

Adaptive Automation als sozialer Akteur: Anforderungen an die Gestaltung aus psychologischer und systemtheoretischer Sicht

Jessica Schwarz & Sven Fuchs

Zusammenfassung

Die raschen Fortschritte in der technologischen Entwicklung ermöglichen und erfordern es, dass die technische Komponente eines Mensch-Maschine Systems nicht mehr nur als passives Werkzeug verstanden werden sollte. Moderne technische Systeme verhalten sich zunehmend wie soziale Akteure, die aktiv mit dem Operateur interagieren, um die Systemziele zu erreichen und die Stabilität des Gesamtsystems aufrechtzuerhalten. Konzepte adaptiver Automation bieten bereits vielversprechende Optionen, um dynamisch auf Zustandsveränderungen des Operateurs zu reagieren und damit bekannten Problemen mit der Automation entgegenzuwirken. Dennoch stoßen diese Ansätze außerhalb kontrollierter Laborumgebungen an ihre Grenzen, wenn die Anforderungssituation in der realen Welt so komplex ist, dass ein symptomatisches Reagieren auf Zustandsveränderungen des Operateurs zu kurz greift.

Dieser Beitrag setzt daher bei den generellen Anforderungen an, die ein adaptives System erfüllen sollte, wenn es – im Sinne eines sozialen Akteurs – in der Lage sein soll, in aktive Wechselwirkung mit dem Operateur und der Umwelt zu treten. Zum Einen wird aus psychologischer Sicht beleuchtet, welche Anforderungen an die Nutzerzustandsdiagnose gestellt werden müssen, damit das technische System zu sozialer Interaktion befähigt werden kann. Zum Anderen werden Erkenntnisse aus der soziologischen Systemtheorie herangezogen, um weitere Implikationen und Anforderungen für die Gestaltung adaptiver Mensch-Technik-Interaktion abzuleiten.

1 Probleme bisheriger Automationskonzepte

1.1 Statische Automation

Nachdem im Zuge der Automatisierung zunächst das Ziel verfolgt wurde, so viel zu automatisieren, wie maximal möglich ist, hat sich herausgestellt, dass Automation nicht nur positive Effekte für die Leistungsfähigkeit des Mensch-Maschine-Systems mit sich bringt, sondern diese im Gegenteil sogar verschlechtern kann. Bainbridge (1983) bezeichnete dies als „*ironies of automation*“, also Widersprüchlichkeiten der Automatisierung. Sie weist darauf hin, dass Automation den Menschen zwar einerseits entlasten, unterstützen und

teilweise auch ersetzen soll, die Verantwortung jedoch weiterhin meist beim Menschen verbleibt, so dass diesem auch bei Übernahme von Aufgaben durch die Automation zumindest eine Überwachungsrolle zukommt. Die Ironie der Automation besteht nun darin, dass die Ausführung dieser Überwachungsaufgabe ebenfalls eine Beanspruchung darstellt und die Aufgaben, die trotz Automation beim Menschen verbleiben, entsprechend schwieriger sind. Insbesondere besteht eine wesentliche Herausforderung für den Menschen darin, dass er trotz seiner passiven Rolle aufmerksam bleiben und sein Situationsbewusstsein aufrecht erhalten muss, um auf etwaige Automationsfehler rechtzeitig und angemessen reagieren zu können. Weitere Probleme ergeben sich durch ein mangelndes oder übersteigertes Vertrauen in die Automation, sowie durch mögliche Fertigkeitsverluste, die als Folge der Nutzung automatisierter Systeme auftreten (Manzey, 2008).

1.2 Adaptive Automation

Mit den Konzepten der Adaptiven Automation wird das Ziel verfolgt, den zuvor genannten Automationsproblemen entgegenzuwirken, ohne auf die Vorteile von Automation verzichten zu müssen. Gegenüber der statischen Automation basieren Konzepte adaptiver Automation auf dem Prinzip einer dynamischen Umverteilung von Aufgaben zwischen Operateur und Automation (vgl. Dynamic Function Allocation, Scerbo, 1996), die beispielsweise durch eine Erhöhung oder Reduzierung des Automationsgrads vorgenommen werden kann. Als Entscheidungskriterium, wann eine Umverteilung sinnvoll ist, werden üblicherweise die über physiologische Maße erfassbare Beanspruchung des Operateurs oder seine Leistung herangezogen (vgl. z.B. Parasuraman, 1992). So kann der Operateur bei geringer Beanspruchung „im Loop“ gehalten werden, indem ihm die Ausführung der Aufgabe überlassen wird. Bei hoher Beanspruchung kann er entlastet werden, indem Aufgabenteile durch die Automation übernommen werden.

Trotz des großen Potenzials für die Bewältigung der üblichen Automationsprobleme konnten sich die Konzepte adaptiver Automation noch nicht in der Praxis etablieren. Seit einigen Jahren setzt sich die Erkenntnis durch, dass zunächst solide allgemeingültige Grundlagen geschaffen werden müssen, bevor adaptive Automation in großem Stil alltagstauglich werden kann (z.B. Feigh, Dorneich & Heyes, et al. 2012; Steihauser, Pavlas & Hancock et al. 2009). Möglicherweise sind diese Grundlagen aber nicht in der Automationsforschung und den benachbarten Disziplinen zu finden. Wie in Fuchs & Schwarz (2014, in diesem Band) dargelegt wird, verfügen derzeitige automatisierte Systeme über Eigenschaften, die über das in technischen Disziplinen verbreitete Verständnis von eingebender Intelligenz (Mensch) und Ausgabe einer Berechnung (Maschine als Werkzeug) hinausgehen.

2 Adaptive Automation als soziotechnisches System

Bei modernen technischen Systemen, insbesondere bei Vorhandensein von adaptiver Funktionalität, die es der Technik ermöglicht, den Menschen zu deuten

und dynamisch auf ihn zu reagieren, entsteht zwischen Mensch und Technik eine bidirektionale Wechselwirkung (vgl. Fuchs & Schwarz, 2014, in diesem Band), bei der zu einem gewissen Grad eine Handlungsfähigkeit (engl. „agency“) der Technik angenommen werden kann. Laut Rammert (1999) sei Technik daher „nicht mehr ein passives Objekt, sondern als ein mitwirkender ‘Agent’ zu sehen“ (S.8). Entsprechend sind die entstehenden Wechselwirkungen unter Umständen einem sozialen System ähnlicher als dem Verhältnis zwischen Mensch und Werkzeug (vgl. Fuchs et al., 2013 für eine ausführlichere Diskussion dieser These). Für derartige Konstellationen wurde vom Technikphilosophen Günter Ropohl (1979) der Begriff des soziotechnischen Systems geprägt, das die Dualität von Materialität und Sozialität auflöst, indem nicht das technische Artefakt im Mittelpunkt steht, sondern dessen Wirkung in Verknüpfung mit anderen (sozialen) Komponenten (Weyer, 2008).

