

Benutzergerechte Automatisierung – Grundlagen und Realisierungskonzepte

Karl-Friedrich Kraiss, Aachen



Univ.-Prof. Dr.-Ing. Karl-Friedrich Kraiss ist Inhaber des Lehrstuhls für Technische Informatik in der Fakultät für Elektrotechnik der Rheinisch Westfälischen Technischen Hochschule Aachen. Hauptarbeitsgebiete: Mensch-Maschine Kommunikation sowie erfahrungsgestützte und lernfähige Systeme.

Adresse: Lehrstuhl für Technische Informatik, RWTH Aachen, Ahornstr. 55, D-52074 Aachen, Email: kraiss@techninfo.rwth-aachen.de

Die Unfallstatistiken großtechnischer Systeme haben sich in den letzten Jahrzehnten ständig verbessert, auch die Anzahl der Unfälle mit Todesfolge im Luft- und Straßenverkehr sinkt bei wachsendem Verkehrsaufkommen stetig. Der relative Anteil sogenannter menschlicher Fehler an der Restfehlerquote nimmt dagegen in allen Bereichen zu. Es besteht somit Anlaß, die Rolle des Menschen in derartigen Systemen neu zu überdenken, da sich hier ein Ansatzpunkt bietet, die Zuverlässigkeit komplexer Systeme weiter zu erhöhen.

Da der Benutzer auf lange Sicht nicht durch Rechner eliminiert werden kann und soll, untersucht dieser Beitrag die Erfordernisse einer benutzergerechten Automatisierung. Nach einer einleitenden Analyse grundlegender Systemfunktionen, der Automatisierungsgrenzen und der Leistungsdefizite des Menschen werden mögliche Formen und Strategien der Funktionsteilung zwischen Automatik und Benutzer hergeleitet. Für die Automaten werden benutzerbezogene Gestaltungsrichtlinien definiert. Zur Unterstützung manueller Funktionen bietet sich der Einsatz von Assistenzfunktionen an, für die eine allgemeine Systemarchitektur und ein Klassifikationsschema vorgestellt werden.

Human Centered Automation – Foundations and Implementation Concepts

The accident statistics of large technical systems have been steadily improving during the last decades. Also the number of fatal accidents in air and surface transportation is decreasing in spite of increased traffic. However, the relative share of so called human errors is increasing across application areas. Hence, for a further increase in reliability, the functional integration of humans in such systems must be reconsidered.

Since the user, on the long run, will and should not be eliminated by computers this paper reviews basic requirements of a human centered automation. Following an analysis of generic system functions, automation limits, and human deficiencies, possible structures and strategies for a suitable human-machine function allo-

cation are derived. Human factors requirements for automated functions are defined. Manual functions are supported by assistance functions, for which a general system architecture and a classification scheme are presented.

1 Einleitung

Das Zusammenwirken von Mensch und Technik ist heute in fast allen Bereichen des Lebens eine Selbstverständlichkeit. Ohne Anspruch auf Vollständigkeit werden hier einige Anwendungsgebiete für derartige soziotechnische Systeme genannt:

- Prozeßleitung von großtechnischen Anlagen
 - Verkehrsleitsysteme
 - Verfahrenstechnische Systeme
 - Energieerzeugungssysteme
 - Kommunikationssysteme
- Navigation, Bahnführung und Stabilisierung von Verkehrsmitteln
 - Kraftfahrzeuge
 - Flugzeuge
 - Schienenfahrzeuge
 - Schiffe
- Spezialtechnische Anwendungen
 - Medizintechnische Anlagen
 - Wehrtechnische Systeme
 - Weltraumsysteme
 - Unterwassersysteme
 - Robotersysteme

Motivation für die Automatisierung derartiger Systeme ist zumeist, daß eine Funktion maschinell billiger, schneller, genauer oder zuverlässiger erledigt werden kann. Häufig wird auch unterstellt, daß Automatisierung die Handhabung komplexer Systeme vereinfacht. Nach dem heutigen Stand der Technik sind jedoch nicht alle anfallenden Funktionen automatisierbar, so daß eine Vollautomatisierung nicht möglich ist. Gerade schwierige Teilaufgaben bleiben zur manuellen Bearbeitung übrig [1].

Die Herausnahme von Teilaufgaben aus einem Arbeitsablauf verändert die Arbeitsbedingungen. Die Annahme, daß Nutzer im Rahmen ihrer Adaptationsfähigkeit mit diesen aus dem Zusammenhang gerissenen Aufgabenresten fertig werden, trifft häufig nicht zu. Tatsächlich ist zu beobachten, daß technikzentriert konzipierte Systeme das Entstehen menschlicher Fehler begünstigen.

Im Rahmen einer menschengerechten Funktionsteilung zwischen Mensch und Maschine ist deshalb unter sozialen, psychologischen, arbeitswissenschaftlichen und legalen Aspekten zu prüfen, ob sich eine Automatisierungsmaßnahme mit der Leistungsfähigkeit, den Leistungsgrenzen und Bedürfnissen der Benutzer verträglich gestalten läßt. Die technische Automatisierbarkeit allein reicht dabei als Kriterium nicht aus. Wiener und Curry bemerken dazu: „The question is not whether a function can be automated, but whether it should be, due to various human factors questions that are raised“ [2].

In diesem Beitrag werden zunächst die in komplexen Mensch-Maschine Systemen anfallenden Funktionen identifiziert. Es folgt eine Untersuchung der Möglichkeiten der Leistungserbringung durch Mensch und Maschine. Auf dieser Grundlage werden anschließend Prinzipien für eine menschengerechte Funktionsteilung zwischen Mensch und Maschine hergeleitet und deren Realisierbarkeit untersucht.

2 Funktionen in komplexen Mensch – Maschine Systemen

Die in komplexen, hierarchisch strukturierten Systemen anfallenden Funktionen betreffen:

- Kommunikation
- Situationserfassung und -bewertung
- Planung
- Lenkung
- Stabilisierung
- Systemmanagement

Diese Funktionen lassen sich wie folgt charakterisieren (vergleiche auch Bild 1):

Kommunikation

Kommunikation besteht im Aufbau von Kommunikationsverbindungen sowie im Senden und Empfangen

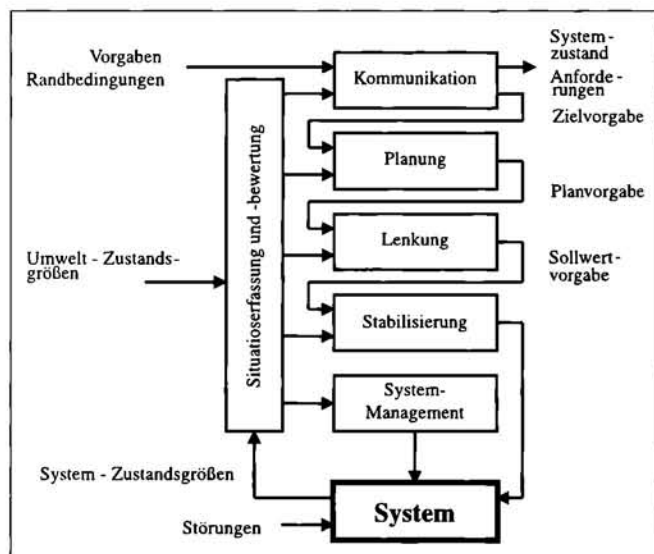


Bild 1: Funktionen in komplexen Systemen.

von Nachrichten. Die Kommunikation mit der Außenwelt betrifft die Entgegennahme von Anforderungen und Randbedingungen aus übergeordneten oder nebenläufigen Prozessen. Hieraus leitet sich die durchzuführende Mission als Zielvorgabe ab. Meldungen über den Systemzustand und gegebenenfalls über weitere Anforderungen werden weitergegeben. Lokale Kommunikation betrifft den verbalen Informationsaustausch mit Crew-Mitgliedern.

Situationserfassung und -bewertung

Sinnvolle System-Eingriffe setzen voraus, daß ein Benutzer die jeweils vorliegende Situation korrekt wahrnimmt und bewertet. Der Mensch erfaßt hierzu Zustandsgrößen von System und Umwelt direkt über seine natürlichen Sinne oder indirekt über technische Sensoren und Anzeigen. Die erhobenen Daten sind häufig unsicher. Für Automaten muß die Situation ebenfalls über technische Sensoren erfaßt werden. Die Einschätzung, ob alle für eine korrekte Situationserfassung relevanten und notwendigen Symptome vorliegen, ist für den Menschen ebenso schwierig, wie die Identifikation aller möglicherweise vorliegenden Situationen.

