

Intention-Based Supervisory Control

Kooperative Mensch-Maschine-Kommunikation in der Prozessführung

Michael Herczeg

Kurzfassung

Intention-Based Supervisory Control (IBSC) beschreibt die gegenseitige und kooperative Überwachung und Unterstützung von Mensch und Maschine in komplexen und sicherheitskritischen Anwendungsbereichen. Mensch und Maschine können dabei bedarfsorientiert die Initiative in der Prozessführung übernehmen und stehen sich vor allem hinsichtlich kritischen oder außergewöhnlichen Entscheidungen kooperativ gegenüber. So können jederzeit beide Seiten im Ausnahmefall durch die abgestimmte Übernahme der Initiative zu aktiv Handelnden werden. Die Grundlage des Prozessführungskonzepts bildet ein kongruentes mentales Modell seitens des Menschen bzw. konzeptuelles Modell seitens der Maschine. Dazu müssen alle einzelnen Handlungs- und Kommunikationsebenen seitens Mensch und Maschine verträglich gestaltet werden, da es sonst keine Kommunikation und kooperative Problemlösung geben kann. IBSC ist in der Lage, nicht nur den Normalfall der Mensch-Maschine-Arbeitsteilung sondern auch den kritischen Ausnahmefall zu behandeln.

1. Einleitung

Viele sicherheitskritische Anwendungen, wie z.B. die Steuerung von Flugzeugen und Schiffen oder der Betrieb von verfahrenstechnischen Anlagen und Kraftwerken basieren auf dem Automatisierungsprinzip des *Supervisory Control* [Sheridan 1987, Sheridan 1988]. Dabei initiiert und überwacht der Operateur auf höchster Ebene, d.h. auf der Ebene von Verfahren (Prozeduren) und Zielsetzungen (Intentionen) die Automatisierungsprozesse und greift im Falle von Änderungen der Ziele oder bei Abweichungen des Prozesses von der Zielsetzung in die Steuerung oder Regelung ein. Umgekehrt überwachen maschinelle Funktionen den Menschen auf niedriger Ebene, d.h. auf Ebene der Sensomotorik und der syntaktischen und einfachen semantischen Regeln (Eingaberegeln, Anwendungszustände) und schalten sich bei vermeintlichen Fehlbedienungen oder Fehlsteuerungen ein.

Das gesamte Mensch-Maschine-System ist hinsichtlich der Initiative und Überwachung dabei allerdings nicht symmetrisch. Die Asymmetrie resultiert einerseits aus der besonderen Rolle des Menschen als zielführende Instanz und andererseits aus der begrenzten Intelligenz maschineller Regelungs- und Steuerungssysteme. Diese Asymmetrie erzeugt im Bereich der sicherheitskritischen Systeme eine Vielzahl von Problemen, die oft in Form von Störfällen und Unfällen zu Tage treten. Im folgenden sollen einige Kategorien derartiger Probleme diskutiert werden. Anschließend werden Konzepte vorgestellt, die diese Asymmetrie so weit wie möglich reduzieren und mit ihr ein Teil der damit verbundenen Probleme.

Ein erster wesentlicher Schritt zu einer handlungsorientierten Symmetrie des Mensch-Maschine-Systems zu kommen, ist die Herstellung einer *Modellkongruenz* (direkte Abbildbarkeit) der verschiedenen Handlungs- bzw. Artikulationsebenen bei Mensch und Maschine. Ein zweiter wichtiger Schritt ist die *Metamodellierung* (explizite Modellierung) einer pragmatischen sowie einer intentionalen Ebene in der Maschine, um diese in die Lage zu versetzen, Intentionen und Abläufe geeignet kommunizieren bzw. überwachen zu können.

Die meisten existierenden Systemmodelle weisen, wenn überhaupt, nur bis zur semantischen Ebene der Arbeitsobjekte eine Metamodellierung auf. Das durch die Ergänzung von intentionaler und pragmatischer Ebene entstehende Mensch-Maschine-Konzept soll ***Intention-Based Supervisory Control (IBSC)*** genannt werden (siehe Abbildungen 2 und 3).

Situational Awareness spielt sich im Spektrum zwischen dem Erkennen und Verstehen aktueller Zustände eines Prozesses und der Erfassung der situativen Position, d.h. dem Einordnen eines Zustandes in einen Handlungsablauf und in eine dadurch bewirkte Zustandskette. In vielen Darstellungen reduziert sich Situational Awareness jedoch auf das Erfassen eines momentanen Prozesszustandes durch einen Operateur, um daraus geeignete Schlussfolgerungen für die folgenden Handlungen zu ziehen. Die Unterstützung durch das Prozessführungssystem beschränkt sich auf die mehr oder weniger aggregierte Präsentation der Prozessparameter [Rasmussen, Goodstein 1988] mit der einen oder anderen parametrischen Trendüberwachung. Diese Vorgehensweise beruht auf einer grundsätzlichen Reduktion menschlichen Handelns auf zeitlich eng begrenzte gegenständliche Aktivierungen. In Wirklichkeit basiert Handeln auf Intentionen, Pläne sowie auf situative und szenarische Konzepte. Diese wichtigen, mit der Historie, Gegenwart und Zukunft eines Handlungs- oder Kommunikationsprozesses zusammenhängenden Wahrnehmungen und Entscheidungen werden in Prozessführungssystemen mangels geeigneter Systemmodellierungen unzureichend oder nicht unterstützt. Insofern sind mangelnde Situational Awareness und asymmetrisches Supervisory Control nur unterschiedliche Perspektiven auf dieselbe Problematik.

2. Human-Centered Automation und das Automatisierungskontinuum

Charles E. Billings spricht von der Notwendigkeit eines künftigen Systemkonzepts, das er ***Human-Centered Automation*** nennt und zwar im Sinne einer explizit zielbasierten Arbeitsteilung: „automation designed to work cooperatively with human operators in the pursuit of stated objectives“ [Billings 1991].