Um in Bezug auf den Menschen handlungsfähig zu sein, muss die adaptive Technik zunächst Informationen über ihren Interaktionspartner erhalten, was Erfassung und Diagnose von dessen Eigenschaften und Zustand sowie externer Faktoren, die seinen Zustand beeinflussen, voraussetzt. Im folgenden Abschnitt wird daher eine ganzheitlichere Betrachtung des Nutzerzustands sowie der darauf einwirkenden Umweltfaktoren vorgeschlagen. Es wird auch beschrieben, welche Anforderungen an die Diagnosefähigkeit adaptiver automatisierter Systeme daraus abgeleitet werden können.

Wird die technische Komponente eines adaptiven Systems als sozialer Akteur verstanden, sind auch die Erkenntnisse der soziologischen Systemtheorie als potenziell relevant zu betrachten und sollten hinsichtlich ihrer Übertragbarkeit auf Mensch-Maschine-Systeme überprüft werden. In Fuchs et al. (2013) wurde daher anhand der techniksoziologischen Literatur der Frage nachgegangen, ob es überhaupt angemessen ist, von Mensch-Maschine-Systemen und Mensch-Maschine-Interaktion im soziologischen Begriffsverständnis auszugehen. Wesentliches Ergebnis dieser Analyse ist, dass (1) das Zusammenspiel zwischen Mensch und Technik den Charakter eines sozialen Systems hat, wenn die Technik von ihrem Gegenüber als Akteur wahrgenommen wird und (2) der Charakter eines sozialen Systems im Zusammenspiel zwischen Mensch und Technik auch episodisch bestehen kann. Unter dieser Maßgabe kann also ein Mensch-Maschine-System dann als soziales System verstanden werden, wenn technische Artefakte als Akteure empirisch beobachtbar und dadurch gesellschaftlich relevant werden. In Abschnitt 4 dieses Beitrags werden daher einige Kernkonzepte der soziologischen Systemtheorie vorgestellt sowie Implikationen und Anforderungen für die Gestaltung adaptiver Mensch-Technik-Interaktion abgeleitet.

3 Anforderungen an die Nutzerzustandsdiagnose

Die Zustandsdiagnose stellt in einem adaptiven System eine zentrale Komponente dar, die es ermöglichen soll, Zeitpunkt und Art einer Adaptierung zu bestimmen.

Sie bildet damit die Grundlage, um das technische System zu einer aktiven Wechselwirkung mit dem Operateur und seiner Umwelt zu befähigen. Die Umsetzung einer solchen Diagnosefunktion hat sich jedoch als nicht trivial herausgestellt. Dies zeigt sich in zahlreichen Forschungsansätzen, die zwar oft vielversprechende Laborergebnisse liefern, aber auch Probleme aufzeigen, die sich bei einer Online-Diagnose außerhalb kontrollierter Laborumgebungen ergeben können (de Greef et al., 2009; Grandt, 2004; Veltman & Jansen, 2006). Um diesen Herausforderungen zu begegnen, wird im Folgenden eine umfassendere Diagnose des Nutzerzustands und der ihn beeinflussenden Umweltfaktoren vorgeschlagen.

3.1 Multidimensionaler Nutzerzustand

Bei einer Analyse bisheriger Studien zur Nutzerzustandsdiagnose für adaptive Systeme fällt auf, dass der Nutzerzustand oft eindimensional betrachtet wird. Viele Studien zielen darauf ab, die mentale Beanspruchung zu erfassen, um auf dieser Basis Adaptierungen (z.B. durch eine Erhöhung oder Reduzierung des Automationsgrads) vornehmen zu können (z.B. Hilburn et al., 1997; Kaber et al., 2002; Parasuraman, 2003).

Die Beanspruchung ist zwar zweifellos ein wichtiger Faktor, jedoch nicht der einzige, der sich auf die menschliche Leistungsfähigkeit auswirkt. In der psychologischen Literatur finden sich weitere mentale Konstrukte, für die nachgewiesen wurde, dass sie die Leistungsfähigkeit des Menschen positiv und/oder negativ beeinflussen können. Hierzu zählen die Müdigkeit, die Motivation, der emotionale Zustand, das Situationsbewusstsein und die Aufmerksamkeit (vgl. Tab. 1). In den letzten Jahren wurden für diese Faktoren ebenfalls Diagnose- und Adaptierungsmöglichkeiten entwickelt, wie z.B. Müdigkeitssensoren im Auto, Adaptierungsstrategien, die Aufmerksamkeitsdefizite adressieren (Bosse et al., 2009), oder adaptive Systeme, die den emotionalen Zustand berücksichtigen (Hudlicka & McNeese, 2002).

Es finden sich jedoch kaum Studien, die diese Faktoren im Zusammenspiel betrachten, obwohl Unfallanalysen, wie der Flugunfallbericht zum Absturz der Air-France-Maschine AF447 (BEA, 2012) darauf hinweisen, dass bei menschlichem Versagen oft mehrere dieser Faktoren beteiligt sind und sie womöglich erst in Kombination kritisches Fehlverhalten der Operateure verursachen (vgl. Schwarz et al., 2014).

In diesem Beitrag wird daher vorgeschlagen, diese Konstrukte in die Zustandsdiagnose mit aufzunehmen und den Nutzerzustand somit multidimensional als Zusammenwirken der sechs Faktoren Beanspruchung, Müdigkeit, Motivation, Aufmerksamkeit, Situationsbewusstsein und dem emotionalen Zustand zu definieren.

Tab. 1: Auswirkungen von Faktoren des Nutzerzustands auf die Leistung

Nutzerzustand	Auswirkungen auf die Leistung	Referenz
Beanspruchung	Leistung kann sich verschlechtern, wenn die Beanspruchung zu hoch oder zu gering ist.	Hancock & Chignell (1986); Veltman & Jansen (2006)
Müdigkeit	Müdigkeit beeinträchtigt Informationsverarbeitung, Aufmerksamkeit, und Situationsbewusstsein. Sie trägt zu 20-30% der Unfälle im Transportbereich bei.	Hursh (2003); Akerstedt et al. (2003)
Motivation	Motivation kann die Leistungsfähigkeit verbessern und eine Zeit lang auch bei Schlafentzug aufrechterhalten.	Wilkinson et al. (1966)
Aufmerksamkeit	Aufmerksamkeitsdefizite (z.B. durch inattentional blindness) und Vigilanzverlust bei dauerhaften Überwachungsaufgaben beeinträchtigen die Leistung.	Mack & Rock (1998); Mackworth (1948)
Situationsbewusstsein	Ein Großteil menschlicher Fehler (bei Flugzeugunfällen 88%) ist auf Probleme mit dem Situationsbewusstsein zurückzuführen.	Endsley (1999)
Emotionaler Zustand	Emotionen mit negativer Valenz und hohem Arousal können die Aufmerksamkeit einengen und die Informationsverarbeitung beeinträchtigen.	Staal (2004)

3.2 Entwicklung eines ganzheitlichen Modells zum Nutzerzustand

In der Psychologie stellen die zuvor genannten Dimensionen des Nutzerzustands Konstrukte oder latente Variablen dar, da sie nicht unmittelbar beobachtbar sind, sondern nur mit Hilfe anderer beobachtbarer Variablen erschlossen werden können, die mit ihnen in Zusammenhang stehen. Beobachtbare Reaktionen des Nutzerzustands, wie psychophysiologische Veränderungen, können jedoch nicht immer eindeutig auf eine bestimmte Zustandsdimension zurückgeführt werden. Es empfiehlt sich daher, auch die Einflussfaktoren des Nutzerzustands zu bestimmen, um verlässlichere Zustandsdiagnosen und zielgerichtete Adaptierungen zu ermöglichen.

