



**Gesellschaft für Anlagen-
und Reaktorsicherheit
(GRS) mbH**

**Beurteilung der
menschlichen
Zuverlässigkeit
auf der Basis von
Betriebserfahrung**

Dissertation von
Oliver Sträter

Januar 1997

**GRS - 138
ISBN 3-923875-95-9**

Deskriptoren:

Betriebserfahrung, Datenbank, Evaluierung, Expertensystem, Fehler, Mensch, Modell, PSA, Zuverlässigkeit

Lehrstuhl für Ergonomie der Technischen Universität München

**Beurteilung der menschlichen Zuverlässigkeit
auf der Basis von Betriebserfahrung**

Oliver Sträter

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Wirtschafts- und Sozialwissenschaften der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktors der Philosophie

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr. rer. pol. Dr. h.c. R. Reichwald

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr. rer. nat. H. Bubb
2. Univ.-Prof. Dr. rer. nat. B. Zimolong, Ruhr-Universität Bochum

Die Dissertation wurde am 21.5.1996 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Wirtschafts- und Sozialwissenschaften am 15.1.1997 angenommen.

Zusammenfassung

Die vorliegende Dissertation wurde bei der Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH aufbauend auf dem Projekt RS 872 des BMBF "Weiterentwicklung methodischer Grundlagen und Rechenprogramme für probabilistische Sicherheitsanalysen" durchgeführt. Ein zentrales Problem bei der Bewertung der menschlichen Zuverlässigkeit ist, daß die für den Beurteilungsprozeß benötigten Daten bisher unvollständig und unzureichend validiert sind. Betriebserfahrung in Form von Fehlerereignissen bietet sich hier als eine bisher nicht systematisch genutzte Quelle an, um dieses Datenproblem zu lösen. Ziel der Promotion war es, eine Methode zur Auswertung von Ereignissen im Hinblick auf menschliche Fehler zu entwickeln und die in den Ereignissen enthaltene Betriebserfahrung für qualitative und quantitative Bewertungen menschlicher Zuverlässigkeit nutzbar zu machen. Zur Entwicklung der Methode wurde aus vorliegenden Modellen zur qualitativen Beurteilung des menschlichen Fehlverhaltens (z.B. Swain, Hacker, Rasmussen) und aus verschiedenen Ansätzen zur quantitativen Beurteilung menschlicher Fehlhandlungen (z.B. THERP, ASEP, HCR, SLIM) ein Anforderungsprofil erstellt. Aufbauend darauf wurde eine Methode zur Erfassung und Bewertung von Fehlhandlungen entwickelt. Die Methode gliedert sich in die beiden Teilbereiche Ereignisanalyse und -auswertung: Zunächst erfolgt die Analyse von Ereignissen hinsichtlich aller Informationen, die für das Zustandekommen einer menschlichen Fehlhandlung bedeutsam sind. Neben Angaben zum Hergang eines Vorkommnisses werden auch mögliche Bedingungen für das Scheitern einer Handlung berücksichtigt. Da eine Bewertung menschlicher Zuverlässigkeit vielfältige Auswertungsmöglichkeiten erfordert, wurde zur Auswertung der gesammelten Ereignisse auf der Grundlage einer Diskussion verschiedener Ansätze aus der Künstlichen Intelligenz (KI) ein konnektionistisches Verfahren entwickelt, welches sowohl qualitative als auch quantitative Aussagen in einem einheitlichen Ansatz ermöglicht.

Um die Leistungsfähigkeit des Verfahrens zu prüfen, wurden insgesamt 165 Ereignisse mit menschlichem Fehlverhalten aus der Datenbank "Besondere Vorkommnisse" der GRS untersucht. Die Auswertung dieser Fälle bringt neue Erkenntnisse bezüglich wirkender Fehlermechanismen und der Validierung der Daten vorhandener Bewertungsverfahren. So konnten u.a. Verwechslungsfehler auf einen Interferenzeffekt kognitiver Teilfertigkeiten zurückgeführt werden. Weiterhin wurden 30 Einflußfaktoren auf die menschliche Zuverlässigkeit aus der Betriebserfahrung identifiziert. Um neben qualitativen Angaben auch quantitative Aussagen zur menschlichen Zuverlässigkeit zu

untersuchen, wurden die Angaben aus der Betriebserfahrung mit 79 Items des Verfahrens THERP verglichen. Insgesamt zeigt sich eine gute Übereinstimmung der Vorhersagen aus der Betriebserfahrung mit THERP. Auch wurden einige Abweichungen gefunden, die für probabilistische Analysen von Bedeutung sind. Eine breitere Anwendung des hier vorgestellten Analyseverfahrens würde eine bessere Einschätzung dieser Abweichungen ermöglichen. Die erfolgreiche Validierung legt auch nahe, das hier vorgestellte Verfahren als einen Ansatz für ein weiterentwickeltes Verfahren zur Analyse und Bewertung der menschlichen Zuverlässigkeit zu nutzen.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all denen bedanken, die zur Erstellung dieser Arbeit beigetragen haben.

Ein ganz besonderer Dank gilt dabei Herrn Prof. Heiner Bubb (Lehrstuhl für Ergonomie der TU München), der mir bei Problemen stets zur Seite stand und wertvolle Anregungen für diese Arbeit gegeben hat.

Herrn Prof. Bernhard Zimolong danke ich für sein großes Interesse an der Arbeit und der Übernahme der Aufgabe als zweiter Berichterstatter.

Ferner danke ich Wolfgang Preischl (GRS), Dr. Bernhard Reer (Forschungszentrum Jülich), Jürgen Bonfert (ISTec), dem Arbeitskreis 'Menschliche Zuverlässigkeit und Sicherheit' des VDI (Verein Deutscher Ingenieure) sowie der Arbeitsgruppe EARTH (siehe Mosneron-Dupin et al., submitted) für die zahlreichen fachlichen Diskussionen zu den Themen Menschliche Zuverlässigkeit, Datenverarbeitung und Künstliche Intelligenz. Undenkbar wäre diese Arbeit auch ohne die moralische Unterstützung meiner Familie und Christina sowie von vielen Mitarbeitern der GRS, von denen ich Dr. David Beraha, Dr. Werner Bastl und Thomas Voggenberger besonders danken möchte.

Inhaltsverzeichnis

Seite

Einleitung	1
1	Auffassungen und Modellvorstellungen über den menschlichen Fehler..... 5
1.1	Historischer Überblick 5
1.1.1	Der menschliche Fehler in der Philosophie 6
1.1.2	Der menschliche Fehler in der Psychologie..... 8
1.1.3	Der menschliche Fehler in den Ingenieurwissenschaften 10
1.1.4	Zusammenfassung..... 12
1.2	Auffassungen über den menschlichen Fehler 13
1.2.1	Definitionen für menschliche Fehler 13
1.2.2	Ein einfaches Beispiel eines menschlichen Fehlers 15
1.2.3	Definition des menschlichen Fehlers in dieser Arbeit 18
1.3	Modellvorstellungen über den menschlichen Fehler 20
1.3.1	Phänomenologische Modellvorstellungen 22
1.3.2	Kausale Modellvorstellungen..... 24
1.3.3	Aktionale Modellvorstellungen..... 30
1.4	Ansätze für ein Modell zur Analyse menschlicher Fehler..... 36
1.4.1	Diskussion der Modellvorstellungen 36
1.4.2	Ein behaviouristischer Ansatz zur Fehlermodellierung 38
1.4.3	Ein kognitivistischer Ansatz zur Fehlermodellierung 40
1.4.4	Weiteres Vorgehen 46
2	Verfahren zur Beurteilung menschlicher Zuverlässigkeit..... 47
2.1	Beurteilung der menschlicher Zuverlässigkeit in der PSA 48
2.1.1	Vorgehen in einer PSA..... 49
2.1.2	Vorgehen bei einer HRA 53
2.2	Verfahren zur Bewertung der menschlichen Zuverlässigkeit 58
2.2.1	HRA-Verfahren..... 58
2.2.2	Diskussion der HRA-Verfahren 70
2.3	Verfahren zur Analyse von Betriebserfahrung 74
2.3.1	Arbeitswissenschaftliche Bewertungssysteme 74
2.3.2	Verfahren zur Analyse von Ereignissen..... 76
2.3.3	Systeme zur Ereignismeldung..... 79

2.4	Anforderungen an ein Modell zur Beurteilung menschlicher Zuverlässigkeit auf der Basis von Betriebserfahrung.....	84
2.4.1	Anforderungen an die zu erfassende Information.....	84
2.4.2	Anforderungen an die Struktur der bereitzustellenden Daten und deren Auswertung.....	85
2.4.3	Anforderungen an den erwarteten Erkenntnisgewinn durch die Auswertung von Betriebserfahrung.....	86
3	Ein allgemeines Modell zur Analyse menschlicher Fehler in Ereignissen.....	88
3.1	Grundlagen des Beschreibungsmodells.....	88
3.1.1	Generisches Beschreibungsmodell zur Analyse von Ereignissen.....	88
3.1.2	Ausweitung des generischen MMS auf Arbeitssysteme.....	94
3.2	Analyse von Ereignissen.....	95
3.2.1	Ereignisidentifikation.....	96
3.2.2	Zerlegung eines Ereignisses für Analysen.....	97
3.2.3	Analyse des Handlungsablaufes.....	99
3.2.4	Analyse der kognitiven Belastung und Beanspruchung.....	104
3.2.5	Aspekte hinsichtlich der Anlagenoptimierung.....	105
3.3	Fehlerarten und Fehlerbedingungen im Beschreibungsmodell.....	106
3.3.1	Fehlerbeschreibungen innerhalb des Modells.....	106
3.3.2	Fehlermodelle im Beschreibungsmodell.....	113
3.3.3	Spezifische Aspekte des Beschreibungsmodells bezüglich der HRA-Verfahren und Anlagenoptimierung.....	115
3.4	Diskussion.....	122
3.4.1	Leistungsmerkmale des Beschreibungsmodells.....	123
3.4.2	Unterschiede zu bisherigen Verfahren zur Ereignisauswertung.....	124
4	Modell zur Auswertung der Informationen aus den Ereignissen.....	130
4.1	Auswertungsaspekte.....	131
4.1.1	Erforderliche Auswertungsmöglichkeiten.....	132
4.1.2	Die Datenstruktur des Beschreibungsmodells.....	135
4.2	Ansätze für das Auswertungsmodell aus der KI.....	143
4.3	Entwicklung des Auswertungsmodells.....	147
4.3.1	Netztopologie.....	147
4.3.2	Aktivierungsfunktion.....	149
4.3.3	Verarbeitungsmechanismus.....	151

4.4	Modell zur Auswertung der Ereignisbeschreibungen	160
4.4.1	Struktur des Netzes zur Vorhersage menschlicher Zuverlässigkeit	160
4.4.2	Verarbeitung komplexer Aussagen innerhalb des Netzes	163
4.4.3	Unsicherheiten in den Daten	164
4.4.4	Quantitative und qualitative Aussagen im Modell	166
4.5	Diskussion des Auswertungsmodells	169
4.5.1	Methodische Fähigkeiten des konnektionistischen Netzes	170
4.5.2	Besonderheiten bezüglich der Ereignisauswertung	174
5	Ereignisauswertung und Vorhersagen des Verfahrens	177
5.1	Auswertung der Quellen zur Betriebserfahrung	177
5.1.1	Identifikation möglicher HF-Ereignisse	178
5.1.2	Untersuchung der HF-Ereignisse	180
5.1.3	Auswertung der HF-Ereignisse	181
5.2	Auswertung der Daten im Hinblick auf qualitative Angaben	182
5.2.1	Identifizierte Handlungstypen	182
5.2.2	Identifizierte Fehlerarten	184
5.2.3	Kausale Einflußfaktoren	186
5.2.4	Identifizierte Fehlerbedingungen bzw. aktionale Einflußfaktoren	190
5.2.5	Wirkungszusammenhänge von Fehlerbedingungen	197
5.2.6	Systemergonomie, kognitive Fehler und Verwechslungsfehler	204
5.2.7	Wirksamkeit von Optimierungsmaßnahmen	209
5.3	Häufigkeitsanalytische Vorhersagen aus der Betriebserfahrung	212
5.3.1	Verteilungsannahmen	212
5.3.2	Quantitative Vorhersagen aus der Betriebserfahrung	219
5.4	Schätzwerte für Zuverlässigkeitskenngrößen aus der Betriebserfahrung mit Hilfe eines probabilistischen Modells	227
5.4.1	Das Modell von Rasch	228
5.4.2	Parameterschätzung	234
5.5	Probabilistische Vorhersagen aus der Betriebserfahrung	239
5.5.1	Probabilistischer Vergleich der Betriebserfahrung mit den Daten des THERP-Verfahrens	239
5.5.2	Vergleich mit einzelnen Modellen des THERP-Verfahrens	244
5.6	Diskussion	250
5.6.1	Bedeutung von HEP in der menschlichen Zuverlässigkeit	250
5.6.2	Vorhersagen zur menschlichen Zuverlässigkeit mit Hilfe eines situativen Bewertungsansatzes	254

6	Abschließende Diskussion der Arbeitsergebnisse.....	256
	Literaturverzeichnis	261
	Anhänge	271
Anhang 1:	Darstellung des Datenbanksystems CAHR	A1-1
Anhang 2:	Taxonomien zur Beschreibung menschlicher Handlungen und Fehler.....	A2-1
Anhang 3:	Beispiel einer Ereignisbeschreibung mit dem Beschreibungsmodell	A3-1
Anhang 4:	Ansätze für das Auswertungsmodell aus der KI.....	A4-1
A.4.1	Expertensysteme.....	A4-1
A.4.2	Fuzzy-Sets	A4-10
A.4.3	Probabilistische Netze	A4-18
A.4.4	Neuronale und konnektionistische Netze.....	A4-26
Anhang 5:	Extrakt des Kapitels 20 des THERP-Handbuches.....	A5-1
Anhang 6:	Kriterien zur Auswahl der HF-Fälle, Abfrageergebnisse zu den THERP-Tabellen	A6-1

Tabellenverzeichnis

Seite

Tabelle 1	Das TMI-Ereignis - ein Beispiel für einen menschlichen Fehler.....	17
Tabelle 2	Ansätze zur phänomenologischen Klassifikation menschlicher Fehlhandlungen.....	22
Tabelle 3	Einteilung von Norman.....	25
Tabelle 4	Einteilung von Reason (1976).....	27
Tabelle 5	Einflußfaktoren auf menschliche Handlungen nach Swain und Guttman (1983).....	33
Tabelle 6	Erweiterung des Modells von Rasmussen um den Faktor der Aufmerksamkeitssteuerung.....	44
Tabelle 7	Die systemergonomische Klassifikation zur Modellierung der kognitiven Belastung.....	45
Tabelle 8	Einteilung des Handlungsbereiches C.....	56
Tabelle 9	Struktur eines Datensatzes in NUCLARR (nach Reece et al., 1994)....	81
Tabelle 10	Kategorien der Datenbank BEVOR.....	82
Tabelle 11	Zusammenfassung der Einteilungen von Ereignisbeschreibungen.....	83
Tabelle 12	Anforderungen an die zu erfassende Information.....	85
Tabelle 13	Beschreibung der Komponenten im MMS.....	92
Tabelle 14	Allgemeine Taxonomie zur Fehleridentifikation innerhalb des MMS (angelehnt an Swain & Guttman, 1983, p3-7).....	93
Tabelle 15	Zustände im betrieblichen Ablauf.....	97
Tabelle 16	Darstellung der Möglichkeiten zur Fehlerbeschreibung anhand eines hypothetischen Beispiels.....	102
Tabelle 17	Regeln zur systemergonomischen Klassifikation kognitiver Belastung.....	105
Tabelle 18	Beschreibung von Verbesserungen im Beschreibungsmodell.....	106
Tabelle 19	Abbildung möglicher Abhängigkeiten im Beschreibungsmodell.....	121
Tabelle 20	Vorhersage optimaler Wirksamkeiten von Maßnahmen zur Anlagenoptimierung.....	121
Tabelle 21	Unterschied zwischen Deskriptoren und standardisierter Sprache.....	127
Tabelle 22	Situationsbeschreibendes Muster zur Suche nach den Ereignissen, bei denen ein Prozedurschritt unterlassen wurde.....	129
Tabelle 23	Beziehungen in der Datenstruktur der Ereignisbeschreibung.....	140
Tabelle 24	Gegenüberstellung der KI-Ansätze bezüglich der Anforderungen des Auswertungsmodells.....	146
Tabelle 25	Klassifikation gefundener Handlungstypen in den untersuchten Ereignissen.....	183
Tabelle 26	In der Untersuchung beobachtete Fehlerarten und deren Häufigkeiten innerhalb der identifizierten MMS.....	186