Automatisierung ist demgemäß nicht zu verstehen als Gegenpol zum manuellen Handeln, sondern als Spektrum zwischen manuellem Handeln und Vollautomatisierung. Billings beschreibt einen zweidimensionalen Raum (siehe Abbildung 1) entlang der Dimensionen ***Automatisierung*** und ***Involvierung*** (Einbezogenheit). Dabei ist zu beobachten, dass die Extreme dieses zweidimensionale Spektrums auch die Involviertheit des menschlichen Operateurs in die Extreme bringen, nämlich einerseits die maximale Einbezogenheit (aktiver Operateur) im Falle der manuellen Steuerung und andererseits die nicht mehr vorhandene Einbezogenheit (passiver Operateur). Komplementär dazu verhält sich die Einbezogenheit der Maschine in die Prozessführung. Ein besonders interessanter Bereich ist das Mittelfeld, das aus Automatisierungskonzepten besteht, die sowohl Mensch und Maschine in einer aktiven Rolle halten, bei dem beide den Prozess beobachten, interpretieren, bewerten und definiert Einfluss nehmen können.

Die ***Prinzipien von Human-Centered Automation*** zählt Billings [Billings 1991] sinngemäß folgendermaßen auf („automated system“ wird hier als „Maschine“ übersetzt):

1. Der menschliche Operateur muss involviert sein, um effektiv steuern zu können.
2. Der menschliche Operateur muss informiert sein, um involviert zu sein.
3. Der menschliche Operateur muss in der Lage sein, die Maschine zu überwachen.

4. Das Verhalten der Maschine muss vorhersehbar sein.
5. Die Maschine muss auch in der Lage sein, den menschlichen Operateur zu überwachen.
6. Mensch und Maschine müssen ihre gegenseitigen Intentionen kennen.

Gerade die beiden letzten Punkte führen auf eine besondere Notwendigkeit der Symmetrie des Mensch-Maschine-Systems hin.

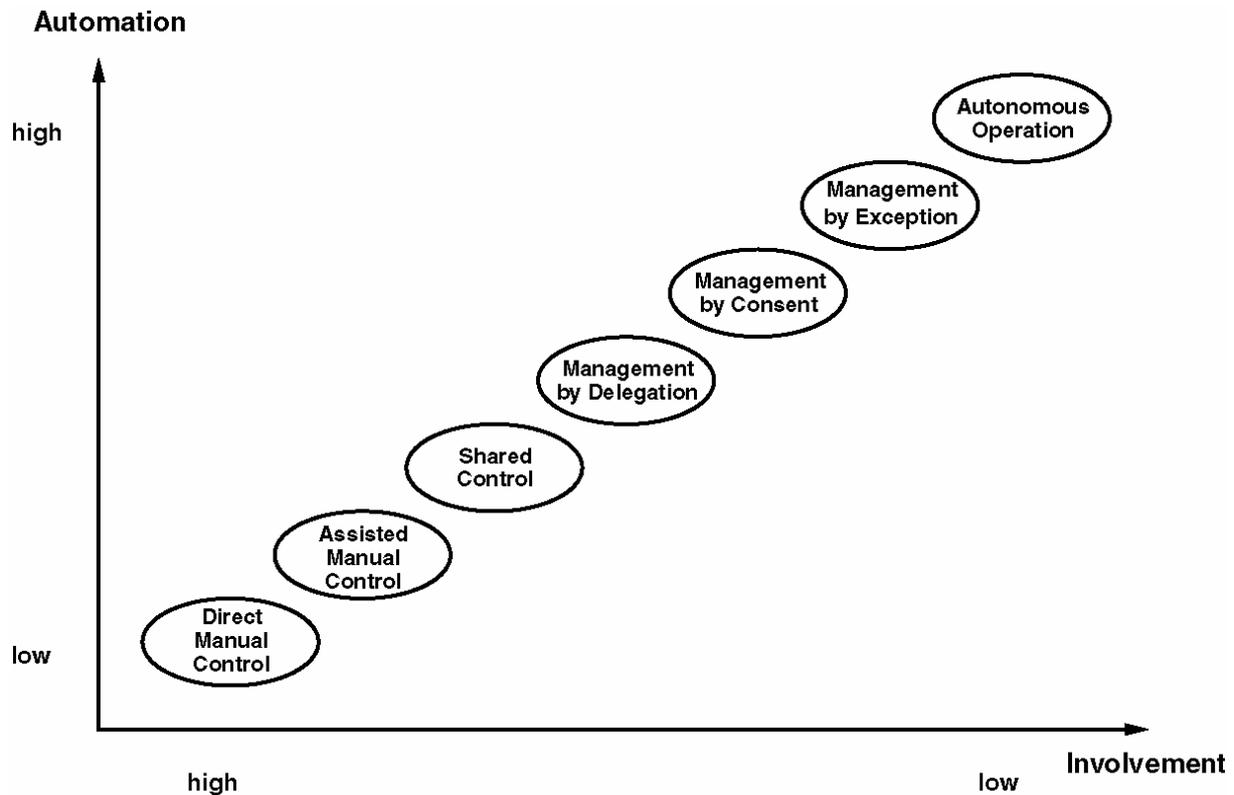


Abbildung 1: Das Automatisierungsspektrum (nach [Billings 1991])

3. Folgen der Asymmetrie in der Mensch-Maschine-Kommunikation

Eine halbe Stunde nach dem Start von Flug 004 der Lauda Air am 26.5.1991 in Bangkok war in der B767 in einer Flughöhe von fast 6000 Metern die Umkehrschub-Einrichtung aktiviert worden. Die Maschine stürzte über Thailand ab. Die Maschine hatte offenbar keinen funktionsfähigen Schutzmechanismus (Interlock), der diese Funktion in einer solchen Flugphase verhindert hätte.

