der technologischen Weiterentwicklung auch eine Weiterentwicklung von Bedien- und Interaktionskonzepten statt, die daraufhin zu untersuchen ist, ob sie der Gesundheit und Leistungsfähigkeit in der Arbeitswelt zuträglich ist. Einen Beitrag dazu liefert das ebenfalls seit 2014 laufende Forschungsprojekt „Belastungsoptimierte Arbeitsgestaltung in Leitwarten beim Einsatz moderner Informations- und Kommunikationstechnologien“ der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin.

Die Bedienung und Überwachung von Maschinen wird in 32 Studien innerhalb des Scoping Reviews betrachtet. Es zeigt sich allgemein, dass Produktionsarbeit und die Bedienung und Überwachung von Maschinen mit einem höheren gesundheitlichen Risiko verbunden ist als Arbeit in höher qualifizierten Tätigkeiten (Landsbergis et al., 2013). Art und Umfang der Bedienung von Maschinen ergeben sich aus der zuvor festgelegten Funktionsteilung sowie der Schnittstellengestaltung. Daher sind diese Merkmale der MMI mitverantwortlich für die Entstehung von Bedienstrukturen wie bspw. aktiven und passiven Tätigkeitsbestandteilen. Insbesondere aus passiven Bedientätigkeiten (z. B. Überwachung) können sich negative Erlebenszustände bilden. Die Erweiterung des Aufgabenbereichs kann dem jedoch entgegenwirken. Eine weitere interessante Feststellung wurde zudem von Rau (1996b) getroffen: Die Autorin findet in ihrer Studie, dass ein Mehr an aktiven und verantwortungsvollen Tätigkeiten (Störungsdiagnose im Energiesektor) auch mit gesteigerten subjektiven und psychophysiologischen Beanspruchungsindikatoren einhergeht, was der Modellannahme von Karasek widerspricht (Rau, 1996b). Offene Fragen ergeben sich für das Merkmal Bedienung und Überwachung besonders im Hinblick darauf, ob die Zusammenarbeit von Mensch und Maschine mit negativen Folgen für die psychische Gesundheit verbunden ist. Eine mögliche Annäherung an diese Frage liefern die Ar-

beiten von Corbett und Kollegen (Corbett, 1987; Corbett et al., 1989), die negative Auswirkungen auf die mentale Gesundheit und die Arbeitszufriedenheit von Beschäftigten feststellen, wenn diese eng an eine Maschine gekoppelt sind. Das Konzept der technologischen Kopplung stellt zugleich eine interessante und an psychologischen Konstrukten orientierte Möglichkeit dar, Mensch-Maschine-Systeme zu charakterisieren, und sollte auch auf seine Anwendungstauglichkeit in modernen Produktionssystemen hin überprüft werden.

Die innerhalb des Scoping Reviews angestrebten Aussagen über Effekte von Alter und Geschlecht auf den Arbeitsbedingungsfaktor können für die Mensch-Maschine-Interaktion nicht getroffen werden. Nur wenige Studien weisen explizit auf geschlechtsspezifische Unterschiede hin oder stellen altersabhängige Zusammenhänge her, sodass hier keine ausreichende Datenbasis besteht, um zu Schlussfolgerungen zu gelangen. Dabei bietet insbesondere der Arbeitsbedingungsfaktor Mensch-Maschine-Interaktion zahlreiche Ansatzpunkte für eine alters- und geschlechtsspezifische Gestaltung in soziotechnischen Arbeitssystemen. Diese könnte den förderlichen Charakter der Mensch-Maschine-Interaktion und den Einsatz von Technologien als Ressource betonen. Vor allem im Hinblick auf den demografischen Wandel sollte dieses Potenzial stärker ausgeschöpft und in den Fokus der Forschung gerückt werden.

Des Weiteren lässt sich feststellen, dass die Metriken zur Beschreibung der Mensch-Maschine-Interaktion weiterer Differenzierung bedürfen. So konnten im Rahmen des Scoping Reviews zahlreiche Ansätze zur Messung der MMI erfasst werden. Diese umfassen objektiv überprüfbare Systemeigenschaften, die Beschreibung natürlicher Bedingungen oder den Einsatz theoriebasierter, psychometrischer Messinstrumente. Insgesamt zeigen sich dabei enorme Unterschiede hinsichtlich des Umfangs, in dem die MMI charakterisiert wird. Die Mensch-Maschine-Interaktion wird in nur wenigen Studien mit Hilfe psychologisch-orientierter Konstrukte operationalisiert (bspw. technologische Kopplung, technologische Unsicherheit). Dies erfolgt in der Regel fragebogenbasiert per Selbst- oder Fremdeinschätzung, wobei die eingesetzten Instrumente überwiegend nicht standardisiert sind, sodass kaum Aussagen zu ihren Gütekriterien getroffen werden können. Zum besseren Verständnis der MMI und ihrer Auswirkungen ist es daher bedeutsam, auch die Messmethoden weiterzuentwickeln. Dies gilt sowohl für Prädiktor- als auch Kriteriumsvariablen, die MMI-spezifisch umzusetzen sind. Auch Bengler und Kollegen (2012) verweisen in ihrer Arbeit über Interaktionsprinzipien auf diesen Umstand.

Über alle Merkmale hinweg wurden vier Sekundärstudien, 59 experimentelle Studien, keine Längsschnittstudie, 33 Querschnittstudien und vier Studien mit anderem Studiendesign extrahiert. Es zeigt sich, dass viele Erkenntnisse aus älteren Arbeiten bis heute als relevant betrachtet werden können. Im Zuge der technologischen Entwicklung sind zudem viele neue Fragen aufgetreten, die nicht abschließend beantwortet werden können. Laut Hollnagel und Woods ist auch ein Mensch-Maschine-System mehr als die Summe seiner Teile. Somit sind die Ausgestaltung und Organisation der menschlichen und technischen Komponenten des Systems die entscheidenden Bestimmungsfaktoren für den Erfolg des Gesamtsystems (Hollnagel & Woods, 1983).

7. Aktuelles Gestaltungswissen auf Basis des bisherigen Literaturüberblicks

Der Arbeitsbedingungsfaktor Mensch-Maschine-Interaktion weist eine hohe thematische Breite auf, wie auch die hier berichtete Studienlage zeigt. Die Ableitung von allgemeingültigem Gestaltungswissen oder Regelungsansätzen stellt somit eine besondere Herausforderung dar. Diese wird jedoch vonseiten des Gesetzgebers und der internationalen Normung bereits angenommen, wie das vorhandene Vorschriften-, Normen- und Regelwerk zeigt. Auf einige prominente Beispiele aus diesem Schriftgut soll im Folgenden kurz eingegangen werden, bevor das Gestaltungswissen auf Basis der extrahierten Studien erläutert wird.

7.1. Gestaltungswissen aus dem Normen- und Gesetzeswerk

Auf europäischer Ebene befasst sich die Maschinenrichtlinie mit Grundsätzen für die Integration der Sicherheit. Im Anhang der Richtlinie findet sich der Hinweis darauf, dass die Anwendung ergonomischer Prinzipien genutzt werden soll, um die Belästigung, Ermüdung sowie körperliche und geistige Fehlbeanspruchung auf ein Mindestmaß zu reduzieren (2006/42/EG). Diese europäische Richtlinie wird über das Produktsicherheitsgesetz und die dazugehörige Verordnung in nationales Recht umgesetzt (ProdSG). Im nationalen Regelwerk stellt § 4 des Arbeitsschutzgesetzes (ArbSchG) die Grundlage für die Durchführung von Gefährdungsbeurteilungen dar und verweist zugleich darauf, dass auch die Gestaltung, die Auswahl und der Einsatz von Arbeitsmitteln (z. B. Maschinen) mit Gefährdungen verbunden sein können. Darüber hinaus stellt auch die Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV) heraus, dass den Arbeitnehmern nur Arbeitsmittel zur Verfügung gestellt werden sollen, bei „deren bestimmungsgemäßer Benutzung Sicherheit und Gesundheitsschutz gewährleistet sind“ (BetrSichV, S. 6). Übertragen auf die Interaktion des Menschen mit technischen Arbeitsmitteln ist somit darauf zu achten, dass keine Gefährdungen für Sicherheit und Gesundheit entstehen. Zur Konkretisierung dieser Verordnungen werden auf nationaler Ebene Technische Regeln eingesetzt. Bedeutsam für den Arbeitsbedingungsfaktor MMI ist insbesondere die Technische Regel für Betriebssicherheit 1151 (TRBS 1151), die sich mit Gefährdungen an der Schnittstelle Mensch und Arbeitsmittel befasst und dabei ergonomische und menschliche Faktoren fokussiert. Laut Abschnitt 3.1 bestehen konkrete Gefährdungen in der unzureichenden Anordnung von Anzeigen, Schaltbildern und Bedienelementen sowie in einer zu hohen Informationsdichte, Monotonie, Wachsamkeit und mangelhaft gestalteten Bedienelementen. Mit der TRBS 1151 liegt somit ein Regelwerk vor, das auf konkrete Gefährdungen an der Schnittstelle von Mensch und Arbeitsmittel (z. B. Maschine) hinweist. Die Vorschläge zur Durchführung von technischen oder organisatorischen Maßnahmen bleiben dabei jedoch wenig konkret. Internationale Normen wie die DIN EN ISO 26800:2011-11 betonen, dass sich Gestaltung stets am Menschen orientieren sollte. In DIN EN ISO 6385:2004 wird weiter ausgeführt, dass das Ziel der Gestaltung von Arbeitssystemen die Optimierung der Arbeitsbelastung sein sollte. Die Verbesserung der Effektivität und Effizienz des Systems würde dem primären Ziel folgen. Der zunehmende Fokus auf Leistungsfähigkeit und Effizienz von Systemen und Arbeitsprozessen scheint dem zu widersprechen und diese vor die menschenorientierte Gestaltung zu stellen. Die Norm benennt verschiedene Ansätze, die bei der Gestaltung von Mensch-Maschine-Schnittstellen Anwendung finden können. Dazu gehört bspw. die Bereitstellung von Informationen zu den einzelnen Parametern sowie von Überblicksinformationen, die leichte Erreichbarkeit und Sichtbarkeit von viel verwendeten Elementen und die wirkungsvolle Gestaltung von Anzeigen, Signalen und Stellteilen unter Berücksichtigung

der menschlichen Wahrnehmung. Einige dieser Punkte lassen sich auch in den Gestaltungsansätzen der extrahierten Studien finden, wie die nachfolgenden Ausführungen zeigen werden. Eine weitere Norm – DIN EN ISO 9241-110:2008-09 – befasst sich mit den Grundsätzen der Dialoggestaltung bei der Mensch-System-Interaktion. Die Aspekte Aufgabenangemessenheit, Selbstbeschreibungsfähigkeit, Erwartungskonformität, Lernförderlichkeit, Steuerbarkeit, Fehlertoleranz und Individualisierbarkeit sollen zur Gebrauchstauglichkeit von Systemen beitragen. Doch wie die obigen Ausführungen gezeigt haben, können auch grundlegendere Aspekte wie die Funktionsteilung oder verschiedene Systemeigenschaften die Mensch-System-Interaktion beeinflussen.