Anhand empirischer Ergebnisse und theoretischer Modelle zu den Dimensionen des Nutzerzustands wurde ein Modell entwickelt, das in generischer Form beschreibt, welche Faktoren Einfluss auf die Entstehung und Regulierung des Nutzerzustands nehmen, und welche Reaktionen aus dem Nutzerzustand resultieren können (vgl. Bild 1). Kernpunkt des Modells bildet der multidimensionale Nutzerzustand, der aus den sechs Zustandsdimensionen und ihren Wechselwirkungen resultiert (vgl. Bild 1, A). Die weiteren Komponenten des Modells, die mit dem Nutzerzustand in Zusammenhang stehen, werden in den folgenden

Abschnitten näher erläutert. Dabei werden auch resultierende Anforderungen an die Diagnosefähigkeit abgeleitet.

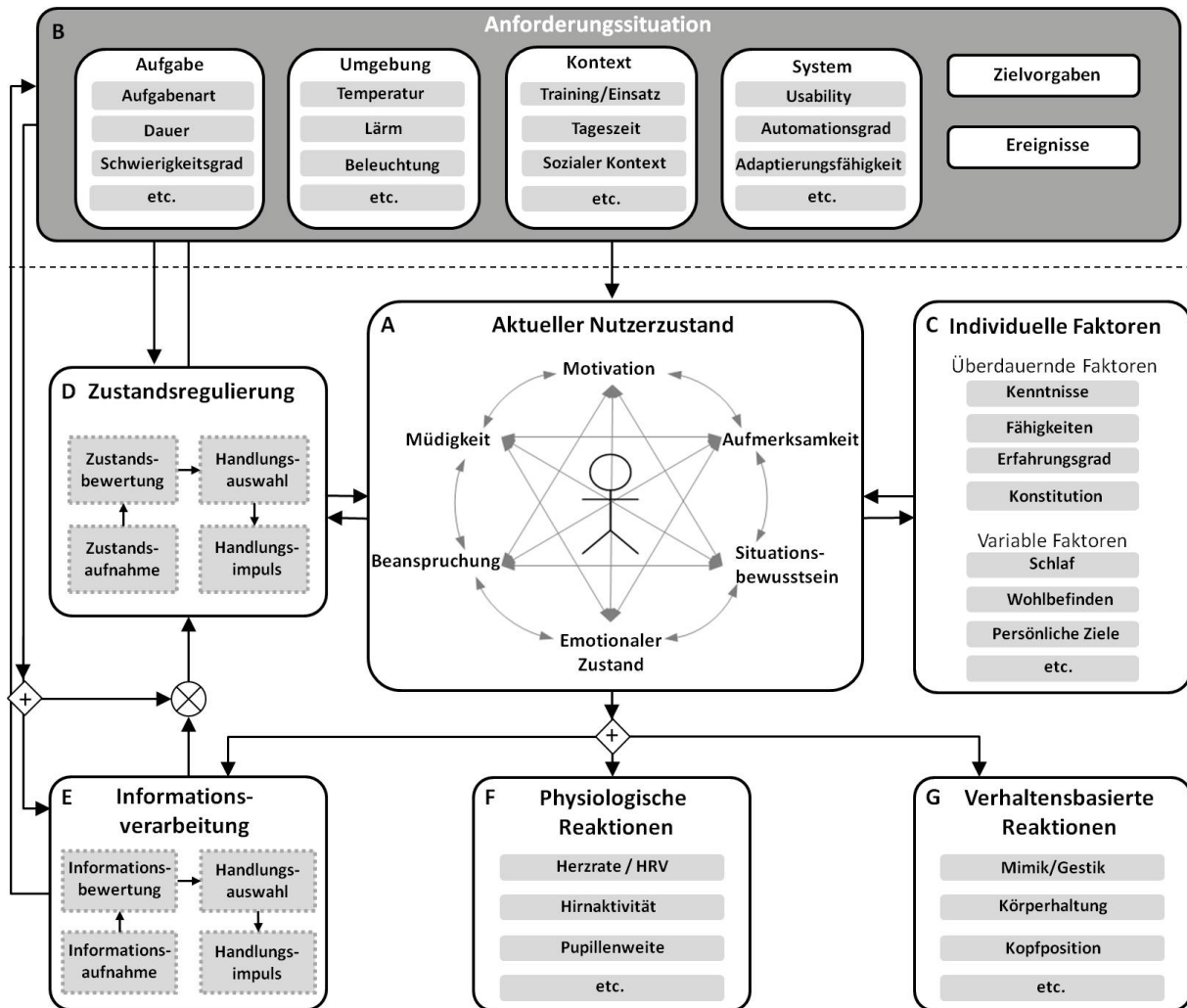


Bild 1: Generisches Modell für eine ganzheitlichere Erfassung des Nutzerzustands

3.2.1 Anforderungssituation

Die Anforderungssituation (vgl. Bild 1, B) beinhaltet alle Faktoren, die von außen auf den Menschen einwirken und die Zustandsdimensionen beeinflussen. Hierzu zählen Merkmale der Aufgabe, Umgebungsfaktoren, Kontextfaktoren, Eigenschaften des technischen Systems sowie Ereignisse und Ziele des Mensch-Maschine-Systems. Eine ähnliche, jedoch weniger differenzierte Klassifizierung findet sich auch in Feigh et al. (2012). Verschiedene Autoren fordern eine Berücksichtigung von Umweltfaktoren bei der Nutzerzustandsdiagnose (z.B. Dorneich et al., 2012; Fuchs et al., 2006; Steinhauser et al., 2009). Sie werden in Laboruntersuchungen allerdings häufig als Störeinflüsse ausgeschaltet oder konstant gehalten, was die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf die reale Welt einschränkt. An dieser Stelle seien nur einige Beispiele genannt, wie sich Umweltfaktoren auf den Nutzerzustand und die Leistungsfähigkeit auswirken können. Hinsichtlich der Umgebungsfaktoren kann z.B. Lärm die Effektivität des Kurzzeitgedächtnisses stören (Hockey, 1986). Auch für die Temperatur wurde

nachgewiesen, dass sowohl besonders hohe als auch niedrige Temperaturen bei verschiedenen kognitiven Aufgaben zu Leistungsminderungen führen (Pilcher, 2002). Außerdem können verschiedene Kontextfaktoren Einfluss darauf haben, wie der Operateur auf situative und aufgabenbezogene Anforderungen reagiert. So stellten Veltman & Jansen (2004) fest, dass die Anstrengungsbereitschaft beim Fliegen eines realen Flugzeugs deutlich höher ist als beim Training im Simulator. Die Tageszeit wirkt sich insbesondere auf die Müdigkeit aus, kann jedoch zum Beispiel bei Nachtflügen auch Einfluss auf die Wahrnehmung der Umgebungssituation und somit auf das Situationsbewusstsein nehmen (vgl. Schwarz et al., 2014). Solche Faktoren sollten in die Zustandsdiagnose einfließen, damit das adaptive System den Zustand und das Handeln des Operateurs korrekt bewerten und Problemsituationen frühzeitig erkennen kann.