Beim Landeanflug eines Lufthansa Airbus A320 am 14.9.1993 in Moskau hatte eine solche Schutzfunktion das Aktivieren des Umkehrschubs, das Ausfahren der Störklappen und die Funktion der Radbremsen verhindert, während das Flugzeug noch nicht ausreichend eingefederte Fahrwerke und ausreichende Radumdrehungen zeigte. Die Piloten waren sich durchaus bewusst, dass sie die Maschine aufgrund von gemeldetem Seitenwind mit einseitig belasteten Fahrwerken gelandet hatten und trotzdem schon den Bremsvorgang wegen dem späten Aufsetzen sowie der kurzen und nassen Landebahn unmittelbar einleiten mussten. Die Maschine „kannte“ diese Intention nicht und war gewissermaßen von einem Bedienfehler ausgegangen und hatte diesen „erfolgreich“ verhindert. Als der Umkehrschub einsetzte, war die Leistung der Triebwerke, von den Piloten nicht beeinflussbar, auf 71% begrenzt, um für

den Normalfall die Belastung der Triebwerke zugunsten ihrer Lebensdauer zu reduzieren. Der Ausnahmefall war zwischen Mensch und Maschine nicht aushandelbar. Der Programmierer hatte sich mittels einfachster logischer Verknüpfungen von aktuellen Prozessdaten festgelegt (siehe A320 Flight Crew Operating Manual – Landing Gear).

Interlocks werden für einfache Systemzustände vorgesehen, bei denen Entwickler zu wissen glauben, dass eine Funktion in diesen Zuständen nicht anwendbar sein soll. Die Funktion wird für den Operateur in diesen Zuständen deaktiviert. Der „Schutzmechanismus“ entscheidet dabei normalerweise nur auf Grundlage des momentanen Systemzustandes, in nur wenigen Fällen auch auf Grundlagen von Trends ohne Kenntnis der Intentionen und Ziele des Operateurs. Die Situational Awareness des Systems reduziert sich auf eine Zustandsmomentaufnahme oder einen minimalen zeitlichen Zustandsraum.

Die besondere Fähigkeit von Menschen liegt in der Fähigkeit, Ziele auf unterschiedlichen Wegen (Pfad durch den Zustandsraum) unter Verwendung von möglicherweise nicht dafür gedachten Funktionen zu erreichen. Diese Fähigkeit ist insbesondere, aber nicht ausschließlich im Notfall von Bedeutung. Automatisierte Schutzmechanismen oder auch organisatorische Regeln be- oder verhindern oft Aktionen in Ausnahmesituationen. Die Folge ist, dass Operateure derartige Schutzmechanismen, wenn möglich, deaktivieren, um in der Handlung frei zu sein. Ähnliches gilt für das bewusste Verletzen oder Ignorieren von Regeln. Sie empfinden die Situational Awareness des Systems als ungeeignet und seine Reaktionen als hindernd und verzichten lieber auf die Einflussnahmen des Systems auf einer solchen Grundlage. Mit anderen Worten, viele Interlocks und Regeln unterstützen im Normalfall und behindern in Ausnahme- und Notfällen. Das „vorsorgliche“ Abschalten oder Ignorieren von Regeln wiederum findet nicht nur im Einzel-, z.B. im Notfall sondern bereits im Normalbetrieb statt. Dies ist gewissermaßen ein Dilemma der Mensch-Maschine-Kommunikation. Lösen lässt sich dieses Problem nur durch eine andere, auf Intentionen basierende Kommunikation zwischen menschlichem Operateur und der Maschine.

Am Beispiel des Unfalls in Warschau hätte der Pilot der Maschine geeignet mitgeteilt, dass er die Maschine bewusst in dieser Flugphase bereits mit allen vorhandenen Mitteln abbremsen wird. Noch günstiger wäre es gewesen, der Maschine mitteilen zu können, dass Sie ab einem vom Operateur mitgeteilten Moment alle Möglichkeiten der Verzögerung selbst in Anwendung bringt und somit seine Intention und sein Ziel automatisch umsetzt, „wissend“, dass es sich um einen Ausnahmefall handelt, der es erlaubt, bestimmte, in anderen Situationen durchaus sinnvolle und wichtige Regeln vorsätzlich zu verletzen.

Eine Vielzahl weiterer Unfälle und Zwischenfälle (z.B. Interflug 11.2.1991, Air Lanka 3.3.1994, China Airlines 26.4.1994, Birgenair 6.2.1996, zuletzt DHL Cargo/Bashkirian Airlines und Schweizer Flugsicherung 1.7.2002) zeigen immer wieder den Kampf zwischen Mensch und Maschine durch unverträgliche Ziel-, Zustands- und Erklärungsmodelle. Typische Probleme sind:

- Automaten sind aktiviert, während die Operateure annehmen, manuell zu steuern
- manuelle und automatische Steuerungs- und Regelungsprozesse laufen gleichzeitig und uneinschätzbar ab
- Interlocks und ähnliche Blockierungsmechanismen verhindern die Aktivierung und Anwendung von dringend benötigten Funktionen
- kritische Systemzustände werden durch unaggregierte Datenpräsentation weder vom Menschen noch von der Maschine erkannt; eine gemeinsame Diagnostik ist im Normalfall

mangels geeigneter Modellierung diagnostischer Prozesse nicht vorgesehen

- widersprüchliche Zielstellungen zwischen Mensch und Maschine, ohne dass dies kommunizierbar würde

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass es wenig geeignete Interaktions- und Kommunikationsmechanismen zu geben scheint, die eine wirkungsvolle, seitens Mensch und Maschine gemeinsam und konsistent wahrgenommene Überwachung und Steuerung eines komplexen Prozesses ermöglichen würden. Fehlende Situational Awareness und fehlende Symmetrie der Einbezogenheit von Mensch und Maschine im Prozess sind die zwangsläufige Folge.