Tabelle 27	Häufigkeiten kausaler PSF und Wirkungsbeziehungen des Informationsflusses innerhalb des MMS.	188
Tabelle 28	Zusammenfassung der identifizierten Bedingungen für einen menschlichen Fehler.	191
Tabelle 29	Beobachtete Zusammenhänge von Einflußfaktoren.	198
Tabelle 30	Zusammenhang von Systemergonomie und kognitiven Fehlern.	208
Tabelle 31	Beispiele für die Modellierung der THERP-Items als situative Anfragemuster an die Datenbank.	223
Tabelle 32	Verschiedene Ansätze zur Kalibrierung.	227
Tabelle 33	Annahmen des Rasch-Modells.	229
Tabelle 34	THERP-Items, Abweichungsrichtung und mögliche Gründe.	243
Tabelle 4- 1	Entscheidungstafel zur Bestimmung einer Membershipfunktion.....	A4-16

Abbildungsverzeichnis

	Seite
Bild 1	Einteilung von menschlichen Fehlern nach Rouse und Rouse (1983). 26
Bild 2	Fehler im Drei-Ebenen-Modell nach Rasmussen (1986). 28
Bild 3	Das GEMS-Modell nach Reason (1990, p.64)..... 30
Bild 4	Einteilung von Hacker (1986). 31
Bild 5	Einteilung von Swain und Guttman..... 32
Bild 6	Einteilung von Seifert und Brauser. 34
Bild 7	Multi-Aspekt einer aktionalen Betrachtung menschlicher Fehler nach Rasmussen. 35
Bild 8	Gestaffeltes Vorgehen einer Fehlerbeschreibung. 37
Bild 9	Das Grundschema des MMS. 39
Bild 10	Ereignisablaufdiagramm für ein Dampferzeugerheizrohrleck (nach DRS-B, 1990). 50
Bild 11	Einfacher hypothetischer Fehlerbaum mit menschlichen und technischen Basisereignissen..... 52
Bild 12	Analyseschritte in SHARP..... 54
Bild 13	Aktionsbaum und Fehlerwahrscheinlichkeiten (nach Swain & Guttman, 1983). 61
Bild 14	Zeit-Zuverlässigkeitskurven aus den Simulatorexperimenten von EDF. 68
Bild 15	Teilausschnitt der Hierarchie von HSYS..... 78
Bild 16	Das MMS als generisches Element zur Erfassung menschlicher Handlungen..... 90
Bild 17	Zuordnung fehlerbegünstigender Bedingungen aus der Literatur zu den MMS-Komponenten..... 94
Bild 18	Ein einfaches Arbeitssystem. 94
Bild 19	Beschreibung komplexer Ereignisse im Arbeitssystem. 95
Bild 20	Ereigniserlegung und Beispiele für Abhängigkeiten verschiedener MMS..... 99
Bild 21	Veranschaulichung der allgemeinen Definition eines Fehlers..... 100
Bild 22	Beschreibung von Fehlern als Ist-Soll Abweichung oder in vektorieller Notation. 101
Bild 23	Direkt wirkende und indirekt wirkende PSF auf die menschliche Leistung (nach Bubb, 1994). 113
Bild 24	Charakteristische Schwachstellen im MMS zur Klassifikation der Handlungsbereiche A, B und C. 119
Bild 25	Trade-Off zwischen der analytischen Vorgehensweise gegenüber Deskriptoren..... 125

Bild 26	Ein einfaches Beispiel einer mit dem Beschreibungsmodell gewonnenen Datenstruktur.	131
Bild 27	Geforderte Auswertungsmöglichkeiten aus den gesammelten Ereignissen.	132
Bild 28	Mögliche Beziehungen zwischen Daten.	139
Bild 29	Aussage 'Ventil öffnen unterlassen' als Venn-Diagramm.	148
Bild 30	Ereignisbezogene Topologie zur Auswertung der Betriebserfahrung.....	149
Bild 31	Aufbau einer Zelle im konnektionistischen Netz und Aktivierungsfluß.....	150
Bild 32	Darstellung des Prinzips einer konnektionistischen Datengewinnung.	153
Bild 33	Konnektionistische Datengewinnung bei UND NICHT-Verknüpfung.....	157
Bild 34	Konnektionistische Datengewinnung bei ODER-Verknüpfung.....	158
Bild 35	Darstellung des konnektionistischen Netzes zur Auswertung von Betriebserfahrung.....	161
Bild 36	Schwellenwertberechnungen bei komplexen Aussagen.	164
Bild 37	Hypothetische Wechselwirkungen verschiedener Einflußfaktoren.....	169
Bild 38	Verlauf der kombinatorischen Explosion des Kodierungsaufwandes für deskriptor-orientierte Verfahren im Vergleich zum konnektionistischen Netz.	172
Bild 39	Verteilung der HF-Ereignisse gegenüber HF-relevanten (HR) Ereignissen und technischen Ereignissen.	178
Bild 40	Prüfung der Repräsentativität der untersuchten HF-Ereignisse.....	179
Bild 41	NMDS der Fehler im Informationsfluß des MMS.	189
Bild 42	Identifizierte Einflußfaktoren mit ihren Unsicherheiten.....	190
Bild 43	Nicht Metrische Multidimensionale Skalierung der Wechselwirkungen zwischen den Einflußfaktoren.....	203
Bild 44	Bedeutungsprofil der Einflußfaktoren bezogen auf die kognitive Belastung und Beanspruchung.	205
Bild 45	Bedeutungsprofil der Fehlerarten bei kognitiven Prozessen.....	207
Bild 46	Identifizierte Schwachstellen und getroffene Vorkehrungen.....	210
Bild 47	Logarithmische Normalverteilung durch Beschreibungsaufwand operationalisiert.....	215
Bild 48	Logarithmisch-Linearer Zusammenhang zwischen Zeit und Zuverlässigkeit.	216
Bild 49	Zusammenhang zwischen Fehlern und Aufgabenkomplexität.....	218
Bild 50	Verteilung der absoluten Beobachtungshäufigkeiten im Vergleich zu den HEP-Werten aus dem THERP-Katalog.	224
Bild 51	Erwartete Häufigkeiten gegenüber HEP-Werten von THERP.	225

Bild 52	Probabilistisches Modell zur Vorhersage von Auftretens- Wahrscheinlichkeiten aus Häufigkeiten in der Beobachtung.	236
Bild 53	Dichtefunktion für das Auftreten eines Ereignisses vom Typ i in Abhängigkeit von der Aufgabenschwierigkeit (D).	238
Bild 54	Korrelationsgerade zwischen HEP-Werten von THERP gegenüber den mit CAHR aus den Beobachtungen berechneten Werten.	240
Bild 55	Darstellung der Über- und Unterschätzungen in den Einzelbeobachtungen.	242
Bild 56	Vergleich der Diagnosekurven von THERP und PHRA mit den Vorhersagen von CAHR.	245
Bild 57	Vergleich der Betriebserfahrung mit den Vorhersagen von THERP bezüglich verschiedener Streßgrade.	246
Bild 58	Vergleich der Betriebserfahrung mit den Vorhersagen von THERP bezüglich verschiedener Abhängigkeitsgrade.	249
Bild 1- 1	Aufbau des Systems.	A1-1
Bild 1- 2	Eingabe der Kennzeichen in die Datenbank.	A1-2
Bild 1- 3	Ereignisbeschreibungen in der Datenbank.	A1-2
Bild 1- 4	Eingabe der HF-Informationen in die Datenbank.	A1-3
Bild 1- 5	Darstellung einer quantitativen Abfrage in dem Datenbanksystem.	A1-4
Bild 1- 6	Darstellung einer qualitativen Abfrage in dem Datenbanksystem.	A1-5
Bild 1- 7	Darstellung der Klassenbildung.	A1-6
Bild 1- 8	Auswertung der Kennzeichen in dem Datenbanksystem.	A1-6
Bild 3- 1	Prinzipschaltbild der technischen Systeme, die beim Ereignis von Bedeutung waren.	A2-1
Bild 3- 2	Ereignisablauf.	A2-2
Bild 4- 1	Prinzipieller Aufbau eines Expertensystems.	A4-2
Bild 4- 2	Allgemeiner Aufbau einer Regel in Expertensystemen.	A4-3
Bild 4- 3	Mögliche Verbindungen von Regeln in Expertensystemen.	A4-3
Bild 4- 4	Ein einfaches Objekt-Netzwerk.	A4-5
Bild 4- 5	Eine einfache Membershipfunktion zur Bestimmung des Haltebereiches einer U-Bahn.	A4-11
Bild 4- 6	Darstellung einer Membershipfunktion als Netz.	A4-13
Bild 4- 7	Eine einfache Membershipfunktion der Dimension 'Wartengestaltung'.	A4-15
Bild 4- 8	Konstruktion einer Membershipfunktion mit der Signal- Entdeckungstheorie.	A4-16
Bild 4- 9	Verschiedene Typen von Graphen.	A4-20
Bild 4-10	Ein einfaches probabilistisches Netz.	A4-21
Bild 4-11	Ansatz eines probabilistischen Netzes zur Auswertung der Ereignisbeschreibungen.	A4-23
Bild 4-12	Aufbau einer Nervenzelle.	A4-27

Bild 4-13	Grobstruktur eines einfachen konnektionistischen Modells.	A4-29
Bild 4-14	Aussagenbezogene Topologie eines konnektionistischen Netzes. ...	A4-33
Bild 4-15	Objektbezogene Topologie mit inhibitorischen Verbindungen.	A4-34
Bild 4-16	Ereignisbezogene Topologie eines konnektionistischen Netz.	A4-36

Abkürzungsverzeichnis

	Seite
ASEP - Accident Sequence Evaluation Programme	63
ASSET - Assessment of Safety Significant Events Team	76
BEVOR - Besondere Vorkommnisse	81
CAHR - Connectionism Assessment of Human Reliability	177
DNE - Direct Numerical Estimation	69
DH - Druckhalter	17
DWR - Druckwasserreaktoren	177
EDF - Electricite de France	66
EOC - Error of Commission	22
EOM - Error of Omission	22
GEMS - Generic Error Modeling System	29
HRA - Human Reliability Analysis	1
HSYS - Human System	78
HEP - Human Error Probabilities	1
HF - Human-Factor Ereignis	97
HR - Human-Factor relevantes Ereignis	97
IAEA - International Atomic Energy Agency	53; 76
INES - International Nuclear Event Scale	83
IRS - Incident Reporting System	80
ICC - Item Characteristic Curve	232
MMS - Mensch-Maschine-System	38; 88
NMDS - Nicht-Metrische-Multidimensionale-Skalierung	188
NRC - Nuclear Regulatory Commission	76
NUCLARR - Nuclear Computerized Library for Assessing Reactor Reliability	80
PC - Paired Comparison	69
PHRA - Probabilistic Human Reliability Assessment	67
PSA - Probabilistischen Sicherheitsanalysen	1
PSF - Performance Shaping Factors	32; 68
SHARP - Systematic Human Action Reliability Procedure	53
SWR - Siedewasserreaktoren	177
SLI- Success Likelihood Index	69
SLIM-MAUD - MAUD für Multi Attribute Utility Decomposition	69
SLIM-Verfahren - Success Likelihood Index Method	68
SQL - Structured Query Language	140
THERP - Technique for Human Error Rate Prediction	59
TMI - Three Mile Island	15

Autorenverzeichnis

- ACSNI (1991) 74
Adams (1982) 251
Albers (1995) 194
Ameling (1990) 137
Anderson (1983) 193
Attneave (1974) 195
Bainbridge (1987) 11
Barriere et al. (1994) 75
Bartels et al. (1990) 47
Becker et al. (1995) 76
Berg & Schott (1992) 58; 62; 69
Billows (1993) 45
Bley et al. (1992) 74
Bollnow (1970) 7
Borg & Staufenbiel (1989) 188
Bortz (1989) 237
Broadbent (1958) 9; 193
Bubb (1992) 18; 21; 35; 38; 41; 44; 53;
70; 73; 89; 100; 104; 111; 194; 195;
258
Bubb (1993) 99; 117
Bubb (1994) 112; 113
Cacciabue (1992) 104
Chomsky (1965) 173
Comer et al. (1984) 69
Crutchfield et al. (1989) 20
Deutschmann (1994) 76
DIN 31051) 98
DIN 32541) 98
DIN 4003) 39
DIN 55350) 98
Dörner (1976) 25
Dorsch et al. (1994) 173
Dougherty & Fragola (1988) 2
Dougherty (1992) 176
DRS-B (1990) 1; 48; 50; 62; 167
Eberhard (1987) 21
Ebert (1993) 139; 140
Edwards et al. (1977) 68
Eggerdinger et al. (1986) 75
Embrey (1983) 34
Embrey (1992) 104
Embrey et al. (1984) 69; 72
Eye & Marx (1984) 188
Festinger (1957) 7; 41; 43
Fischer (1974) 20; 73; 227
Fitts (1954) 64
Frieling & Hoyos (1978) 75
Fujita (1992) 62; 66; 71; 73; 75; 104
Gausepohl (1989) 189
Gentner & Stevens (1983) 9; 195
Gerdes (1993) 58; 70
Gerster (1972) 139
Gertman et al. (1992) 72
GosAtomNadzor (1992) 104
Günzel (1993)) 193
Hacker (1986) 22; 31; 114; 205
Hacker et al. (1983) 75
Hannaman & Spurgin (1984a) 65; 212
Hannaman & Spurgin (1984b) 53
Harbour & Hill (1991) 78; 168
Hauptmanns et al. (1987) 47
Head (1926) 24
Hebb (1949) 209
Heslinga & Arnold (1993) 62; 70; 71;
251
Heuer (1992) 144
Hirschberg (1990) 55
Hockey (1984) 247
Hollnagel (1992) 62; 63; 72
IAEA-499 (1987) 53
IAEA-50 (1992) 54; 55; 182