Einige Lücken oder wenig konkrete Anregungen aus den gesetzlichen und untergesetzlichen Regelwerken können womöglich durch verschiedene Gestaltungsansätze, die aus den extrahierten Studien abgeleitet werden konnten, konkretisiert werden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass auf die Aufteilung anhand der MMI-Merkmale (Funktionsteilung, Schnittstellengestaltung und Bedienung) verzichtet wird.

7.2. Gestaltungsempfehlungen

In diesem Kapitel werden die Gestaltungsansätze wiedergegeben, die sich auf empirische Zusammenhänge beziehen. Das bedeutet, dass die Autoren in ihren Studien Gestaltungsempfehlungen auf Basis ihrer empirischen Ergebnisse beschreiben.

Auf einem höheren Level werden zunächst die organisationalen Bedingungen betont. So verweisen Hsu und Wang (2003) im Hinblick auf die körperlichen Beschwerden bei der Bildschirmarbeit darauf, dass auch die Gestaltung von Arbeits- und Pausenzeiten für Bediener von Bildschirmgeräten von Bedeutung ist.

Im Bereich der Gestaltungsempfehlungen wird von vielen Autoren die Bedeutung der Passung von der Arbeitsaufgabe und dem entsprechenden Mensch-Maschine-System betont. So verweisen bspw. Kampmeier et al. darauf, dass bestimmte Personen sensibel auf das Tragen von HMDs reagieren und daher die „individuelle Verträglichkeit des Systems“ (Kampmeier et al., 2007, S. 595) überprüft werden sollte. Zudem können in Abhängigkeit von der Aufgabe Leistungsunterschiede bestehen, weshalb auch überprüft werden sollte, ob HMDs oder andere Displaygeräte für die jeweilige Tätigkeit geeignet sind. Zu einem ähnlichen Schluss kommen auch Wiedenmaier et al., die feststellen, dass schwierige Aufgaben ein besseres Potenzial für die Unterstützung durch AR-Technologien bieten als einfache und repetitive Tätigkeiten (Wiedenmaier et al., 2003). Der von Odenthal et al. (2014) beschriebene Genauigkeitsvorteil, der mit der Nutzung von HMDs erzielt werden kann, spricht zudem für den Einsatz von HMDs bei Aufgaben, die eine hohe Genauigkeit erfordern.

Die Arbeitssituation ist zudem durch die auftretende Arbeitsbelastung gekennzeichnet. Adams (2009) kann – wie oben beschrieben – für Situationen mit hoher Arbeitsbelastung negative Folgen für die Leistung und die Beanspruchung von Bedienern ferngesteuerter Roboter nachweisen. Aus diesen Ergebnissen leitet der Autor ab, dass eine Reduktion von erforderlichen Kommandos und Sensoranzeigen dazu dienen kann, die wahrgenommene Arbeitsbelastung zu reduzieren.

Ebenfalls auf der Ebene der Arbeitsaufgabe findet sich die Forderung danach, die Zusammenarbeit von Mensch und Maschine möglichst aktiv zu gestalten und so genügend Möglichkeiten zur Beeinflussung (auch im Produktionsprozess) für Beschäftigte zu sichern

(Sonnenberg & Thämelt, 1985). Wie die Autorinnen betonen, muss dafür zunächst eine Analyse erfolgen, ob genügend aktive Elemente in der Tätigkeit enthalten sind (ebd.). In der Studie wird jedoch die Anreicherung der Tätigkeit durch die Übernahme von Pflege-, Wartungs- und Instandhaltungsarbeiten infrage gestellt, da diese Maßnahmen nur „wenig geeignet für die Kompensation geringer Möglichkeiten des aktiven Beeinflussens des Produktionsprozesses“ seien (Sonnenberg & Thämelt, 1985, S. 124). Hingegen wird die Anreicherung von passiven Tätigkeiten durch Zusatzaufgaben von Persson et al. (2001) befürwortet. In ihrer Studie führt die Hinzugabe von angereicherten Tätigkeiten dazu, dass die passive Aufgabe der Netzüberwachung sich im Erleben der Operateure kaum mehr von der aktiven Verteilertätigkeit unterscheidet. Allerdings betonen die Autoren auch hier, dass die Zusatzaufgaben als sinnvoll erachtet werden müssen (ebd.). Die Durchführungen von verschiedenen Handlungen und die aktive Involvierung von Nutzern können auch die Bedienung von komplexen Systemen positiv beeinflussen, indem bspw. Tendenzen des Übervertrauens (*complacency*) verhindert werden (McFadden et al., 2004). Auch Johansson et al. (1996) kommen bei der Untersuchung von Überwachungstätigkeiten zu dem Ergebnis, dass die Leistung und das allgemeine Wohlbefinden der Operateure durch eine eher aktive Rolle bei der Überwachung gesichert werden können. Sie empfehlen dabei eine Kombination aus technischen und organisationalen Lösungen, können diesen Vorschlag jedoch nicht durch empirische Erfahrungen untermauern.

Für Situationen, in denen Operateure in ein Arbeitssystem integriert sind, bei dem die Funktionsteilung auf höherer Ebene erfolgt, lassen sich in den extrahierten Studien ebenfalls Empfehlungen für eine erfolgreiche Gestaltung finden. Der von Onnasch et al. (2014) bestätigte „Lumberjack“-Effekt stellt eine bedeutsame Herausforderung für die MMI dar. Die Autoren empfehlen daher, dass auch Operateure in automatisierten Systemen an der Entscheidungsauswahl sowie der Handlungsauswahl und -implementierung beteiligt sein sollten. Dies gilt insbesondere für Situationen, in denen eine mögliche Rückkehr zur manuellen Bedienung und darauf basierende Leistungseinbußen eine Rolle spielen können (Onnasch et al., 2014). Zu ähnlichen Schlüssen kommt die Studie von Manzey et al. (2012), in der die Vorteile von mittleren LOA betont werden, die eine Balance aus Kosten und Vorteilen bei der Zusammenarbeit mit automatisierten Systemen herstellen können. Die Empfehlungen, die Rovira et al. (2007) aus ihrer Untersuchung ableiten, verweisen ebenfalls darauf, dass Operateure insbesondere Zugang zu Rohdaten benötigen. Darüber hinaus plädieren die Autoren dafür, dass Operateure eher mit Systemen arbeiten sollten, die die Informationsaufnahme steuern, als mit hochautonomen Entscheidungssystemen (Rovira et al., 2007). Hinsichtlich der Entscheidung darüber, wie umfassend die Autorität des Operateurs bei der Wahl des Levels der Automation sein sollte, erörtern Sauer et al. (2011) die möglichen Vorzüge einer gezwungenen Wahl. Somit könnte die Tendenz von Operateuren, die Auswahl höherer Automationslevel zu vermeiden, gebrochen werden. Einschränkend weisen die Autoren jedoch darauf hin, dass dies mit einer zusätzlichen Verringerung der Autonomie einhergehen kann (Sauer et al., 2011). Hier sei darauf verwiesen, dass die Modellvorstellungen im Hinblick auf die Autonomie, die eine Arbeitsaufgabe bieten sollte, auseinandergehen, wie das Review zum Arbeitsbedingungsfaktor Handlungs- und Entscheidungsspielraum aufzeigt.

Eine zukunftsorientierte Facette wird in der Studie von Bailey et al. (2006) angesprochen: Die Autoren befürworten den Einsatz von adaptiven, biokybernetischen Systemen, da diese mit einer geringeren Beanspruchung verbunden sein können als menschengesteuerte adaptive Systeme.

Zusätzlich zu der Betrachtung von Forschungsarbeiten besteht ein möglicher Ansatz bei der Ableitung von Gestaltungsempfehlungen darin, modellgeleitet vorzugehen. So bietet das in Kapitel 1. beschriebene Modell von Parasuraman et al. (2000) relevante Aspekte möglicher Gestaltung. Dazu gehört bspw. die systematische Betrachtung der Frage „Was soll automatisiert werden“ mit der entsprechenden Auswahl der Art bzw. des Grads der Automatisierung und der nachfolgenden Auswahl eines Automatisierungslevels. Die frühzeitige Anwendung von Evaluationskriterien kann sodann dazu beitragen, mögliche Defizite in der Gestaltung zu entdecken. Wichtig ist dabei jedoch auch, den Fokus nicht nur auf Leistungskonsequenzen zu richten, sondern auch psychische und physische Beanspruchungen für den Bediener zu berücksichtigen. Durch einen iterativen Prozess, in dem die Gestaltung stetig angepasst wird, können effektive und effiziente Konzepte für die MMI abgeleitet werden.

Hinsichtlich der Gestaltung von Schnittstellen können insbesondere die Vorteile der Integration von Informationen, der redundanten Darstellung und der farblichen Unterstützung hervorgehoben werden, da diese meist mit positiven Effekten auf die Akzeptanz, Nutzerzufriedenheit und Beanspruchung von Bedienern verbunden sind (Baber et al., 1992; Coury & Pietras, 1989; Van Laar & Deshe, 2002; Vicente et al., 1996). Beispielsweise heben Sanderson et al. (2003) hervor, dass die Abbildung von Inhalten durch *Shape-Displays*, die einen starken „visuellen Imperativ“ besitzen und die dargestellten Parameter intuitiv abbilden (*mapping*), zur Leistung in einer Überwachungsaufgabe beitragen können. Gleiches gilt für die Darstellung des Rankine-Kreisprozesses mit einem speziellen Diagramm zur Verdeutlichung des Zusammenhangs zwischen Entropie und Temperatur, welches die Störungsdiagnose erleichtert (Vicente et al., 1995). Somit zeigt sich hier, dass der aktuelle Kenntnisstand hinsichtlich der Vorteile ergonomischer Schnittstellengestaltung bestätigt werden kann.

Bei der Zusammenarbeit von Mensch und Roboter bleiben diese Erkenntnisse weiterhin relevant. Jedoch zeigen sich hier auch neue Anforderungen an die Gestaltung. So verweist die Studie von Lee und Lau (2011) darauf, dass das Erscheinungsbild von Robotern den erwarteten Funktionen und Fähigkeiten angemessen sein sollte. Zudem sollten die Funktionen und das Aussehen des Roboters den beruflichen Anforderungen entsprechen.

Bei der Gestaltung von Rückmeldungen sollte zudem darauf geachtet werden, dass die Richtung der Rückmeldung (negativ, positiv) sich auf die Stimmung der Nutzer und so dann auch auf deren Technikakzeptanz auswirken kann (Djamasbi & Loiacono, 2008). Die Vermittlung der Rückmeldung durch computerbasierte Agenten kann mit einer Frustrationsreduktion einhergehen. Hierbei empfiehlt sich laut Hone (2006) besonders die digitale Abbildung einer Frau, die affektive Botschaften sendet. Auch Liu et al. (2008) weisen darauf hin, dass sich Vertrauen in Agenten erst im Zeitverlauf ausbildet und positiv durch die konsistente Nutzung sozialpsychologischer Kommunikationshinweise beeinflusst werden kann. Jedoch sollten die persuasiven Absichten nicht zu offensichtlich gestaltet sein, da ansonsten die von den Nutzern wahrgenommene Autonomie leidet und es zu einer verminderten Akzeptanz der Autorität des Agenten kommen kann (ebd). Im Kontext des Einsatzes von Rückmeldungen für das Erreichen von Produktionszielen kann auf die Studie von Stansfield und Longenecker (2006) verwiesen werden. Die Autoren stellen fest, dass sowohl die Anwendung von Informationssystemen als auch die Selbstaufzeichnung von Leistungsdaten positiv von den Mitarbeitern aufgenommen werden können. Dies wird auf die Wertungsfreiheit und die geringere Beeinflussbarkeit durch Vorgesetzte zurückgeführt, die mit numerischen Daten einhergeht. Der Überblick über die eigene Leistung sowie die

darauf abgestimmte Zeiteinteilung kann zudem zu einer selbstbestimmteren Arbeit im Team führen (ebd.).