4. Das menschliche Handlungsmodell

Menschliches Handeln im Bereich der Routinetätigkeiten (Normalbetrieb) lässt sich mittels hierarchischer Handlungsmodelle (siehe Abbildung 2) recht gut modellieren und darstellen [Herczeg 1994]. Dabei beginnt ein Operateur die Bearbeitung einer Aufgabe mit der Entwicklung von Zielen (*Intentionale Ebene*), die Aufgabe in einer bestimmten Weise mit bestimmten Qualitäten hinsichtlich des Ergebnisses und Randbedingungen des Handelns zu erreichen. Die Intentionen werden auf meist vertraute Verfahren (*Prozedurale Ebene*) abgebildet, die einzelne Handlungsschritte enthalten. Jeder Handlungsschritt (Aktion, Operation) besitzt meist gegenständliche Bezüge auf physische oder mentale Arbeitsobjekte und deren Zustände (*Semantische Ebene*). Diese Operationen wiederum werden mit Hilfe der Arbeitsmittel (z.B. Funktionen des Cockpits, der Leitwarte, der Computerschnittstelle) unter Anwendung einer formalen Sprache (Syntax) des technischen Systems formuliert (*Syntaktische Ebene*). Durch die Eingabe von Zeichen in meist hierarchischen Zeichenstrukturen wird die Aktion codiert (*Lexikalische Ebene*) und zuletzt motorisch aktiviert (*Sensomotorische Ebene*).

Sobald das System auf die Handlungen mit Feedback reagiert, wird der Operateur dieses zunächst auf der Signalebene (*Sensomotorische Ebene*) erfassen. Diese Signale werden dann als Zeichen (*Lexikalische Ebene*) wahrgenommen. Daraufhin werden sie mit der ausgeführten Handlung in Bezug gesetzt (*Syntaktische Ebene*) und auf die erfolgreichen Übermittlung der Nachricht überprüft. Ist auch dies mit klarem Ergebnis nach Plan verlaufen, kann durch eine Zustandsanalyse geprüft werden, inwieweit die Manipulation eines Arbeitsobjekts erfolgreich war oder nicht (*Semantische Ebene*). Wurde die Beeinflussung erfolgreich absolviert, kann der nächste geplante Schritt im Verfahren aktiviert werden (*Prozedurale Ebene*). Erst wenn alle Schritte des geplanten Verfahrens abgearbeitet sind, kann die erfolgreiche Bearbeitung der Aufgabe und damit die gesamte Zielerreichung (*Intentionale Ebene*) geprüft und die Aufgabe bei Erfolg abgeschlossen werden.

Werden auf den jeweiligen Ebenen Abweichungen vom erwarteten oder akzeptablen Ergebnis erkannt, so findet eine Regulation auf der jeweiligen Ebene statt, um das gewünschte Ergebnis nach Möglichkeit doch noch herbeizuführen. Dies wird *Handlungsregulation* genannt. Da ein Computersystem nicht mit einem passiven Werkzeug verglichen werden kann, lässt sich der Handlungsprozess, insbesondere auch die Handlungsregulation in einem Mensch-Maschine-System nicht ohne das Betrachten der Funktionsebenen der Maschine isolieren. *Interaktion* heißt Wechselwirkung und unterscheidet sich grundlegend von Steuerungs- und Regulationsprozessen bei passiven Automatismen. Computersysteme können grundsätzlich selbst komplexe und flexible regel- und wissensbasierte Zielsetzungen verfolgen, die mit den menschlichen Aktivitäten abgestimmt werden müssen und genau dies findet unzulänglich statt.