Die Bewertung der vorliegenden Symptome erlaubt die Zuordnung einer Situation zu einer möglichen Diagnose. Dies geschieht entweder durch eine entscheidungstheoretische Bewertung möglicher Diagnosen oder, erfahrungsgestützt, durch den Vergleich mit gespeicherten Symptom/Diagnose-Zuordnungen.

Planung

Planen bezeichnet einen mehrstufigen Prozeß, bei dem aus einer Anzahl von Möglichkeiten des Handelns diejenige ausgewählt werden muß, die zum Ziel (zu Lösung) führt. Die Planungsaufgabe besteht darin, Wege von einem festgestellten Ausgangszustand über verschiedene Zwischenschritte zu einem Zielzustand zu finden. Die Menge aller möglichen Lösungswege wird als Planungsraum bezeichnet. Aus dem Planungsraum wird durch geeignete Suchverfahren derjenige Weg ausgewählt, der nach einem vorgegebenen Kriterium optimal ist. Der ausgewählte Plan dient als Vorgabe für die nachfolgende Lenkungebene.

Lenkung

Durch Vergleich der Planvorgabe mit der aktuell vorliegenden Situation erfolgt eine Überprüfung des Sollablaufs. Bei festgestellten Abweichungen von einem vorgegebenen Plan werden der Stabilisierungsebene Sollgrößen für eine korrekte Durchführung vorgegeben.

Stabilisierung

Auf dieser Ebene erfolgt ein Vergleich einzelner Zustandsgrößen mit den Sollvorgaben der Lenkungebene. Festgestellte, meist hochfrequente Abweichungen von einer Sollgröße werden ausgeglichen.

System-Management

Basierend auf der Erfassung relevanter Systemzustandsgrößen über Anzeigen hat das Systemmanagement

ment zwei Aufgaben. Das *Ressourcenmanagement* betrifft den Einsatz und die Versorgung von Untersystemen (z.B. das Ein- oder Ausschalten von Autopiloten oder die Rekonfiguration von Teilsystemen). Das *Fehlermanagement* dient der Sicherstellung der Betriebsfähigkeit durch Funktionsersatz (technische Redundanz), unter Umständen gefolgt von einer Fehlerkompensation und Reparatur. Fehlermanagement kann auch in der Überführung eines defekten Systems in eine sichere Rückfallebene bestehen (z.B. Abschalten eines Kraftwerks).

Bei beiden Managementbereichen besteht die Aufgabe in der Auswahl und Durchführung geeigneter Maßnahmen in einer festgestellten Situation. Zu einer bewerteten Situation ist eine von verschiedenen möglichen Aktionen zu wählen, entweder durch eine entscheidungstheoretische Bewertung oder durch den Vergleich mit gespeicherten, in früheren Fällen erfolgreich angewendeten Situations-Aktions-Zuordnungen. Aktionen können dabei die Durchführung von Einzelhandlungen aber auch die Abarbeitung komplexer Prozeduren bedeuten.

3 Möglichkeiten der Leistungserbringung in Mensch – Maschine Systemen

Funktionen in Mensch-Maschine Systemen müssen maschinell oder manuell erbracht werden. Die Automatisierung von Funktionen wird einerseits durch die verfügbare Technik, andererseits durch nichttechnische Faktoren begrenzt. Dem manuellen Betrieb sind Grenzen durch die Leistungsfähigkeit des Menschen gesetzt [3]; [4].

3.1 Automatisierungsgrenzen

Grundsätzlich eignen sich alle Aufgaben die sich präzise definieren lassen dazu, automatisiert zu wer-

Tabelle 1: Automatisierbarkeit vs. System-Eigenschaften (nach [5]).

| | Luftverkehr | Straßenverkehr | Prozeßleit- technik |
|---|--|--|---|
| Situations- erfassung | Sensor-Infra- struktur und Außensicht | Außensicht | Sensor- Infrastruktur |
| Wartungs- zustand | gut | heterogen | gut |
| Ausstattung | homogen | heterogen | homogen |
| Benutzer: Ausbildung Qualifikation Tauglichkeit Trainings- zustand | hervorragend hervorragend laufend geprüft gut | heterogen gut – schlecht einmal geprüft unbekannt | hervorragend gut laufend geprüft gut |
| Rückfallebene | keine | ja, anhalten | ja, abfahren |
| Koordination | zentral | dezentral | zentral |
| Automatisie- rungsgrad | hoch | gering | sehr hoch |

den. Obwohl die Entwicklung der Sensor- und Automatisierungstechnik in den letzten Jahren dramatische Fortschritte gemacht hat, ist die erreichbare Leistungsfähigkeit in Teilbereichen jedoch noch nicht ausreichend, um den Menschen zu ersetzen. Dies betrifft vor allem:

- **Mängel der automatischen Situationserfassung**
Die Situationserfassung scheitert in Teilbereichen an fehlender Sensorik (z.B. Straßenverkehr), an unsicherer Sensorik (z.B. Veränderungen, Driften) oder an der zu großen Variabilität der Zustandsgrößen (z.B. Wetter).
- **Unflexibilität der verfügbaren Automaten**
Heutige Automaten sind besonders geeignet für den Einsatz unter deterministischen Randbedingungen. In unbekannter, veränderlicher Umgebung sind die verfügbaren Planungsverfahren häufig unzureichend für einen autonomen Betrieb. Die hierfür erforderliche Lern- und Adaptationsfähigkeit ist erst in Ansätzen verfügbar.
- **Unzureichende Software-Zuverlässigkeit**
Während sich die Zuverlässigkeit von Hardware durch Redundanz steigern läßt, kann die Fehlerfreiheit komplexer Software nicht in allen Funktionen garantiert werden (In fertigen, ausgetesteten Programmen ist mit einem Fehler pro 5 000 Zeilen zu rechnen).

Automatisierung ist also mit der heute verfügbaren Technik technisch nicht in allen Bereichen möglich. Dies trifft insbesondere zu für die Situationserfassung über optische Sensoren und für komplexe Planungs- und Managementaufgaben in variabler, unbekannter Umgebung. Demgegenüber sind Stabilisierung und Lenkung in heutigen Systemen vollständig automatisierbar.

Der realisierbare Automatisierungsgrad wird weiterhin durch die Eigenschaften eines Systems und dessen Benutzer bestimmt. So sind geschlossene Systeme mit zentraler Koordination, gutem Wartungszustand des Geräts und gutausgebildetem Personal weitergehend automatisierbar als Systeme, die diese Eigenschaften nicht aufweisen (Tabelle 1).

- **Nichttechnische Automatisierungsgrenzen**
Auch technisch verfügbare Automaten werden häufig nicht eingesetzt. Mögliche Gründe sind:
 - mangelnde Wirtschaftlichkeit
 - fehlende soziologische Akzeptanz (z.B. Arbeitsplatzvernichtung)
 - fehlende psychologische Akzeptanz
 - ungeklärte Haftungsfragen bei vollautomatischem Betrieb oder Eingriff

Besonders Haftungsfragen stellen sich häufig als entscheidendes Hindernis für die Einführung von Automaten (z.B. im Straßenverkehr) heraus.