Bei der digitalen Aufgabenbearbeitung kann der Modus der Rückmeldung sich auf die Leistung und auf die Beanspruchung der Nutzer auswirken, wie die Studie von Vitense et al. (2003) zeigt. Die Autoren empfehlen hierbei insbesondere den Einsatz von haptischem und visuellem Feedback, das sowohl einzeln als auch in bimodaler Kombination zu einer Leistungsverbesserung beitragen kann. Insbesondere bimodale Rückmeldungen scheinen leistungsförderlich und beanspruchungsoptimierend zu wirken, wenn sie der Aufgabe angemessen sind. Hinsichtlich der Verwendung von auditiven Rückmeldungen geben die Autoren einschränkend zu bedenken, dass die zeitliche Natur auditiven Feedbacks bei der Gestaltung von Feedback-Systemen zu beachten ist (ebd.). Wie bei der Informationsdarstellung können somit auch für die Gestaltung von Rückmeldungen Vorzüge der redundanten Darbietung gefunden werden. Dies bestätigt auch die Studie von Baber et al. (1992), in der die Kombination aus textuellem und symbolischem Feedback mit konstant hoher Leistung verbunden ist. Doch auch hier verweisen die Autoren darauf, dass das angemessene Feedback-Medium durch die aufgabeninhärenten Anforderungen an die Informationsbearbeitung bestimmt wird (ebd.).

Im Kapitel 4.3. konnte deutlich gezeigt werden, dass Systemeigenschaften einen relevanten Einfluss auf die Interaktion von Mensch und Maschine ausüben. Diese Effekte sollten bei der Gestaltung von Maschinen und Systemen berücksichtigt werden. Eine zentrale Rolle für die Gestaltung einer erfolgreichen Mensch-Maschine-Interaktion spielt sodann die Kenntnis von Systemeigenschaften. Diese kann bspw. die Ausbildung einer angemessenen Vertrauensstrategie begünstigen (Rice & Geels, 2010). Zur Kenntnis der Eigenschaften gehört zudem, Bewusstsein für den Funktionsumfang und für die Grenzen des Systems zu schaffen (Cegarra & Hoc, 2008). Dies wird auch von Manzey et al. (2012) erwähnt, die im Hinblick auf die Interaktion mit komplexen Systemen darauf verweisen, dass das Erleben von Automationsausfällen dem Auftreten des *Automation Bias* entgegenwirken kann. Eine Möglichkeit, Systembedienern die Eigenschaften und Fähigkeiten ihrer Systeme zu vermitteln, liegt in der Durchführung von Trainings. Bergmann (2001) kann im Kontext der Störungsdiagnose nachweisen, dass multiples Strategietraining, welches sich durch die Kombination mehrerer transförderlicher Konzepte auszeichnet, besonders die Bearbeitung von unbekanntem Störungen positiv beeinflusst.

Verschiedene Gestaltungsaspekte der MMI können sich unterschiedlich auf verschiedene Benutzergruppen auswirken. Beispielsweise beeinflusst die Art der Rückmeldung Männer und Frauen unterschiedlich (Djamasbi & Loiacono, 2008), die Gestaltung von Robotern wirkt sich auf die Leistung in unterschiedlichen Aufgaben aus (Kuchenbrandt et al., 2012) und auch das Alter kann bei verschiedenen Interaktionen zwischen Mensch und Maschine eine Rolle spielen (Arning & Ziefle, 2007).

Auch wenn in dem hier angefertigten Review die Gestaltung von Arbeit anhand von Verhältnisprävention im Vordergrund steht, verweisen einige extrahierte Studien auch auf die Bedeutung von Persönlichkeitseigenschaften. So kommt die Studie von Dvash und Mannheim (2001) zu dem Schluss, dass der Wunsch nach Kontrollerleben (*desirability of control*) sich auf die Wahrnehmung des Arbeitsplatzes auswirken kann. Shu et al. (2011) finden zudem die höchste Ausprägung von Technostress bei Mitarbeitern, die eine hohe Technologieabhängigkeit und eine geringe Selbstwirksamkeit im Hinblick auf die Arbeit mit Computern aufweisen.

7.3. Allgemeine Gestaltungsaussagen

Dieses Kapitel dient der Beschreibung von allgemeinen Gestaltungsaussagen, die aus den Studien gewonnen werden konnten. Das bedeutet, dass in den jeweiligen Studien keine empirischen Belege für die genannten Gestaltungsaussagen angeführt werden. Dennoch stellen die Aussagen, die verschiedene Aspekte des Arbeitssystems betonen, mögliche Ansätze für die Gestaltung der Mensch-Maschine-Interaktion dar.

So sollte vor der Implementierung von Maschinen und Systemen eine Analyse der Aufgabe, der Arbeitssituation und der Informationsbedürfnisse durchgeführt werden, um Inkonsistenzen zwischen der angestrebten und der tatsächlichen Nutzung von Maschinen und Systemen zu vermeiden (Hockey & Maule, 1995; Sheik-Nainar et al., 2005). Auch die Involvierung der zukünftigen Nutzer bei der Entwicklung von neuen Informationssystemen kann dazu beitragen, eine höhere Zufriedenheit und Akzeptanz im späteren Nutzungsprozess zu schaffen (Kampmeier et al., 2007; Mahmood et al., 2000). Auch Gerace und Galimore (2001) betonen, dass bspw. Ingenieure als Endnutzer von CAD-Anwendungen in den Designprozess von Systemen für die Produktionsplanung eingebunden werden sollten.

Ein weiterer Aspekt umfasst den Erhalt eines gewissen Maßes an Flexibilität, das den Bedienern sowohl bei der Arbeit mit Maschinen als auch mit komplexen Systemen überlassen werden sollte. Majchrzak et al. (1986) betonen dabei, dass negativen Effekten, die auf der zunehmenden Standardisierung von Arbeitsprozeduren beruhen, durch flexible Anteile entgegengewirkt werden kann. Die Autoren sehen eine Möglichkeit, dieses Ziel zu erreichen, darin, die Zeit an bestimmten Systemen (z. B. CAD) zu begrenzen. Eine Möglichkeit, Flexibilität zu erreichen, kann darin liegen, Bedientätigkeiten möglichst mit aktiven Tätigkeitsbestandteilen anzureichern (Johansson et al., 1996) oder sie mit anderen Tätigkeiten zu verbinden, um eine möglichst variable Aufgabengestaltung zu gewährleisten (Kaufman, 1965). Der Autor spricht sich in diesem Zusammenhang für die Anwendung von Prinzipien der Aufgabenerweiterung und der Arbeitsplatzrotation aus, die nach seiner Ansicht auch bei der Zusammenarbeit mit automatisierten Systemen zu einer Verbesserung der Arbeitszufriedenheit beitragen können (ebd.). Somit zeigt sich auch bei den Gestaltungsansätzen die Nähe zum Arbeitsbedingungsfaktor Handlungs- und Entscheidungsspielraum. Inwieweit die damit verbundenen Gestaltungsmöglichkeiten tatsächlich positive Effekte auf die psychische Gesundheit der Beschäftigten ausüben, wird in dem entsprechenden Review erörtert.

Zudem werden auf einer allgemeinen Ebene die Vorzüge möglicher Bedienertrainings genannt. Diese können entweder die Einübung sicherheitskritischen Verhaltens umfassen (Liao & Chang, 2011; Ogle et al., 2008) oder aber dazu dienen, dass Operateure Eigenschaften und Risiken ihrer Systeme besser kennenlernen und im Umgang mit Fehlern geschult werden (Arning & Ziefle, 2009; Djamasbi & Loiacono, 2008; Karwowski & Rahimi, 1991; Mahmood et al., 2000; McBride et al., 2011).

Weitere Gestaltungshinweise fokussieren die Gestaltung von Bedienschnittstellen (z. B. Anzeigen) und beinhalten die Forderung, dass diese verschiedenen leistungs- und beanspruchungsförderlichen Prinzipien folgen wie bspw. redundanter Informationsdarstellung oder ökologischer Gestaltung (Cegarra & Hoc, 2008; Ogle et al., 2008; Sonnenberg & Thämelt, 1985). Auch die Abbildung von Überwachungssystemen durch verschiedene Varianten der Informationsdarstellung und -speicherung wird von einigen Autoren als Maßnahme genannt, um den Werkträgern Aktivität und Selbstständigkeit zu ermöglichen (Son-

nenberg & Thämelt, 1985). Insbesondere die Möglichkeit der Anpassung der Informationsdarstellung wird auch in DIN EN ISO 9241-110:2008-09 unter dem Aspekt „Individualisierbarkeit“ betrachtet und für die Dialoggestaltung von Mensch-Maschine-Systemen empfohlen. Ogle et al. (2008) betonen zudem die Bedeutung von gut gestalteten Sicherheitssystemen, die sowohl bei niedriger als auch bei hoher Automationskomplexität eine zentrale Rolle einnehmen. Darüber hinaus ist es bedeutsam, den Operateuren die notwendigen Daten und Alarme bereitzustellen, damit sie kritische Systemzustände feststellen können. Zudem müssen Notfallprozeduren einfach und gut geübt sein, damit die Operateure in diesen Ausnahmefällen auf die richtigen Handlungen zurückgreifen (ebd.).

Eine Möglichkeit, Schwachstellen in der Systemgestaltung aufzudecken, liegt darin, Fehler zu analysieren. So empfehlen Liao und Chang (2011), dass bei Fehlern, die auf inkorrekten Entscheidungen und korrekten Handlungen beruhen, die Betriebsverfahren und allgemeine Richtlinien überprüft werden sollten. In Situationen, in denen korrekte Entscheidungen und inkorrekte Handlungen zu verzeichnen sind, können zusätzliches Training, Überprüfung durch Fachkollegen sowie eine Aufsicht durch das Management zu einer Fehlerreduktion beitragen. Wenn die Fehler auf inkorrekte Entscheidungen und inkorrekte Handlungen zurückzuführen sind, kann nach Meinung der Autoren eine Anpassung der Leitweise, bspw. im Rahmen einer Reevaluation mit Fokus auf den „menschlichen Faktoren“, erforderlich sein (Liao & Chang, 2011). Wie oben beschrieben, können auch ungeplante manuelle Eingriffe mit einer Mehrbelastung für Operateure verbunden sein. Hockey und Maule (1995) schlagen daher vor, diese Eingriffe entweder mehr zu kontrollieren bzw. zu verhindern, was bspw. durch Trainings, andere Zugriffsrechte oder eine stärkere Überwachung der individuellen Protokolle erfolgen könnte. Eine andere Möglichkeit sehen die Autoren darin, die manuellen Eingriffe stärker zu unterstützen, indem Werkzeuge und Programme zur Entscheidungsunterstützung bereitgestellt werden. Insbesondere in der zweiten Möglichkeit sehen Hockey und Maule (1995) mehr Spielraum, um effektiv zum Erreichen von Produktionszielen beitragen zu können.