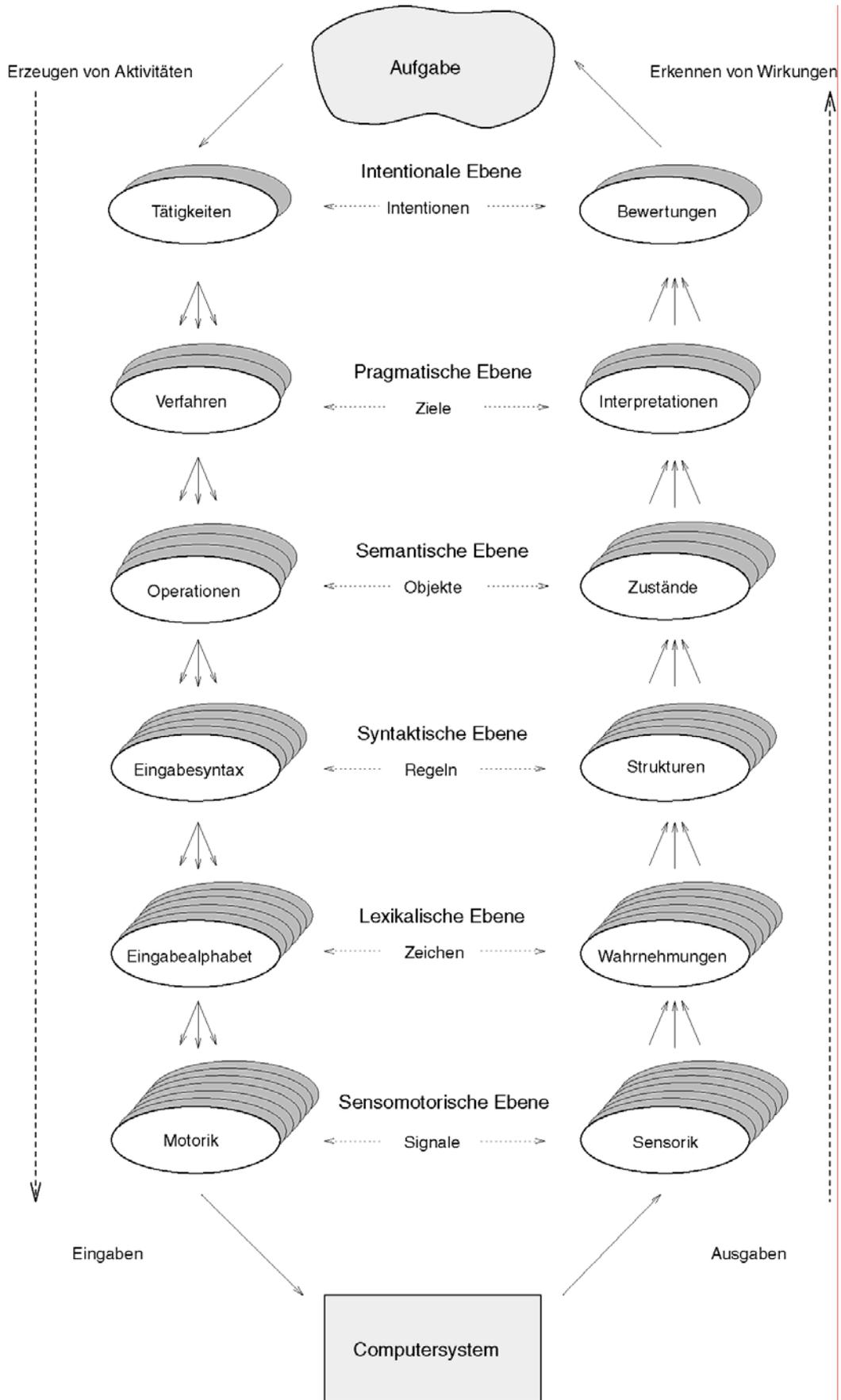


Abbildung 2: Mentales Handlungsmodell des Menschen auf 6 Ebenen

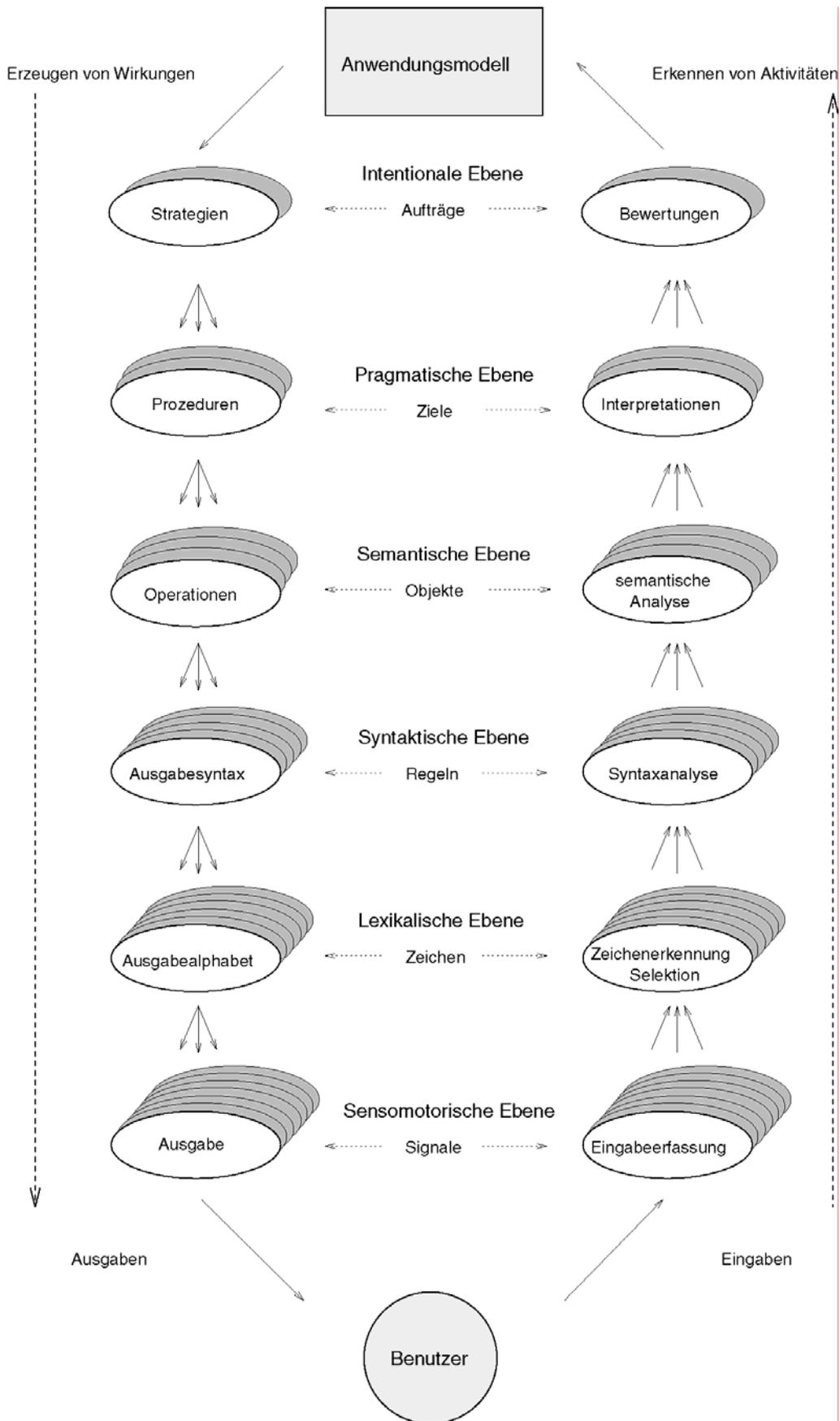


Abbildung 3: Konzeptuelles Funktionsmodell der Maschine auf 6 Ebenen

Ähnlich wie seitens des Menschen das Handlungsmodell (mentales Modell), kann auch das Funktionsmodell seitens der Maschine (Systemmodell) in mit dem mentalen Modell korrespondierenden Schichten beschrieben werden (siehe Abbildung 3). Die Ein-Ausgabebene korrespondiert dabei mit der *Sensomotorischen Ebene*. Die *Lexikalische Ebene* spiegelt sich in einer Zeichenebene im System mit einem Zeichenerkennungsprozess (Scanner) wider. Die *Syntaktische Ebene* wird eingabeseitig von strukturellen Erkennungsmodulen (Parser) und ausgabeseitig von Generierungsmodulen (Sprach- und Bildgeneratoren) repräsentiert. Die *Semantische Ebene* wird hauptsächlich vom inzwischen oft auch objektorientiert modellierten Informations- und Funktionsmodell repräsentiert. Die Ebene der Verfahren, die *Prozedurale Ebene*, verschwindet im allgemeinen in einer Reihe von impliziten Programmstatements. Eine *Intentionale Ebene* ist in Computer- und anderen Automatisierungssystemen ebenfalls, von einfachen Zustandsmodellen abgesehen, entweder gar nicht oder fast nur implizit vorhanden. Eine Metamodellierung auf die die Maschine selbst zugreifen könnte (Selbstbild), fehlt.