- IAEA-538 (1990) 54; 58; 91
 IAEA-632 (1991) 76; 80
 Jastrzebska-Fraczek & Schmidtke (1992) 75
 Johnson (1980) 76
 Kaarstad et al. (1995) 218
 Keller (1990) 6; 7
 Kempke (1988) 142; 170
 Kieras & Polson (1985) 42
 Kirwan (1994) 218
 Kohonen (1988) 154
 Köller et al. (1994) 227
 Kotthoff & Voswinkel (1981) 81
 KTA 3501) 98
 Löhr et al. (1992) 196
 Lorenz (1978) 9
 Mandl & Spada (1988) 24; 196
 Mehl (1995) 19
 Meister & Hogg (1995) 206
 Meister (1977) 22
 Meister (1985) 99
 Miller (1956) 9
 Modarres et al. (1992) 104
 Moieni et al. (1994) 44
 Mosey (1990) 1; 15; 130
 Mosneron-Dupin (1993) 206; 219; 258
 Mosneron-Dupin (1994) 67; 176
 Mosneron-Dupin et al. (1990) 67; 212; 244
 Mosneron-Dupin et al. (submitted) III
 Nauck et al. (1994) 171
 Norman (1981) 22; 24
 Norman (1983) 194
 O'Hara (1994) 75
 Rasch (1960) 227
 Rasch (1980) 232
 Rasmussen (1986) 27; 28; 35; 40; 115; 193; 208; 209; 251
 Reason (1976) 26; 27; 78; 79
 Reason (1990) 6; 14; 15; 22; 27; 29; 30; 40; 43; 58; 208
 Reece et al. (1994) 80; 81
 Reer & Mertens (1993) 1; 62; 66; 73; 74
 Reer (1988) 63; 213; 214; 232
 Reer (1993) 227
 Reer (1995) 58; 67; 71
 Reer et al. (1996) 227
 Reichart (1985) 62; 69
 Reichart (1992) 60; 62; 63; 74
 Rigby (1970) 13; 22
 Rohmert & Landau (1978) 75
 Rost & Spada (1978) 227
 Rouse & Rouse (1983) 25; 26
 Rummelhart & Norman (1982) 253
 Sanders (1975) 43
 Schandry (1981) 42
 Schank (1975) 24
 Schmidt (1975) 24; 43
 Schneider & Shiffrin (1977) 27; 251
 Schuler (1995) 120
 Seifert & Brauser (1987) 34; 114
 Semmer (1994) 180
 Shastri (1988) 135
 Spanner (1993) 195
 SR2055 (1995) 75
 Sternberg (1969) 9; 26; 78
 Störig (1988) 6; 7
 Sträter (1991) 126; 142
 Sträter (1994) 214
 Sträter (1995) 197
 Sträter et al. (1995) 258
 SVA (1992) 212
 Swain & Guttman (1983) 1; 4; 22; 27; 31; 33; 34; 59; 60; 61; 63; 93; 111; 114; 212; 213; 214; 219; 220; 221; 222; 233; 258; 259
 Swain (1987) 63

- Swain (1989) 58; 62; 64; 66; 69; 70; 71
Swain (1992) 13; 14; 16; 59; 73; 221
Thelwell (1994) 218
Thurstone (1927) 69
Ullwer (1996) 206
van der Ven (1980) 228
VDI Nachrichten (1992) 11
Wakenhut (1974) 227
Wehner (1984) 5; 9; 193
Weimer (1931) 22
Werner et al. (1992) 59
Wickens (1984) 10; 26; 44; 64; 251; 252
Wiederhold (1981) 132; 139; 140
Williams (1986) 72
Wilpert et al. (1994) 75; 80
Worledge et al. (1988) 67
Wright & Stone (1979) 227
Wurst (1993) 67
Zapf et al. (1989) 43
Zimolong (1988) 5
Zimolong (1990) 74
Zimolong (1992) 70; 74
- Anhang 2**
- Fujita (1992) 1
Guski (1989) 1
Handelsby et al. (1992) 1
Harbour & Hill (1991) 1
Kieras & Polson (1985) 1
Seifert (1992) 1
Seifert & Brauser (1987) 1
Wilpert et al. (1994) 1
- Anhang 4**
- Abel (1991) 10
Altrock (1991) 10
Attneave (1974) 26
Bonato (1990) 6; 20; 30
Bortz (1989) 19; 25
- Emmanji et al. (1992) 26
Fu (1993) 26
Gerike (1991) 4
Harmon & King (1986) 4
Hebb (1949) 31
Heuer (1992) 2; 4
Kempke (1988) 26
Kohonen (1988) 26; 31
Lipschutz (1976) 20
Mandl & Spada (1988) 4
McClelland & Rummelhart (1981) 26
Miller (1956) 26
Nauck et al. (1994) 26
Neumann (1992) 26
NEXPERT (1990) 9
Pearl (1988) 18; 19; 25
Pedrycz (1989) 10
Preuß (1992) 10
Rummelhart & McClelland (1986) 26
Rummelhart & Norman (1982) 26
Sanders (1975) 26
Scheffe (1987) 6; 17
Schocken & Hummel (1993) 21; 25
Schult (1992) 9
Shastri (1988) 26
Shortliffe (1976) 3; 9
Spiegelhalter et al. (1993) 18
Stoffer (1989) 26
Strube (1990) 26; 30
Whittaker (1993) 25
Wickens (1984) 16
Zimmermann (1990) 10; 12; 16; 17; 18
Zimolong & Rohrmann (1988) 1
- Anhang 5**
- Swain und Guttman (1983) 1

Einleitung

Die Sicherheit und Verfügbarkeit der Kernkraftwerke ist trotz ihrer hohen Automatisierung in starkem Maße durch menschliche Eingriffe beeinflusst. Dieser Einfluß des Menschen wird sowohl in aufgetretenen Ereignissen (vgl. Mosey, 1990) als auch in Probabilistischen Sicherheitsanalysen (PSA) deutlich (DRS-B, 1990). Der scheinbare Widerspruch zwischen hoher Automatisierung und gleichzeitig hohem menschlichen Einfluß kann dadurch erklärt werden, daß durch eine zunehmend höhere und sichere Automatisierung der relative Anteil an menschlichen Fehlhandlungen zunimmt.

Will man diesen Faktor für die Sicherheit und Verfügbarkeit der Kernkraftwerke in die Bewertung und Optimierung einbeziehen, so stellt man fest, daß die Methoden zur Berücksichtigung des menschlichen Einflusses unzureichend sind. Hauptproblem sind die der Bewertung zugrundeliegenden Daten, wobei der Begriff Daten sowohl qualitative Angaben (z.B. Einflußfaktoren) als auch quantitative Zuverlässigkeitskenngrößen umfaßt. Zum einen ist die Methodik zur Erfassung von Daten über die menschliche Zuverlässigkeit aus der Betriebserfahrung unzureichend. Betriebserfahrung, also alle Erfahrungen, die beim Umgang mit einem technischen System gemacht werden (u.a. Störuereignisse, Untersuchungen betrieblicher Abläufe oder Simulatorexperimente), wird derzeit nur insofern auf menschliche Fehler hin ausgewertet, daß die Fehler in Form von Taxonomien beschrieben werden. Zum anderen ist es aus der Sicht der Bewertung menschlicher Zuverlässigkeit, der sogenannten HRA (Human Reliability Analysis) erforderlich, die vorhandenen Daten zu menschlichen Fehlerwahrscheinlichkeiten (Human Error Probabilities - HEP) zu validieren und Daten für die Bewertung neuer Technologien bereitzustellen. Angaben zur menschlichen Zuverlässigkeit in deutschen Sicherheitsstudien zu Kernkraftwerken basieren beispielsweise im wesentlichen auf dem THERP-Verfahren von Swain und Guttmann (1983), welches zum überwiegenden Teil auf nicht-nukleare Daten aus dem Jahre 1945 oder Expertenschätzungen zurückgreift, so daß diesem Bewertungsverfahren oft vorgeworfen wird, nicht der Realität in deutschen Anlagen zu entsprechen (z.B. Reer & Mertens, 1993). In der Bewertung führt dies zu ungenauen Schätzwerten über den menschlichen Einfluß, die nur durch pessimistische Einschätzungen und hohe Streufaktoren in den Fehlerwahrscheinlichkeiten aufgefangen werden können.

Die hier dargestellten Probleme einer Beurteilung der menschlichen Zuverlässigkeit verhindern zum einen eine valide Beurteilung in probabilistischen Analysen und zum anderen eine Optimierung der Sicherheit und Verfügbarkeit, welche durch eine effek-

tive Ausnutzung von realistischen Daten über menschliches Fehlverhalten möglich wäre. Dementsprechend ist es aus der Sicht der probabilistischen Analyse und aus der Sicht der Anlagenoptimierung gleichermaßen erforderlich, ein Verfahren zu entwickeln, welches eine empirische Ermittlung von Daten zur menschlichen Zuverlässigkeit aus der Betriebserfahrung ermöglicht.

Daß die Methodik zur Bewertung der menschlichen Zuverlässigkeit aufgrund der zur Verfügung stehenden Daten unzureichend ist und eine Validierung der Methoden durch Überprüfung der zugrundeliegenden Daten notwendig ist, kann durch ein Zitat von Dougherty und Fragola (1988; p13) zusammengefaßt werden:

The 'ideal' situation for HRA would consist of a validated theory of behaviour that could be translated into a model of human/system performance that then could be quantified probabilistically. An alternative would be for enough data to detect theoretically meaningful patterns in human failures and to quantify the patterns with statistical robustness. Neither alternative exists at this moment.

Um diese unbefriedigende Situation anzugehen, hat sich diese Arbeit zum Ziel gesetzt, eine Methode für eine systematische Auswertung von Ereignissen im Hinblick auf menschliche Fehler zu entwickeln, die es gleichzeitig erlaubt, eine empirische Datenbasis für Zuverlässigkeitskenngrößen aufzubauen. Das Verfahren soll einerseits durch die Klassifizierung von Fehlhandlungen eine konsistente Erfassung der Betriebserfahrung ermöglichen und andererseits Rückschlüsse auf die Ursachen von menschlichen Fehlhandlungen zulassen sowie Daten für probabilistische Sicherheitsanalysen liefern. Durch ein derartiges Verfahren sollen zum einen Möglichkeiten zur Fehlervermeidung gefunden und zum anderen qualitative und quantitative Aussagen aus der Betriebserfahrung gewonnen werden, die u.a. dazu genutzt werden können, vorhandene Methoden der HRA (Human Reliability Analysis) zu validieren.

Um dieses Ziel zu erreichen, muß zunächst eine Methode gefunden werden, mit der die Betriebserfahrung so erfaßt werden kann, daß qualitative und quantitative Analysen über menschliche Fehler möglich werden. Fehlerarten und Fehlerursachen müssen abgebildet werden können. Zur quantitativen Analyse muß darauf aufbauend eine Methode gefunden werden, welche es erlaubt, Daten unterschiedlicher Ereignisse anlagen- und situationsübergreifend analysieren zu können sowie Daten über die menschliche Zuverlässigkeit zu gewinnen, die für eine PSA genutzt werden können.

Eine solche Methode, anhand von Betriebserfahrung vorhandene Bewertungsverfahren zu validieren, ist sowohl für die Einschätzung von Optimierungsmaßnahmen als auch für die Bewertung laufender Anlagen von großem Interesse. Auch ist das Bereitstellen von Daten zur menschlichen Zuverlässigkeit für die Bewertung neuer Probleme bei der Probabilistischen Sicherheitsanalyse (PSA) erforderlich, da mit den derzeitigen Datengrundlagen nur Zuverlässigkeitsangaben für den normalen, bestimmungsgemäßen Betrieb von sicherheitstechnisch bedeutsamen Industrieanlagen bewertet werden können. Derzeit fehlen Daten für die Bewertung von Zuständen außerhalb des bestimmungsgemäßen Betriebes (z.B. Wartungs- und Instandhaltungstätigkeiten, Maßnahmen zur Störfallbeherrschung) oder für die Bewertung neuer Technologien (z.B. computerunterstützte Prozeßinformation) und den damit verbundenen neuen Organisationsformen (z.B. Cockpit-Warten). Durch die systematische Erhebung und Auswertung von Ereignissen aus der Betriebserfahrung können wertvolle Informationen gewonnen werden, die für eine Bewertung bzw. Optimierung dieser Betriebsarten und für methodische Weiterentwicklungen herangezogen werden können.

Um dieses Ziel zu erreichen, wird im folgenden, einleitenden Kapitel 1 das Phänomen des menschlichen Fehlers genauer betrachtet. Ausgehend von einem Überblick werden Modelle aus der kognitiven Psychologie und den Arbeitswissenschaften vorgestellt. Die Überlegungen in diesem Kapitel dienen als Grundlage für die Erstellung einer Methode zur Erfassung und Beurteilung menschlicher Fehler anhand der Betriebserfahrung.

In Kapitel 2 werden Anforderungen an eine Auswertung der Betriebserfahrung abgeleitet. Dazu wird der Informationsbedarf für eine Bewertung menschlicher Handlungen sowie bisher verwendete Methoden zur Erfassung menschlicher Fehler aus betrieblichen Ereignissen untersucht. Die verschiedenen Anforderungen werden dann dahingehend zusammengefaßt, was eine Methode zur Erfassung und Beurteilung aus der Betriebserfahrung leisten muß.

Darauf aufbauend wird ein Verfahren entwickelt, welches zur Erfassung und Bewertung der menschlichen Zuverlässigkeit innerhalb von Ereignissen dient. Das Verfahren beinhaltet zwei wesentliche Schritte: Im ersten Schritt wird ein Ereignis, bei dem ein menschlicher Fehler beobachtet wurde, systematisch analysiert. Im zweiten Schritt wird die gesammelte Information zur Bewertung der Zuverlässigkeit des Menschen in einer hypothetischen Situation genutzt. Für diese beiden Schritte werden ein Beschrei-

bungs- und ein Auswertungsmodell entworfen, welche getrennt in den Kapiteln 3 und 4 dargestellt werden.

In Kapitel 5 wird das Verfahren auf 165 Ereignisse aus deutschen Kernkraftwerken angewendet. Zunächst werden die Ergebnisse einer qualitativen Analyse vorgestellt. Darauf wird ein quantitativer Vergleich mit den umfangreichen Angaben des THERP-Verfahrens von Swain und Guttman (1983) vorgenommen. Die Bedeutung der Ergebnisse wird abschließend diskutiert. Kapitel 6 faßt die wesentlichen Ergebnisse der gesamten Arbeit hinsichtlich der methodischen Entwicklungen und der Auswertung der Ereignisse zusammen.

1 Auffassungen und Modellvorstellungen über den menschlichen Fehler

Der menschliche Fehler ist ein äußerst vielschichtiges Phänomen. Es reicht vom Zweifel an den eigenen Fähigkeiten, sobald man z.B. einen Tippfehler auch nach Dutzenden von Korrekturlesungen nicht bemerkt hat, bis hin zu juristischen Konsequenzen, wenn durch ihn ein Schaden an einer Person oder an einer Sache entstanden ist. Gerade der Schadensaspekt macht deutlich, daß der menschliche Fehler auch mit der Schuld einer entsprechenden Person an dem Schaden und mit entsprechenden juristischen Konsequenzen verbunden ist. So wurde z.B. von Goethe vorgeschlagen, Druck-Handwerker öffentlich zu rügen, wenn sie Druckfehler in ihren Arbeiten hatten (vgl. Zimolng, 1988; Wehner, 1984). Die Ansicht von Goethe mutet auf den ersten Blick befremdend an, wenn man die menschliche Zuverlässigkeit in großtechnischen Systemen betrachtet. Sie macht aber deutlich, daß in vielen Fällen der menschliche Fehler nicht von der Schuld des Menschen und der damit einhergehenden Bestrafung getrennt wird.

Aufgrund des Problems der Schuldfrage wird eine Auseinandersetzung mit diesem Thema leider auch oft gemieden, obwohl es von herausragender Bedeutung für die Sicherheit und Produktivität moderner technischer Systeme ist. Die Diskussion in diesem ersten Kapitel soll dementsprechend unter anderem zeigen, daß die Frage nach der schuldigen Person weder der Erklärung des Zustandekommens des Fehlers noch der Bewertung, Optimierung und Vermeidung menschlicher Fehler in technischen Systemen dient. Dazu werden zunächst in einem kurzen historischen Überblick Vorstellungen zum menschlichen Fehler dargestellt und einige bedeutsame Definitionen und Modelle zum menschlichen Fehler erläutert.