8. Suchstrings zum Arbeitsbedingungsfaktor Mensch-Maschine-Interaktion

Tab. 4 Suchstrings EBSCO-Datenbank

Kognition	"cognition" OR "cognitive function*" OR "cognitive efficiency" OR "cognitive impairment" OR "memor*" OR "alzheimer" OR "dementia" OR "forget*" OR "cognitive failure" OR "cognitive decline" OR "cognitive deterioration" OR "reasoning" OR "problem solving" OR "inhibition" OR "attention" OR "executive function*" OR "processing speed" OR "decision making" OR "alertness" OR Kognition OR "kognitive Fähigkeiten" OR "kognitive Leistungsfähigkeit" OR "kognitive Beeinträchtigung" OR "Gedächtnis" OR Demenz OR Vergessen OR "kognitives Versagen" OR "kognitive Verschlechterung" OR "schlussfolgerndes Denken" OR Problemlösen OR Aufmerksamkeit OR "exekutive Funktion" OR Verarbeitungsgeschwindigkeit OR Entscheidungsfindung OR Wachsamkeit
Beschwerden	(SU(headache OR "sleep disorders" OR asthenia OR tinnitus OR "irritable bowel syndrome" OR "somatoform disorders")) OR ("irritable bowel syndrome" OR "abdominal pain" OR gastritis OR "gastrointestinal disorders" OR arthralgia OR "joint pain" OR "muscle tension" OR "muscle tonus" OR "limb pain" OR headache OR "sleep disorders" OR asthenia OR "psychosomatic disorders" OR "psychosomatic complaints" OR "somatoform disorders" OR "sick building syndrome" OR "eye pain" OR "skin symptoms" OR tinnitus OR "hearing loss" OR breathlessness OR dyspnea OR "respiratory diseases" OR "respiration disorders" OR "unspecific symptoms" OR "nonspecific symptoms" OR "unexplained symptoms" OR "unspecific pain" OR "nonspecific pain" OR "unexplained pain" OR "unspecific complaints" OR "nonspecific complaints" OR "unexplained complaints" OR "chronic pain" OR "chronic complaints" OR discomfort OR Reizdarmsyndrom OR Magenschmerzen OR Gastritis OR Magenschleimhautentzündung OR "gastrointestinale Störungen" OR Gelenkschmerzen OR Verspannung OR Gliederschmerzen OR Kopfschmerz OR Schlafstörungen OR Asthenie OR "psychosomatische Störungen" OR "somatoforme Störungen" OR "psychosomatische Beschwerden" OR Gebäudekrankheit OR Augenbeschwerden OR Hautveränderungen OR Tinnitus OR Ohrgeräusche OR Hörverlust OR Hörsturz OR Kurzatmigkeit OR Atembeschwerden OR Atemwegserkrankungen OR Dyspnoe OR "unspezifische Symptome" OR "unspezifischer Schmerz" OR "unspezifische Beschwerden" OR "chronischer Schmerz" OR "chronische Beschwerden" OR Unwohlsein)
Ment. Gesundheit & Zufriedenheit	"mental health" OR "well-being" OR wellbeing OR workability OR "work ability" OR happiness OR "positive affect" OR "positive emotions" OR "satisfaction with life" OR "life satisfaction" OR "work satisfaction" OR "job satisfaction" OR "quality of life" OR affect OR mood OR "mentale Gesundheit" OR Wohlbefinden OR Arbeitsfähigkeit OR Freude OR "positiver Affekt" OR "positive Emotionen" OR Lebenszufriedenheit OR Arbeitszufriedenheit OR Lebensqualität OR Affekt OR Stimmung

psychische Störungen	<p>depression OR "major depression" OR burnout OR "anxiety disorders" OR "soma- toform disorders" OR "adjustment disorders" OR "stress disorders" OR "stress- related disorders" OR "stressor-related disorder" OR "sleep disorders" OR "depres- sive disorder" OR "depressive symptoms" OR depressiveness OR "dysthymic dis- order" OR "depressive episode" OR "affective disorder" OR "affective symptoms" OR "mood disorder" OR "mental disorder" OR "mental illness" OR "psychiatric dis- order" OR distress OR "substance-related disorders" OR "alcohol abuse" OR "drug abuse" OR "mental fatigue" OR fatigue OR exhaustion OR satiation OR "mental satiation" OR "negative affect" OR irritation OR effort OR "irritable mood" OR "irri- table mood" OR irritability OR (DE(Depression OR Burnout)) OR Angststörungen OR "somatoforme Störungen" OR Anpassungsstörungen OR "stressbezogene Störungen" OR "Schlafstörungen" OR "depressive Störungen" OR "depressive Symptome" OR Depressivität OR "dysthimische Störungen" OR "depressive Epi- sode" OR "affektive Störungen" OR "affektive Symptome" OR Stimmungsstörungen OR "psychische Störungen" OR "emotionale Belastung" OR Substanzmissbrauch OR Alkoholmissbrauch OR Drogenmissbrauch OR "psychische Ermüdung" OR Ermüdung OR Erschöpfung OR Sättigung OR "psychische Sättigung" OR "nega- tiver Affekt" OR Gereiztheit OR Anstrengung OR "gereizte Stimmung" OR Reiz- barkeit</p>
Leistung und Spezifisches	<p>detachment OR "sick leave" OR motivation OR "intrinsic motivation" OR "employee motivation" OR "job involvement" OR "occupational aspirations" OR "organisational commitment" OR "organizational commitment" OR "labour turnover" OR "turnover intentions" OR absenteeism OR performance OR "job performance" OR "employee efficiency" OR "employee productivity" OR "organisational effectiveness" OR "or- ganizational effectiveness" OR "quality of service" OR error OR "false alarms" OR accidents OR vigilance OR "accuracy rate" OR incident OR injury OR hazard OR Distanziertheit OR Krankenurlaub OR Arbeitsunfähigkeit OR Motivation OR "intrin- sische Motivation" OR Mitarbeitermotivation OR "berufliches Engagement" OR "berufliche Ziele" OR "organisationales Commitment" OR Fluktuation OR Wech- selabsichten OR Absentismus OR Leistung OR "berufliche Leistung" OR "Leis- tungsfähigkeit von Arbeitnehmern" OR Arbeitnehmerproduktivität OR Organisa- tionseffektivität OR Servicequalität OR Fehler OR "falscher Alarm" OR Unfälle OR Vigilanz OR Daueraufmerksamkeit OR Genauigkeit OR Zwischenfall OR Ver- letzung OR Gefährdung</p>

MSE	<p>((pain OR complaint) AND ("lower extremity" OR "lower extremities" OR "lower limb" OR knee OR "knee joint" OR pelvis OR neck OR "neck muscles" OR "shoulder joint" OR shoulder OR back OR "low back" OR hip OR elbow OR "elbow joint" OR "upper limb" OR "upper extremities" OR arm OR "musculoskeletal system" OR "trigger points")) OR "neck pain" OR "shoulder pain" OR "low back pain" OR "back pain" OR "musculoskeletal disorders" OR "musculoskeletal pain" OR "muscular pain" OR "muscular diseases" OR "musculoskeletal systems" OR "cumulative trauma disorders" OR "tennis elbow" OR "patellofemoral pain" OR "myofascial pain" OR "patellofemoral pain syndrome" OR ((Schmerz OR Beschwerden) AND ("untere Extremitäten" OR "untere Gliedmaßen" OR Knie OR Kniegelenk OR Becken OR Genick OR Nackenmuskulatur OR Schultergelenk OR Schulter OR Rücken OR "unterer Rücken" OR Hüfte OR Ellbogen OR Ellbogengelenk OR "obere Gliedmaßen" OR "obere Extremitäten" OR Arm OR Muskelskelettsystem OR Triggerpunkte)) OR Genickschmerz OR Nackenschmerz OR Schulterschmerz OR "Schmerzen im unteren Rücken" OR Rückenschmerzen OR "muskuloskelettale Erkrankungen" OR "muskuloskelettale Schmerzen" OR Muskelschmerz OR Muskelerkrankungen OR Muskelskelettsystem OR "kumulative traumatische Erkrankung" OR Tennisarm OR "patellofemorale Schmerzen" OR "myofaszialer Schmerz"</p>
HKE	<p>"cardiovascular diseases" OR "blood pressure" OR hypertension OR "coronary heart disease" OR "coronary disease" OR "cerebrovascular disorders" OR "angina pectoris" OR "cardiovascular death" OR "heart failure" OR atherosclerosis OR "myocardial infarctions" OR "heart disorder" OR "kardiovaskuläre Störungen" OR Blutdruck OR Hypertonie OR "koronare Herzkrankheiten" OR Hirngefäßstörungen OR Herzinfarkt OR Tod OR Herzversagen OR Atherosklerose OR Ateriosklerose</p>
UV	<p>"human-machine systems" OR "human-computer interaction" OR "human-robot interaction" OR "human-robot system" OR "human-robot cooperation" OR "human factors engineering" OR "expert systems" OR "decision support systems" OR "automated information processing" OR "automation" OR "information technology" OR "information systems" OR "process control" OR "supervisory control" OR "video display" OR "visual display" OR "assembly line" OR "conveyor belt" OR "Mensch-Maschine-Systeme" OR "Mensch-Computer-Interaktion" OR "Mensch-Roboter-Interaktion" OR "Mensch-Roboter-Systeme" OR "Mensch-Roboter-Kooperation" OR Ergonomie OR Expertensystem OR "computerunterstützte Entscheidungshilfen" OR "automatisierte Informationsverarbeitung" OR Automation OR Informationstechnologie OR Informationssysteme OR Prozesskontrolle OR "überwachende Kontrolle" OR "visuelle Informationsdarbietung" OR Fließband</p>
Kontext	<p>worker OR occupation OR occupational OR "employ*" OR "job-related" OR "work-related" OR manufacturing OR production OR industry OR industrial OR industrialised OR industrialized OR "production line" OR operator OR user OR "blue-collar" OR "control room" OR "automotive industry" OR Arbeiter OR Beschäftigung OR arbeitsbezogen OR Job OR angestellt OR Industrialisierung OR Industrie OR industriell OR Produktion OR Operateur OR Nutzer OR Bediener OR Kontrollraum OR Automobilindustrie</p>
Not	<p>"Brain-Computer Interaction" OR BCI OR "automobile driving" OR driving OR rehabilitation OR care OR therapy OR surgery OR clinic* OR government OR military</p>