Verglichen mit dem mentalen Modell des menschlichen Akteurs weist das Modell der Maschine eine Reihe von Schwachstellen auf:

- die lexikalische Ebene verwendet artifizielle Zeichen und nicht wie der Mensch semantisch aufgeladene (sub-)kulturelle Zeichen, d.h. die Maschine verfügt über keine flexiblen und situativen Interpretationsmechanismen bei der Verarbeitung von Zeichen
- die syntaktische Ebene basiert auf einer eindeutigen formalen Sprache, die nur wenige oder keine Unschärfen erlaubt
- die semantische Ebene besitzt nur einfache Zustandsstrukturmodelle (Anwendungsobjekte) und üblicherweise keine situativen Modelle (Verhaltensschemata und Szenarien)
- die pragmatische Ebene ist wenig flexibel, sondern in Form von definierten Abläufen programmiert (Algorithmen)
- die intentionale Ebene fehlt im allgemeinen, so dass Systeme nur einfache Zielzustände verfolgen, nicht aber komplexe und unscharfe Ziele
- die einzelnen Ebenen sind nur unzulänglich hinterfragbar, außer man begibt sich auf die Ebene des Programmcodes, d.h. es fehlen Metamodellierungen (Selbstbilder), die beschreiben und artikulieren, wie das System modelliert ist, wie es prinzipiell funktioniert und vor allem was es gerade tut und in der nahen Zukunft beabsichtigt

Aufgrund dieser Defizite kommt es im allgemeinen zu keiner angemessenen Symmetrie und gegenseitigen Adaption in der Mensch-Maschine-Kommunikation, die erlauben würde, Intentionen, Begründungen, Erklärungsmodelle und andere, insbesondere in Problemsituationen wichtige Informationen auszutauschen. So kommt es auch zu keiner ausgeprägten gegenseitigen Unterstützung, Kooperation oder gemeinsamer Situational Awareness.

5. Symmetrie der Mensch-Maschine-Interaktion

Auch wenn wir einer Maschine kein mit dem eines Menschen vergleichbares mentales Modell geben können, gibt es doch eine Reihe praktischer Konzepte und Realisierungsmöglichkeiten, einige der Schwächen in der Systemmodellierung zu überwinden. Im folgenden soll dargestellt werden, wie auf der Grundlage einer weitergehenden Symmetrie mentaler und konzeptueller Modelle ein ausgewogeneres Verhältnis zwischen menschlichen und

maschinellen Funktionen zum Zweck der verbesserten Mensch-Maschine-Kommunikation gefunden werden kann.

Das menschliche Handlungsmodell und das maschinelle Funktionsmodell entstehen zwar im Umfeld eines analytischen Entwicklungskontextes, weisen jedoch im allgemeinen wenig verträgliche Ebenen auf. Die Maschine wird an ihrem angemessenen Input-Output-Verhalten gemessen. Letztlich gilt ähnliches für den Menschen. Diese behavioristischen Modelle erlauben zwar die Validierung und Gewähr der Performanz im Normalbetrieb, nicht aber die erfolgreiche Bewältigung, „das Meistern“ einer Problemsituation. Im Notfall wird die gesamte Diskrepanz und Unverträglichkeit des menschlichen Handlungsmodell (mentales Modell) und des maschinellen Funktionsmodells (konzeptuelles Modell) sichtbar und spürbar. Der Mensch kämpft gegen die Arbeitsweise der Maschine und die Maschine gegen die Handlungen des Menschen mit jeweils gerade in der Notsituation wenig adäquaten Mechanismen. Interlocks vereiteln Notlösungen und menschliche (Über-)Reaktionen maschinelle Stabilisierungsversuche und Schutzmechanismen. Mensch und Maschine führen einen sprachlosen Kampf gegeneinander.

Diese Eskalation gegenseitigen Unverständnisses kennzeichnet fast jede Kaskade von fatalen Handlungen und Funktionen, oft auch fälschlicherweise als Fehlerketten angesehen. Viele davon sind in Wirklichkeit keine Fehlerketten sondern babylonische Dialoge. Beispiele dafür gibt es unzählige. Trotzdem sollen noch einmal einige besonders dramatische und typische Fälle genannt werden:

- der Absturz der Birgenair Maschine, bei der eine vollkommen flugtaugliche Maschine nach heftigen, aber völlig zur maschinellen Funktion inkohärenten Aktivitäten des Piloten ins Meer stürzt
- die kürzliche Kollision der DHL-Cargo-Maschine mit der bashkirianischen Maschine, bei der die beiden Piloten, der Controller der Flugsicherung und die beiden Kollisionswarnsysteme der Maschinen aneinander vorbei kommuniziert haben
- die meisten Schiffskollisionen ereignen sich zwischen Schiffen, die sich zunächst nicht auf Kollisionskurs befinden, sondern erst nachdem mindestens ein Kapitän das andere Schiff erkannt hat und daraufhin den Kurs ändert [Perrow 1987]
- der schwerste aller Nuklearunfälle, Tschernobyl, bei dem eine Bedienmannschaft den Reaktor in die Instabilität bringt, während sie einen Routinetest durchführt und andererseits Kiev weiterhin mit Strom beliefern will; beim Versuch die Anlage schnell abzuschalten wird diese endgültig destabilisiert und zur Explosion gebracht

Ein möglicher Weg derartige Unfälle aufgrund von unverträglichen Handlungs- und Funktionsmodellen zu verhindern, ist derjenige, auf den 6 genannten mentalen und konzeptuellen Ebenen von unten soweit wie möglich nach oben eine Kongruenz und damit Kompatibilität von mentalem Modell und Systemmodell herzustellen. Das bislang favorisierte blackbox-orientierte behavioristische Input/Output-Verhalten alleine erlaubt keine Kommunikation von verständlichen und bedeutungsvollen (kultivierten) Zeichen, syntaktischen Strukturen, ineinander übersetzbaren Informationsmodellen, verträglichen und verständlichen Prozeduren oder auch Intentionen des Handelns oder Funktionierens. Es fehlen entsprechende Systementwicklungsprozesse (*Cognitive Engineering*) [Herczeg 1999, Herczeg 2001, Kritzenberger, Herczeg 2001], die auf der Grundlage mentaler Modelle kongruente konzeptuelle Funktionsmodelle mit einer von der Maschine zugreifbaren Metaschicht

(Selbstbild der Maschine) in der Maschine modellieren und realisieren.