3.2.2 Individuelle Faktoren

In Hinblick auf die Adaptierung ist zu bedenken, dass Personen unterschiedliche Fähigkeiten, Erfahrungen und Bewältigungsstrategien besitzen, die sich auf den Nutzerzustand und die Leistungsfähigkeit auswirken (vgl. z.B. Parasuraman et al., 1992). Neben diesen relativ überdauernden individuellen Faktoren werden Nutzerzustand und Leistungsfähigkeit jedoch auch durch zeitlich variable individuelle Faktoren (z.B. durch Wohlbefinden und Schlaf) beeinflusst (vgl. Bild 1, C). Um die Effekte, die von Aufgabenanforderungen und Stressoren aus der Umwelt hervorgerufen werden, interpretieren zu können, ist es notwendig zuvor die Tagesform über eine Baselinemessung zu bestimmen (Veltman et al., 2004).

Eine weitere Herausforderung besteht darin, dass das technische System Unterschiede im mentalen Zustand eines einzelnen Operateurs online diagnostizieren muss (so genannte Single-Trial Diagnose), um auf diese reagieren zu können. Bei Single-Trial-Analysen ist zu berücksichtigen, dass die Sensitivität physiologischer Maße interindividuell unterschiedlich sein kann. Daher wird empfohlen, für jede Person individuell die Maße auszuwählen, die für diese am aussagekräftigsten sind (vgl. Veltman & Jansen, 2003).

3.2.3 Prozesse der Zustandsregulierung und Informationsverarbeitung

Veltman & Jansen (2006) weisen darauf hin, dass der Operateur selbst ein adaptives System darstellt, das sich kontinuierlich an die Arbeitsanforderungen anpasst. Die Anstrengungsregulierung beruht den Autoren zufolge auf einem Ist-Soll-Vergleich: Liegt die gegenwärtige Leistung unter der durch die Anforderungssituation geforderten Leistung, kann der Operateur im Rahmen seiner Zustandsregulierung die Anstrengung erhöhen und damit die Intensität der Informationsverarbeitung steigern. Diese äußert sich idealerweise in einer höheren Leistung des Operateurs (vgl. Bild 1, Zusammenhänge zwischen B, D und E). In diesem Fall würde eine höhere Anstrengung aber nicht zwangsläufig bedeuten, dass der Operateur auch Unterstützung benötigt. Im Gegenteil könnte eine Erhöhung des Automationsgrads sogar bewirken, dass sich die Leistung verschlechtert, da der Operateur nicht mehr so stark in die Aufgabe involviert ist.

Hancock & Chignell (1986) sprechen in diesem Zusammenhang von einer “Zone der Adaptierbarkeit”, innerhalb derer der Mensch in der Lage ist, sich an Veränderungen der Anforderungssituation anzupassen. Wird diese Zone jedoch bei zu hoher oder zu geringer Beanspruchung über- oder unterschritten, besteht Unterstützungsbedarf.

Sowohl Veltman & Jansen (2004, 2006) als auch Hancock & Chignell (1986) beziehen die Prozesse der Selbstregulierung nur auf die Anstrengungsregulierung. Sie berücksichtigen nicht, dass Zustandsregulierungsprozesse auch in Hinblick auf die übrigen zuvor genannten Dimensionen des Nutzerzustands stattfinden können. Beispielsweise könnte bei starker Müdigkeit eine Regulation darin bestehen, dass eine Ruhepause eingelegt wird, oder dass Stimulantien, wie Koffein, eingenommen werden. In diesem Beitrag wird die menschliche Selbstregulierung daher umfassender als ein Prozess betrachtet, der das Ziel verfolgt, aversive Zustände, die das Wohlbefinden und die Leistung beeinträchtigen, zu vermeiden. Analog zum Informationsverarbeitungsprozess von Parasuraman et al. (2000) (vgl. Bild 1, E) wird der Prozess im Modell über die Stufen: Zustandsaufnahme, Zustandsbewertung, Handlungsauswahl und Handlungsausführung beschrieben (vgl. Bild 1, D). Zustandsregulierungsprozesse sollten bei der Nutzerzustandsdiagnose berücksichtigt werden, da sonst die Gefahr besteht, dass zwei adaptive Systeme kontraproduktiv zusammenwirken.

3.2.4 Physiologische und verhaltensbasierte Reaktionen

Üblicherweise werden für die Diagnose des Nutzerzustands psychophysiologische (z.B. okulomotorische Maße, kardiovaskuläre Maße, Maße zur Hirnaktivität) oder auch verhaltensbasierte Maße (z.B. Mimik, Gestik, Sitzposition) herangezogen (vgl. Bild 1, F und G). Die Vorzüge dieser Maße bestehen darin, dass sie größtenteils eine kontinuierliche Messwerterfassung und eine Diagnose von Zustandsveränderungen in Echtzeit ermöglichen, ohne den Operateur bei der Aufgabenbearbeitung zu stören (Grandt, 2004; Schwarz, 2013). Damit bieten sie entscheidende Vorteile gegenüber subjektiven Maßen, die nur episodisch erfasst werden können und ihrerseits eine Belastung darstellen können. Da viele dieser Maße den Nutzerzustand nur unspezifisch erfassen und anfällig für Störeinflüsse sind, wird empfohlen, mehrere dieser Maße im Rahmen der Nutzerzustandsdiagnose zu kombinieren (vgl. z.B. Haarmann et al., 2009).

3.2.5 Zusammenfassung der Anforderungen

Im Wesentlichen lassen sich die Anforderungen, die sich aus der ganzheitlicheren Betrachtung des Nutzerzustands für die Gestaltung adaptiver Systeme ergeben, wie folgt zusammenfassen:

- Bei der Diagnose des Nutzerzustands sollten neben der Beanspruchung auch die Müdigkeit, der emotionale Zustand, die Motivation, die Aufmerksamkeit und das Situationsbewusstsein erfasst und bewertet werden.
- In die Zustandsdiagnose sollten Merkmale der Anforderungssituation sowie überdauernde und variable individuelle Faktoren einbezogen werden.