1.1 Historischer Überblick

Der in diesem Abschnitt dargestellte kurze historische Überblick soll verdeutlichen, daß der menschliche Fehler eine weitaus wichtigere Rolle für den Erwerb und den Gebrauch menschlicher Fähigkeiten spielt, als der Begriff 'Fehler' nahelegt. Hierdurch soll ein weitergehendes Verständnis über den menschlichen Fehler gewonnen werden, bei dem der menschliche Fehler nicht als ein Makel des Menschen aufzufassen ist oder, wie an anderen Stellen formuliert, der menschliche Fehler nicht als 'andere Seite der Medaille' und somit als unvermeidbarer Nachteil anzusehen ist, wenn man die Lei-

stungsfähigkeit des Menschen innerhalb eines technischen Prozesses nutzen will (z.B. in Reason, 1990; p1). Zu diesem Zweck sollen drei Bereiche, in denen menschliche Fehler untersucht wurden, historisch angesprochen werden: die Philosophie, die Psychologie und die Ingenieurwissenschaften.

1.1.1 Der menschliche Fehler in der Philosophie

Nicht erst mit Bestehen der Psychologie oder der Arbeitswissenschaften bzw. der Ergonomie wurde und wird das Problem des menschlichen Fehlers untersucht. In philosophischen Überlegungen wurden bereits in weit zurück reichender Vergangenheit Erklärungen für das Zustandekommen des menschlichen Fehlers gesucht, da er aus der Sicht der Philosophie die Grenzen des Erkenntnisvermögens des Menschen deutlich macht und in diesem Teil der Philosophie, der Erkenntnistheorie, einen zentralen Untersuchungsgegenstand darstellt.

So stellte bereits Aristoteles den menschlichen Irrtum als falsche Unterordnung und Verknüpfung der durch die Sinne gelieferten Daten im Denken dar. Descartes hatte folgende Auffassung über den menschlichen Fehler: "Der freie Wille ermöglicht es dem Menschen, diese Vorstellung zu bejahen, jene zu verwerfen. Nur in dieser Tätigkeit des Willens, nicht in den Vorstellungen selbst, liegt die Quelle allen Irrtums.". Hume sah den Irrtum als Zusammenspiel von Ideen und Impressionen an: Aller Irrtum kommt durch die Anwendung falscher Ideen auf richtige Impressionen oder durch die Verknüpfung falscher Impressionen mit richtigen Ideen zustande (vgl. hierzu Störig, 1988; p180, p316, p355). Auch Kant stellte zum menschlichen Fehler in Form von Vorurteilen fest, daß die Quelle für Vorurteile Neuartigkeit, Fehleinschätzung, Nachahmung, Gewohnheit, Neigung und Eigenliebe sind (siehe Keller, 1990; p87). Untersucht man diese verschiedenen Auffassungen hinsichtlich ihrer Ähnlichkeiten und Verschiedenheiten, so stellt man fest, daß alle Auffassungen sich auf drei Bestimmungsfaktoren reduzieren lassen, die für menschliche Fehler von Bedeutung sind. Dies sind:

- Der Prozeß der Verarbeitung von Information durch den Menschen (Verknüpfung bei Aristoteles und Hume, Tätigkeit des Willens bei Descartes, Fehleinschätzung und Gewohnheit bei Kant).
- Das ausgewählte Ziel der menschlichen Handlung (Wille bei Descartes, Anwendung falscher Ideen bei Hume, Neigung und Eigenliebe bei Kant).

- Die über die Sinne oder Denkprozesse zur Verfügung stehende Information (durch die Sinne gelieferte Daten bei Aristoteles, die Vorstellung bei Descartes, Impressionen bei Hume, Nachahmung und Neuartigkeit bei Kant).

Dabei unterliegen die beiden letztgenannten Punkte (gewähltes Ziel und zugrundeliegende Information) immer einem Prozeß der Informationsverarbeitung des Menschen, so daß gefolgert werden kann, daß die Informationsverarbeitung eine zentrale Rolle für das Zustandekommen menschlicher Fehler spielt. Sie kann sich dabei entweder bewußt oder unbewußt abspielen. Wohingegen unbewußte Informationsverarbeitung automatisch abläuft und gewohnte Verhaltensweisen abrufen, setzt bewußte Informationsverarbeitung immer voraus, daß ein gewohnter Ablauf gestört wird und so dasjenige bewußt wird, was im ungestörten Zustand selbstverständlich war und gar nicht bemerkt werden konnte (Bollnow, 1970; p298). Über Denkprozesse wird dann versucht, die Gegensätze auf einer höheren Abstraktionsebene zu integrieren.

Dieses Kompensationsverhalten menschlicher Informationsverarbeitung, welches letztendlich der Informationsreduktion dient, wird treffend in der Theorie der kognitiven Dissonanz (Festinger, 1957) beschrieben: Tritt eine Störung der menschlichen Gewohnheit ein, die nicht durch automatische Verhaltensweisen behoben werden kann, so erzeugt dies eine kognitive Dissonanz, die durch Konsonanzbestrebungen versucht wird zu beheben. Die Konsonanzbestrebungen nutzen letztendlich wiederum Erfahrungen und Gewohnheiten, um die Konsonanz herzustellen. Dementsprechend kann festgehalten werden, daß ein menschlicher Fehler letztendlich immer auch Ausdruck von Gewohnheiten ist, die in bestimmten Situationen nicht anwendbar waren und so zum menschlichen Fehler geführt haben. Dies wird auch durch die Kohärenztheorie des Wahrheitsbegriffes untermauert, die besagt, daß ein Mensch etwas dann für wahr hält, wenn es sich widerspruchlos in die übrigen Aussagen seiner Erfahrungen einfügen läßt (Keller, 1990; p108).

Somit läßt sich zusammenfassend feststellen, daß ein menschlicher Fehler letztendlich durch Gewohnheit bzw. durch die gelernten Handlungsweisen zustande kommt und die Gewißheit darüber voraussetzt, daß das ausgewählte Ziel oder die zugrunde gelegte Information wahr ist. Daraus läßt sich weiterhin folgern, daß jede menschliche Handlung das Potential eines Fehlers in sich birgt, da ein Mensch nie letztendlich gültige Gewißheit über die Richtigkeit einer Aussage gewinnen kann, da ein Mensch allgemeingültige Aussagen nur falsifizieren kann (vgl. Popper in Störig, 1988).

Weiterhin ist der menschliche Fehler aus der hier dargestellten philosophischen Sicht durchaus als ein positives Ereignis anzusehen. Nur durch Fehler und durch den mit ihm verbundenen Zweifel an der Richtigkeit von Aussagen und Denkakтивitäten ist überhaupt erst ein Erkenntnisfortschritt und damit eine weitere Erhöhung der Leistungsfähigkeit der menschlichen Informationsverarbeitung möglich. Der menschliche Fehler hat also folgende positiven Eigenschaften, die gerade in der Kontrolle technischer Systeme vom Menschen gefordert sind und langfristig nicht durch Automatisierungen abgelöst werden können:

- Stetiger Erkenntnisfortschritt durch eigenständige Verbesserung und Anpassung der menschlichen Leistungsfähigkeit an neue Situationen.
- Nachdenken über die Richtigkeit einer Maßnahme in einer bestimmten (extremen) Situation, für die automatische Systeme nicht wirksam sind.

Diese philosophischen Betrachtungen zum menschlichen Fehler bieten somit auch für den praxisorientierten Bereich einer arbeitspsychologischen Analyse menschlicher Fehler, die das Ziel dieser Arbeit ist, fruchtbare Ansätze. Sie werden dementsprechend im weiteren Verlauf dieses Kapitels wiederholt aufgegriffen.

1.1.2 Der menschliche Fehler in der Psychologie

Der zweite Ausgangspunkt für ein Verständnis über den menschlichen Fehler ist die Psychologie, die sich seit den Anfängen ihrer Entwicklung mit diesem Thema beschäftigt.

In der Psychologie wird der menschliche Fehler oft als "Fenster zum Bewußtsein" bezeichnet. Diese Formulierung unterstreicht, daß jegliche psychologische Erforschung der Ursachen menschlicher Fehler, von den ersten Ansätzen bis in die Gegenwart, vom Bestreben geleitet war, aus der Beobachtung menschlicher Fehler Ansätze für eine Theorie der menschlichen Informationsverarbeitung und Vorhersagen über das menschliche Verhalten zu gewinnen. Es ist somit nicht überraschend, daß viele psychologische Modelle über menschliche Fehler darauf abzielen, konkrete Vorstellungen über die menschliche Informationsverarbeitung und die Arbeitsweise des menschlichen Bewußtseins zu gewinnen.

Die Analogie macht ferner deutlich, daß sich die verschiedenen psychologischen Forschungsrichtungen direkt oder indirekt mit dem menschlichen Fehler auseinandersetzen.

zen müssen. So finden sich in allen psychologischen Forschungsrichtungen (von der klinischen über die mathematische Psychologie bis zu der Arbeitspsychologie) Untersuchungen und Experimente zur Erforschung des menschlichen Fehlers. Bemerkenswert ist weiterhin, daß die Fehlerforschung die verschiedensten Forschungsparadigmen von der Psychoanalyse über den Behaviourismus bis hin zum Kognitivismus überdauert hat oder sogar wesentliche Impulse für die jeweiligen Paradigmen aus der Fehlerforschung gewonnen worden sind. Die Erforschung menschlicher Fehler ist somit von großer Bedeutung für die Psychologie als Wissenschaft, da sie ein, gegenüber den Paradigmen, invariantes Forschungsthema darstellt.

Wehner (1984) hat die verschiedenen vorherrschenden Paradigmen zusammengestellt, unter denen Untersuchungen zum menschlichen Fehler durchgeführt wurden. Er unterscheidet die folgenden Paradigmen, die in zwei voneinander zu unterscheidende Ansätze unterteilt werden können:

- **Kognitivistische Ansätze:** Diese Ansätze bauen auf Paradigmen auf, die eine Modellvorstellung über die menschliche Informationsverarbeitung benötigen. Typische kognitivistische Ansätze sind der Gedächtnispsychologie, der Entscheidungstheorie sowie der Denkpsychologie zuzuordnen. Vertreter dieser Ansätze, die Einzug in die Beurteilung menschlicher Fehler in technischen Systemen gefunden haben, sind u.a. Sternberg (1969), Broadbent (1958) und Miller (1956). Die Untersuchungsergebnisse dieser Autoren bezüglich der menschlichen Informationsverarbeitung stellen bis heute zentrale Annahmen der Fehlerforschung dar und werden auch in den Fehlermodellen verwendet, die im anschließenden Abschnitt dargestellt werden. Weitere Vertreter dieser Ansätze sind die mentalen Modelle (z.B. Gentner & Stevens, 1983).
- **Behaviouristische Ansätze:** Diese Ansätze bauen auf Paradigmen auf, die aus Beobachtungen Vorhersagen über menschliches Verhalten machen. Typische behaviouristische Ansätze sind die Neurophysiologie, die Wahrnehmungspsychologie, die Linguistik sowie handlungs- bzw. tätigkeitspsychologische Paradigmen wie z.B. die Stimulus-Reaktions Modelle (S-R Modelle). Ein klassischer Vertreter dieser Ansätze ist Lorenz (1978). Im Bezug zur Fehlerforschung sind insbesondere die handlungs- bzw. tätigkeitspsychologischen Paradigmen von Bedeutung.

1.1.3 Der menschliche Fehler in den Ingenieurwissenschaften

Mit dem Beginn der industriellen Revolution finden die Betrachtungen und Forschungsergebnisse zum menschlichen Fehler, die zuvor der Grundlagenforschung zuzuschreiben waren und allenfalls von wissenschaftlichem Interesse waren, auch Einzug in die Ingenieurwissenschaften und die Gestaltung und Bewertung technischer Systeme. Einen wesentlichen Impuls erhielt dieser Forschungszweig, wie andere technische Entwicklungen auch, im zweiten Weltkrieg. Bei Untersuchungen von Fehlbedienungen von Geschützen wurde deutlich, daß trotz hoher Übung an den Geräten immer wieder menschliche Fehler die Schlagkraft herabsetzten (vgl. Wickens, 1984; p4).

Heutzutage ist die Erforschung des menschlichen Fehlers zu einem wesentlichen Faktor für die Sicherheit und Produktionskraft von großindustriellen Anlagen und für den Schutz der Umwelt vor großflächigen Umweltkatastrophen geworden. Eine Anzahl von Unfällen in der chemischen und nuklearen Industrie und auch im Transportwesen (Luftfahrt sowie Kraftfahrzeug- und Schienenverkehr) zeigen, daß der Mensch ein wesentlicher Faktor bei der Entstehung aber auch bei der Beherrschung von Ereignissen ist, die zu einem hohen Verlust von Menschenleben, zu einer Verschmutzung der Umwelt oder einem hohen Verlust an Geldmitteln führen können oder geführt haben.

Der Grund für die Zunahme des sogenannten menschlichen Faktors ist dabei zu einem erheblichen Maße in der zunehmenden Komplexität der technischen Systeme zu sehen. Bestrebungen, diesen menschlichen Einfluß durch eine höhere Automatisierung zu vermindern, sind aus zwei Gründen gescheitert: So müssen erstens die automatischen Systeme nach wie vor von Menschen konstruiert und gewartet werden, so daß sich der Problembereich allenfalls verschiebt. Zweitens besitzen auch automatische Systeme Ausfallwahrscheinlichkeiten, so daß man in sicherheitsrelevanten Bereichen auf den Menschen als letzte Instanz der Prozeßkontrolle und -überwachung aufgrund der, in den philosophischen Betrachtungen bereits dargestellten, positiven Eigenschaften menschlicher Leistungsfähigkeit nicht verzichten will und kann.

So ergibt sich aus einer Erhöhung des Automatisierungsgrades und der Zuverlässigkeit der technischen Systeme zwangsläufig eine Erhöhung des relativen Anteils menschlicher Fehler. Unterstützt wird dieser Effekt dadurch, daß eine steigende Automatisierung auch zu Entwicklungen führt, die nicht den menschlichen Leistungsfähigkeiten angepaßt sind. Dies zeigt z.B. der Airbus-Unfall von 1992 in Frankreich (VDI

Nachrichten, 1992): Der Pilot der Unglücksmaschine hatte vermutlich die Gleitwinkeleinstellung mit der Sinkrateneinstellung verwechselt. Beide Flugmodi werden über einen einzigen Bedientopf eingestellt. Ein weiterer Modus-Schalter entscheidet darüber, ob ein und derselbe Bedientopf zur Einstellung von Gleitwinkel oder Sinkrate genutzt wird. Über diese aus ergonomischer Sicht unzulässige Vermaschung von Bedienungen hinaus fehlte eine vollständige Rückmeldung des Systems über den Zustand (ein installiertes Head-Up Display informierte nicht über den aktuellen Flugmodus von Gleitwinkeleinstellung bzw. Sinkrateneinstellung, eine direkte Rückmeldung der Triebwerksgeräusche war aufgrund der guten Schallisolierung des Cockpits nicht hörbar).