Tab. 5 Suchstrings PubMed-Datenbank

("man-machine systems"[MeSH Terms] OR "human-computer interaction"[all fields] OR
 "human-robot interaction"[all fields] OR "human-robot cooperation"[all fields] OR "human
 engineering"[MeSH Terms] OR "expert systems"[MeSH Terms] OR "decision support
 systems, management"[MeSH Terms] OR "automatic data processing"[MeSH Terms]
 OR "automation"[MeSH Terms] OR "information technology"[all fields] OR "information
 systems"[MeSH Terms] OR "process control"[all fields] OR "supervisory control"[all
 fields] OR "computer terminals"[MeSH Terms] OR "data display"[MeSH Terms] OR "as-
 sembly line"[all fields] OR "conveyor belt"[all fields]) AND ("mental health"[All Fields] OR
 "well-being"[All Fields] OR wellbeing[All Fields] OR workability[All Fields] OR "work abil-
 ity"[All Fields] OR "happiness"[MeSH Terms] OR "positive affect"[All Fields] OR "positive
 emotions"[All Fields] OR "satisfaction with life"[All Fields] OR "life satisfaction"[All Fields]
 OR "work satisfaction"[All Fields] OR "job satisfaction"[All Fields] OR "quality of life"[All
 Fields] OR "affect"[MeSH Terms] OR "affect"[All Fields] OR "mood"[All Fields] OR "de-
 pressive disorder"[MeSH Terms] OR "depressive disorder"[All Fields] OR "depres-
 sion"[All Fields] OR "depression"[MeSH Terms] OR "major depression"[All Fields] OR
 burnout[All Fields] OR "anxiety disorders"[All Fields] OR "somatoform disorders"[All
 Fields] OR "adjustment disorders"[All Fields] OR "stress disorders"[All Fields] OR
 "stress-related disorders"[All Fields] OR "stressor-related disorder"[All Fields] OR "sleep
 disorders"[All Fields] OR "depressive disorder"[All Fields] OR "depressive symptoms"[All
 Fields] OR depressiveness[All Fields] OR "dysthymic disorder"[All Fields] OR "depres-
 sive episode"[All Fields] OR "affective disorder"[All Fields] OR "affective symptoms"[All
 Fields] OR "mood disorder"[All Fields] OR "mental disorder"[All Fields] OR "mental ill-
 ness"[All Fields] OR "psychiatric disorder"[All Fields] OR distress[All Fields] OR "sub-
 stance-related disorders"[All Fields] OR "alcohol abuse"[All Fields] OR "drug abuse"[All
 Fields] OR "mental fatigue"[All Fields] OR "fatigue"[MeSH Terms] OR "fatigue"[All Fields]
 OR exhaustion[All Fields] OR "satiating"[MeSH Terms] OR "satiating"[All Fields] OR
 "mental satiation"[All Fields] OR "negative affect"[All Fields] OR irritation[All Fields] OR
 effort[All Fields] OR "irritable mood"[MeSH Terms] OR "irritable mood"[All Fields] OR
 "irritability"[All Fields] OR detachment[All Fields] OR "sick leave"[MeSH Terms] OR "mo-
 tivation"[MeSH Terms] OR "motivation"[All Fields] OR "intrinsic motivation"[All Fields] OR
 "employee motivation"[All Fields] OR "job involvement"[All Fields] OR "occupational aspi-
 rations"[All Fields] OR "organisational commitment"[All Fields] OR "organizational com-
 mitment"[All Fields] OR "labour turnover"[All Fields] OR "turnover intentions"[All Fields]
 OR "absenteeism"[MeSH Terms] OR "absenteeism"[All Fields] OR performance[All
 Fields] OR "job performance"[All Fields] OR "employee efficiency"[All Fields] OR "em-
 ployee productivity"[All Fields] OR "organisational effectiveness"[All Fields] OR "organi-
 zational effectiveness"[All Fields] OR "quality of service"[All Fields] OR error[All Fields]
 OR "false alarms"[All Fields] OR "accidents"[MeSH Terms] OR "accidents"[All Fields] OR
 vigilance[All Fields] OR "accuracy rate"[All Fields] OR incident[All Fields] OR "wounds
 and injuries"[MeSH Terms] OR "injury"[All Fields] OR hazard[All Fields] OR "cogni-
 tion"[All Fields] OR "cognitive function*"[All Fields] OR "cognitive efficiency"[All Fields]

OR "cognitive impairment"[All Fields] OR "memor*"[All Fields] OR "alzheimer"[All Fields] OR "dementia"[MeSH Terms] OR "forget*"[All Fields] OR "cognitive failure"[All Fields] OR "cognitive decline"[All Fields] OR "cognitive deterioration"[All Fields] OR "reasoning"[All Fields] OR "problem solving"[All Fields] OR "inhibition"[All Fields] OR "attention"[All Fields] OR "executive function*"[All Fields] OR "processing speed"[All Fields] OR "decision making"[All Fields] OR "alertness"[All Fields] OR (("pain"[MeSH Terms] OR "pain"[All Fields] OR complaint[All Fields]) AND ("lower extremity"[MeSH Terms] OR "lower extremity"[All Fields] OR "lower extremities"[All Fields] OR "lower limb"[All Fields] OR "knee"[MeSH Terms] OR "knee"[All Fields] OR "knee joint"[MeSH Terms] OR "knee joint"[All Fields] OR "pelvis"[MeSH Terms] OR "pelvis"[All Fields] OR "neck"[MeSH Terms] OR "neck"[All Fields] OR "neck muscles"[MeSH Terms] OR "shoulder"[MeSH Terms] OR "shoulder joint"[MeSH Terms] OR "shoulder"[All Fields] OR "back"[MeSH Terms] OR "back"[All Fields] OR "low back"[All Fields] OR "hip"[MeSH Terms] OR "hip"[All Fields] OR "elbow"[MeSH Terms] OR "elbow joint"[MeSH Terms] OR "upper limb"[All Fields] OR "upper extremity"[MeSH Terms] OR "upper extremities"[All Fields] OR "arm"[MeSH Terms] OR "arm"[All Fields] OR "musculoskeletal system"[MeSH Terms] OR "trigger points"[MeSH Terms])) OR "neck pain"[MeSH Terms] OR "shoulder pain"[MeSH Terms] OR "low back pain"[MeSH Terms] OR "back pain"[MeSH Terms] OR "musculoskeletal disorders"[All Fields] OR "musculoskeletal pain"[All Fields] OR "musculoskeletal pain"[MeSH Terms] OR "muscular pain"[All Fields] OR "muscular diseases"[All Fields] OR "muscular diseases"[MeSH Terms] OR "musculoskeletal systems"[All Fields] OR "cumulative trauma disorders"[All Fields] OR "cumulative trauma disorders"[MeSH Terms] OR "tennis elbow"[MeSH Terms] OR "tennis elbow"[All Fields] OR "patellofemoral pain"[All Fields] OR "myofascial pain"[All Fields] OR "patellofemoral pain syndrome"[All Fields] OR "patellofemoral pain syndrome"[MeSH Terms] OR "cardiovascular diseases"[All Fields] OR "blood pressure"[All Fields] OR "hypertension"[MeSH Terms] OR "coronary heart disease"[All Fields] OR "coronary disease"[All Fields] OR "cerebrovascular disorders"[All Fields] OR "angina pectoris"[All Fields] OR "cardiovascular death"[All Fields] OR "heart failure"[All Fields] OR "atherosclerosis"[MeSH Terms] OR "myocardial infarction"[All Fields] OR "heart disorder"[all fields] OR "gastrointestinal diseases"[MeSH Terms] OR "gastrointestinal diseases"[All Fields] OR "irritable bowel syndrome"[MeSH Terms] OR "abdominal pain"[MeSH Terms] OR "abdominal pain"[All Fields] OR "gastritis"[MeSH Terms] OR "gastrointestinal complaints"[All Fields] OR "limb pain"[All Fields] OR "joint pain"[All Fields] OR "arthralgia"[MeSH Terms] OR "muscle tonus"[MeSH Terms] OR "muscle tonus"[All Fields] OR "muscle tension"[All Fields] OR tension[all fields] OR "psychophysiologic disorders"[MeSH Terms] OR "psychophysiologic disorders"[All Fields] OR "psychosomatic disorder"[All Fields] OR "psychosomatic complaints"[All Fields] OR "somatoform disorders"[MeSH Terms] OR "somatoform disorders"[All Fields] OR "sick building syndrome"[MeSH Terms] OR "sick building syndrome"[All Fields] OR "headache"[MeSH Terms] OR "headache"[All Fields] OR "sleep disorders"[MeSH Terms] OR "sleep disorders"[All Fields] OR "asthenia"[All Fields] OR "tinnitus"[MeSH Terms] OR "tinnitus"[All Fields] OR "hearing loss"[MeSH Terms] OR "hearing loss"[All Fields] OR "unspecific symptoms"[All Fields] OR "nonspecific symp-

toms"[All Fields] OR "nonspecific pain"[All Fields] OR discomfort[All Fields] OR "unspecific complaints"[all fields] OR "nonspecific complaints"[all fields] OR "chronic pain"[MeSH Terms] OR "chronic complaints"[all fields] OR "respiration disorders"[MeSH Terms] OR "respiratory diseases"[All Fields] OR "skin symptoms"[all fields] OR "eye pain"[MeSH Terms]) AND (worker[All Fields] OR "occupations"[MeSH Terms] OR "occupations"[All Fields] OR "occupation"[All Fields] OR occupational[All Fields] OR "employ*" [All Fields] OR "job-related"[All Fields] OR "work-related"[All Fields] OR manufacturing[All Fields] OR "production"[All Fields] OR "industry"[MeSH Terms] OR "industry"[All Fields] OR "industrial"[All Fields] OR industrialised[All Fields] OR industrialized[All Fields] OR "production line"[All Fields] OR operator[All Fields] OR user[All Fields] OR "blue-collar"[All Fields] OR "control room"[All Fields] OR "automotive industry"[All Fields]) NOT ("clinic*" [All Fields] OR "therapy"[All Fields] OR "therapeutics"[MeSH Terms] OR "driving"[All Fields] OR "automobile driving"[MeSH Terms] OR "BCI"[All Fields] OR "Brain Computer Interaction"[All Fields] OR "rehabilitation"[All Fields] OR "rehabilitation"[MeSH Terms] OR "care"[All Fields] OR "pharma*" [All Fields] OR "general surgery"[MeSH Terms] OR "surgery" OR "student" OR "students"[MeSH Terms] OR "military" OR "government" OR "government"[MeSH Terms])