- Der Einsatz produktiver Selbstregulierungsstrategien sollte durch die Adaptierung nicht unterbunden werden.
- Physiologische und verhaltensbasierte Reaktionen sollten personenspezifisch und in Zusammenhang mit Merkmalen der Anforderungssituation und individuellen Faktoren ausgewertet und interpretiert werden.

4 Erkenntnisse aus der soziologischen Systemtheorie

Durch enge Kopplung der menschlichen Kognition mit der Maschine und die Implementierung von Rückkopplungsschleifen in beide Richtungen entsteht ein System mit zwei Elementen – das Mensch-Maschine-System. Systeme, die über eine adaptive technische Funktionalität verfügen, bilden einen Spezialfall, da sie einerseits autonom handeln und dadurch einen gewissen Grad an Handlungsträgerschaft erlangen und andererseits auf den Menschen gerichtete Aktionen durchführen können, die eine soziale Ausprägung aufweisen (vgl. Abschnitt 2). Die konsequente Betrachtung und Implementierung adaptiver Technik als Akteurähnliches Element eines sozialen Systems eröffnet weitreichende Möglichkeiten, birgt aber auch neue Voraussetzungen und Herausforderungen in Bezug auf die Gestaltung dieser „hybriden soziotechnischen Konstellation“ (Rammert & Schulz-Schaeffer, 2002, S. 17).

In diesem Abschnitt geben wir daher einen Überblick über einige Kernkonzepte der soziologischen Systemtheorie und leiten Implikationen und Anforderungen für die Gestaltung von Adaptivität in Mensch-Maschine-Systemen ab.

4.1 Systembildung durch Interaktion und Differenzierung

In seiner Allgemeinen Systemtheorie definiert Ludwig von Bertalanffy ein System bewusst einfach als „*Menge von Elementen, zwischen denen Wechselbeziehungen bestehen*“ (von Bertalanffy, 1969, S.38). Für einen externen Beobachter entsteht aus diesen Beziehungen ein vereinigtes Ganzes, welches das System von seiner Umwelt unterscheidet. Diese Strukturordnung erlaubt uns den Umgang mit der prinzipiell unendlichen Komplexität der uns umgebenden Welt.

In der Soziologie wurde der Systemgedanke populär, um das gemeinsame Wirken von Gruppen und Gesellschaften zu analysieren und zu beschreiben (z.B. Simmel, 1908). Der Soziologe Georg Simmel beschreibt schon 1900 die Einheit eines sozialen Körpers als „gegenseitig ausgeübte Attraktions- und Kohäsionskräfte seiner Individuen“, ein „rein dynamischen Verhältnis unter diesen“ (S. 67). Angelehnt daran postulierte Luhmann (1986), dass weder Menschen noch deren Handlungen soziale Systeme bilden, sondern die Kommunikation zwischen ihnen. Dabei entstehe durch Beobachtung, Versuch und Irrtum im Laufe der Zeit eine emergente Ordnung, die Luhmann als soziales System bezeichnet.

Erkenntnisse für die Gestaltung adaptiver Mensch-Maschine-Interaktion:

- Ein Mensch-Maschine-System, in dem die Maschine soziale Qualitäten aufweist, ist also durch die gegenseitigen Interaktionen und Kommunikationen zwischen Mensch und Maschine charakterisiert.
- Die emergente Ordnung eines sozialen Systems entsteht durch Beobachtung, Versuch und Irrtum in der Kommunikation zwischen den Akteuren. Die adaptive Funktionalität sollte daher über diese Eigenschaften verfügen.

4.2 Parsons' AGIL-Schema

Nach Talcott Parsons' Strukturfunktionaler Systemtheorie, die von ihm auch auf soziale Systeme übertragen wurde (Parsons, 1951), muss jedes System zur Existenzerhaltung vier wesentliche Voraussetzungen erfüllen. Nach seinem AGIL-Schema muss ein System die Fähigkeiten haben,

1. sich an veränderliche äußere Bedingungen anzupassen (Adaptation),
2. Ziele zu definieren und zu verfolgen (Goal Attainment),
3. Elemente einzugliedern (Integration),
4. grundlegende Strukturen aufrechtzuerhalten (Latency).

Zwar wird Parsons Anwendung des Schemas zur Erklärung gesellschaftlicher Phänomene von Soziologen häufig als zu statisch kritisiert (z.B. Dahrendorf, 1961), auf der strukturellen Ebene sind die wesentlichen Kernpunkte jedoch kompatibel mit anderen Theorien und wurden, unter anderem von Luhmann (z.B. 1984, 1986), produktiv aufgegriffen. So deckt sich die Forderung nach Adaptierung und Zielstreben mit dem System-Streben nach Gleichgewicht (von Bertalanffy, 1969) und die Forderung nach Integration ist vereinbar mit der Systemeigenschaft der Dekomponierbarkeit und der Definition eines Systems durch die Interaktionen zwischen seinen Elementen. Auch die Forderung nach Latenz ist vor dem Hintergrund der Differenzierung von seiner Umwelt nachvollziehbar: Wäre ein System nicht über grundlegende Strukturen definiert, wäre eine Unterscheidung zwischen System und der ungeordneten Umwelt nur schwer möglich.

Auch für adaptive Mensch-Maschine-Systeme könnten diese vier Grundfähigkeiten daher maßgeblich sein. Insbesondere die Fähigkeit zur Zielverfolgung soll an dieser Stelle herausgestellt werden. Das Mensch-Maschine-System sollte ein globales Systemziel verfolgen, das allen Elementen bekannt sein muss und deren Handeln prägt. Da jedes Element für sich ein Untersystem darstellt, werden daneben noch lokale Ziele bestehen, die beispielsweise in der Erzeugung oder Beibehaltung bestimmter Zustände bestehen können. Haben die Akteure eines adaptiven Systems inkongruente individuelle Ziele, könnten die Interaktionen anstelle von Produktivität nur der Konfliktlösung dienen (vgl. Arciszewski et al., 2009).

Erkenntnisse für die Gestaltung adaptiver Mensch-Maschine-Interaktion:

- Die Adaptierung muss in der Lage sein, sich an veränderliche äußere Bedingungen anzupassen. Dafür müssen diese erfasst und analysiert werden.
- Den Akteuren müssen Kontext, Umwelt, Ziele sowie Intentionen und Handlungen des Gegenübers bekannt sein, damit es effektiv mit ihm zusammenarbeiten kann (vgl auch Sherry & Ritter, 2002).
- Ein globales Systemziel sollte existieren und den beteiligten Akteuren bekannt sein. Das mögliche Vorhandensein Akteur-eigener lokaler Ziele muss berücksichtigt werden, auch falls diese nicht externalisiert werden.