Daß diese ambivalente Einstellung zum Menschen in technischen Systemen (der Mensch als letzte Sicherheitseinrichtung und als schwächstes Element der Zuverlässigkeit), welche wiederum eng mit der oben angesprochenen Schuldfrage verknüpft ist, dem tatsächlichen Zustand in hochautomatisierten Systemen aus der Sicht der Operateure nicht gerecht wird, hat Bainbridge (1987) in einem mittlerweile als Standardwerk zu betrachtenden Artikel als "Ironies of Automation" bezeichnet. Sie stellt bezüglich der Wechselbeziehung von Automatisierung und Operateur fest, daß durch eine zunehmende Automatisierung drei Hauptprobleme für die menschliche Leistungsfähigkeit hervorgerufen werden:

- Durch eine hohe Automatisierung sind prinzipiell weniger Handmaßnahmen der Operateure erforderlich. Dadurch sind Operateure weniger geübt und ihre Fähigkeiten, den Prozeß bei Ausfall einer Automatik zu übernehmen, werden verschlechtert. Die Verschlechterung resultiert daraus, daß die motorischen Fertigkeiten (manual skills) und auch die kognitiven Fertigkeiten (cognitive skills) aufgrund der mangelnden aktiven Beteiligung am Prozeß abnehmen. Ferner wird der Zugriff auf das vorhandene Wissen erschwert und kein neues Wissen über das Verhalten des Prozesses oder die Effektivität von Problemlösungen erworben.
- Während des störungsfrei ablaufenden Prozesses hat der Operateur die Aufgabe, den fehlerfreien Ablauf des Prozesses zu überwachen und zu kontrollieren. Diese vermeintlich einfache Aufgabe bringt jedoch zwei wesentliche Probleme für den Operateur mit sich: Zunächst handelt es sich bei diesem (aus technischer Sicht wünschenswerten) Zustand aus der Sicht des Operateurs um ein typisches Vili-ganzproblem, welches seine Leistungsfähigkeit stark beeinträchtigt. Weiterhin ist die Kontrolle der Störungsfreiheit der automatischen Systeme eine zusätzliche

(und schwer erkennbare) Aufgabe, die parallel zur eigentlichen Aufgabe, den Prozeß zu steuern, durchgeführt werden muß.

- Wenn in hochautomatisierten Systemen eine Störung eintritt, muß die Prozeßkontrolle vom Menschen übernommen werden. Diese Übernahme (take over) wirft weitere Probleme auf: So muß sich der Mensch zunächst, da er sich nicht aktiv im Geschehen des Prozesses befindet, zuerst in das Ereignis hineindenken. Erschwerend für diese Aufgabe erfolgen in hochautomatisierten Systemen die Rückmeldungen vom Systemzustand, die für diese Übernahme erforderlich sind, nur auf der abstrakten Ebene der automatischen Systeme und sind somit unzureichend für detaillierte Analysen, die im Falle des Versagens der Automatik vom Operateur gefordert sind. Es kann also nicht davon ausgegangen werden, daß durch eine hohe Automatisierung die Prozeßsteuerung einfacher wird und weniger Training der Operateure erforderlich ist.

1.1.4 Zusammenfassung

Die vorhergehenden Abschnitte zeigen, daß die Erforschung des menschlichen Fehlers ein sehr umfangreiches und interdisziplinäres Problem ist. Die philosophischen Betrachtungen verdeutlichen, daß der Mensch nicht ohne die Auseinandersetzung mit seiner Umwelt zu zunehmender Erkenntnis kommen kann und daß auch menschliche Fehler eine wichtige Quelle für den Erkenntnisfortschritt sind. Wie bei technischen Fehlern auch, besteht somit immer die Möglichkeit eines menschlichen Fehlers. Diese Auffassung wird im zunehmenden Maße auch in ingenieurwissenschaftlichen Betrachtungen vertreten, wie die Forderung nach aktiver Einbindung der Operateurs in den Prozeß, verbunden mit dem Schlagwort des "Fehlertoleranten Systems", verdeutlicht. Diese Auffassung über den menschlichen Fehler soll auch als Grundlage für das Verständnis menschlicher Zuverlässigkeit in dieser Arbeit dienen. So wird u.a. die im folgenden Abschnitt vorgestellte Definition und das in Kapitel 3 vorgestellte Beschreibungsmodell auf diesem Verständnis über den menschlichen Fehler beruhen.

Die psychologischen Betrachtungen zeigen weiterhin, daß prinzipiell zwischen zwei Ansätzen zur Modellierung menschlicher Fehler unterschieden werden muß: Der kognitivistische Ansatz und der behaviouristische Ansatz. Inwieweit sich diese beiden Ansätze für die Erfassung und Bewertung menschlicher Fehler eignen, soll im übernächsten Abschnitt herausgearbeitet werden.

1.2 Auffassungen über den menschlichen Fehler

Um die hier gemachten Überlegungen zusammenzufassen und gegenüber anderen Auffassungen über den menschlichen Fehler abgrenzen zu können, soll im folgenden eine für diese Arbeit gültige Definition des menschlichen Fehlers gefunden werden.

1.2.1 Definitionen für menschliche Fehler

Zunächst sollen drei Definitionen vorgestellt werden, die innerhalb der Verfahren zur Analyse der menschlichen Zuverlässigkeit üblich sind.

Definition des menschlichen Fehlers nach Rigby (1970): Eine menschliche Handlung ist als Fehler zu werten, wenn hierdurch die durch das System vorgegebenen Anforderungen nicht bzw. in nicht ausreichendem Maße erfüllt werden.

In der Definition von Rigby wird der menschliche Fehler streng an den Anforderungen des Systems orientiert definiert. Hintergrund dieser Definition ist eine Einordnung menschlicher Handlungen, die dem Zweck einer ingenieurmäßigen Beurteilung technischer Systeme dient. Aus der Perspektive der menschlichen Rolle gesehen stellt diese Definition die ungünstigste aller Möglichkeiten dar, da sie den menschlichen Fehler unter Berücksichtigung technischer Leistungsgrenzen, aber ohne Berücksichtigung der menschlichen Leistungsgrenzen betrachtet. Sie ist somit einseitig definiert und reduziert die Schuldfrage eindeutig auf menschliches Versagen.

Diese Auffassung über den menschlichen Fehler ändert sich auch nicht durch die derzeit in der Analyse der menschlichen Zuverlässigkeit übliche Definition von Swain (1992).

Definition des menschlichen Fehlers nach Swain (1992): Der Begriff "menschlicher Fehler" umfaßt alle Tätigkeiten oder Unterlassungen einer Person, welche entweder etwas Unerwünschtes verursachen oder die Möglichkeit besitzen, etwas Unerwünschtes zu verursachen.

In der Definition von Swain wird der Mensch als Komponente eines technischen Systems gesehen. Wie bei Rigby orientiert sich die Definition des menschlichen Fehlers

an den Leistungsgrenzen des Systems. Um der Schuldfrage Rechnung zu tragen, schwächt Swain seine Definition ab, indem er in einem Nachsatz folgendes ergänzt:

Zusatz zur Definition von Swain (1992): *Im Kontext eines Systems wird diese Definition eines menschlichen Fehlers genommen, obwohl die Hauptfaktoren, die zu einem Fehler beitragen, beispielsweise mangelnde ergonomische Gestaltung, Prozeduren, Training oder eine Kombination aller dieser sein können. Deshalb sollte keine Schuld mit dem Ausdruck "Menschlicher Fehler" verbunden sein.*

Durch den Zusatz hebt Swain heraus, daß die Ursachen für einen menschlichen Fehler durchaus außerhalb des Menschen liegen können. Der erste Teil der Definition legt jedoch eindeutig fest, daß der menschliche Fehler immer ein Fehler in der Ausführung einer Anforderung des Systems ist. Auch bei Swain wird der menschliche Fehler somit anhand technischer Leistungsgrenzen und ohne Berücksichtigung menschlicher Leistungsgrenzen definiert.

Um eine an den menschlichen Leistungsgrenzen orientierte Definition zu finden, soll drittens die Definition von Reason (1990) betrachtet werden:

Definition des menschlichen Fehlers nach Reason (1990): *Ein menschlicher Fehler wird als ein generischer Ausdruck verstanden, der all die Gelegenheiten umfaßt, in welchen eine geplante Sequenz von mentalen oder physischen Aktivitäten versagen, ein beabsichtigtes Ergebnis zu erreichen und dieses Versagen nicht dem Eingreifen eines zufälligen Auslösers zugeschrieben werden kann.*

Reason faßt den Menschen als informationsverarbeitende Komponente innerhalb des technischen Systems auf. Nach den obigen Überlegungen zu psychologischen Ansätzen handelt es sich somit um eine am kognitivistischen Ansatz orientierte Definition. Obwohl diese Definition versucht, eine am Menschen orientierte Sichtweise über den menschlichen Fehler zu geben, verschärft sie (auf ungewollter Weise) die oben dargestellte Problematik. Der menschliche Fehler wird ohne Berücksichtigung der menschlichen Leistungsgrenzen definiert. Somit stellt auch diese Definition indirekt eine an technischen Leistungsgrenzen orientierte Definition dar.

Die Definitionen legen insgesamt betrachtet den menschlichen Fehler durch die Anforderungen des Systems fest. Das technische System bestimmt, ob sich der Mensch fehlerhaft oder fehlerlos verhält. Diese einseitige Ausrichtung zugunsten des technischen Systems wird auch nicht dadurch verändert, daß man den menschlichen Fehler bezogen auf die menschliche Informationsverarbeitung definiert.

Diese Definitionen sind somit nur für eine am technischen System ausgerichtete Analyse geeignet. Sie sind aber direkt oder indirekt einseitig auf das technische System ausgerichtet. Der Zusammenhang von menschlichen Leistungsgrenzen und dem technischen System wird nicht betrachtet (z.B. Überforderungen des Menschen durch das System oder Wechselwirkungen von Mensch und Maschine). Daß eine kognitivistisch orientierte Definition das Problem der Schuldfrage nicht entschärft sondern vielmehr noch weiter auf den Menschen (speziell auf seine Informationsverarbeitung) einengt, zeigt die Definition von Reason. Somit sind diese Definitionen auch im Hinblick auf eine sinnvolle Klärung der Schuldfrage nicht geeignet, da die Antwort auf diese Frage in allen Definitionen gleich lautet und immer den Handlungsausführenden trifft.

1.2.2 Ein einfaches Beispiel eines menschlichen Fehlers

Bevor eine für diese Arbeit gültige Definition vorgeschlagen wird, soll herausgearbeitet werden, welche Bedeutung eine angemessene Definition menschlicher Fehler aus praktischer Sicht in einer großtechnischen Anlage hat. Dazu wird in diesem Abschnitt das Beispiel in Tabelle 1 nach Reason (1990) und Mosey (1990) mit Hilfe der oben dargestellten Definitionen diskutiert. Die Tabelle faßt den TMI (Three Mile Island) - Unfall im Überblick zusammen.

Wendet man die oben aufgeführten Definitionen von Rigby, Swain und Reason auf das Beispiel an, so stellt man fest, daß die Definitionen sowohl für die Identifikation der Fehler als auch für die Suche nach den Fehlerursachen unzureichend sind: So werden in allen drei Definitionen die in der linken Spalte der Tabelle aufgeführten Ereignisse immer als menschliche Fehler angesehen, sobald ein Mensch an dem Ereignis beteiligt war. Die eigentlichen Ursachen für das menschliche Verhalten werden als beitragende Bedingungen und latente Fehler in der rechten Spalte genannt.

Alle drei Definitionen sind also allenfalls in der Lage, Fehler des technischen Systems von erforderlichen Handlungen der Operateure zu trennen. Sie sind nicht in der Lage, die erforderlichen Handlungen der Operateure dahingehend zu unterscheiden, ob

- der Fehler des Menschen in Wechselwirkung mit Fehlern im technischen System passiert ist (Nr. 1: Das Wartungspersonal hat die Instrumentierung unter Wasser gesetzt, da ein Ventil nicht geschlossen war) oder
- aus dem Grunde ein menschlicher Fehler angenommen wurde, weil der Mensch prinzipiell hätte eingreifen können (Nr. 4 und 5: Die ergonomische Gestaltung der Warte machten es unmöglich, das offene DH-Ventil zu bemerken, der Operateur wäre aber prinzipiell in der Lage gewesen es zu bemerken), oder ob
- der menschliche Fehler eine Folge von falschen Annahmen ist, deren Ursachen im technischen Ablauf liegen (Nr. 6: Die Operateure schalteten die Hochdruckpumpen ab, da sie das offene DH-Ventil nicht bemerkten und sich den Effekt des Füllstandsanstieges im DH nicht erklären konnten).

Die Anwendung der Definitionen auf das Beispiel zeigt, daß sich keine der oben dargestellten Definitionen zur Analyse eines menschlichen Fehlers eignet. Es ist also nicht sinnvoll, den Fehler eines Menschen anhand der Anforderungen des technischen Systems zu definieren. Ein Hauptproblem der vorgestellten Definitionen ist dabei, daß sie in gewisser Weise tautologische Züge tragen; d.h., sie sind selbsterklärend und ohne Erkenntnisgewinn, da sie den menschlichen Fehler anhand des Vorhandenseins des Menschen im technischen System definieren. Es kann also festgehalten werden, daß eine Klassifikation des 'menschlichen Fehlers' aufgrund eines einzigen differenzbildenden Merkmals (den Menschen) nicht zulässig ist.

Daß diese Reduktion auf den Menschen auch für die Analyse der menschlichen Zuverlässigkeit unpraktikabel ist, wurde bereits in dem oben erwähnten Zusatz zur Definition von Swain (1992) deutlich. Zusätzlich ist diese Reduktion auf den Menschen aus der Sicht der Schuldfrage von weitreichender Tragweite, da sie mit einer einseitigen, auf den handelnden Menschen bezogenen Ursachenzuweisung und einer einseitigen Suche nach Fehlervermeidungen verbunden ist.

Zusammenfassend stellen die bisher dargestellten Definitionen also eine unzulässige Abstraktion und Reduktion von Fehlern in technischen Systemen auf den Menschen dar. Im folgenden wird eine Definition vorgeschlagen, die den Aspekt der Komplexität der Fehlersituation berücksichtigt.