3.2 Grenzen manueller Leistungserbringung

Die Leistungen des Menschen bei Mustererkennungs- und Bildverarbeitungsaufgaben lassen sich technisch nur in Teilbereichen erzielen. Dies gilt auch

Tabelle 2: Systemfunktionen, zugeordnete kognitive Arbeitsebenen, einige Leistungsdefizite des Menschen und Unterstützungserfordernisse bei verschiedenen Aufgaben.

| Funktion | Kognitive Arbeitsebene | Ausgewählte Leistungsdefizite des Menschen bei der Aufgabenerfüllung | Unterstützungserfordernisse |
|---------------------|--|--|--|
| Situationserfassung | wissensbasiert/ regelbasiert/ fertigkeitsbasiert | Voreingenommenheit (Bias), Tunnelsehen, Leistungsvariabilität | Selektion relevanter Information |
| Situationsbewertung | wissensbasiert/ regelbasiert/ fertigkeitsbasiert | Inkonsistente Situationsbewertung, irrationales Entscheidungsverhalten | Bewertung von Informationen |
| Planung | wissensbasiert/ regelbasiert | unvollständiges/inkorrektes mentales Modell (Problemraum), begrenzter Planungshorizont, suboptimale Lösungssuche im Problemraum, kognitive Fixierung | automatischer Planentwurf, Bewertung von Plänen |
| Lenkung | regelbasiert | Gedächtnisgrenzen, Fehler/Versehen | Einhaltung der Planvorgabe |
| Stabilisierung | fertigkeitsbasiert | Leistungsvariabilität, Reaktionszeiten, Fehlerreaktionen, Kraftentfaltung | Linearisierung/Entkopplung manueller Eingaben, Servoverstärker, Automatische Regler |
| System-Management | wissensbasiert/ regelbasiert | unvollständiges/inkorrektes mentales Modell (Problemraum), inkonsistente Situationsbewertung, irrationales Entscheidungsverhalten, Fehler/Versehen, kognitive Fixierung, Übungsverlust | Bewertung von Fehlerfolgen, Fehlerkompensation, Vorschläge für Ressourceneinsatz |

für Entscheidungsprozesse unter unvollständigen Randbedingungen. Dabei wenden Menschen, anders als Automaten, kein rationales Verhalten an. Vielmehr werden intuitiv Lösungen gesucht, die einem Satisfaktionskriterium genügen oder es erfolgt die Substitution des Entscheidungsprozesses durch Assoziation mit einer schon erlebten Situation, für die eine Lösung durch früher gemachte Erfahrungen bereits im Gedächtnis vorliegt. Dieser Lösungsansatz ist nur auf der Basis eines zutreffenden mentalen Modells des Systemverhaltens möglich.

Neben den genannten hervorragenden Leistungsfähigkeiten zeigt der Mensch als Systemkomponente gravierende Leistungsmängel, wie u.a.:

- Gedächtnisgrenzen
- fehlendes/fehlerhaftes mentales Modell
- begrenzte Zuverlässigkeit
- mangelnde Leistungskonstanz bei Dauerbetrieb
- Voreingenommenheit und Fixierung
- mangelhafte mentale Arithmetik
- begrenzte Bandbreite bei manuellen Reaktionen

Weiterhin ist zu beachten, daß der Mensch, abhängig von Trainingszustand und gestellten Anforderungen, auf verschiedenen kognitiven Arbeitsebenen operiert. Rasmussen schlägt für zielgerichtete sensumotorische Tätigkeiten des Menschen eine Einteilung in drei Klassen vor [6]:

- wissensbasiertes Verhalten (knowledge based behaviour)
- regelbasiertes Verhalten (rule-based behaviour)
- fertigkeitsbasiertes Verhalten (skill-based behaviour)

Komplexe Anforderungssituationen, die den Menschen unvorbereitet treffen und ihm bisher untrainierte Handlungsweisen abverlangen, führen zu wissensbasiertem Verhalten. Regelbasiertes Verhalten liegt vor, wenn die situativen Gegebenheiten bei früheren Gelegenheiten schon häufiger aufgetreten sind und der Bediener bereits über ein Repertoire gespeicherter Verhaltensmuster verfügt, dessen nach subjektiver Erfahrung effektivste Variante abgerufen wird. Fertigkeitsbasiertes Verhalten schließlich ist durch reflexartige Reiz-Reaktionsmechanismen charakterisiert, die in einem mehr oder weniger lang dauernden Lernprozeß eintrainiert wurden und nun in einem selbsttätigen, nicht mehr bewußte Kontrolle erfordernden stetigen Fluß ablaufen.

Tabelle 2 zeigt, auf welchen kognitiven Arbeitsebenen die Funktionen in Mensch-Maschine Systemen typisch abgearbeitet werden. Weiterhin sind in der Tabelle einige Leistungsdefizite des Menschen genannt, welche die Erfüllung bestimmter Aufgaben systematisch beeinträchtigen. Schließlich sind in der letzten Spalte aufgabenspezifische Unterstützungserfordernisse zur Kompensation der genannten Leistungsdefizite angegeben.

4 Grundlagen der Funktionsteilung Mensch – Maschine

Dieser Abschnitt definiert zunächst den minimalen und maximalen Automatisierungsgrad AG eines Systems und beschreibt dann Überlegungen, die zu einem ergonomisch optimierten Automatisierungsgrad führen.

4.1 Freiheitsgrade bei der Funktionsteilung Mensch – Maschine

Gegenstand der Funktionsteilung können grundsätzlich nur diejenigen Funktionen sein, die von Mensch und Maschine gleichermaßen mit der erforderlichen Leistung erbracht werden können (Bereich $F_{\text{manuell/auto}}$ in Bild 2). Von einer Funktionsteilung ausgeschlossen sind somit Funktionen, die nur durch den Menschen ($F_{\text{manuell mu\ss}}$) bzw. nur durch eine Automatik zu erledigen sind ($F_{\text{auto mu\ss}}$).

Anhand von Bild 2 läßt sich der Automatisierungsgrad AG eines Mensch-Maschine Systems definieren als:

$$AG = \frac{F_{\text{auto}}}{F_{\text{ges}}}$$

Der maximal erreichbare Automatisierungsgrad AG_{max} ist erreicht, wenn nur die personellen Mußfunktionen $F_{\text{manuell mu\ss}}$ von Hand erledigt werden:

$$AG_{\text{max}} = \frac{F_{\text{ges}} - F_{\text{manuell mu\ss}}}{F_{\text{ges}}}$$

Um den Menschen mit seinen Leistungsdefiziten weitestgehend zu eliminieren, werden hier möglichst viele Funktionen automatisiert. Der Benutzer ist im

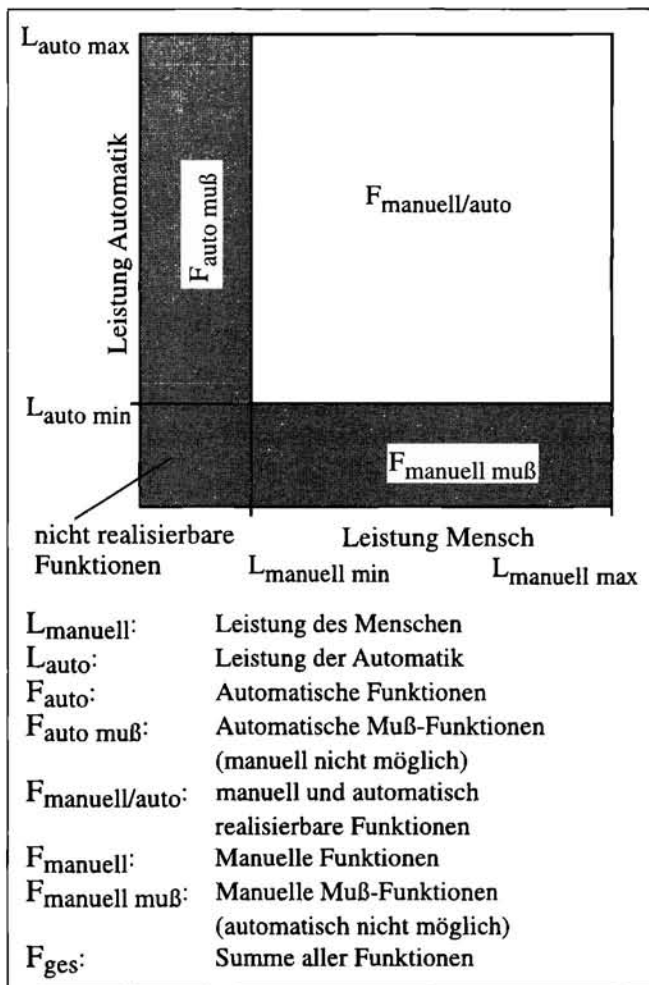


Bild 2: Mögliche Leistungserbringung durch Mensch und Rechner in Mensch-Maschine Systemen (modifiziert nach [7]).

Normalfall passiver Überwacher (human out-of-the-loop). Dies resultiert einerseits in informatorischer Überforderung, andererseits in Langeweile, Kritiklosigkeit und Übungsverlust. Nur im Ausnahmefall ist der Benutzer aktiver Manager, Planer und Regler [8].