4.3 Dekomponierbarkeit

Die Elemente eines Systems sind wiederum Systeme, die gegenseitig in ihrer jeweiligen Umwelt existieren. Ebenso können sich Systeme zu Elementen anderer Systeme entwickeln (de Zeeuw, 2005) und sind somit durch die Entstehung eines übergeordneten Gesamtsystems hierarchisch konstruiert. Komplexe Systeme bestehen aus stabilen Subsystemen, von denen jedes nahezu unabhängig von den internen Prozessen der jeweils anderen Subsysteme operiert, also lediglich durch deren In- und Outputs beeinflusst wird (Bolz, 2005). Diese Dekomponierbarkeit lässt laut Bolz zwei Schlüsse für die Systemanalyse zu: (1) Man kann das Verhalten des Gesamtsystems beobachten, ohne auf seine Details einzugehen, und (2) man kann das (kurzfristige) Verhalten von Subsystemen beschreiben, ohne auf deren Zusammenspiel im Gesamtsystem einzugehen. Jedoch verhält sich ein Gesamtsystem aufgrund möglicher emergenter Effekte – also solcher Effekte, die erst durch das Zusammenwirken der Systemkomponenten entstehen – anders, als es die isolierte Betrachtung seiner Komponenten schließen lässt. Es mag verlockend sein, einen gewissen Effekt (z.B. einen kognitiven Problemzustand) zu isolieren, um ihn durch eine Adaptivitätsstrategie zu adressieren. In Kombination mit anderen Interaktionen können emergente Effekte jedoch komplexe Phänomene hervorrufen, die auf der Untersystemebene nicht vorhersehbar waren. Komplexe Phänomene müssen daher zwingend aus der Gesamtheit ihrer Beziehungen zueinander geklärt werden.

Erkenntnisse für die Gestaltung adaptiver Mensch-Maschine-Interaktion:

- Das Gesamtsystem wird sich aufgrund möglicher emergenter Effekte anders verhalten, als sich aus der isolierten Betrachtung seiner Komponenten schließen lässt.
- Wenn Adaptivitätsstrategien für bestimmte Zustände in Isolierung entwickelt werden, besteht Gefahr, dass sie auch nur in Isolierung funktionieren.

4.4 Komplexität und Selektion

Komplexität bezeichnet die Tiefendimensionen eines Systems (Willke, 2005). Ausgehend von einer Leitdifferenz, die das System von seiner Umwelt unter-

scheidet, kann ein Beobachter beliebige Folgedifferenzen selektieren, um Formen, Elemente und Strukturen zu bestimmen. Die Komplexität eines Systems wird also nur durch Selektivitäten der Formbildung fassbar und bestimmbar (Selektionszwang). Selektion ist daher ein für Komplexitätsreduktion und Verständnis nötiger Prozess. In der Folge kann aber nur ein Ausschnitt der Komplexität auf Basis der getätigten Selektionen wahrgenommen werden.

Die Folge dieser Entscheidungsfreiheit bei der Selektion wird als Kontingenz bezeichnet. Kontingenz entsteht durch die Entscheidung für die tiefere Verfolgung einer Differenz statt einer anderen und ist nach Willke (2005) die „horizontale Dimension möglicher Parallelwelten“ (S. 314), die durch andere Selektionen entstehen könnten. Da jede Selektionsoperation den zugänglichen Komplexitätsausschnitt einschränkt, geht Kontingenz laut Luhmann (1984) stets mit dem Risiko einher, unvereinbare Positionen zwischen den Akteuren zu erzeugen, die die Interaktion und Systembildung erschweren. Gleichzeitig ist Kontingenz aber ebenso Ursache und Bedingung für die Entstehung und Aufrechterhaltung sozialer Systeme, da die durch Kontingenz bedingten Kommunikationen und Interaktionen das soziale System im Luhmann'schen Verständnis erst definieren. Nach Rammert & Schulz-Schaeffer (2002) liegen nämlich Interaktionen nur dann vor, „wenn die Kontingenz möglicher Abläufe nicht auf einen einzigen reduziert ist, sondern sich je nach Situation und Pfadabhängigkeit unterschiedliche erfolgreiche Verläufe ergeben können“ (S.15).

Erkenntnisse für die Gestaltung adaptiver Mensch-Maschine-Interaktion:

- Allein durch die prinzipielle Offenheit menschlicher Einstellungen und Handlungen ist das emergente Verhalten eines Mensch-Maschine-Systems nie deterministisch, sondern unbestimmbar komplex und unberechenbar.
- Adaptivität kann stets nur einen selektierten Bereich des menschlichen Aktionsspektrums antizipieren. So besteht bei einem kontingent handelnden Gegenüber das Risiko der Unvereinbarkeit von Zuständen und Positionen. Der Verlauf einer adaptiven Interaktion muss daher laufend kontrolliert und nötigenfalls korrigiert werden. Um Widersprüche aufzulösen, müssen Konflikte erkannt und Entscheidungsregeln angewandt werden.
- Adaptivitätsstrategien müssen in der Lage sein, sich und das System in geeigneter Weise dynamisch zu rekonfigurieren, um auch im Falle unerwarteter Parameter resilient zu agieren. Adaptivität muss folglich auch sich selbst adaptieren können.

4.5 Satisficing und iterative Kontrolle

Ein System, das zu komplex ist, um verstanden zu werden, kann trotzdem kontrollierbar sein (Ashby, 1958), aber in Anbetracht von Komplexität und Kontingenz scheint es nicht möglich zu sein, für jedes Problem eine spezifische Adaptierungsstrategie zu erstellen, die stets Wirkung zeigt. Wenn es aber nicht

möglich ist, eine einzige beste Lösung zu generieren, muss man sich mit einer Lösung zufriedengeben, die gut genug ist. Das Streben nach einer genügend guten Lösung wird als Satisficing (Simon, 1969) bezeichnet und trägt der Tatsache Rechnung, dass es trotz prinzipiell unendlicher Komplexität möglich ist, mit Hilfe der Selektivität akzeptable Lösungen zu generieren. Statt ein unmögliches Verstehen der Gesamtheit zu versuchen, sollten adaptive Systeme daher erreichte Zustände mit gewünschten Zuständen des Systems vergleichen und im Rahmen von Kontrollstrategien entweder die Variablen der Umwelt oder interne Variablen manipulieren, um eine iterative Korrektur zu versuchen (vgl. Baecker, 2005, S.59).

Erkenntnisse für die Gestaltung adaptiver Mensch-Maschine-Interaktion:

- Adaptierungen können stets nur eine vorübergehende Adressierung vorübergehender Lagen sein. Ziel der Adaptierung kann nicht sein, einen fixen, stabilen Zustand herzustellen.
- Adaptierung allein auf Basis einer Zustandsänderung oder der Unter- oder Überschreitung eines Grenzwertes ist unzureichend. Der Verlauf einer adaptiven Interaktion muss stets kontrolliert und ggf. korrigiert werden.
- Das Adaptivitätsmanagement sollte in der Lage sein, Abweichungen von seinen Erwartungen zu detektieren und die Erwartungen zu korrigieren.