Tabelle 1 Das TMI-Ereignis - ein Beispiel für einen menschlichen Fehler

Nr	Ereignisabfolge	Beitragende Bedingungen und latente Fehler
1	Wartungspersonal setzt die Instrumentierung der Kondensat-Reinigungsanlage unter Wasser, da ein Ventil in Offen-Stellung hängen blieb. Die Kondensatzufuhr und Bespeisung des Reaktors fällt aus.	Die Betreibergesellschaft hat keine Vorkehrungen gegen Wiederholung eingeleitet, obwohl dieser Fehler bereits zuvor zweimal aufgetreten ist.
2	Turbine fällt aus. Speisewasserpumpen schalten ab. Notspeisepumpen schalten automatisch zu, aber die Bespeisung wird durch zwei geschlossene Ventile verhindert.	Die beiden Blockventile sind wahrscheinlich bei Wartungstätigkeiten zwei Tage vor dem Störungsereignis fehlerhaft in der geschlossenen Position belassen worden. Ein Warnlicht in der Warte, welches anzeigt, daß die Ventile geschlossen sind, wurde durch ein Wartungsschild verdeckt.
3	Schneller Anstieg der Kerntemperatur und des Druckes im Reaktor. Druckhalter (DH)-Ventil öffnet automatisch, bleibt aber in Offen-Stellung hängen. Daraus ergibt sich ein sogenannter Kühlmittelverlust-Störfall (ca. 13 Sekunden nach Störfalleintritt)	Während eines Störfalles in David-Besse im September 1977 blieb ebenfalls ein DH-Ventil offen. Obwohl dieser Vorfall intensiv vom Betreiber und der Aufsichtsbehörde untersucht wurde, wurde die Erfahrung aus dem vorhergehenden Ereignis nicht ausreichend genutzt und die Information bezüglich angemessener Operateurhandlungen wurde nicht in ausreichendem Maße verbreitet.
4	Die Operateure bemerken das offene DH-Ventil nicht. Das radioaktive Wasser des Primärkreislaufes wird unter hohem Druck in das Containment abgeblasen.	Die Operateure wurden durch die Wartenanzeige falsch informiert. Aufgrund eines Störfalles 1 Jahr zuvor wurde eine Zustandsanzeige für das DH-Ventil eingebaut. Die Zustandsanzeige zeigt nur an, ob ein Auf- bzw. Zubefehl gegeben worden ist; sie zeigt nicht, ob das Ventil tatsächlich in Auf- bzw. Zustellung ist. Die Operateure nahmen fälschlicherweise an, daß die Temperatur am Abblasestrang des DH-Ventil aufgrund einer chronischen Leckage hoch ist und nicht aufgrund des offenen Ventils (durch eine permanente Leckage wurde auch im normalen Anlagenzustand eine hohe Temperatur angezeigt).
5	Die Operateure bemerken das offene DH-Ventil auch 2 Stunden später nicht.	Die Warte war schlecht gestaltet und die Alarmer waren nicht strukturiert: Viele der Schlüsselinformationen waren auf der Rückwand der Warte angebracht. Mehr als 100 Alarmer wurden aktiviert, ohne daß wichtige von unwichtigen getrennt waren. Mehrere Instrumente befanden sich am Anschlag und der Meldungsdrucker lief mehr als zwei Stunden hinter dem Anlagenzustand hinterher. Das Operateurtraining bestand vornehmlich aus Vorträgen und Arbeiten im Anlagensimulator, die nicht adäquat auf echte Notfälle vorbereiteten. Das Trainingsprogramm war unzureichend ausgearbeitet und es wurde keine Rückmeldung an die Auszubildenden gegeben.
6	Die Operateure schalteten die Hochdruckeinspeisung in den Reaktor aus und reduzierten so die Kühlung des Reaktorkerns, der daraufhin beschädigt wurde.	Die Operateure gingen aufgrund des hohen Füllstandes im Druckhalter davon aus, daß genügend Wasser im Primärkreislauf vorhanden ist. Ihnen war nicht bewußt, daß der Füllstand aufgrund des Systemzustandes angestiegen ist (Blasenbildung aufgrund zu hoher Temperatur wurde nicht erkannt, da die Temperaturanzeige für nicht zuverlässig gehalten wurde). Das Training konzentrierte sich auf Gefahren der Kernflutung und berücksichtigte nicht die Möglichkeit eines Kühlmittelverlustes. Die Aufsichtsbehörde veröffentlichte hierzu eine Publikation, in der mit keinem Wort erwähnt wurde, daß die Operateure dort die Hochdruckeinspeisung ausschalteten. Die Überschrift lautete "Fehlfunktion eines Ventils".

1.2.3 Definition des menschlichen Fehlers in dieser Arbeit

Um die vorangegangenen Betrachtungen zusammenzufassen, wird die folgende Definition vorgeschlagen:

Ein menschlicher Fehler liegt dann vor, wenn innerhalb eines Arbeitssystems ein nicht erwünschter oder fehlerhafter Zustand dazu führt, daß Anforderungen des Systems nicht oder unzureichend erfüllt werden. Anteil am Fehler innerhalb des Arbeitssystems hat der Mensch immer gemeinsam mit anderen Anteilen im Arbeitssystem. Alle Anteile innerhalb des Arbeitssystems können dabei in Abhängigkeit bzw. Wechselwirkung stehen.

Diese Definition geht, wie die oben vorgestellten von Rigby und Swain auch, von der Anforderung des Systems aus. Sie entspricht somit den ingenieurmäßigen Vorstellungen darüber, daß das System vorgibt, ob ein menschlicher Fehler vorliegt oder nicht. In dieser Definition wird der Mensch bei einem unerwünschten Systemzustand aber nicht automatisch als Ursache für den Fehler definiert. Damit entfällt in dieser Definition auch die ausschließliche Schuldzuweisung an den Menschen, der einen Fehler in einem vermeintlich fehlerfreien Arbeitssystem macht. Diese Definition stellt also im Sinne des in der Ergonomie üblichen Belastungs-/Beanspruchungsmodells (vgl. Bubb, 1992) sowohl die Belastungsseite (das Arbeitssystem) als auch die Beanspruchungsseite (den Menschen) dar, wohingegen die oben aufgeführten Definitionen von Rigby, Swain und Reason lediglich die Beanspruchungsseite berücksichtigen. In dieser Definition wird festgelegt, daß die Komponente Mensch immer einen Anteil unter anderen Anteilen innerhalb des Arbeitssystems am Fehlereignis hat und daß alle Anteile gemeinsam zum Fehlerereignis führen. Damit erfordert diese Definition ein anderes Verständnis des Ursachenbegriffs und der Schuldfrage.

Um die Ursache für einen menschlichen Fehler genauer zu spezifizieren, hilft zunächst die Unterscheidung zwischen notwendiger Bedingung (Voraussetzung) und hinreichender Bedingung (Auslöser): Handelt es sich um einen Fehler in anderen Teilen des Arbeitssystems, ist der Mensch notwendige Bedingung für den Fehler. Die hinreichenden Bedingungen liegen außerhalb des Menschen (z.B. defekte Schalter, falsche Darbietung von Information). Ist der Mensch hinreichende Bedingung für den fehlerhaften Zustand, ist er Ursache für diesen. Diese Unterscheidung bezüglich der Ursache ist auch für die Schuldfrage von Bedeutung: Ist der Mensch nur notwendige Bedingung für einen Fehler, kann er nicht schuldfähiger sein als jede andere Komponen-

te des Arbeitssystems auch. Bei Fehlern in einem Arbeitssystem spricht man jedoch oft vom "menschlichen Versagen" und macht damit den Menschen, auch wenn er nur notwendige Bedingung für den Fehler war, oft zur hinreichenden Bedingung. Bei jedem Ereignis mit menschlicher Beteiligung ist aber immer zu kontrollieren, ob der Mensch tatsächlich hinreichende Bedingung für den Fehler war.

Verfolgt man die Frage nach der Ursache für einen menschlichen Fehler weiter, so stellt sich notwendigerweise die Frage, welche Bedeutung der Ursachenbestimmung zugemessen werden muß. Prinzipiell ist der Ursachenbegriff für die Klärung von Bedeutung, ob es sich um einen menschlichen Fehler handelt oder nicht. Daß diese Entscheidung innerhalb eines Arbeitssystems nicht ohne weiteres getroffen werden kann, zeigt die folgende Betrachtung: Losgelöst vom menschlichen Fehler kann man in zunehmend komplexeren, technischen oder physikalischen Systemen feststellen, daß es unmöglich ist, eine eindeutige Ursachenanalyse durchzuführen und das Verhalten des komplexen Systems einzelnen Komponenten zuzuschreiben. Dies demonstrieren sowohl der Bereich Softwarezuverlässigkeit als auch die Chaos-Forschung.

In der Forschung zur Softwarezuverlässigkeit zeigt sich, daß eine Software prinzipiell nicht vollständig testbar ist. Mit anderen Worten kann nicht jedem fehlerhaften Systemzustand eines Softwareproduktes, durch seine Komplexität und Wechselwirkung mit Hardwarefehlern bedingt, eine bestimmte Ursache zugeteilt werden (vgl. Mehl, 1995).

In der Chaos-Forschung, die hier nicht im Detail vorgestellt werden kann, wurde der Begriff der Ursache sogar völlig vermieden. Die Chaos-Forschung beschäftigt sich mit der Analyse von Veränderungen innerhalb des Systems, die für sich beobachtbar sind, deren Ursache allerdings nicht beobachtbar oder nicht nachvollziehbar ist. Dabei wird angenommen, daß der kausale Zusammenhang zwischen beobachtbarer Ursache und Wirkung durch das komplexe Zusammenwirken einer Vielzahl von interferierenden Faktoren verloren geht. Weiterhin kann ein Vorgang, der in seinen Einzelvorgängen deterministisch beschreibbar war, im komplexen System nicht mehr beschrieben werden. Um dennoch Vorhersagen über das Verhalten des Systems machen zu können, sind innerhalb dieser Forschungsrichtung andere Ansätze als das Ursache/Wirkungsprinzip entwickelt worden. Die zentralen Begriffe dieses Ansatzes sind chaotische Attraktoren und Trajekturen sowie Fraktale. Fraktale stellen eine mögliche Bauvorschrift eines chaotischen Systems dar. Attraktoren und Trajekturen sind Mittel zur Darstellung der Eigenschaften des Systems. Damit wird das Ursa-

che/Wirkungsprinzip durch eine systematische Beschreibung der Eigenschaften abgelöst (näheres siehe Crutchfield et al., 1989). Ohne diesen Ansatz detailliert zu beschreiben, können bezüglich der Ursachen für menschliche Fehler folgende Schlußfolgerungen gezogen werden:

- Faßt man den Menschen als ein komplexes System auf, so kann gefolgert werden, daß der Mensch sich nicht durch einfache deterministische Ursachenzuordnungen beschreiben läßt. Eine deterministische Ursachenklärung menschlicher Fehler allein auf den Menschen bezogen ist nicht möglich und auch nicht sinnvoll. Der menschliche Fehler ist immer multikausal und durch mehrere Bedingungen innerhalb und außerhalb des einzelnen Menschen bestimmt.
- Auch wenn ein menschlicher Fehler beobachtet werden kann, kann durch diese Beobachtung allein nicht die Ursache für diesen Fehler geklärt werden. Für eine sinnvolle Analyse menschlicher Fehler müssen somit zunächst die Zusammenhänge von Fehlern und fehlerauslösenden Bedingungen geklärt werden. Der Begriff der Ursache spielt eine untergeordnete Rolle.

Dieser letzte Punkt ist in der Psychologie nicht neu. Man kennt ähnliche Vorstellungen z.B. in der Testtheorie (vgl. Fischer, 1974). Dort werden menschliche Leistungen in Testverfahren im Hinblick auf bestimmte Verhaltensdispositionen nicht durch ein einziges Item, sondern durch mehrere Items, die in Testbatterien zusammengefaßt sind, gemessen. Die Beiträge der Items werden dann als Indikatoren für eine bestimmte latente (d.h. nicht beobachtbare) psychische Eigenschaft (z.B. Intelligenz) aufgefaßt und nicht als psychische Eigenschaft selbst angesehen.

Aus diesen Überlegungen zur Ursache menschlicher Fehler kann also abschließend gefolgert werden, daß die Frage nach der Schuld des Menschen bei menschlichen Fehlern prinzipiell falsch gestellt ist. Der Begriff 'Ursache' soll daher im weiteren Verlauf dieser Arbeit im Sinne von 'Bedingung für' oder 'Eigenschaft von' verstanden werden. Vordringlicher als eine Ursachenbestimmung ist es, die dem menschlichen Fehler zugrundeliegenden Eigenschaften bzw. Bedingungen in einer strukturierten Form zu erfassen. Einen Ansatz zur Strukturierung soll der nächste Abschnitt liefern.

1.3 Modellvorstellungen über den menschlichen Fehler

Im letzten Abschnitt wurde gezeigt, daß das Umfeld, in dem der Mensch tätig ist, bei der Entstehung, beim Auftreten und bei der Wirkung des Fehlers von entscheidender

Bedeutung ist. In diesem Abschnitt soll nun untersucht werden, welches Modell geeignet ist, diese Auffassung über den menschlichen Fehler so zu strukturieren, daß sie für eine Beschreibung und Bewertung menschlicher Fehler genutzt werden kann.

Die Darstellung beruht auf einer Literaturlauswertung von vorhandenen Modellen zur Beschreibung menschlicher Fehlhandlungen und konzentriert sich auf diejenigen Modelle, die in der Analyse menschlicher Zuverlässigkeit auch genutzt bzw. diskutiert werden. Sie stellt keinesfalls eine vollständige Aufstellung aller Modelle dar. Die Modelle über das menschliche Fehlverhalten werden nach ihrem Erklärungswert geordnet, wonach Fehlermodelle folgendermaßen kategorisiert werden können (vgl. Eberhard, 1987):

1. Phänomenologische Fehlermodelle. In phänomenologischen Fehlermodellen wird versucht zu klären, was passiert ist. Der Fehler wird in beobachtbare Kategorien klassifiziert und dadurch beschrieben. Hier wird also die Frage nach den Fehlertypen gestellt (Wie vollziehen sich Fehler?).
2. Kausale Fehlermodelle. In kausalen Fehlermodellen sollen mögliche Bedingungen, die zum Fehler geführt haben, erfaßt werden. Sie gehen also über eine Beschreibung dessen, was geschehen ist, hinaus, indem zusätzlich mögliche Bedingungen für die Fehlhandlungen lokalisiert werden. Hier wird die Frage nach den Bedingungen für Fehler gestellt (Warum passieren Fehler?).
3. Aktionale Fehlermodelle. In aktionalen Fehlermodellen wird nach Abhilfemaßnahmen gefragt, damit zukünftig ähnliche Fehler nicht mehr passieren. Hier wird die Frage nach den möglichen Vermeidungen von Fehlern gestellt (Wie kann man Fehler vermeiden?)

Eine ähnliche Einteilung wurde in Bubb (1992) vorgenommen. Dort werden die phänomenologischen Fehlermodelle als auftretensorientierte und die kausalen und aktionalen Fehlermodelle als ursachenorientierte Klassifizierungsansätze bezeichnet. Dieses am Erklärungswert orientierte Vorgehen erlaubt es, die Fehlermodelle nach ihrem Nutzen für die Erfassung und Bewertung menschlicher Handlungen zu beurteilen, und führt gemeinsam mit den bisherigen Überlegungen zu einem Modellierungsansatz menschlicher Fehler.

1.3.1 Phänomenologische Modellvorstellungen

Phänomenologische Fehlermodelle versuchen den Fehler zu beschreiben und in verschiedene Fehlertypen zu klassifizieren. In der Literatur sind verschiedene Einteilungen zu finden, die in Tabelle 2 zusammengestellt sind.

Wie in der Tabelle aufgeführt unterscheiden Norman, Hacker, Meister und Swain menschliche Fehler danach, ob sie durch das Fehlen irgendeiner Tätigkeit (Omission) oder durch eine falsche Handlung (Commission) zustande kommen. Falsche Handlungen können zusätzlich danach unterschieden werden, ob die Handlung dadurch zum Fehler führte, daß sie in zeitlicher Hinsicht (zu früh, zu spät) oder in qualitativer Hinsicht (zu viel, zu wenig) fehlerhaft war.

Tabelle 2 Ansätze zur phänomenologischen Klassifikation menschlicher Fehlhandlungen.

<i>Autoren</i>	<i>Einteilungen</i>
Norman (1981) Hacker (1986) Meister (1977) Swain & Guttman (1983)	<ul style="list-style-type: none"> - Etwas wird unterlassen (Error of Omission - EOM) - Etwas wird falsch gemacht (Error of Commission - EOC) - Etwas wird fehlerhaft gemacht - Zeitfehler (zu früh, zu spät) - Qualitative Fehler (zu viel, zu wenig)
Reason (1990)	<ul style="list-style-type: none"> - Aktive Fehler - Latente Fehler
Weimer (1931)	<ul style="list-style-type: none"> - Man begeht einen Fehler - Man befindet sich im Irrtum
Rigby (1970)	<ul style="list-style-type: none"> - Sporadische Fehler - Zufällige Fehler - Systematische Fehler
Reason (1990)	<ul style="list-style-type: none"> Nicht-intentionale Fehler - Versehen (slip) - Fehler (lapse) Intentionale Fehler - Mißverständnis, Irrtum (mistake) - Verletzung (violation)

Reason grenzt latente und aktive Fehler voneinander ab: Latente Fehler sind Fehler, die erst im Anforderungsfall Auswirkungen haben (z.B. eine defekte Handbremse im Auto; mangelndes Wissen eines Operators über ein Teilsystem, welches sich erst dann bemerkbar macht, wenn der Operator an diesem arbeiten muß). Aktive Fehler sind Fehler, die im Umgang mit einem technischen System geschehen. Latente Fehler sind dabei in der Vergangenheit entstanden und können sowohl durch einen aktiven

Fehler eines Menschen als auch durch einen technischen Defekt zustande gekommen sein.