9. Literatur zum Arbeitsbedingungsfaktor Mensch-Maschine-Interaktion

- Adams, J. A. (2009). Multiple robot/single human interaction: Effects on perceived workload. *Behav Inf Technol*, 28(2), 183-198.
- Alexander, T., Pfendler, C., Thun, J., & Kleiber, M. (2012). The influence of the modality of telecooperation on performance and workload. *Work*, 41 Suppl 1, 3476-3483.
- Ames, S. L., Wolffsohn, J. S., & McBrien, N. A. (2005). The development of a symptom questionnaire for assessing virtual reality viewing using a head-mounted display. *Optometry & Vision Science*, 82(3), 168-176.
- Antwarg, L., Lavie, T., Rokach, L., Shapira, B., & Meyer, J. (2013). Highlighting items as means of adaptive assistance. *Behaviour & Information Technology*, 32(8), 761-777.
- Arning, K., & Ziefle, M. (2007). Barriers of information access in small screen device applications: The relevance of user characteristics for a transgenerational design. In C. Stephanidis & M. Pieper (Eds.), *Universal access in ambient intelligence environments. 9th ERCIM Workshop on User Interfaces for All. Königswinter, Germany, September 2006. Revised papers* (S. 117-136). Berlin: Springer.
- Arning, K., & Ziefle, M. (2009). Effects of age, cognitive, and personal factors on PDA menu navigation performance. *Behaviour & Information Technology*, 28(3), 251-268.
- Baber, C., Usher, D. M., Stammers, R. B., & Taylor, R. G. (1992). Feedback requirements for automatic speech recognition in the process control room. *International Journal of Man-Machine Studies*, 37(6), 703-719.
- Backström, T., & Döös, M. (1997). Absolute and relative frequencies of automation accidents at different kinds of equipment and for different occupational groups. *Journal of Safety Research*, 28(3), 147-158.
- Bailey, N. R., & Scerbo, M. W. (2007). Automation-induced complacency for monitoring highly reliable systems: The role of task complexity, system experience, and operator trust. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 8(4), 321-348.
- Bailey, N. R., Scerbo, M. W., Freeman, F. G., Mikulka, P. J., & Scott, L. A. (2006). Comparison of a brain-based adaptive system and a manual adaptable system for invoking automation. *Human Factors*, 48(4), 693-709.
- Bainbridge, L. (1983). Ironies of automation. *Automatica*, 19(6), 775-779.
- Balogh, I., Ohlsson, K., Hansson, G.-Å., Engström, T., & Skerfving, S. (2006). Increasing the degree of automation in a production system: Consequences for the physical workload. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 36(4), 353-365.
- Bengler, K., Zimmermann, M., Bortot, D., et al. (2012). Interaction Principles for Cooperative Human-Machine Systems. *it - Information Technology Methoden und innovative Anwendungen der Informatik und Informationstechnik*, 54(4), 157-164.
- Berger, S. M., & Ludwig, T. D. (2007). Reducing warehouse employee errors using voice-assisted technology that provided immediate feedback. *Journal of Organizational Behavior Management*, 27(1), 1-31.

- Bergmann, B. (2001). Entwicklung von Störungsdiagnosekompetenz von Mitarbeitern in modernen Fertigungssystemen. In K. Landau & H. Luczak (Eds.), *Ergonomie und Organisation in der Montage*, S. 283-306. München: Hanser.
- Besnard, D., & Cacitti, L. (2005). Interface changes causing accidents. An empirical study of negative transfer. *International Journal of Human-Computer Studies*, 62(1), 105-125.
- Bokhari, R. H. (2005). The relationship between system usage and user satisfaction: a meta-analysis. *Journal of Enterprise Information Management*, 18(2), 211-234.
- Bortot, D., Ding, H., Antonopolous, A., & Bengler, K. (2012). Human motion behavior while interacting with an industrial robot. *Work*, 41, S. 1699-1707.
- Brettel, M., Friederichsen, N., Keller, M., & Rosenberg, M. (2014). How virtualization, decentralization and network building change the manufacturing landscape: An Industry 4.0 Perspective. *International Journal of Mechanical, Industrial Science and Engineering*, 8(1), 37-44.
- Brooke, J. (1996). SUS-A quick and dirty usability scale. In: Patrick W. Jordan, B. Thomas, Ian Lyall McClelland, Bernard Weerdmeester (Eds.). *Usability evaluation in industry*, S. 189-194. London, UK: Taylor & Francis.
- Cegarra, J., & Hoc, J.-M. (2008). The role of algorithm and result comprehensibility of automated scheduling on complacency. *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing*, 18(6), 603-620.
- Chao, G. T., & Kozlowski, S. W. (1986). Employee perceptions on the implementation of robotic manufacturing technology. *Journal of Applied Psychology*, 71(1), 70.
- Claussner, C., & Müller, W. (1989). Arbeitsgestaltung und Arbeitserleben in der flexiblen automatisierten Fertigung : Analyse eines Beispiels aus dem VEB Kombinat Carl Zeiss JENA. *Zeitschrift für die gesamte Hygiene und ihre Grenzgebiete*, 35(8), 464-467.
- Cohen, J. (1988). *Statistical power analysis for the behavioral sciences* (2. Auflage ed.). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Corbett, J. M. (1987). A psychological study of advanced manufacturing technology: The concept of coupling. *Behaviour & Information Technology*, 6(4), 441-453.
- Corbett, J. M., Martin, R., Wall, T. D., & Clegg, C. W. (1989). Technological coupling as a predictor of intrinsic job satisfaction: A replication study. *Journal of Organizational Behavior*, 10(1), 91-95.
- Council, N. R. (1995). *Information Technology for Manufacturing: A Research Agenda*. Washington, DC: The National Academies Press.
- Coury, B. G., & Pietras, C. M. (1989). Alphanumeric and graphic displays for dynamic process monitoring and control. *Ergonomics*, 32(11), 1373-1389.
- Das, B., Shikdar, A. A., & Winters, T. (2007). Workstation redesign for a repetitive drill press operation: A combined work design and ergonomics approach. *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing*, 17(4), 395-410.
- Davis, F. D. (1993). User acceptance of information technology: system characteristics, user perceptions and behavioral impacts. *International Journal of Man-Machine Studies*, 38(3), 475-487.

- Dekker, S. W., & Woods, D. D. (2002). MABA-MABA or abracadabra? Progress on human–automation co-ordination. *Cognition, Technology & Work*, 4(4), 240-244.
- Deuse, J., Weisner, K., Hengstebeck, A., & Busch, F. (2015). Gestaltung von Produktionssystemen im Kontext von Industrie 4.0. In A. Botthof & E. A. Hartmann (Eds.), *Zukunft der Arbeit in Industrie 4.0* (S. 99-109): Springer Berlin Heidelberg.
- Djamasbi, S., & Loiacono, E. T. (2008). Do men and women use feedback provided by their decision support systems (DSS) differently? *Decision Support Systems*, 44(4), 854-869.
- Dvash, A., & Mannheim, B. (2001). Technological coupling, job characteristics and operators' well-being as moderated by desirability of control. *Behaviour & Information Technology*, 20(3), 225-236.
- Edwards, J. R. (1989). Computer aided manufacturing and worker well-being: A review of research. *Behaviour & Information Technology*, 8(3), 157-174.
- Eliav, A., Lavie, T., Parmet, Y., Stern, H., & Edan, Y. (2011). Advanced methods for displays and remote control of robots. *Applied Ergonomics*, 42(6), 820-829.
- Endsley, M. R., & Kaber, D. B. (1999). Level of automation effects on performance, situation awareness and workload in a dynamic control task. *Ergonomics*, 42(3), 462-492.
- Flaspöler, E., Hauke, A., Pappachan, P., Reinert, D., Bleyer, T., Henke, N., . . . Beeck, R. O. D. (2009). The human-machine interface as an emerging risk: Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities.
- Fried, J., Weitman, M., & Davis, M. K. (1972). Man-machine interaction and absenteeism. *Journal of Applied Psychology*, 56(5), 428-429.
- Frieling, E., Buch, M., & Weichel, J. (2008). Ältere Beschäftigte in Gewerblich-Industriellen Tätigkeiten - Ausgewählte Ergebnisse und Handlungsfelder am Beispiel der Montage. *Wirtschaftspsychologie*, 10(3), 120-128.
- Ganschar, O., Gerlach, S., Hämmerle, M., Krause, T., & Schlund, S. (2013). *Produktionsarbeit der Zukunft – Industrie 4.0* (D. Spath Ed.). Stuttgart: Fraunhofer Verlag.
- Garde, A. H., Hansen, Å. M., Persson, R., Ohlsson, K., & Ørbæk, P. (2003). The influence of production systems on physiological responses measured in urine and saliva. *Stress and Health: Journal of the International Society for the Investigation of Stress*, 19(5), 297-306.
- Gelderman, M. (1998). The relation between user satisfaction, usage of information systems and performance. *Information & Management*, 34(1), 11-18.
- Gerace, J., & Gallimore, J. J. (2001). Evaluation of visual display techniques for assembly sequence planning. *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing*, 11(3), 213-231.
- Goldberg, D. (1978). *Manual of the general health questionnaire*: Nfer.
- Goodrich, M. A., & Schultz, A. C. (2007). Human-robot interaction: a survey. *Foundations and trends in human-computer interaction*, 1(3), 203-275.

- Grauel, B. M., Terhoeven, J. N., & Wischniewski, S. (2015). Beanspruchungsoptimaler Einsatz von Head-Mounted Displays als Arbeitsassistent. *Technische Sicherheit*, 5(1/2), 39-42.
- Hacker, W., & Sachse, P. (2014). *Allgemeine Arbeitspsychologie* (3., vollständig überarbeitete Auflage ed.). Göttingen [u.a.]: Hogrefe.
- Hart, S. G. (2006). *NASA-task load index (NASA-TLX); 20 years later*. Paper presented at the Proceedings of the human factors and ergonomics society annual meeting, San Francisco.
- Hart, S. G., & Staveland, L. E. (1988). Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of empirical and theoretical research. *Advances in psychology*, 52, 139-183.
- Heinecke, A. M. (2012). *Mensch-Computer-Interaktion*, 2., überarbeitete und erweiterte Auflage ed.: Springer.
- Hirsch-Kreinsen, H. (2014a). Wandel von Produktionsarbeit–„Industrie 4.0“. In H. Hirsch-Kreinsen & J. Weyer (Eds.), *Soziologisches Arbeitspapier*. Dortmund: Technische Universität Dortmund.
- Hirsch-Kreinsen, H. (2014b). Wandel von Produktionsarbeit - "Industrie 4.0". *WSI-Mitteilungen*, 421-429.
- Hockey, G. R. J. (1997). Compensatory control in the regulation of human performance under stress and high workload: A cognitive-energetical framework. *Biological psychology*, 45(1), 73-93.
- Hockey, G. R. J., & Maule, A. J. (1995). Unscheduled manual interventions in automated process control. *Ergonomics*, 38(12), 2504-2524.
- Holcroft, C. A., & Punnett, L. (2009). Work environment risk factors for injuries in wood processing. *Journal of Safety Research*, 40(4), 247-255.
- Hollnagel, E., & Woods, D. D. (1983). Cognitive Systems Engineering: New wine in new bottles. *International Journal of Man-Machine Studies*, 18(6), 583-600.
- Hone, K. (2006). Empathic agents to reduce user frustration: The effects of varying agent characteristics. *Interacting with Computers*, 18(2), 227-245.
- Hsu, W. H., & Wang, M. J. (2003). Physical discomfort among visual display terminal users in a semiconductor manufacturing company: a study of prevalence and relation to psychosocial and physical/ergonomic factors. *AIHA Journal : a journal for the science of occupational and environmental health and safety*, 64(2), 276-282.
- Johansson, G., Cavalini, P., & Pettersson, P. (1996). Psychobiological Reactions to Unpredictable Performance Stress in a Monotonous Situation. *Human Performance*, 9(4), 363-384.
- Kahai, S. S., Solieri, S. A., & Felo, A. J. (1998). Active involvement, familiarity, framing, and the illusion of control during decision support system use. *Decision Support Systems*, 23(2), 133-148.
- Kampmeier, J., Cucera, A., Fritzsche, L., Brau, H., Duthweiler, M., & Lang, G. K. (2007). [Potentials of monocular augmented reality technology in automobile production]. *Klinisches Monatsblatt Augenheilkunde*, 224(7), 590-596.