5 Ausblick

In diesem Beitrag wurde dargestellt, welche Anforderungen sich aus psychologischer und systemtheoretischer Sicht für die Gestaltung adaptiver Automation ergeben, wenn die technische Komponente – wie in diesem Beitrag dargelegt – als sozialer Akteur verstanden wird. Diese Erkenntnisse stellen die Grundlage für weitere Forschungsaktivitäten der Autoren dar. So ist geplant, in einem Diagnoseexperiment verschiedene Dimensionen des Nutzerzustands und ihre Wechselwirkungen im Zusammenhang mit Merkmalen der Anforderungssituation und individuellen Faktoren zu erfassen und zu bewerten. In Hinblick auf die systemtheoretischen Erkenntnisse ist geplant, diese zunächst zu generischen Gestaltungsprinzipien zu verdichten und Möglichkeiten der experimentellen Umsetzung zu erarbeiten.

Literatur

- Akerstedt, T., Mollard, R., Samel, A., Simons, M. & Spencer, M. (2003). *The role of EU FTL legislation in reducing cumulative fatigue in civil aviation*. Beitrag zum ETSC-Meeting am 19. Februar 2003. Online verfügbar unter: <https://www.eurocockpit.be/sites/default/files/Akerstedt-Mollard-Samel-Simons-Spencer-2003.pdf> (letzter Zugriff: 21.08.2014).
- Arciszewski, H.F.R., de Greef, T.E. & van Delft, J.H. (2009). Adaptive Automation in a Naval Combat Management System, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics* 39 (6), 1188–1199.
- Ashby, W.R. (1958). Requisite Variety and its implications for the control of complex systems. *Cybernetica*, 1, 83-99.

- Baecker, D. (2005). Die Umwelt als Element des Systems. In D. Baecker (Hrsg.), *Schlüsselwerke der Systemtheorie* (S. 55-63). Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften.
- Bainbridge, L. (1983). Ironies of Automation. *Automatica*, 19 (6), 775–779.
- BEA (2012). *Final Report on the accident on 1st June 2009 to the Airbus A330-203 registered F-GZCP operated by Air France flight AF447 Rio de Janeiro – Paris*. Paris: Bureau d'Enquêtes et d'Analyses pour la sécurité de l'aviation civile. Online verfügbar unter: <http://www.bea.aero/docspa/2009/f-cp090601.en/pdf/f-cp090601.en.pdf> (letzter Zugriff: 21.08.2014).
- Bolz, N. (2005). Bausteine zu einer Designwissenschaft. In D. Baecker, (Hrsg.), *Schlüsselwerke der Systemtheorie* (S. 129-143). Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften.
- Bosse, T., van Lambalgen, R., van Maanen, P.-P. & Treur, J. (2009). Automated Visual Attention Manipulation. In L. Paletta & J.K. Tsotsos (Eds.), *Attention in Cognitive Systems LNCS (LNAI)*, 5395 (pp 257–272). Heidelberg: Springer.
- Dahrendorf, R.G. (1961). *Gesellschaft und Freiheit. Zur soziologischen Analyse der Gegenwart*. München: Piper.
- de Greef, T., Lafeber, H., van Oostendorp, H. & Lindenberg, J. (2009). Eye Movement as Indicators of Mental Workload. In *Proceedings of Augmented Cognition, HCII 2009, LNAI 5638* (pp 219–228).
- de Zeeuw, G. (2005). Auf der Suche nach Wissen. In D. Baecker (Hrsg.), *Schlüsselwerke der Systemtheorie* (S. 145-171). Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften.
- Dorneich, M.C., Ververs, P.M., Mathan, S., Whitlow, S. & Hayes, C.C. (2012). Considering Etiquette in the Design of an Adaptive System, *Journal of Cognitive Engineering and Decision Making*, 6 (2), 243–265.
- Endsley, M.R.R. (1999). Situation awareness and human error: Designing to support human performance. In *Proceedings of the High Consequence Systems Surety Conference*. Albuquerque, NM: Sandia National Laboratory.
- Feigh, K.M., Dorneich, M.C. & Hayes, C.C. (2012). Toward a Characterization of Adaptive Systems: A Framework for Researchers and System Designers. *Human Factors*, 54 (6), 1008–1024.
- Fuchs, S., Hale, K.S., Stanney, K.M., Berka, C., Levendowski, D. & Juhnke, J. (2006). Physiological Sensors Cannot Effectively Drive System Mitigation Alone. In D.D. Schmorow, K.M. Stanney & L.M. Reeves (Eds.), *Foundations of Augmented Cognition* (2nd Ed., pp 193–200). Arlington: Strategic Analysis, Inc.
- Fuchs, S., Schwarz, J. & Eihof, A. (2013). *Adaptive Mensch-Maschine-Interaktion: System-Theoretische Anforderungen, Datenerfassung und -auswertung* (Zwischenbericht zur Studie E/E4BX/DA005/CF215). Wachtberg: Fraunhofer FKIE.
- Fuchs, S. & Schwarz, J. (2014). Vom passiven Werkzeug zum sozialen Akteur: Ansatz einer ganzheitlicheren Betrachtung adaptiver automatisierter Systeme. In M. Grandt & S. Schmerwitz (Hrsg.), *Der Mensch zwischen Automatisierung, Kompetenz und Verantwortung* (DGLR-Bericht 2014-01, S. 285-288). Bonn: Deutsche Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt e.V..
- Grandt, M. (2004). *Erfassung und Bewertung der mentalen Beanspruchung mittels psychophysiologischer Messverfahren* (FKIE-Bericht Nr. 88). Wachtberg: Forschungsinstitut für Kommunikation, Informationsverarbeitung und Ergonomie.
- Haarmann, A., Boucsein, W. & Schaefer, F. (2009). Combining electrodermal responses and cardiovascular measures for probing adaptive automation during simulated flight. *Applied ergonomics*, 40(6), 1026–40.