Die Automatisierung verhindert das Lernen aus Fehlern und damit den Aufbau eines Handlungsrepertoires, da der Bediener nicht aktiv mit dem System interagiert [9]. Die verantwortliche manuelle Übernahme unter Zeitdruck ist schwierig. Wegen Übungs- und Wissensmängeln ist zweifelhaft, ob eine Bedienperson im Ernstfall die ihr zugedachte Autorität der letzten Entscheidung überhaupt qualifiziert ausüben kann.

Entsprechend ergibt sich der geringste erreichbare Automatisierungsgrad AG_{min} , wenn nur die Mußfunktionen $F_{\text{auto mu\ss}}$ automatisiert sind:

$$AG_{\text{min}} = \frac{F_{\text{auto mu\ss}}}{F_{\text{ges}}}$$

Um die ständige Einbindung des Benutzers in das Prozeßgeschehen sicherzustellen (human in-the-loop), werden bei diesem Konzept möglichst viele Funktionen manuell ausgeführt. Dies kann zu Ermüdung durch exzessive Arbeitsbelastung und zur Überlastung sensorischer, kognitiver und motorischer Ressourcen führen.

4.2 Benutzerzentrierte Funktionsteilung Mensch – Maschine

Für eine menschengerechte Automatisierung ist eine Symbiose zwischen Mensch und Automatik anzustreben, welche die Vorzüge von Automatik- und Handbetrieb verbindet und gleichzeitig deren Nachteile kompensiert [10]. Wegen der genannten Nachteile der extremen Automatisierungsgrade AG_{min} und AG_{max} ist zu vermuten, daß ein optimaler Automatisierungsgrad AG_{opt} ein Kompromiß zwischen beiden sein muß. Die Vorgehensweise zur Ermittlung dieser benutzerzentrierten Funktionsteilung zwischen Mensch und Maschine umfaßt die folgenden fünf Schritte [11]:

• Grobidentifikation manueller Mußfunktionen

Grobe Anhaltspunkte für die Funktionsteilung ergeben sich aus sogenannten MABA-MABA-Listen (man better at, machine better at), wie sie z.B. Fitts angegeben hat [12]. Personelle Mußfunktionen sind z.B. Wahrnehmungs- und Kognitionsleistungen, während es sich bei maschinellen Mußfunktionen um Kraftverstärkung und Stabilisierung handeln kann.

• Feinanpassung an konkrete Benutzerfähigkeiten und -eigenschaften

Die oben genannte grobe Funktionszuweisung ist nicht ausreichend, vielmehr ist eine Feinanpassung an die tatsächlichen späteren Systembenutzer durchzuführen, deren spezifischen Eigenschaften, Neigungen und Fähigkeiten zu berücksichtigen sind [13]. Die dem Menschen durch natürliche Veranlagung gesetzten Leistungsgrenzen können zwar durch Motivation, Training und Selektion beeinflusst werden. Diese Maßnahmen sind jedoch auf bestimmte Anwendungsbereiche mit ausgewählten Be-

nutzerpopulationen begrenzt. Es ist im allgemeinen ökonomischer die Hardware oder Software eines Systems zu ändern, als ungeeignete Benutzer für eine vorgegebene Aufgabe zu trainieren.

● Berücksichtigung äußerer Randbedingungen

Die Funktionsteilung hat auch vorgegebene Randbedingungen zu berücksichtigen wie:

- Ökonomische und zeitliche Vorgaben
- Technische Vorgaben (z.B. der Zwang zur Verwendung von Beistellteilen)
- Organisatorische Vorgaben (z.B. die Berücksichtigung eingefahrener Arbeitsabläufe)
- Einhaltung von Arbeitsplatzvorschriften
- Qualifikation des verfügbaren Personals bzw. der erforderliche Trainingsaufwand

Häufig wird nicht beachtet, daß ein Benutzer im Rahmen des beruflichen Alltags nicht mit einer Aufgabe, sondern mit mehreren Aufgaben an verschiedenen Systemen konfrontiert ist. Forderungen nach Automatisierung können durch Überlastung bei anderen Aufgaben motiviert sein. Prozeduren in verschiedenen Teilaufgaben sollten konsistent ablaufen und damit einen Lerntransfer ermöglichen.

● Prüfung der manuellen Restaufgaben auf kohärente Arbeitsstruktur

Um den optimalen Automatisierungsgrad zu identifizieren ist, nach erfolgter Funktionsteilung, zu prüfen, ob die manuell zu erledigenden Restaufgaben geeignet sind, dem Benutzer ein hinreichendes Verständnis des Gesamtsystems und dessen Verhalten zu vermitteln. Die Automatisierung von Teilaufgaben darf die logische Struktur einer Tätigkeit nicht zerstören. Aufgaben, die zur Entwicklung des mentalen Modells erforderlich sind, sollten nicht automatisiert werden. Diese Forderungen können dazu führen, daß eigentlich automatisierbare Aufgaben manuell erledigt werden müssen.

Kennzeichnend für eine logisch zusammenhängende Arbeitsstruktur sind [14]:

- Ganzheitlichkeit,
- Durchschaubarkeit und
- Rückmeldungen

Ganzheitlichkeit bedeutet, daß eine Tätigkeit die Vorbereitung (Aufgabenanalyse), Ausführung (Informationsbeschaffung, -prüfung und Anwendung) und Ergebniskontrolle umfaßt. Die Bedeutung und der Stellenwert der Aufgabe im Gesamtkontext muß erkennbar sein. **Durchschaubarkeit** bedeutet, daß dem Benutzer die technischen Bedingungen und Zusammenhänge, die organisatorischen Strukturen und die Folgen eines Eingreifens in den Arbeitsprozeß klar sein müssen. Die Forderung nach **Rückmeldungen** besagt, daß im Verlauf einer Tätigkeit klar wird, ob die gewählten Arbeitsschritte zu dem gewünschten Ergebnis führen (Ablauf- und Ergebnismeldung). Beides ermöglicht eine laufende Handlungskorrektur und Zielüberprüfung.

● Prüfung der resultierenden Arbeitsbelastung

Der durch das beschriebene Verfahren identifizierte optimierte Automatisierungsgrad AG_{opt} ist schließlich dahingehend zu überprüfen, ob die daraus resul-

tierende Arbeitsbelastung eines Benutzers sich auch bei Berücksichtigung von Leistungsminderung durch Langzeiteinsatz auf einem akzeptablen Niveau bewegt. Dies kann, angepaßt an situative Erfordernisse, auch zu einer zeitvariablen Funktionsteilung führen [15]. Falls dieses Hauptkriterium der Funktionsteilung nicht erfüllt ist, muß eine bessere Lösung durch die Umverteilung von Funktionen gesucht werden [16].

5 Realisierungskonzepte für die Funktionsteilung Mensch – Maschine

Entsprechend dem gewählten Automatisierungsgrad übernehmen in teilautomatisierten Systemen einerseits Operateure Aufgaben (Handbetrieb), andererseits treten Automatikfunktionen in Aktion. Die einzelnen Beiträge zum resultierenden Arbeitsergebnis müssen zeitlich und inhaltlich koordiniert werden. Hierbei sind serielle (trading mode) und parallele (sharing mode) Konzepte denkbar [17]. Bei serieller Organisation ergänzen sich Mensch und Automatik, indem sie nacheinander unterschiedliche Teilfunktionen erledigen (Bild 3a). Bei der nicht redundanten parallelen Organisation erledigen Mensch und Rechner gleichzeitig *unterschiedliche* Funktionen (Bild 3b).

Bei redundant-paralleler Funktionsteilung bearbeiten dagegen Mensch und Rechner die *gleiche* Aufgabe (Bild 3c). Abweichungen, die sich beim Vergleich manuell und automatisch erzielter Ergebnisse ergeben, sind Grundlage für die Unterstützung des Handbetriebs. Entsprechend wird die von einem nach Bild 3c eingesetzten Rechner erbrachte Leistung als Assistenzfunktion bezeichnet.