- Karasek, R. T., T. (1990). *Healthy work—stress, productivity and the reconstruction of working life*. US: Basic Books.
- Karwowski, W., & Rahimi, M. (1991). Worker selection of safe speed and idle condition in simulated monitoring of two industrial robots. *Ergonomics*, 34(5), 531-546.
- Kaufman, H. G. (1965). Job Design and Adjustment to Computer Automation. *Journal of Industrial Psychology*, 3(3), 61-67.
- Kemp, N. J., & Clegg, C. W. (1987). Information technology and job design: A case study on computerized numerically controlled machine tool working. *Behaviour & Information Technology*, 6(2), 109-124.
- Kuchenbrandt, D., Häring, M., Eichberg, J., & Eyssel, F. (2012). Keep an eye on the task! How gender typicality of tasks influence human—robot interactions. *Social Robotics*, 448-457.
- Kuorinka, I., Jonsson, B., Kilbom, A., Vinterberg, H., Biering-Sørensen, F., Andersson, G., & Jørgensen, K. (1987). Standardised Nordic questionnaires for the analysis of musculoskeletal symptoms. *Applied Ergonomics*, 18(3), 233-237.
- Landsbergis, P. A., Janevic, T., Rothenberg, L., Adamu, M. T., Johnson, S., & Mirer, F. E. (2013). Disability rates for cardiovascular and psychological disorders among autoworkers by job category, facility type, and facility overtime hours. *American Journal of Industrial Medicine*, 56(7), 755-764.
- Lee, E. A. (2008). *Cyber Physical Systems: Design Challenges*: EECS Department, University of California, Berkeley.
- Lee, J. D. (2006). Human factors and ergonomics in automation design. In G. Salvendy (Ed.), *Handbook of Human Factors and Ergonomics* (Third Edition), S. 1570-1596): John Wiley & Sons, Inc.
- Lee, J. D., & See, K. A. (2004). Trust in automation: Designing for appropriate reliance. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 46(1), 50-80.
- Lee, J. D., & Seppelt, B. D. (2009). Human Factors in Automation Design *Springer Handbook of Automation* (S. 417-436). Berlin, Heidelberg: Springer.
- Lee, S.-I., Lau, I. Y.-m., & Hong, Y.-y. (2011). Effects of appearance and functions on likability and perceived occupational suitability of robots. *Journal of Cognitive Engineering and Decision Making*, 5(2), 232-250.
- Li, X., Powell, M. S., & Horberry, T. (2012). Human factors in control room operations in mineral processing: Elevating control from reactive to proactive. *Journal of Cognitive Engineering and Decision Making*, 6(1), 88-111.
- Liao, H., & Chang, J. L. (2011). Human performance in control rooms of nuclear power plants: A survey study. *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries*, 21(4), 412-428.
- Lin, C. J., Yenn, T.-C., & Yang, C.-W. (2010). Evaluation of operators' performance for automation design in the fully digital control room of nuclear power plants. *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries*, 20(1), 10-23.
- Liu, S., Helfenstein, S., & Wahlstedt, A. (2008). Social psychology of persuasion applied to human—agent interaction. *Human Technology: An Interdisciplinary Journal on Humans in ICT Environments*, 4(2), 123-143.

- Lorenz, B., & Parasuraman, R. (2003). Human operator functional state in automated systems: the role of compensatory control strategies. *NATO Science Series, Sub Series I Life and Behavioural Sciences*, 355, 224-237.
- Mahmood, M. A., Burn, J. M., Gemoets, L. A., & Jacquez, C. (2000). Variables affecting information technology end-user satisfaction: A meta-analysis of the empirical literature. *International Journal of Human-Computer Studies*, 52(4), 751-771.
- Majchrzak, A., Collins, P., & Mandeville, D. (1986). A quantitative assessment of changes in work activities resulting from computer-assisted design. *Behaviour & Information Technology*, 5(3), 259-271.
- Manzey, D., Reichenbach, J., & Onnasch, L. (2012). Human performance consequences of automated decision aids: The impact of degree of automation and system experience. *Journal of Cognitive Engineering and Decision Making*, 6(1), 57-87.
- McBride, S. E., Rogers, W. A., & Fisk, A. D. (2011). Understanding the effect of workload on automation use for younger and older adults. *Human Factors*, 53(6), 672-686.
- McFadden, S. M., Vimalachandran, A., & Blackmore, E. (2004). Factors affecting performance on a target monitoring task employing an automatic tracker. *Ergonomics*, 47(3), 257-280.
- Mullarkey, S., Jackson, P. R., Wall, T. D., Wilson, J. R., & Grey-Taylor, S. M. (1997). The impact of technology characteristics and job control on worker mental health. *Journal of Organizational Behavior*, 18(5), 471-489.
- Nagamachi, M. (1986). Human factors of industrial robots and robot safety management in Japan. *Applied Ergonomics*, 17(1), 9-18.
- Nübling, M., Hasselhorn, H., Seitsamo, J., & Ilmarinen, J. (2004). *Comparing the use of the short and the long disease list in the Work Ability Index Questionnaire*. Paper presented at the Proceedings of the 2nd Symposium on Work Ability "Assessment and promotion of work ability, health and wellbeing of ageing workers", Verona, Italien.
- Odenthal, B., Mayer, M. P., Kabuß, W., & Schlick, C. M. (2014). A comparative study of head-mounted and table-mounted augmented vision systems for assembly error detection. *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries*, 24(1), 105-123.
- Ogle, R. A., Morrison, D. T., 3rd, & Carpenter, A. R. (2008). The relationship between automation complexity and operator error. *Journal of Hazardous Materials*, 159(1), 135-141.
- Onnasch, L., Wickens, C. D., Li, H., & Manzey, D. (2014). Human performance consequences of stages and levels of automation: An integrated meta-analysis. *Human Factors*, 56(3), 476-488.
- Or, C. K. L., Duffy, V. G., & Cheung, C. C. (2009). Perception of safe robot idle time in virtual reality and real industrial environments. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 39(5), 807-812.
- Parasuraman, R., Mouloua, M., & Hilburn, B. (1999). Adaptive aiding and adaptive task allocation enhance human-machine interaction. In M. W. M. Scerbo, Mustapha (Ed.), *Automation technology and human performance: Current research and trends* (pp. 119-123). Mahwah, New Jersey: Lawrence Erlbaum Associates.

- Parasuraman, R., & Riley, V. (1997). Humans and automation: Use, misuse, disuse, abuse. *Human Factors*, 39(2), 230-253.
- Parasuraman, R., Sheridan, T. B., & Wickens, C. D. (2000). A model for types and levels of human interaction with automation. *Systems, Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans, IEEE Transactions on*, 30(3), 286-297.
- Pearson, R. G., & Byars Jr, G. E. (1956). The development and validation of a checklist for measuring subjective fatigue: DTIC Document.
- Peisser, M., & Hipp, C. (2013). *Potenziale der Mensch-Technik Interaktion für die effiziente und vernetzte Produktion von Morgen* (D. Spath & A. Weisbecker Eds.). Stuttgart: Fraunhofer Verlag.
- Persson, A., Wanek, B., & Johansson, A. (2001). Passive versus active operator work in automated process control--a job design case study in a control centre. *Applied Ergonomics*, 32(5), 441-451.
- Persson, R., Garde, A. H., Hansen, Å. M., Ørbæk, P., & Ohlsson, K. (2003). The influence of production systems on self-reported arousal, sleepiness, physical exertion and fatigue-consequences of increasing mechanization. *Stress and Health: Journal of the International Society for the Investigation of Stress*, 19(3), 163-171.
- Plath, H., & Richter, P. (1978). Der BMS (I)-Erfassungsbogen-Ein Verfahren zur skalierten Erfassung erlebter Beanspruchungsfolgen. *Probleme und Ergebnisse der Psychologie*, 65, 45-85.
- Rafnsdottir, G. L., & Gudmundsdottir, M. L. (2004). New technology and its impact on well being. *WORK: A Journal of Prevention, Assessment and Rehabilitation*, 22(1), 31-39.
- Rasmussen, J. (1983). Skills, rules, and knowledge; signals, signs, and symbols, and other distinctions in human performance models. *Systems, Man and Cybernetics, IEEE Transactions on*(3), 257-266.
- Rau, R. (1996a). Einzelfallanalysen zur Bewertung von Handlungssicherheit in komplexen, automatisierten Systemen. *Zeitschrift für Arbeits- und Organisationspsychologie*, 40 (N.F.14), 75-86.
- Rau, R. (1996b). Psychophysiological assessment of human reliability in a simulated complex system. *Biological Psychology*, 42, 287-300.
- Rice, S., & Geels, K. (2010). Using system-wide trust theory to make predictions about dependence on four diagnostic aids. *Journal of General Psychology*, 137(4), 362-375.
- Roßnagel, A. (2012). *Zulässigkeit von Feuerwehr-Schutzanzügen mit Sensoren und Anforderungen an den Umgang mit personenbezogenen Daten*. Dortmund [u.a.]: BAuA.
- Röttger, S., Bali, K., & Manzey, D. (2009). Impact of automated decision aids on performance, operator behaviour and workload in a simulated supervisory control task. *Ergonomics*, 52(5), 512-523.
- Rovira, E., McGarry, K., & Parasuraman, R. (2007). Effects of imperfect automation on decision making in a simulated command and control task. *Human Factors*, 49(1), 76-87.

- Salanova, M., & Schaufeli, W. B. (2000). Exposure to information technology and its relation to burnout. *Behaviour & Information Technology*, 19(5), 385-392.
- Salvendy, G., Shodja, S., Sharit, J., & Etherton, J. (1983). A case study of the occupational stress implications of working with two different actuation/safety devices. *Applied Ergonomics*, 14(4), 291-295.
- Sanderson, P., Pipingas, A., Danieli, F., & Silberstein, R. (2003). Process monitoring and configural display design: A neuroimaging study. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 4(1-2), 151-174.
- Sauer, J., Kao, C.-S., & Wastell, D. (2012). A comparison of adaptive and adaptable automation under different levels of environmental stress. *Ergonomics*, 55(8), 840-853.
- Sauer, J., Kao, C.-S., Wastell, D., & Nickel, P. (2011). Explicit control of adaptive automation under different levels of environmental stress. *Ergonomics*, 54(8), 755-766.
- Sauer, J., Nickel, P., & Wastell, D. (2013). Designing automation for complex work environments under different levels of stress. *Applied Ergonomics*, 44(1), 119-127.
- Schaefer, F., Schäfer, R., & Boucsein, W. (2000). Auswirkungen von Prozesslaufzeit und Prozessindikatoren beim Multi-Tasking auf Arbeitsstrategie und Beanspruchung des Benutzers. [Effects of process duration and process indicators on work strategy and strain during multitasking]. *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft*, 54(3-4), 267-275.
- Sheik-Nainar, M. A., Kaber, D. B., & Chow, M.-Y. (2005). Control Gain Adaptation in Virtual Reality Mediated Human--Telerobot Interaction. *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing*, 15(3), 259-274.
- Sheridan, T. B. (2002). *Humans and automation: System design and research issues*. Hoboken, N.J.: John Wiley & Sons, Inc.
- Sheridan, T. B. (2011). Adaptive automation, level of automation, allocation authority, supervisory control, and adaptive control: Distinctions and modes of adaptation. *Systems, Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans, IEEE Transactions on*, 41(4), 662-667.
- Sheridan, T. B., & Parasuraman, R. (2005). Human-automation interaction. *Reviews of Human Factors and Ergonomics*, 1(1), 89-129.
- Shu, Q., Tu, Q., & Wang, K. (2011). The impact of computer self-efficacy and technology dependence on computer-related technostress: A social cognitive theory perspective. *International Journal of Human- Computer Interaction*, 27(10), 923-939.
- Skjerve, A. B. M., & Skraaning, G., Jr. (2004). The quality of human-automation cooperation in human-system interface for nuclear power plants. *International Journal of Human-Computer Studies*, 61(5), 649-677.
- Sonnenberg, R., & Thämelt, K. (1985). Beanspruchungserleben bei Überwachungstätigkeiten in der chemischen Industrie. [Perceived demands of monitoring tasks in the chemical industry]. *Psychologie für die Praxis*, 2, 118-125.