Nach Weimer kann eine Person entweder einen Fehler begehen oder sich im Irrtum befinden. Begeht sie einen Fehler, so ist die Person das auslösende Element eines fehlerhaften Zustandes. Sie befindet sich im Irrtum, wenn sie in gutem Glauben handelt, das Richtige zu tun.

Rigby unterscheidet sporadische, zufällige und systematische Fehler. Sporadische Fehler sind Einzelfehler und werden oft auch als Ausreißer bezeichnet. Zufällige Fehler haben eine hohe Streuung um den gewünschten Zielzustand, lassen aber keine Tendenz in eine bestimmte Richtung erkennen. Systematische Fehler haben dagegen eine klare Tendenz in eine bestimmte Richtung.

Reason nennt schließlich als weitere Einteilung sogenannte intentionale Fehler, die von nicht-intentionalen Fehlern unterschieden werden. Intentionale Fehler sind Fehlhandlungen, die ein Mensch in der Absicht, das Richtige zu tun, unternommen hat. Die Einteilung von Reason ist also mit der von Weimer zu vergleichen. Weimer sowie Reason unterscheiden letztendlich danach, ob der Mensch hinreichende oder notwendige Bedingung für den Fehler ist.

Betrachtet man die verschiedenen Einteilungen unter dem Aspekt der Informationen, die benötigt werden, diese Klassifikationen vorzunehmen, so kann man folgendes festhalten: Die Einteilung von Norman, Hacker, Meister und Swain orientiert sich an der Information, die innerhalb des Ereignisses unmittelbar beobachtbar ist. Die Einteilung von Reason in latente und aktive Fehler unterscheidet nach dem zugrundeliegenden Systemzustand und ist insbesondere in der Probabilistischen Analyse von Bedeutung (siehe Kapitel 2).

Die Überlegungen zum Ursachenbegriff zeigten, daß sowohl eine am Systemzustand als auch eine auf den Menschen beschränkte Einteilung für die Erfassung und Bewertung menschlicher Fehler nicht sinnvoll ist. Es kann also gefolgert werden, daß die Einteilung von Norman, Hacker, Meister und Swain eine sinnvolle Ausgangsbasis für eine phänomenologische Einteilung von Fehlertypen darstellt. Um zu bestimmen, welchen Nutzen kausale Fehlereinteilungen für die Erfassung und Bewertung menschlicher Fehler haben, sollen nun im nächsten Abschnitt kausale Modellvorstellungen beleuchtet werden.

1.3.2 Kausale Modellvorstellungen

Kausale Fehlermodelle gehen über eine Beschreibung dessen, was geschehen ist, hinaus, indem eine Zuordnung der möglichen Ursachen der Fehlhandlungen stattfindet. Es wurde weiter oben bereits erwähnt, daß der menschliche Fehler in der Fehlerforschung oft als "Fenster zum Bewußtsein" bezeichnet wird. Aus dieser Formulierung läßt sich auch ableiten, daß sich kausale Modelle mit dem Aufbau der menschlichen Kognition bzw. Informationsverarbeitung beschäftigen. Dementsprechend lassen sich die kausalen Fehlermodelle zusätzlich nach den psychologischen Grundlagenbereichen, aus denen der wesentliche Aufbau des Fehlermodells entnommen worden ist, unterteilen. Dies sind gedächtnispsychologische Modelle, entscheidungstheoretische Modelle und Modelle der Informationsverarbeitung. Durch die Forschungen auf dem Gebiet der Arbeitswissenschaft existiert ein vierter Bereich, der auf diesen Grundlagenbereichen aufbaut. Fehlermodelle aus diesen vier Bereichen, die in der Forschung zur menschlichen Zuverlässigkeit von Bedeutung sind, werden im folgenden vorgestellt.

- **Ein gedächtnispsychologisches Fehlermodell von Norman**

Gedächtnispsychologische Fehlermodelle gehen von grundlegenden Vorstellungen über das Erfassen, Behalten und Wiedergeben von Informationen aus (Mandl & Spada, 1988). Ein zentraler Begriff in der Gedächtnispsychologie, der in die Fehlerforschung Einzug gefunden hat, ist das Schema. Der Begriff des Schemas geht auf Head (1926) zurück und wurde von Schank (1975) auf die formale Beschreibung von Wissensstrukturen sowie von Schmidt (1975) auf die Beschreibung motorischer Tätigkeiten übertragen. Im allgemeinen Aufbau stellen Schemata vorgefertigte Wissensstrukturen dar, die bestimmte Attribute besitzen, die wiederum bestimmte Werte annehmen können. Diese standardisierten Wissensblöcke dienen zur Speicherung von Abläufen oder Handlungen. Je nachdem, ob sie prozedurale oder deklarative Attribute und Werte beinhalten, werden sie "Scripts" oder "Frames" genannt.

Norman (1981) hat die Schematheorie zur Beschreibung von Fehlern herangezogen. Er teilt Fehlhandlungen ein in Irrtümer (mistakes), Modus-Fehler (mode errors) und Anker-Fehler (captures). Irrtümer sind fälschlicherweise angesprochene Schemata, Modus-Fehler sind falsch aktivierte Schemata, Anker-Fehler sind schließlich falsch getriggerte Schemata in einem richtigen Zusammenhang. Das Ansprechen (Triggern) eines Schemas erfordert eine zeitliche Koordination der Abfolge der Schemata, so daß

zwar etwas "richtiges getan" wird, dies allerdings aufgrund des falschen Zeitpunktes zum Fehler wird. Aus diesem Ansatz wird die Einteilung nach Tabelle 3 möglich.

Der Schemaansatz hat einen gravierenden Nachteil: Eine Wissensstrukturierung (und damit eine Beschreibung menschlicher Fehler) findet immer über ein Schema statt. Somit sind schemaorientierte Ansätze immer auch eine zwangsweise algorithmische Beschreibung feststehender Einzelabfolgen, sogenannter Produktionssysteme, oder feststehender Zustände, sogenannter Objektstrukturen. Bei Fehlern, die nicht algorithmisch beschreibbar sind, wie z.B. zeitliche Variabilität von Fehlern bedingt durch Lern- oder Diagnosevorgänge, stoßen Schemaansätze an die Grenzen ihrer Beschreibungsmöglichkeiten.

Tabelle 3 Einteilung von Norman.

<i>Fehlerbezeichnung</i>	<i>Fehlerarten</i>
Irrtümer	Fehler bei der Auswahl eines Schemas (Entscheidungsfehler)
Modus-Fehler	Fehler bei der Anwendung eines Schemas Stereotypisierungsfehler und Gewohnheitsfehler)
Anker-Fehler	Fehler in der zeitlichen Abfolge verschiedener Schemata (Zeitliche und qualitative Fehler)

- **Ein entscheidungstheoretischer Ansatz von Rouse und Rouse**

Entscheidungstheoretische Ansätze gehen von der Beschreibung des allgemeinen Prozesses zur Problemlösung aus (vgl. Dörner, 1976). Rouse und Rouse (1983) unterscheiden nach diesem Ansatz Handlungsstufen mit dazugehörigen Fehlerarten (Bild 1).

In einer Entscheidungssituation muß zunächst die Abweichung eines Ist-Wertes von einem Soll-Wert erkannt werden. Dann sind diejenigen Maßnahmen herauszufinden, mit denen eine Angleichung der bestehenden Differenz möglich wird. Hierzu sind drei Schritte erforderlich: Bildung einer Hypothese darüber, was passiert ist, Auswahl des gewünschten Zielzustandes und Auswahl der Verfahren, mit denen dieses Ziel erreicht werden kann.

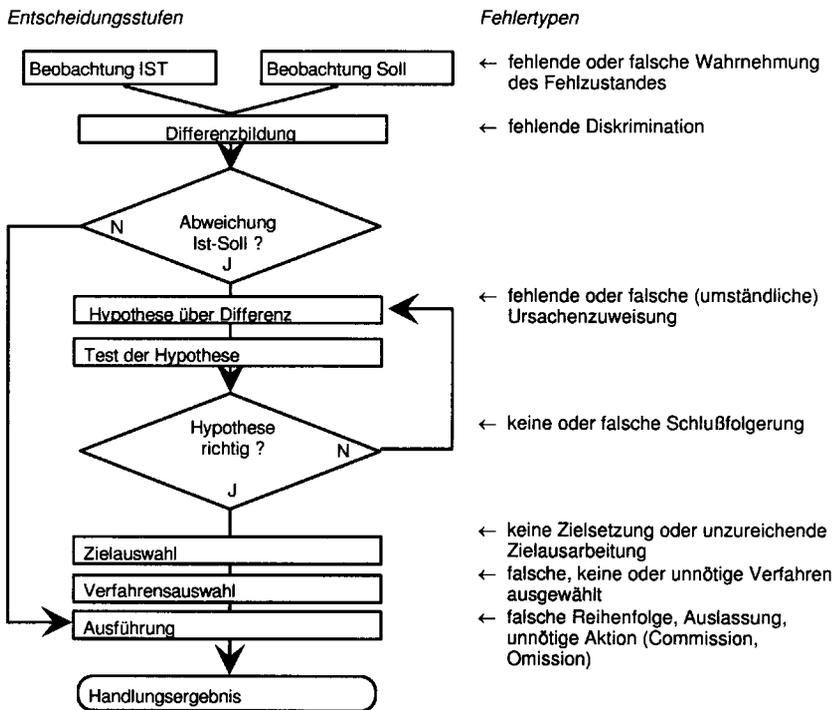


Bild 1 Einteilung von menschlichen Fehlern nach Rouse und Rouse (1983).

- **Ein Fehlermodell der Informationsverarbeitung von Reason**

Fehlermodelle aus der Psychologie der Informationsverarbeitung beziehen sich auf die Stufen der Verarbeitung, die durchlaufen werden müssen, um die Information, die auf der Wahrnehmungsseite dargeboten wird, in eine Information umzusetzen, die auf einer Handlungsseite verändert ausgegeben wird (vgl. Wickens, 1984).

Eines der bekanntesten dieser sogenannten Stufenmodelle ist das von Sternberg (1969). Sternberg geht von einer streng sequentiellen Verarbeitung Stufe für Stufe aus. Reason (1976) hat sein frühes Fehlermodell an diese durch Wahrnehmungsexperimente gefundenen Stufen angelehnt. In Tabelle 4 ist dargestellt, welche Handlungsstufen und Fehlermöglichkeiten Reason unterscheidet.

Tabelle 4 Einteilung von Reason (1976).

<i>Verarbeitungsstufe</i>	<i>Fehlermöglichkeiten</i>
Wahrnehmen und Erkennen (Input Detection)	Diskriminationsfehler bei der Signalentdeckung
Vergleich und Entscheidung (Comparison & Decision)	Fehler in der Zusammenführung von Handlungsprogrammen
Wahl der Antwort (Response Selection)	Fehler durch Vergessen von Handlungen oder durch falschen Rückruf
Wahl der Handlung (Action Selection)	Fehler bei der Auswahl automatisierter Handlungskomponenten
Rückmeldung der Handlung (Action Feedback)	Fehler durch mangelnde Rückmeldung von der Handlung

- **Ein Fehlermodell der Informationsverarbeitung von Rasmussen**

Ein für die Psychologie der Informationsverarbeitung klassisches Experiment von Schneider und Shiffrin (1977) konnte zeigen, daß die verschiedenen Stufen der Verarbeitung stark vom Übungsgrad der Personen abhängen und somit keine streng sequentielle Stufenverarbeitung angenommen werden kann. Vielmehr findet durch häufige Übung bestimmter Verhaltensweisen eine Automatisierung bestimmter Handlungen statt. Diese hochgeübten Handlungen laufen dann ohne Aufmerksamkeit und automatisiert ab. Demzufolge können bestimmte Phasen der Verarbeitungsqualität unterschieden werden (neuartig, geübt, hoch geübt).

Alle neueren Ansätze zur Fehlermodellierung berücksichtigen diesen Aspekt verschiedener Übungsphasen (z.B. Reason, 1990; Swain & Guttman, 1983; Rasmussen, 1986). Den klassischen Ansatz der Integration des Stufen- und des Phasenansatzes stellt das Modell von Rasmussen (1986) dar. Er unterteilt die Organisation des Wissens in drei Ebenen: die fertigkeitsbasierte, die regelbasierte und die wissensbasierte Ebene: Auf der **fertigkeitsbasierten Ebene**, die sich durch ein hohes Übungs- und Erfahrungsniveau auszeichnet, herrscht automatisierte Verarbeitung der sensorischen und motorischen Information vor. Auf der **regelbasierten Ebene** wird eine Anzahl von automatisierten Verhaltensweisen unter Verwendung einer Regel zu einer neuen Verhaltensweise kombiniert. Eine Informationsverarbeitung auf der **wissensbasierten Ebene** tritt bei ungeübten oder neuartigen Situationen auf. Hier findet eine neue Zusammenstellung von automatisierten Verhaltensweisen und regelbasiertem Wissen unter Verwendung von konkreten Zielvorstellungen statt, so daß neue Handlungspläne erstellt werden. Jede Ebene hat für sie charakteristische Fehlerarten (Bild 2).

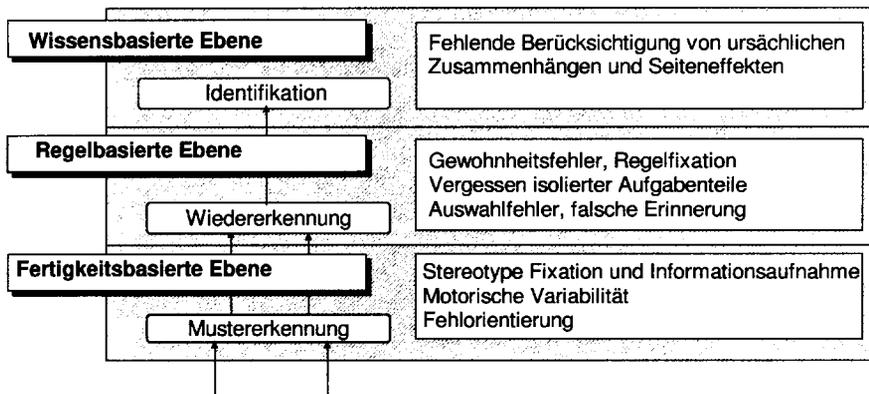


Bild 2 Fehler im Drei-Ebenen-Modell nach Rasmussen (1986).

Je nach dem Grad der Routine einer Handlung werden die verschiedenen Prozesse auf den Ebenen, wie sie in Bild 2 dargestellt sind, bei einer konkreten Handlung durchlaufen: Bei einer Routinetätigkeit wird eher nur die fertigkeitbasierte Ebene durchlaufen, bei ungeübten Handlungen in Notfallsituationen erstreckt sich der Prozeß der Informationsverarbeitung bis zur wissensbasierten Ebene.

Je nachdem, von welcher Ebene der Informationsfluß ausgeht, lassen sich nach Rasmussen (1986) Handlungen grob in zwei Vorgehensweisen unterscheiden: topographische (top down) und symptomatische Suche (bottom up). Bei einem **topographischen Vorgehen** beschränkt sich der Experte bei der Suche nach dem Ort des Problems auf die Untersuchung von bestimmten möglichen Problemursachen und beurteilt diese, indem er aus seinem mentalen Modell Hypothesen über die Ursache ableitet und deren Zutreffen kontrolliert. Die topographische Suche geht also von Hypothesen über mögliche Ursachen auf der wissensbasierten Ebene aus. Bei der **symptomatischen Suche** versucht der Experte über Mustererkennungsprozesse die dem Problem entsprechenden Ursachen in seinem internen Modell vom Problemraum wiederzuerkennen und so das Problem zu klassifizieren. Die symptomatische Suche geht von der Informationsaufnahme auf der fertigkeitbasierten Ebene aus.