Bezüglich des unterschiedlichen Rechnereinsatzes nach Bild 3 bietet sich ein Vergleich mit der Betriebsorganisation an. Dort unterscheidet man den Personaleinsatz in Linien- und Stabsfunktionen. Linienpositionen sind durch eigene Entscheidungsbefugnis ausgezeichnet, während Stabsstellen lediglich beratende

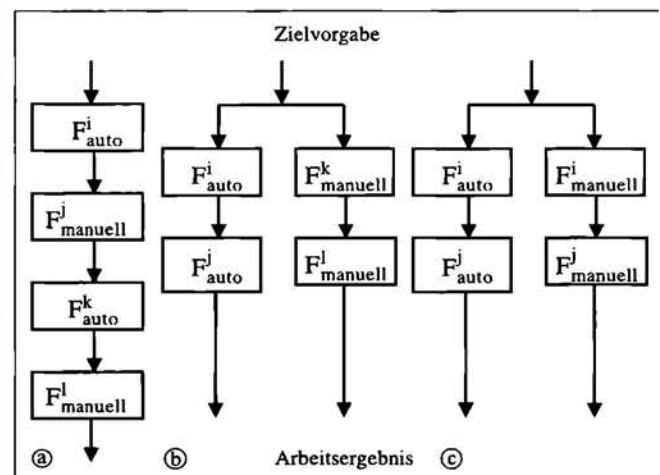


Bild 3: Formen der Arbeitsteilung zwischen Mensch und Automatik: a) seriell; b) parallel; c) redundant-parallel (F_i^{auto} : Funktion i automatisch ausgeführt; $F_j^{manuell}$: Funktion j manuell ausgeführt).

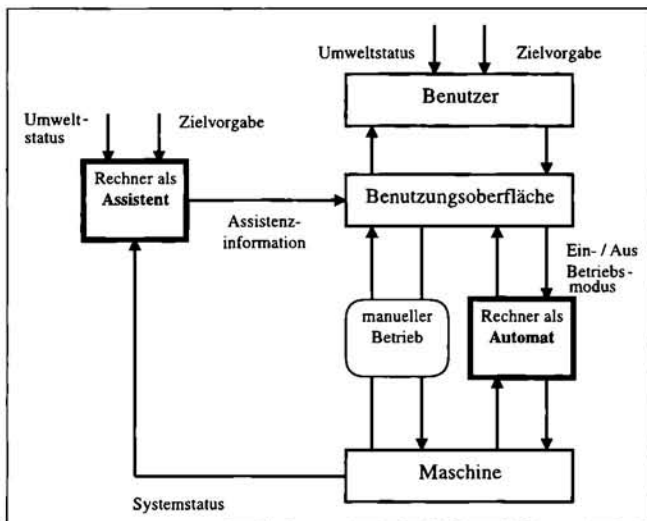


Bild 4: Rechnereinsatz als Automat und als Assistent in Mensch-Maschine Systemen [18].

und entscheidungsvorbereitende Aufgaben haben. Automatikfunktionen sind nach dieser Einteilung Linienfunktionen gleichzusetzen, da sie autonom, ohne Einflußnahme von Operateuren, agieren. Demgegenüber ist der Einsatz eines Rechners als Assistent mit einer Stabsstelle vergleichbar.

Rechner können demnach in Mensch-Maschine Systemen einerseits als Automaten, andererseits als Assistenten eingesetzt werden. Bild 4 zeigt eine schematische Systemarchitektur, die beide Einsatzmöglichkeiten berücksichtigt. Für beide Strukturen ist im Weiteren zu untersuchen, ob sich damit die für eine benutzerzentrierte Automatisierung wichtigen Forderungen nach Ganzheitlichkeit, Durchschaubarkeit und Rückmeldungen realisieren lassen.

5.1 Realisierungskonzepte für Automatikfunktionen

Die Architektur eines Mensch-Maschine Systems mit permanenten und zuschaltbaren Automaten ist in Bild 5 dargestellt. Permanente Automaten realisieren meist automatische Mußfunktionen, wie z.B. die Kompensation hochfrequenter Störungen. Da diese Funktionen ohnehin nicht manuell beherrschbar sind, entfällt an dieser Stelle die Forderung nach Ganzheitlichkeit.

Zuschaltbare Automaten decken den Bereich der optional automatisierbaren Funktionen ab (z.B. Autopiloten). Sie müssen zuverlässig, fehlerresistent und fehler tolerant sein. Für ihre Aktivierung gibt es verschiedene Übergabe-Strategien:

- unbedingte Delegation (Management by delegation), d.h. das Zuschalten einer Automatik zur autonomen Aufgabenerfüllung
- bedingte Delegation (Management by consent), d.h. der Operateur wird über den Automatikbetrieb informiert und muß Bearbeitungsabschnitte quittieren
- unbedingte Delegation mit optionaler Kontrollmöglichkeit (Management by exception), d.h. der Operateur wird über den Automatikbetrieb informiert und kann optional eingreifen.

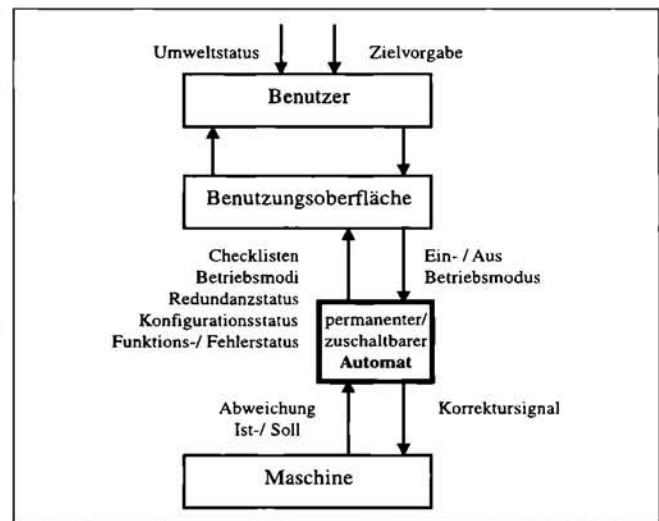


Bild 5: Permanente und zuschaltbare Automaten in Mensch-Maschine Systemen.

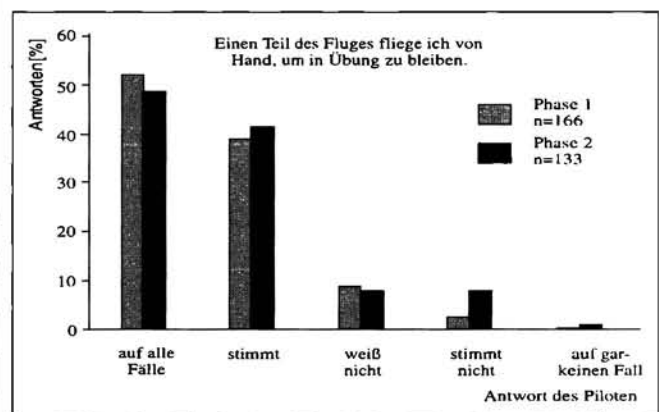


Bild 6: Subjektive Aussagen zur Nutzung der Automatikfunktionen des Flugzeugs Boeing 757 durch Piloten.

Ausschlaggebend für die Wahl einer der genannten Übergabe-Strategien sind die Belastung des Operators und die möglichen Folgen einer Fehlfunktion der Automatik. Gefährliche Aktionen dürfen keinesfalls autonom ausgelöst werden, da immer mit Software- und Logikfehlern gerechnet werden muß.

Die mangelnde Ganzheitlichkeit der Tätigkeit von Operateuren in automatisch betriebenen Systemen wird von den Benutzern erkannt und durch zwischenzeitlich manuellen Betrieb des Systems bei zuschaltbaren Automaten kompensiert. Beispielsweise werden Autopiloten im Flugzeug routinemäßig abgeschaltet, um in Übung zu bleiben. Diese Aussage unterstreicht das Ergebnis der Befragung von Piloten des hochautomatisierten Flugzeugs Boeing 757 (Bild 6).