Im folgenden soll diese Kongruenz der Ebenen im Einzelnen diskutiert werden:

Sensomotorische Ebene: Eine Kongruenz auf sensomotorischer Ebene bedeutet einerseits die problemgerechte, direkte Abbildung vor allem menschlicher Motorik oder gesprochener Sprache auf die Maschine. Die Kongruenz drückt sich insbesondere in der Natürlichkeit und der dynamisch angepassten Empfindlichkeit des technischen Systems auf menschliche physische Interaktionen aus. Im Bereich der Systemausgaben und menschlicher Sensorik drückt sich die Kongruenz in der Verträglichkeit von sensorischem Kanal und technischer Stimulation (Signale) aus. Sensomotorische Kongruenz scheitert in vielen Fällen am fehlenden Kräftefeedback und der fehlenden Adaptivität technischer Eingabesysteme. Operateure müssen über andere sensorische Kanäle die Wirkung ihrer Aktionen einschätzen.

In realen Mensch-Maschine-Systemen finden wir viele Beispiele in denen natürliche Eingaben möglich sind, insbesondere falls ein Kräftefeedback vorhanden ist, wie z.B. Joystick, Lenkrad, Touchpad sowie eine Reihe von wenig kongruenten Eingabetechniken, wie z.B. Tastaturen. Ausgabeseitig finden wir ein hohes Maß an Kongruenz durch naturalistische Visualisierungen in Form von Dreidimensionalität oder Audifikationen durch MP3-komprimiertes Multikanalaudio während wir beispielsweise bei grob gerasterten Bildschirmen oder engbandigem Audio fehlangepasste sensorische Anbindungen vorfinden.

Lexikalische und syntaktische Ebene: Eine Kongruenz auf lexikalischer Ebene bezieht sich auf ein gemeinsames Zeichenrepertoire. Zeichen können selbst wieder in Form syntaktischer Strukturen hierarchische oder andere Strukturen bilden. Gemeinsame Zeichen, ihre Relation zur realen Welt sowie ihre Interpretation bilden im Sinne der Semiotik die Grundlage zur Kommunikation. Die Verwendung gemeinsamer Zeichenrepertoires und Syntax zwischen Mensch und Maschine gestaltet sich schwierig, da der Bezug eines Zeichens zur realen Welt ein kultureller, situativer und handlungsorientierter und nicht einfach ein gegenständlicher Bezug ist (vgl. auch [Rasmussen 1983]).

Die Kongruenz kann sich in ingenieurtechnisch definierten Systemen leichter einstellen als in der belebten Welt, da Ingenieursysteme (z.B. Flugzeuge) einen abstrakten Systemcharakter per Konstruktion besitzen (z.B. ihre hierarchische Teilestruktur) auf den sich Operateure kraft ihrer Ausbildung einlassen. Die entstehende artifizielle technische Fachsprache ist ein Beispiel von zwischen Mensch und Maschine zuverlässig kommunizierbaren Zeichensystemen. Schwierig wird die Kommunikation dann, wenn der Gegenstand des Dialogs das Artefakt verlässt und Bezüge zur natürlichen Welt herstellen will. Dies ist beispielsweise der Fall, wenn ein Pilot Begrifflichkeiten mit der Maschine auszutauschen versucht, die beispielsweise unvorhergesehene Umweltbedingungen (Wetter, etc.) adressieren. Hier wird es schnell zum Bruch der Kohärenz und damit zu nicht mehr eindeutiger Semantik der Nachrichten kommen, da keine zuverlässigen gemeinsamen Zeichensysteme existieren.

Semantische und pragmatische Ebene: Auf der semantischen Ebene werden Objekte der Anwendungswelt und ihre Eigenschaften angesprochen. Diese Eigenschaften bilden Zustände, die wiederum einzelne oder mehrere Aktionen zu ihrer Änderung in Gang setzen. Die Kongruenz der Objektmodelle (Informationsmodelle) zwischen Mensch und Maschine ist in einem hohen Maße möglich, aber nicht unbedingt selbstverständlich. So wird mangels Analyse in der Maschine üblicherweise ein konzeptuelles Modell geschaffen, dass sich vom mentalen Modell des Operateurs deutlich unterscheidet. Der Operateur hat dann die Aufgabe seine geplanten Aktivitäten in mögliche Operationen mit dem System zu übersetzen. Diese

Transformationsleistung in beiden Richtungen der Kommunikation (Senden und Empfangen von Nachrichten) beeinträchtigt die Konzentration auf das Problem. Stattdessen muss der Operateur seine Aufgaben im Rahmen der Problemstellung (externe Aufgaben) in Aufgaben mit dem System (interne Aufgaben) übersetzen und investiert damit einen wesentlichen Teil seiner kognitiven Leistung außerhalb des Routine- oder Problemlösungsprozesses für die Kommunikation mit der Maschine.