- Hancock, P.A. & Chignell, M.H. (1986). Input information requirements for an adaptive human-machine system. In *Proceedings of the Tenth Department of Defense Conference on Psychology*, 10, 493-498.
- Hilburn, B., Jorna, P.G., Byrne, E.A. & Parasuraman, R. (1997). The effect of adaptive air traffic control (ATC) decision aiding on controller mental workload. In: M. Mouloua & J. Koonce (Eds.), *Human Automation Interaction: Research and Practice*, (pp 84–91). Mahwah, NJ: Erlbaum.
- Hockey, G.R.J. (1986). Changes in operator efficiency as function of effects of environmental stress, fatigue and circadian rhythm. In K. Boff, L. Kaufman & J.P. Thomas (Eds.), *Handbook of Perception and Human Performance (Chapter 44)*. New York: John Wiley and Sons.
- Hudlicka, E. & McNeese, D. (2002). Assessment of user affective and belief states for interface adaptation: Application to an Air Force pilot task. *User Modeling and User-Adapted Interaction*, 12, 1-47.
- Hursh, S. R. (2003). *Fatigue and Alertness Management using the SAFTE model and FAST*. Präsentation vom 11. September 2003. Online verfügbar unter: <http://www.nps.navy.mil/orfacpag/resumePages/projects/Fatigue/HurshSAFTEFAST.pdf> (letzter Zugriff: 21.08.2014)
- Kaber, D.B., Prinzel, L.J. III., Wright, M.C. & Clamann, M.P. (2002). Workload-Matched Adaptive Automation Support of Air Traffic Controller Information Processing Stages. (Technical Report NASA/TP-2002-211932). Hampton, VA: NASA.
- Luhmann, N. (1984). *Soziale Systeme*. Frankfurt/M.: Suhrkamp.
- Luhmann, N. (1986). The autopoiesis of social systems. In F. Greyer, J. v. d. Zouwen (Eds.), *Sociocybernetic paradoxes. Observation, control and evolution of self-steering systems* (S. 172-192). London: SAGE Publications.
- Mack, A. & Rock, I. (1998). *Inattentional Blindness*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Mackworth, N.H. (1948). The breakdown of vigilance during prolonged visual search. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 1, 6-21.
- Manzey, D. (2008). Systemgestaltung und Automatisierung. In P. Badke-Schaub, G. Hofinger & K. Lauche (Hrsg.), *Human Factors. Psychologie sicheren Handelns in Risikobranchen* (S. 333-352). Heidelberg: Springer.
- Parasuraman, R. (2003). Neuroergonomics: research and practice, *Theoretical Issues in Ergonomic Science*, 4, 5–20.
- Parasuraman, R., Bahri, T., Deaton, J.E., Morrison, J.G. & Barnes, M. (1992). *Theory and design of adaptive automation in aviation systems*. Progress Report (NAWCADWAR-92033-60 under Contract No. N62269-90-0022-5931). Warminster, PA: Naval Air Warfare Center – Aircraft Division.
- Parasuraman, R., Sheridan, T.B. & Wickens, C.D. (2000). A model of types and levels of human interaction with automation. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics – Part A: Systems and Humans*, 30, 286–297.
- Parsons, T. (1951). *The social system*. Glencoe, IL, USA: Free Press.
- Pilcher, J.J., Nadler, E. & Busch, C. (2002). Effects of hot and cold temperature exposure on performance: a meta-analytic review. *Ergonomics*, 45(10), 682–698.
- Rammert, W. (1999). Technik. Stichwort für eine Enzyklopädie. In *Technical University Technology Studies Working Papers*. Berlin: Technische Universität Berlin, Institut für Soziologie, Fachgebiet Techniksoziologie.

- Rammert, W. & Schulz-Schaeffer, I. (2002). Technik und Handeln – Wenn soziales Handeln sich auf menschliches Verhalten und technische Abläufe verteilt. In W. Rammert & I. Schulz-Schaeffer (Hrsg.), *Können Maschinen handeln? Soziologische Beiträge zum Verhältnis von Mensch und Technik* (S. 11-64). Frankfurt/M.: Campus.
- Ropohl, G. (1979). *Eine Systemtheorie der Technik. Zur Grundlegung der allgemeinen Technologie*. München: Hanser.
- Scerbo, M.W. (1996). Theoretical perspectives on adaptive automation. In R. Parasuraman & M. Mouloua (Eds.), *Automation and human performance: Theory and application* (pp 37-63). Mahwah, NJ: Erlbaum.
- Schwarz, J. (2013). Benutzerzustandserfassung zur Regelung Kognitiver Assistenz an Bord von Marineschiffen. In D. Söffker (Hrsg.), *2. Interdisziplinärer Workshop Kognitive Systeme: Mensch, Teams, Systeme und Automaten*. Duisburg-Essen: DuEPublico (Online-Publikation).
- Schwarz, J., Fuchs, S. & Flemisch, F. (2014). Towards a more holistic view on user state assessment in adaptive human-computer interaction. To be presented at the *IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, San Diego (Oct 5-8).
- Sherry, R.R. & Ritter, F.E. (2002). *Dynamic Task Allocation: Issues for Implementing Adaptive Intelligent Automation*. Technical Report No. ACS 2002-2. The Pennsylvania State University.
- Simmel, G. (1900). *Philosophie des Geldes*. Leipzig: Verlag von Duncker & Humblot.
- Simmel, G. (1908). *Soziologie. Untersuchungen über die Formen der Vergesellschaftung*. Leipzig: Verlag von Duncker & Humblot.
- Simon, H. (1969). *The Science of the Artificial* (3. Auflage 1996). Cambridge, MA: MIT Press.
- Staal, M.A. (2004). *Stress, cognition, and human performance: A literature review and conceptual framework*. Hanover, MD: National Aeronautics & Space Administration.
- Steinhauser, N.B., Pavlas, D. & Hancock, P.A. (2009). Design Principles for Adaptive Automation and Aiding. *Ergonomics in Design*, 17(2), 6–10.
- Veltman, H., Hockey, B., Schlegel, R.E., Fraser, W. & Burov, A. (2004). Introduction. In NATO Research & Technology Organisation (Ed.), *Operator Functional State Assessment* (NATO-RTO-TR-HFM-104). Neuilly-sur-Seine: NATO-RTO.
- Veltman, J.A. & Jansen, C. (2003). Differentiation of Mental Effort measures: Consequences for Adaptive Automation. In G.R.J. Hockey, A.W.K. Gaillard & O. Burov (Eds.), *Operator Functional State* (pp 249-259). Amsterdam: IOS Press.
- Veltman, H.J.A. & Jansen, C. (2004). The adaptive operator. In D.A. Vincenzi, M. Mouloua & P.A. Hancock (Eds.), *Human performance, situation awareness, and automation: Current research and trends, Vol II* (S. 7-10). Mahwah, NJ: Erlbaum
- Veltman, J.A. & Jansen, C. (2006). *The role of operator state assessment in adaptive automation* (TNO Report TNO-DV3 2005 A245). Soesterberg, Netherlands: TNO.
- von Bertalanffy, L. (1969). *General System Theory – Foundations, Development, Applications*. New York, NY: Braziller.
- Weyer, J. (2008). *Techniksoziologie – Genese, Gestaltung und Steuerung sozio-technischer Systeme*. Weinheim und München: Juventa.
- Willke, H. (2005). Komplexität als Formprinzip. In D. Baecker (Hrsg.), *Schlüsselwerke der Systemtheorie* (S. 303-323). Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften.
- Wilkinson, R.T., Edwards, R.S. & Haines, E. (1966). Performance following a night of reduced sleep. *Psychonomic Science*, 5, 471-472.

Autoren

Dipl.-Psych. J. Schwarz
S. Fuchs, M. Sc.

Fraunhofer Institut für Kommunikation,
Informationsverarbeitung und Ergonomie (FKIE)
Abteilung Mensch-Maschine-Systeme
Wachtberg

Kontakt: jessica.schwarz@fkie.fraunhofer.de