Falls Übung und Systemerfahrung nicht im on-line Betrieb erworben werden können, sind off-line Maßnahmen vorzusehen, wie:

- Training an Systemsimulatoren (check-ups)
- Training an systemintegrierten Simulatoren (eingebettetes Training)

Generell ist zu beachten, daß der Trainingsverlauf beim Menschen zu Beginn durch geringes Leistungsni-

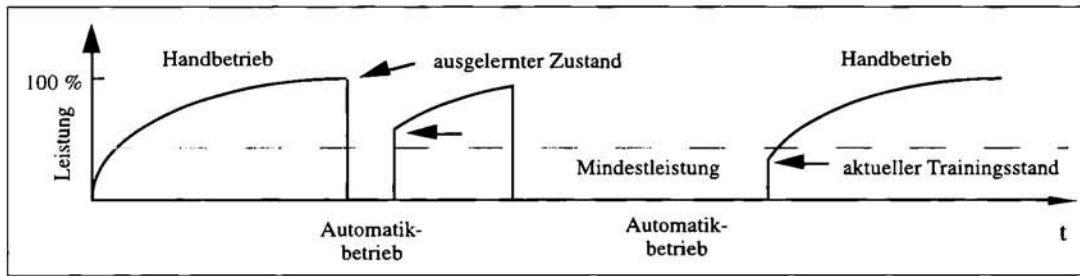


Bild 7: Intermittierend manueller Betrieb zur Erhaltung des Übungsstandes.

veau und hohe Leistungsvariabilität gekennzeichnet ist. Erst im ausgelerten Zustand tritt eine Stabilisierung auf hohem Niveau ein. Beim Wechsel zwischen Hand- und Automatikbetrieb dürfen deshalb die Pausen zwischen manuellen Trainingsphasen nicht zu lang sein, da sonst Übungsverlust eintritt. Der Trainingszustand muß so hoch gehalten werden, daß bei einem nicht auszuschließenden Ausfall der Automatik jederzeit mit einer Mindestleistung manuell übernommen werden kann. Dieser Zusammenhang ist schematisch in Bild 7 wiedergegeben.

Automatikbetrieb erfordert, besonders beim Langzeitbetrieb, gleichbleibend hohe Konzentration und Aufmerksamkeit für Überwachungsaufgaben. Untersuchungen zeigen, daß Operateure Schwierigkeiten haben, sich über lange Zeit auf eine Aufgabe zu konzentrieren. Es sind deshalb technische Maßnahmen entwickelt worden, um den aktuellen Wachzustand eines Bedieners zu ermitteln und gegebenenfalls einzugreifen. Hierzu gehören die

- periodische Abfrage einer Reaktion
- Präsentation synthetischer Alarmer

Die Sicherstellung der Durchschaubarkeit einer Automatik bedeutet, daß Benutzer deren Funktionen verstehen und mit den Betriebsdetails vertraut sind. Dies setzt das Verständnis der Funktionsweise von intakten Automatikfunktionen voraus, aber auch das Verstehen von Fehlfunktionen. Da Fehler nur als Abweichung von einem nominalen Verhalten der Automatik (einschließlich eines Toleranzbereichs) beurteilt werden können, soll das nominale Verhalten den Erwartungen eines Operateurs entsprechen. Dann sind Abweichungen leichter zu erkennen.

Hieraus resultieren im Hinblick auf Durchschaubarkeit folgende Forderungen:

- automatische Regler sollten ähnlich funktionieren wie die manuelle Regelung
- automatische Abläufe sollen nachvollziehbar sein
- automatische Abläufe sollen vorhersagbar sein

Realisierungsmöglichkeiten dafür sind:

- Darstellung der Systemkonfiguration
- Darstellung funktionaler und topologischer Systemdiagramme
- Darstellung der Redundanzreserven
- Darstellung der manuellen Eingriffsmöglichkeiten und -folgen

Rückmeldungen betreffen den Arbeitsablauf und die erzielten Ergebnisse als Grundlage einer laufenden

Handlungskorrektur und Zielüberprüfung. Bezogen auf Automaten bedeutet dies die Notwendigkeit folgender Meldungen und Abfragen:

- Checklisten (Sicherstellung, daß kritische Funktionen überwacht und ausgeführt werden)
- Status der Betriebsmodi
- Redundanzstatus
- Konfigurationsstatus
- Funktions-/ Fehlerstatus (Funktionstests),
- kein Ausfall ohne Meldung (fail-passive)

Warnungen müssen eindeutig und narrensicher, die Fehlalarmrate muß gering sein. Wenn abgeleitete Information verwendet wird, sollten die Rohdaten zur Überprüfung zugänglich sein.

5.2 Realisierungskonzepte für Assistenzfunktionen

Eine allgemeine System-Architektur eines Assistenzrechners, die Konzepte verschiedener Autoren berücksichtigt, ist in Bild 8 wiedergegeben [3]; [15]; [19]; [20]; [21]. Die Funktion der einzelnen Komponenten wird im Folgenden erläutert.

Schlüsselkomponente des Systems ist die automatische Situationserfassung und -bewertung. Der *Situationserfasser* registriert über Sensoren den Systemstatus und über eine Sensorinfrastruktur (wie z.B. GPS, Funkfeuer oder elektronische Baken) den Umweltstatus.

Der *Situationsbewerter* leistet die Zuordnung des situationsbeschreibenden Zustandsvektors zu einer Situationsklasse. Hierzu erfolgt ein Vergleich mit Referenz-Situationen, die in einer Datenbank abgespeichert sind. Falls derartige Vergleichsmuster nicht verfügbar sind, werden Klassifikationsverfahren eingesetzt.

Der *Informationsmanager* hat die Aufgabe, Information so zu filtern und aufzubereiten, daß der Benutzer zu jedem Zeitpunkt nur die Information erhält, die direkt die Aufgabenerfüllung unterstützt. Dies kann situations- und/oder benutzeradaptiv geschehen.

Ein *situationsadaptiver Informationsmanager* erhält als Eingabe die bewertete Situation. Hieraus ermittelt er für das vorgegebene Ziel die vom Bediener zur Stabilisierung, Lenkung, Planung oder zum Systemmanagement benötigte Information.

Benutzeradaptive Informationsmanager, die derzeit noch im Forschungsstadium sind, berücksichtigen bei der Informationsfilterung und -verarbeitung nicht nur die festgestellte Situation, sondern auch noch die Präferenzen, die Intentionen und Fehler und die Beanspruchung eines Operateurs (Benutzeradaptivität ist derzeit in Assistenzfunktionen noch nicht operationell verfü-

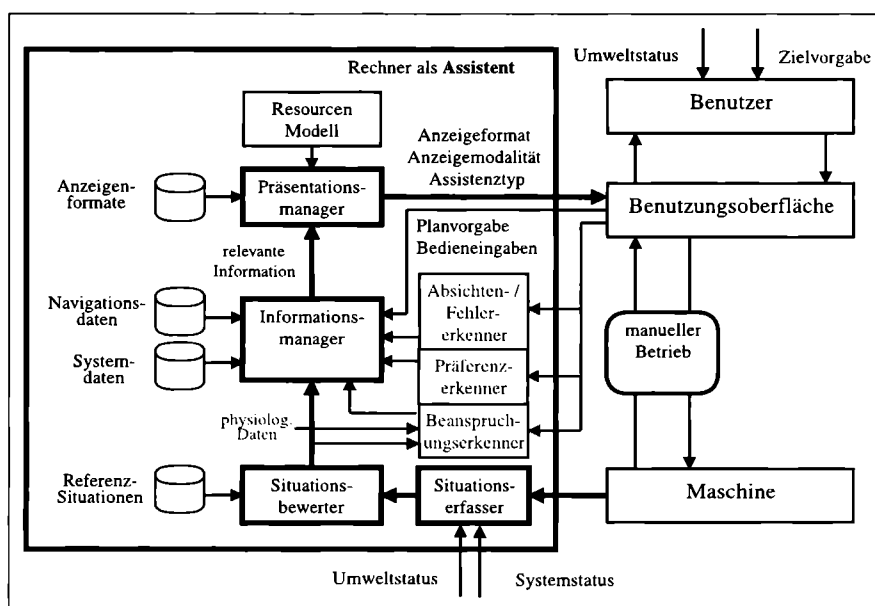


Bild 8: Allgemeine System-Architektur eines Assistenzrechners.

bar, die entsprechenden Komponenten sind deshalb in Bild 8 grau gekennzeichnet).

Der *Absichts- und Fehlererkenner* protokolliert die Bedieneingaben eines Benutzers und versucht sie mit normativen Prozedursegmenten aus der Systemdatenbank zu assoziieren. Bei festgestellter Übereinstimmung erlaubt dies den Rückschluß auf die aktuell vom Benutzer verfolgten Ziele. Bei Abweichungen ist es möglich, auf veränderte Zielsetzungen (z.B. Änderung der Flugroute, um einem Gewitter auszuweichen) oder auf Fehler zu schließen [16]; [22]; [23].