Es wird seit vielen Jahren versucht, durch die Verwendung natürlicher Sprache eine gewissermaßen selbstverständlich problemorientierte Ebene der Kommunikation zwischen Mensch und Maschine herzustellen. Abgesehen davon, dass dies in allen relevanten praktischen Anwendungen nicht ausreichend zuverlässig funktioniert ist dies eines der großen Missverständnisse der Mensch-Maschine-Kommunikation. Es geht nicht um die Verwendung natürlicher Sprache sondern ausschließlich um einen kongruenten gegenständlichen Handlungsraum, bei dem die Objekte (physische und virtuelle Objekte) auf beiden Seiten, soweit es die Problemstellung betrifft, vergleichbar modelliert und benannt wurden. Natürliche Sprache würde zunächst nur zusätzliche Mehrdeutigkeiten liefern und kaum Probleme lösen, da das wirkungsvolle Nutzen natürlicher Sprache ein nicht repräsentierbares Gesamtweltmodell inklusive Common Sense erfordert.

Intentionale Ebene: Nun könnte man annehmen, dass spätestens auf der Intentionalen Ebene Mensch und Maschine nicht mehr kongruent sein können. Menschliche Intentionen sind jedoch zunächst aus Problemlösungssicht nichts anderes als komplexe und unscharfe Zielzustände typischerweise auf der höchsten modellierten Objektebene. Dies ist in einem konzeptuellen Maschinenmodell genauso modellierbar wie Objekte auf niedriger Ebene. Das Problem beginnt, wenn der menschliche Operateur sein eigenes kognitives Modell verlässt und den Problemraum beliebig verbreitert und emotionalisiert. In realen Situationen heisst dies beispielsweise, dass ein Operateur in einem Notfall anfängt zu fluchen (findet sich in vielen Aufzeichnungen von Voice-Recordern) oder zu gestikulieren anstatt auf der kognitiven und kontrolliert sensomotorischen Ebene zu bleiben und zu versuchen das Problem dort zu lösen.

Zusammenfassung

Viele Mensch-Maschine-Probleme basieren auf einer Asymmetrie zwischen dem menschlichen mentalen Handlungssystem und dem maschinellen Funktionssystem. Die Asymmetrie drückt sich in der Inkongruenz der jeweils korrespondierenden Handlungsebenen in Mensch und Maschine aus. Mensch und Maschine haben nicht nur eine begrenzte Fähigkeit im linguistischen Sinne zu kommunizieren, sie zwingen den Menschen auch im Bereich der Handlungen Übersetzungsleistungen zu erbringen, die schwierig, zeitintensiv und fehlerträchtig sind.

Eine wesentliche Verbesserung der Mensch-Maschine-Kommunikation und Mensch-Maschine-Interaktion ist nur durch die geeignete explizite Modellierung (Metamodellierung) der Funktionen des Systems auf allen mit menschlichen Handlungsebenen korrespondierenden Niveaus. Dies bildet die Grundlage für eine intentionsgetriebene gegenseitige Überwachung und Unterstützung (Intention-Based Supervisory Control) sowie für eine beidseitige kommunizierbare Situational Awareness. Das Mensch-Maschine-System weist auf diese Weise eine wesentliche höhere Symmetrie auf, die die Grundlage für kooperatives Planen, Kommunizieren und Handeln, Interpretieren und Bewerten darstellt.

Literatur

[Billings 1991] Ch. Billings: *Human-Centered Aircraft Automation: A Concept and Guidelines*, NASA Technical Memorandum 103885, NASA Ames Research Center, August 1991.

[Herczeg 1994] M. Herczeg: *Software-Ergonomie*, Addison-Wesley und Oldenbourg-Verlag, 1994.

[Herczeg 1999] M. Herczeg: *A Task Analysis Framework for Management Systems and Decision Support Systems*, in: Proceeding of AoM/Iaom, 17. International Conference on Computer Science, San Diego, California, August 1999, pp. 29-34.

[Herczeg 2000] M. Herczeg: *Sicherheitskritische Mensch-Maschine-Systeme*, in: FOCUS MUL 17, Heft 1, 2000, pp 6-12.

[Herczeg 2001] M. Herczeg: *A Task Analysis and Design Framework for Management Systems and Decision Support Systems*, in: ACIS International Journal of Computer & Information Science, Vol. 2, No. 3, September 2001, pp 127-138.

[Kantowitz, Sorkin 1987] B.H. Kantowitz, R.D. Sorkin: *Allocation of Functions*, in: G. Salvendy (Ed.): *Handbook of Human Factors*, John Wiley and Sons, 1997, pp 355-369.

[Kritzenberger, Herczeg 2001] H. Kritzenberger, M. Herczeg: *A Task- and -Scenario-Based Analysis and Design Method for User-Centered Systems*, in: Proceedings of HCI International 2001, 9th International Conference on Human-Computer Interaction jointly with 4th International Conference on Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics and 1st International Conference on Universal Access in Human-Computer Interaction, August 2001, New Orleans, Lawrence Erlbaum Associates, pp. 229-231.

[Perrow 1987] C. Perrow: *Normale Katastrophen: Die unvermeidbaren Risiken der Großtechnik*. Frankfurt/M., New York: Campus.

[Rasmussen 1983] J. Rasmussen: *Skills, Rules, and Knowledge; Signals, Signs, and Symbols, and Other Distinctions in Human Performance Models*, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Vol. SMC-13, No. 3, May/June 1983.

[Rasmussen, Goodstein 1985] J. Rasmussen and L.P. Goodstein: *Decision Support in Supervisory Control*, Technical Report M-2525, Risø National Laboratory, Roskilde, Denmark, August 1985.

[Rasmussen, Goodstein 1988] J. Rasmussen and L.P. Goodstein: *Information Technology and Work*, in: M. Helander (Hrsg.): *Handbook of Human-Computer Interaction*, Elsevier Science Publishers B.V. (North Holland), Amsterdam, 1988, pp 175-201.

[Sheridan 1987] T.B. Sheridan: *Supervisory Control*, In: G. Salvendy (Ed.): *Handbook of Human Factors*, John Wiley and Sons, 1997, pp 1243-1268.

[Sheridan 1988] T.B. Sheridan: *Task Allocation and Supervisory Control*, In: M. Helander (Ed.): *Handbook of Human-Computer Interaction*, Elsevier Science Publishers B.V. (North Holland), Amsterdam, 1988, pp 159-173.