- Spelten, C., Schaub, K., & Landau, K. (2004). IAD–Tollbox körperliche Arbeit. *Landau, K. (Hg.): Montageprozesse gestalten: Fallbeispiele aus Ergonomie und Organisation. ergonomia Verlag, Stuttgart*, 113-149.
- Spielberger, C. D., Gorsuch, R. L., Lushene, R. E., & Press, C. P. (1970). *State-trait anxiety inventory (self-evaluation questionnaire)*: Consulting Psychologists Press.
- Stansfield, T. C., & Longenecker, C. O. (2006). The effects of goal setting and feedback on manufacturing productivity: A field experiment. *International Journal of Productivity and Performance Management*, 55(3-4), 346-358.
- Statistisches Bundesamt (2012a). Kennzahlen Verarbeitendes Gewerbe. Retrieved 21.08.2014, from <https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/Wirtschaftsbereiche/IndustrieVerarbeitendesGewerbe/Tabellen/KennzahlenVerarbeitendesGewerbe.html>
- Statistisches Bundesamt (2012b). Mikrozensus - Bevölkerung und Erwerbstätigkeit: Beruf, Ausbildung und Arbeitsbedingungen der Erwerbstätigen in Deutschland. *Fachserie 1, Reihe 4.1.2*. Retrieved 21.08.2014, from https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/Arbeitsmarkt/Erwerbstaetige/BerufArbeitsbedingungErwerbstaetigen2010412127004.pdf?__blob=publicationFile
- Tattersall, A. J., & Morgan, C. A. (1997). The function and effectiveness of dynamic task allocation. In D. Harris (Ed.), *Engineering psychology and cognitive ergonomics, Vol. 2: Job design and product design*. (pp. 247-255). Burlington, VT, US: Ashgate Publishing Co.
- Te'eni, D. (1991). Feedback as a source of control in decision support systems: An experiment with the feedback specificity. *Behaviour & Information Technology*, 10(5), 373-382.
- Tharanathan, A., Bullemer, P., Laberge, J., Reising, D. V., & McLain, R. (2012). Impact of functional and schematic overview displays on console operators' situation awareness. *Journal of Cognitive Engineering and Decision Making*, 6(2), 141-164.
- Thomaschke, R., & Haering, C. (2014). Predictivity of system delays shortens human response time. *International Journal of Human-Computer Studies*, 72(3), 358-365.
- Thum, M., Boucsein, W., Kuhmann, W., & Ray, W. J. (1995). Standardized task strain and system response times in human-computer interaction. *Ergonomics*, 38(7), 1342-1351. doi: 10.1080/00140139508925192
- Thüsing, G. (2014). *Ergonomie im Spannungsfeld von Arbeits-, Daten- und Diskriminierungsschutz. Analyse arbeitsrechtlicher Voraussetzungen zur Erfassung individual- oder gruppenbezogener Daten als Grundlage für angepasste Arbeitsplatzgestaltung in Unternehmen am Beispiel von Körpermaßen*, 1. Auflage. Dortmund: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin.
- Tielsch, R., & Hofmann, A. (1992). Zum Einfluß des Technologieniveaus und personspezifischer Merkmale auf die subjektive Beurteilung der Arbeitssituation. [Effects of the level of technology and personal characteristics on the subjective evaluation of the working situation]. *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft*, 46(2), 106-110.

- Udris, I., & Alioth, A. (1980). Fragebogen zur subjektiven Arbeitsanalyse (SAA). *Monotonie in der Industrie*. Bern: Huber, 61-68.
- Ulich, E. (2005). *Arbeitspsychologie* (6., überarbeitete und erweiterte Auflage ed.). Stuttgart: Schäffer-Poeschel.
- Van Hoe, R., Poupeye, K., Vandierendonck, A., & de Soete, G. (1990). Some effects of menu characteristics and user personality on performance with menu-driven interfaces. *Behaviour & Information Technology*, 9(1), 17-29.
- Van Laar, D., & Deshe, O. (2002). Evaluation of a visual layering methodology for colour coding control room displays. *Applied Ergonomics*, 33(4), 371-377.
- Van Laar, D., & Deshe, O. (2007). Color coding of control room displays: The psychocartography of visual layering effects. *Human Factors*, 49(3), 477-490.
- Venkatesh, V., & Davis, F. D. (2000). A theoretical extension of the technology acceptance model: Four longitudinal field studies. *Management science*, 46(2), 186-204.
- Vicente, K. J., Christoffersen, K., & Perekhita, A. (1995). Supporting operator problem solving through ecological interface design. *IEEE Transactions on Systems, Man, & Cybernetics*, 25(4), 529-545.
- Vicente, K. J., Moray, N., Lee, J. D., Rasmussen, J., Jones, B. G., Brock, R., & Djemil, T. (1996). Evaluation of a Rankine cycle display for nuclear power plant monitoring and diagnosis. *Human Factors*, 38(3), 506-521.
- Vieitez, J. C., de la Torre Carcía, A., & Vega Rodríguez, M. T. (2001). Perception of job security in a process of technological change: Its influence on psychological well-being. *Behaviour & Information Technology*, 20(3), 213-223.
- Vitense, H. S., Jacko, J. A., & Emery, V. K. (2003). Multimodal feedback: an assessment of performance and mental workload. *Ergonomics*, 46(1-3), 68-87.
- Wandke, H. (2005). Assistance in human-machine interaction: a conceptual framework and a proposal for a taxonomy. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 6(2), 129-155.
- Warr, P., Cook, J., & Wall, T. (1979). Scales for the measurement of some work attitudes and aspects of psychological well-being. *Journal of Occupational Psychology*, 52(2), 129-148.
- Watson, G., Butterfield, J., Curran, R., & Craig, C. (2010). Do dynamic work instructions provide an advantage over static instructions in a small scale assembly task? *Learning and Instruction*, 20(1), 84-93.
- Wickens, C. D., & Dixon, S. R. (2007). The benefits of imperfect diagnostic automation: A synthesis of the literature. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 8(3), 201-212.
- Wiedenmaier, S., Oehme, O., Schmidt, L., & Luczak, H. (2003). Augmented reality (AR) for assembly processes design and experimental evaluation. *International Journal of Human Computer Interaction*, 16(3), 497-514.
- Yanco, H. A., & Drury, J. L. (2004, October). Classifying human-robot interaction: an updated taxonomy. In *SMC (3)* (pp. 2841-2846).
- Zicklin, G. (1987). Numerical control machining and the issue of deskilling: An empirical view. *Work and Occupations*, 14(3), 452-466.

- Zülch, G., Grießer, K., & Reuß, S. (1992). Informationsdarstellung bei rechnerunterstützten Planungssystemen. [Representation of information in computer-aided planning systems]. *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft*, 46(3), 150-154.
- Zülch, G., & Stowasser, S. (2003). Eye tracking for evaluating industrial human-computer interfaces. In J. Hyönä, R. Radach & H. Deubel (Eds.), *The mind's eye: Cognitive and applied aspects of eye movement research* (S. 531-553). Amsterdam: North-Holland.

10. Normen- und Gesetzesverzeichnis

- Arbeitsschutzgesetz vom 7. August 1996 (BGBl. I S. 1246), das zuletzt durch Artikel 8 des Gesetzes vom 19. Oktober 2013 (BGBl. I S. 3836) geändert worden ist.
- Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV) vom 3. Februar 2015 (BGBl. I S. 49), die durch Artikel 1 der Verordnung vom 13. Juli 2015 (BGBl. I S. 1187) geändert worden ist.
- DIN ES ISO 26800:2011-11 – Ergonomie – genereller Ansatz, Prinzipien, Konzepte.
- DIN EN ISO 6385:2004 – Grundsätze der Ergonomie für die Gestaltung von Arbeitssystemen.
- DIN EN ISO 9241-110:2008-09 – Ergonomie der Mensch-System-Interaktion – Grundsätze der Dialoggestaltung.
- Produktsicherheitsgesetz (ProdSG) vom 8. November 2011 (BGBl. I S. 2178, 2179; 2012 I S. 131)
- Richtlinie 2006/42/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 17.05.2006 über Maschinen und zur Änderung der Richtlinie 95/16/EG (Neufassung), (ABl. EG Nr. L 157/24, 09.06.2006) in Kraft getreten am 29.06.2006.
- Technische Regel für Betriebssicherheit 1151 – Gefährdungen an der Schnittstelle Mensch–Arbeitsmittel, Ergonomische und menschliche Faktoren (TRBS 1151) idF vom 27.10.2007 (GMBI. Nr. 47, S. 934 ff.).

11. Tabellenverzeichnis

Tab. 1	Übersicht über die Studien zum Zusammenhang zwischen dem Merkmal Funktionsteilung und den Outcomes	22
Tab. 2	Übersicht über die Studien zum Zusammenhang zwischen dem Merkmal Schnittstelle und den Outcomes	34
Tab. 3	Übersicht über die Studien zum Zusammenhang zwischen dem Merkmal Bedienung/ Überwachung und den Outcomes	53
Tab. 4	Suchstrings EBSCO-Datenbank	87
Tab. 5	Suchstrings PubMed-Datenbank	90

12. Abbildungsverzeichnis

Abb. 1	Modell der Leistung von Operateuren in Anlehnung an Rasmussen (1983)	10
Abb. 2	Arten und Level der Automation nach Parasuraman et al. (2000)	12
Abb. 3	Umsetzungsformen des LOA	13
Abb. 4	Ein- und Ausschluss der Studien auf Titelbasis	16
Abb. 5	Ein- und Ausschluss der Studien auf Basis der Abstracts	17
Abb. 6	Anzahl der Studieneinschlüsse pro Dekade	18
Abb. 7	Übersicht über die Herkunftsländer der extrahierten Studien	19
Abb. 8	Erweitertes Modell der Funktionsteilung (vgl. Parasuraman et al., 2000)	71