Der **Präferenzenerkennung** verfolgt laufend manuelle Regeleingaben einer Bedienperson bei der Stabilisierung und Lenkung, identifiziert daraus das individuell bevorzugte dynamische Verhalten und generiert dazu passende Assistenzinformation [24]; [25]. In derselben Weise lassen sich auch Präferenzen bei der Wahl der Bearbeitungsschritte von Prozeduren ermitteln.

Der Beanspruchungserkennung versucht die aktuelle Beanspruchung eines Benutzers zu schätzen [21]. Die Beanspruchungsermittlung stützt sich auf *leistungsbezogene* Daten wie die Geschwindigkeit, die Genauigkeit und die Fehler von Bedieneraktionen, auf *physiologische* Daten wie Pulsschlagfrequenz und -varianz, Atemfrequenz, Blickrichtung, Lidschlagfrequenz, sowie auf die Ergebnisse *subjektiver* Befragungen mit der Cooper Harper Skala, der Subjective Workload Assessment Technique (SWAT), oder dem NASA Task Load Index (TLX). Die Beanspruchung soll in einem mittleren Bereich gehalten werden, da Operateure zwar eine erhöhte Beanspruchung bis zu einem bestimmten Grad durch vermehrte Anstrengung kompensieren können, im Bereich von Grenzbeanspruchungen jedoch mit Leistungseinbrüchen und nicht vorhersagbaren Reaktionen zu rechnen ist [26]; [27]; [28]; [29].

Der *Präsentationsmanager* stellt die vom Informationsfilter durchgelassene Information auf der Benutzeroberfläche dar. Die *Anzeigeformat-Datenbank* stellt dafür alle verfügbaren Anzeigeformate wie Grafiken,

Töne oder synthetische/aufgezeichnete Sprache sowie haptische Signale bereit.

Die Wahl der sensorischen Modalität für die Informationspräsentation wird durch die aktuell vorliegende Belastung der sensorischen Ressourcen und aus der Modalität der geforderten Reaktion bestimmt. Die Überlastung einer Ressource erfordert die Umcodierung von Informationen auf andere Modalitäten. Grundlage dafür ist ein von Wickens entwickeltes Modell für die teilweise parallele Nutzbarkeit sensorischer, motorischer und kognitiver Ressourcen [30].

Die aktuelle Ressourcenauslastung ergibt sich dabei aus der off-line Analyse einer Mission oder einzelner kritischer Missionssegmente. Die Quantifizierung der Modalitäten von Informationsaufnahme und Reaktionen, sowie die Abschätzung der geforderten kognitiven Aktivitäten, liefern ein Ressourcen-Auslastungsprofil, den sogenannten Workload Assessment Monitor (WAM) [31]; [32]. Bild 9 zeigt ein repräsentatives Missionssegment.

Neben Format und Modalität kann auch der Inhalt einer Assistenzinformation an die Erfordernisse einer

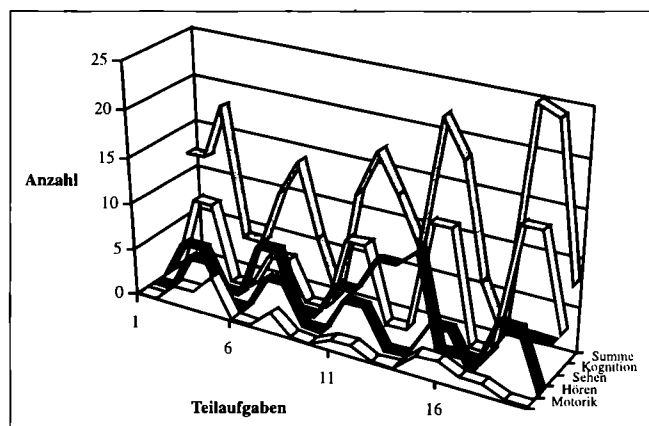


Bild 9: Belastung der sensorischen, motorischen und kognitiven Ressourcen eines Operators für ein Missionssegment (WAA Human Performance Model nach [31]).

bestimmten Situation oder Aufgabe angepaßt werden. Zu unterscheiden sind hier verschiedene Assistenztypen:

- informierende Assistenten
- beratende Assistenten
- kommandierende Assistenten
- intervenierende Assistenten

Informierende Assistenten stellen ein systemintegriertes Informationssystem zur Verfügung, auf das der Benutzer nach Bedarf zugreifen kann. Die zugrundeliegende Wissensbasis ist statisch, d.h. die situationsangepasste Wissensselektion wird nicht unterstützt. Das Informationssystem ist insofern passiv, als es nicht von sich aus Meldungen absetzt.

Beratende Assistenten stützen sich ebenfalls auf systemintegrierte Wissensbasen, verfügen darüber hinaus aber über die Fähigkeit zur automatischen Situationser-

fassung und -bewertung. Damit wird, in Verbindung mit Expertensystemen, eine situationsspezifisch adaptierte Beratung möglich. Ebenso ist die Eigenschaft der Selbsterklärungsfähigkeit gewährleistet, sofern die dafür benötigte Zeit verfügbar ist.

Kommandierende Assistenten finden Einsatz in Arbeitssituationen, die durch extremen Zeitdruck gekennzeichnet sind. Die bereitgestellte Hilfestellung besteht in situationsabhängigen visuellen, akustischen oder haptischen Kommandos, die in der Kürze der Zeit nicht überprüft, sondern nur befolgt oder mißachtet werden können.

Intervenierende Assistenten bewirken eine situationsabhängige Limitierung von Benutzereingaben, die dem Benutzer über meist haptische Stimuli zur Kenntnis gebracht werden. Die Begrenzungen sind in manchen Systemen fest, in anderen situations- und benutzeradaptiv oder übersteuerbar.

Tabelle 3 faßt die Charakterisierung der beschriebenen Assistenztypen zusammen.

Tabelle 4 ordnet die verschiedenen Assistenztypen den grundlegenden Funktionen in Mensch-Maschine Systemen zu (vgl. Bild 1).

Tabelle 3: Assistenztyp und charakteristische Eigenschaften von Assistenzfunktionen.

| Assistenztyp | Charakterisierung |
|--------------|--|
| Information | Statisches Informationssystem, d.h. keine situationsabhängige Informationsfilterung; Passiv, d.h. keine autonomen Meldungen |
| Beratung | Adaptives Informationssystem, d.h. situationsabhängige Information und Handlungsvorschläge; Beanspruchungsabhängige Form und Modalität der Informationsdarstellung; Aktiv, d.h. autonome Ratschläge; Selbsterklärungsfähig; Überprüfbar, wenn Zeit verfügbar |
| Kommando | Situations- und benutzerabhängige Weisungen in Kommandoform Aus Zeitmangel nicht überprüfbar; Übersteuerbar |
| Intervention | Situations- und benutzerabhängige Limitierung von Benutzereingaben, zum Teil übersteuerbar |

6 Zusammenfassung

Die Beherrschung zunehmend komplexer Systeme ist nur durch den Einsatz von Rechnern möglich. In vielen Fällen kann oder soll jedoch keine Vollautomatisierung angestrebt werden, so daß sich die Frage nach einer sinnvollen Funktionsteilung zwischen Mensch und Automatik stellt. In diesem Beitrag wurde, ausgehend von Systemfunktionen und Benutzereigenschaften, eine Vorgehensweise für die Ermittlung einer ergonomisch optimierten Funktionsteilung zwischen Mensch und Rechner skizziert. Für die Automaten wurden Forderungen hinsichtlich Durchschaubarkeit

Tabelle 4: Zuordnung von Assistenzfunktionen zu Funktionen in Mensch-Maschine Systemen.

| Systemfunktion | Informations-Assistenz | Beratungs-Assistenz | Kommando-Assistenz | Interventions-Assistenz |
|----------------|---|---|--|---|
| Stabilisierung | | | | Begrenzung/Modifikation von Benutzereingaben; Modifikation der Systemdynamik |
| Lenkung | Darstellen von: Plan/Planänderungen, Zustandsgrößen, Vorinformation | | Darstellen von: reaktionsauslösenden Kommandos | |
| Planung | Darstellen von: Planungsalternativen, Bewertungskriterien | Darstellen von: bewerteten Plänen | | |
| Management | Darstellen von: Systemdiagrammen, Leistungsdiagrammen, Ressourcenstatus, Redundanz-Status, Konfigurations-Status, Fehlerfolgen, Optionen für Funktionsersatz und Fehlerkompensation | Darstellen von: prioritätsgesteuerten Meldungen und Alarmen; bewerteten Vorschlägen für Ressourceneinsatz und Fehlerbehandlung | | |

und Rückmeldungen definiert. Zur Unterstützung manueller Funktionen wurde der Einsatz von Assistenzfunktionen vorgeschlagen und hierfür auch eine allgemeine System-Architektur angegeben. Weiterhin wurde eine Klassifikation in informierende, beratende, kommandierende und intervenierende Assistenzfunktionen vorgenommen und deren Zuordnung zu einzelnen Systemfunktionen dargelegt.

Erste Erfahrungen aus der Luftfahrt sind ein Beleg dafür, daß das vorgestellte Systemkonzept realisierbar ist und bei Benutzern auf Akzeptanz stößt. Benutzerzentrierte Automatisierung unter Einsatz von Assistenzfunktionen ist somit ein geeigneter, bisher noch wenig genutzter Ansatz, um die Zuverlässigkeit komplexer Systeme weiter zu erhöhen.

Literatur

- [1] Bainbridge, L.: Ironies of Automation. *Automatica*, 19 (6) (1983), pp. 775–779.
- [2] Wiener, E. L. und Curry, R. E.: Flight-deck Automation: Promises and Problems. *Ergonomics*, 23 (10) (1980), pp. 995–1011.
- [3] Kraiss, K.-F.: Fahrzeug- und Prozeßführung – Kognitives Verhalten des Menschen und Entscheidungshilfen, Fachbericht MSR 11, Springer Verlag (1985).
- [4] Reichart, G., Haller, R. und Bubb, P.: Emotion, Erfahrung und Verantwortung – zur Automatisierung der Tätigkeit „Autofahren“. In: Optimaler Automatisierungsgrad von Mensch-Maschine-Systemen, DGLR-Bericht 94-01 (1994), S. 113–124.
- [5] Reister, D.: Wird die Fahrzeugführung später an Automaten delegiert? *Informatik Spektrum*, 20 (3) (1997), S. 179–183.
- [6] Rasmussen, J.: Skills, Rules, and Knowledge: Signals, Signs and Symbols and Other Distinctions in Human Performance Models. *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics*, Vol. SMC-13 (1983), pp. 257–266.
- [7] Price, H. E.: The Allocation of Functions in Systems. *Human Factors*, 27 (1985), pp. 33–45.
- [8] Kraiss, K.-F.: „99% Langeweile und 1% panische Angst“ – über die Schwierigkeiten beim Umgang mit hochautomatisierten Systemen. In: M. Kerner (Hrsg.): Technik und Angst – zur Zukunft der industriellen Zivilisation, Aachen, Verlag Augustinus Buchhandlung (1994), S. 183–195.
- [9] Reichart, G. und Haller, R.: Fahrerassistenz oder Automatisierung – Konzepte für sicheres Autofahren. In: 3. int. Workshop Leitwarten, Verlag TÜV Rheinland (1994), S. 75–90.
- [10] Billings, C.: Human-Centered Aircraft Automation: A Concept and Guidelines, NASA TM 103885, (1991).
- [11] Groom, M. K.: Function Allocation and Manprint. In: Beevis et al. (Ed.): Improving Function Allocation for Integrated Systems Design. NATO, AC/243 (Panel 8) TP/7 (1995), pp. 22–31.
- [12] Fitts, P. M.: Human Engineering for an Effective Air Transportation and Traffic Control System. Washington, DC (1951).
- [13] Beevis, D., Essens P. und Schuffel, H.: Improving Function Allocation for Integrated Systems Design. NATO, AC/243 (Panel 8) TP/7 (1995).
- [14] Hacker, W.: Allgemeine Arbeits- und Ingenieurpsychologie, 2. Auflage; Verlag Hans Huber, Bern, Stuttgart, Wien (1978).
- [15] Onken, R.: Situationsabhängig veränderliche Funktionsverteilung zwischen Mensch und Maschine im Cockpit durch ein intelligentes Unterstützungssystem. In: Psychologische Erkenntnisse und Methoden als Grundlage für die Gestaltung von Mensch-Maschine-Systemen, Bericht 96-3 des Zentrums Mensch-Maschine-Systeme, TU Berlin (1996), S. 39–54.
- [16] Romahn, S.: Wissensbasierte Unterstützung bei der Benutzung komplexer technischer Systeme – angewendet auf die Arbeit von Piloten mit dem Flight Management System (FMS). Dissertation, RWTH Aachen, Lehrstuhl für Technische Informatik (1997).
- [17] Sheridan, T. B.: Allocating Functions Among Humans and Machines. In: Beevis et al. (Ed.): Improving Function Allocation for Integrated Systems Design. NATO, AC/243 (Panel 8) TP/7 (1995), S. 1–11.
- [18] Kraiss, K.-F.: Entwicklungsperspektiven für Mensch-Maschine Schnittstellen. In: 129. ITG Fachbericht. Herausforderung Informationstechnik, München, VDE-Verlag (1994), S. 61–80.
- [19] Rouse, W. B., Geddes, N. D. und Curry, R. E.: An Architecture for Intelligent Interfaces: Outline of an Approach to Supporting Operators of Complex Systems. In: G. Salvendy (Ed.): Human Computer Interaction, London, Lawrence Erlbaum, Vol. 3 (1987), pp. 87–122.
- [20] AGARD: Knowledge-Based Guidance and Control Functions. (Application des Systèmes Experts pour le Guidage et le Pilotage), AGARD (Advisory Group for Aerospace Research & Development) Advisory Report No. 325, North Atlantic Treaty Organization, Januar (1995).
- [21] Mulgund, S. S. und Zacharias, G. L.: A Situation-Driven Adaptive Pilot/Vehicle Interface. In: Proc. of the 3rd Annual Symposium on Human Interaction with Complex Systems, August 25–28. Wright State University, Dayton, Ohio (1996).
- [22] Shalin, V. L., Perschbacher, D. L. und Jamar, P. G.: Intent Recognition: An Emerging Technology. In: Proc. of the Int. Conf. on Human-Machine Interaction and Artificial Intelligence in Aeronautics and Space, Sept. 28–30, Toulouse-Blagnac (1988), pp. 125–137.
- [23] Wittig, T.: Maschinelle Erkennung von Pilotenabsichten und Pilotenfehlern über heuristische Klassifikation. VDI Fortschrittsbericht Nr. 228, VDI Verlag, Düsseldorf (1994).
- [24] Kraiss, K.-F.: Implementation of User-Adaptive Assistants with Neural Operator Models. *Control Engineering Practice*, 3(2) (1995), pp. 249–256.
- [25] Feraric, J. P.: Echtzeitfähige Modellierung des individuellen Fahrerverhaltens zur Realisierung adaptiver Unterstützungsfunktionen in einem Monitor- und Warnsystem. Dissertation, Universität der Bundeswehr, München (1996).
- [26] Hart, S. G. und Staveland, L. E.: Development of NASA-TLX (Task load index): Results of Experimental and Theoretical Research. In: P.A. Hancock, N. Meshkati (eds.): Human Mental Workload, North Holland (1988), pp. 139–183.
- [27] Wierwille, W. und Eggemeier, F.: Recommendations for Mental Workload Measurement in a Test and Evaluation Environment. *Human Factors*, 35(2) (1993), pp. 263–282.
- [28] Vidulich, M. A., Stratton, M., Crabtree, M. und Wilson, G.: Performance-based and Physiological Measures and Situational Awareness. *Aviation Week and Environmental Medicine*, 65 (5 Suppl) (1994), pp. A7–A12.
- [29] Reid, G. B. und Nygren, T. E.: The Subjective Workload Assessment Technique: A Scaling Procedure for Measuring Mental Workload. In: P.A. Hancock, N. Meshkati (eds.): Human Mental Workload, North Holland (1988), pp. 185–218.
- [30] Wickens, C. D.: Engineering Psychology and Human Performance. Merrill Publ. Comp. (1984).
- [31] Swartz, M. L. und Wallace, D. F.: Function Allocation Trade Offs: A Workload Design Methodology. Chapter 13 of: Improving Function Allocation for Integrated Systems Design. Technical Proc, AC/243 (Panel 8) TP/7 DRG NATO, February (1995).
- [32] Wilson, G. F.: Workload Assessment Monitor (WAM). In: Proc. of the Human Factors and Ergonomics Society, Annual Meeting (1994).

Manuskriptingang: 5. Januar 1998.