Bei beiden Suchstrategien sind in starkem Maße Mustererkennungsprozesse beteiligt, da die Informationsaufnahme nur auf der fertigkeitbasierten Ebene stattfindet. Beim topographischen Vorgehen findet die Informationsaufnahme während der Kontrolle des Hypothesenvorschlags (Vergleich von Hypothese und Muster) und beim symptomatischen Vorgehen während des Wiedererkennens von unmittelbar zugänglichen In-

formationsmustern statt. Da die fertigkeitbasierte Ebene auch bei der Wiedererkennung auf der regelbasierten Ebene und bei der Identifikation auf der wissensbasierten Ebene beansprucht wird, stellt diese Stufe der Informationsverarbeitung eine Grundvoraussetzung zur Informationsverarbeitung auch auf den höheren Stufen dar. Mögliche Fehlerarten, die bei diesen Suchstrategien betrachtet werden können, beinhalten nach diesem Modell also immer Gewohnheitseffekte. Fehler entstehen also insbesondere dadurch, daß der Mensch oft wiederkehrende Handlungen oder Handlungskomplexe automatisiert (vgl. auch Diskussion zu 1.1). Probleme treten beim Modell von Rasmussen auf, wenn man versucht, eine gegebene Situation mit Hilfe der verschiedenen Übungsniveaus zu klassifizieren, denn die Einteilungen der Übungsniveaus sind nicht an objektiv beobachtbare Situationsparameter gebunden.

- **Das GEMS-Modell von Reason**

Reason (1990) integriert die verschiedenen psychologischen Ansätze, die bisher in den Fehlermodellen eingesetzt worden sind: die gedächtnispsychologischen Einteilungen (z.B. Norman), die entscheidungspsychologischen Ansätze wie die von Rouse und Rouse sowie die Stufeneinteilung und Phaseneinteilung von Rasmussen. Reason stellt somit ein kausales Fehlermodell dar, welches auf breiter theoretischer Basis mehrere psychologische Ansätze berücksichtigt. Bild 3 zeigt die Struktur des generischen Fehlermodells (GEMS - Generic Error Modeling System) von Reason.

Ohne an dieser Stelle detailliert zum Modell von Reason Stellung zu nehmen, kann festgehalten werden, daß das GEMS-Modell die Verhaltensebenen von Rasmussen um einen entscheidungstheoretischen Ansatz erweitert. Eine bewußt intentionale Bewältigung einer Aufgabe kommt hier nur durch Handlungen auf der regel- oder wissensbasierten Ebene zustande. Handlungen auf der fertigkeitbasierten Ebene können innerhalb dieses Modells nur in Arbeitsumgebungen, die dem Menschen sehr bekannt sind, durchgeführt werden. Auf der fertigkeitbasierten Ebene können aber keine Fehler begangen werden, für die bewußte Aufmerksamkeitsprozesse erforderlich sind. Auf der fertigkeitbasierten Ebene existieren auch keine Mechanismen zur Fehlerkorrektur. Auf dieser Ebene sind nach Reason somit nur nicht-intentionale Fehler (unintended errors) wie z.B. ein Versehen aufgrund mangelnder Aufmerksamkeit möglich. Mechanismen zur Fehlerkorrektur finden sich nur auf der regel- und wissensbasierten Ebene, indem bekannte Regeln oder Analogien gesucht werden. Da die Einteilung in verschiedene Übungsniveaus weitestgehend von Rasmussen übernommen wurde, treten

auch beim GEMS-Modell dieselben Probleme auf, wenn man es auf eine gegebene Situation anwenden will.

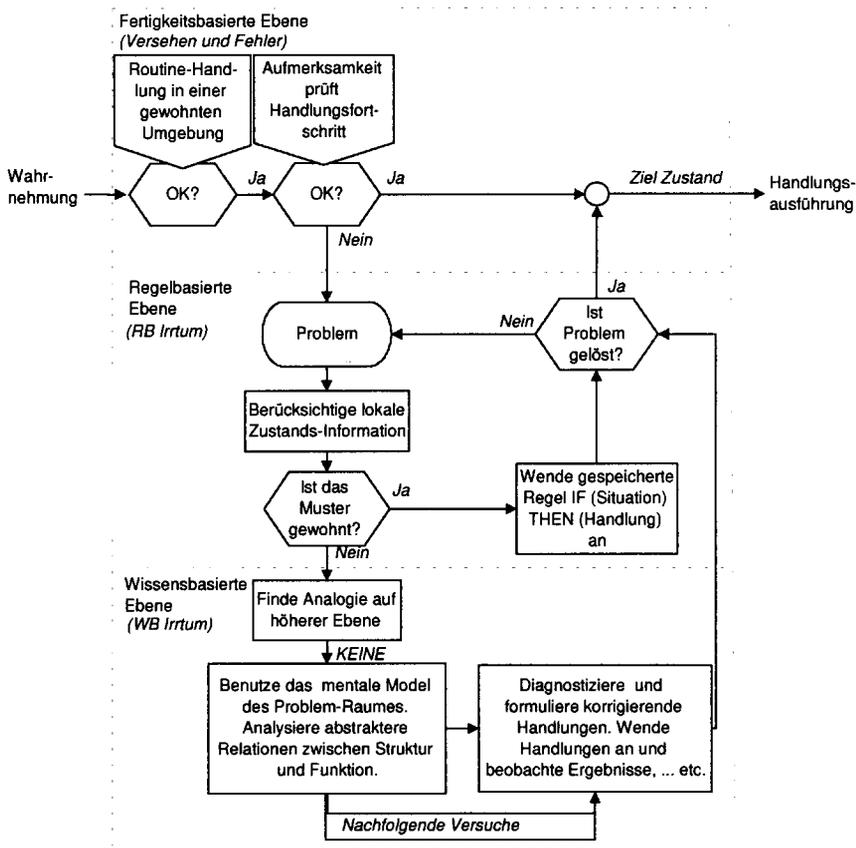


Bild 3 Das GEMS-Modell nach Reason (1990, p.64).

1.3.3 Aktionale Modellvorstellungen

In aktionalen Fehlermodellen sollen Strategien zur Fehlervermeidung bzw. Abhilfemaßnahmen gefunden werden. Der Betrachtungsgegenstand muß hier so gewählt sein, daß er all die Möglichkeiten umfaßt, die auch zu Verbesserungen führen können. Die Modelle von Hacker und Swain stellen einen ersten Schritt in diese Richtung der Betrachtung menschlicher Fehler dar. Weitere Entwicklungen von Brauser und Seifert sowie von Rasmussen werden vorgestellt.

• **Die Fehlereinteilung von Hacker**

Das Modell von Hacker (1986) stellt eine Weiterentwicklung kausaler Fehlermodelle in Richtung einer aktionalen Fehlerbetrachtung dar. Hacker unterscheidet fehlende und falsche Nutzung vorhandener Information. Die falsche Nutzung vorhandener Information kann dann wiederum durch Fehler der Informationsverarbeitung hervorgerufen werden (Bild 4).

Fehlende Nutzung vorhandener Information		<ul style="list-style-type: none"> - Übersehen - Vergessen / Versäumen - Übergehen - redundanzbedingte Informationsreduktion (Stereotypien, Erwartungsfehler 1.Art)
Falsche Nutzung vorhandener Information	falsches Orientieren	<ul style="list-style-type: none"> - Fehlidentifikation (Sinnestäuschung, Erwartungsfehler 2.Art) - Erinnerungstäuschung - Fehlbeurteilung
	falsches Entwerfen von Aktionsprogrammen	<ul style="list-style-type: none"> - Bewegungsprogramme mit räumlich und/oder zeitlich falschen Parametern - Fehlkalkül (Verrechnen, Verplanen)
	falsches Entscheiden	
	unzutreffende Bedingungsanforderung von Aktionsprogrammen	<ul style="list-style-type: none"> - Zeitliche Fehleinordnung (Zeitfehler) - Räumliche Fehleinordnung - Verwecheln (Unter gegebenen Bedingungen im Sinne von Populationsstereotypien)

Bild 4 Einteilung von Hacker (1986).

Das Modell von Hacker stellt somit im Vergleich zu den bisher dargestellten Modellen eine grundlegende Neuerung in der Betrachtung des menschlichen Fehlers dar. Der Begriff des menschlichen Fehlers wird auf die dem Menschen zur Verfügung stehende Information und somit auf seine Umgebung erweitert.

• **Die Fehlereinteilung von Swain**

Auch das Modell von Swain und Guttman (1983) beruht auf dem Informationsverarbeitungsansatz. Er unterscheidet die Verarbeitungsstufen Wahrnehmung, Kognition und Handlung. Neu bei Swain und Guttman ist, daß auch die Schnittstelle, mit der ein Mensch in Kommunikation mit einem technischen Prozeß steht, berücksichtigt wird. Das Modell stellt damit einen gegenüber Hacker weitergehenden Schritt in Richtung eines aktionalen Fehlermodells dar, da die Komponenten, mit denen der Mensch in Verbindung steht, explizit in das Modell einbezogen werden. Zusätzlich wurde, ähnlich

wie von Rasmussen vorgeschlagen, im Modell sowohl der sequentielle Informationsverarbeitungsansatz als auch der Phasenansatz aufgenommen (Bild 5). Die verschiedenen Phasen werden hier als Abkürzungen (short-cuts) innerhalb der sequentiellen Verarbeitung modelliert. Die oberste Ebene entspricht der fertigkeitbasierten, die mittlere der regelbasierten und die untere der wissensbasierten Ebene.

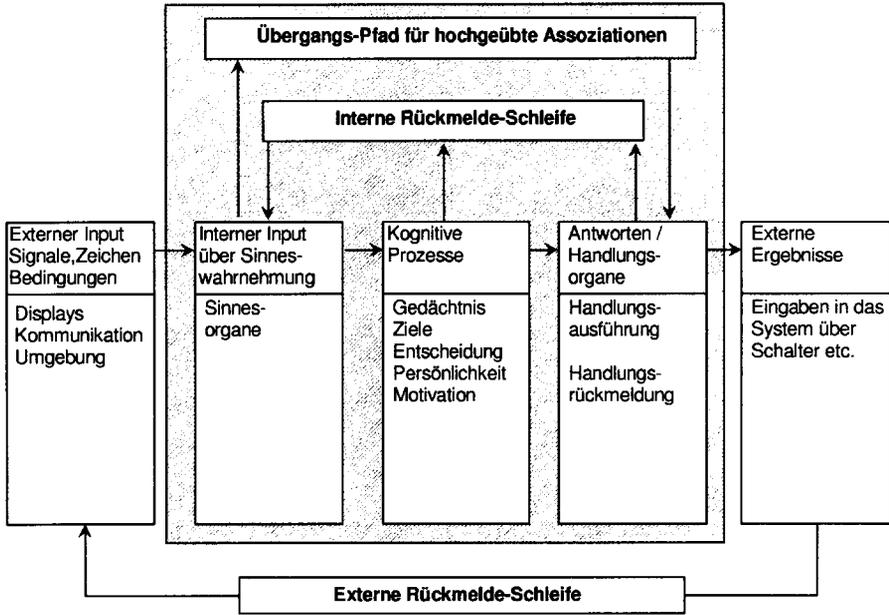


Bild 5 Einteilung von Swain und Guttman.

Innerhalb des Stufenmodells von Swain und Guttman können Fehler dadurch beschrieben werden, daß die phänomenologische Fehlereinteilung aus Tabelle 2 auf diese Stufen angewendet wird. So kann z.B. externe Information fehlen oder zu früh bzw. zu spät dargeboten werden. In entsprechender Weise können Fehler in den anderen Stufen angegeben werden.

Weiterhin können die einzelnen Verarbeitungsstufen durch sogenannte PSF (Performance Shaping Factors) beeinflusst werden (z.B. Streß, Zeitdruck, Arbeitsplatzgestaltung etc.). Die Handlung kann durch psychologische, psychophysische, situationsbezogene und andere auf die Stufen wirkende Faktoren beeinflusst werden. Die von Swain und Guttman genannten PSF zeigt Tabelle 5. In der Tabelle wird unterschieden zwischen externen PSF und internen PSF sowie PSF, die als psychische oder physische Stressoren wirken. Die PSF wirken als fehlerbegünstigende Faktoren und

dienen zur Beschreibung fehlerträchtiger Situationen (error likely situations). Ein typisches Beispiel ist der bereits erwähnte Airbus-Unfall, der durch den PSF "Ergonomische Gestaltung der Bedienung der Gleitwinkeleinstellung" beeinträchtigt war.

Tabelle 5 Einflussfaktoren auf menschliche Handlungen nach Swain und Guttman (1983).

<i>Externe PSF</i>		<i>Stressoren</i>	<i>Interne PSF</i>
<i>Situative Faktoren</i>	<i>Faktoren von Aufgaben und Arbeitsmittel</i>	<i>Psychologische Stressoren</i>	<i>Faktoren bezüglich des Organismus</i>
Konstruktive Merkmale Qualität der Umgebung Temperatur, Luftfeuchte, Luftqualität, Strahlenex- position, Beleuchtung, Lärm, Vibration, Sauber- keit Arbeitszeit Arbeitspausen Verfügbarkeit spezieller Ar- beitsmittel Stellenbesetzung Organisationsstruktur (z.B. Autorität, Verantwor- lichkeit, Kommunikations- kanäle) Handlungen von Schicht- leiter, Arbeiter, Manager, Aufsichtsbehörde Belohnungsstruktur (Anerkennung, Beloh- nung)	Anforderungen an die Wahrnehmung Anforderung an die Moto- rik (Geschwindigkeit, Kraftaufwand, Genauig- keit) Verhältnis von Bedienung zu Anzeige Anforderungen an die An- passung Interpretation Entscheidungsfindung Komplexität (Informationsbelastung) Enge der Aufgabe Häufigkeit und Wiederho- lung der Aufgabe Kritikalität der Aufgabe Kurz- und Langzeitge- dächtnis Berechnungen Rückmeldung (Wissen um Ergebnis einer Handlung) Dynamische bzw. schritt- weise Handlungen Gruppenstruktur und Kom- munikation	Plötzlichkeit des Auftritts Dauer des Stresses Aufgabengeschwindigkeit Aufgabenbelastung Risiko hoher Gefährdung Bedrohungen (Angst vor Versagen, Verlust des Arbeitsplatzes) Monotone, degradierende oder sinnlose Tätigkei- ten Lange ereignislose Peri- oden von Wachsamkeit Motivkonflikte über Ar- beitsleistung Verstärkungen nicht vor- handen oder negativ Sensorische Deprivation Distraktoren (Lärm, Blen- dung, Bewegung, Flak- kern, Farbgebung) Inkonsistente Bezeich- nung	Vorangegangenes Trai- ning, Erfahrung Zustand der augenblick- lichen Praxis bzw. Fähigkeiten Persönlichkeits- und Intelligenzvariablen Motivation und Einstel- lung Emotionaler Zustand Streß (mental oder phy- sich) Wissen um geforderte Leistungsvoraus- setzungen Geschlechtsunter- schiede Physische Kondition Einstellungen durch Familie oder Gruppen Gruppendynamische Prozesse
<i>Arbeit und Aufgaben Instru- tionen</i>		<i>Physiologische Stressoren</i>	
Erforderliche Prozeduren (schriftlich oder nicht- schriftlich) Schriftliche, mündliche Kom- munikation Warnungen und Gefahren- hinweise Arbeitsmethoden Anlagenpolitik	Faktoren der Mensch- Maschine Schnittstelle (Gestaltung von Arbeits- mittel, Prüfgeräte, In- standhaltungsgeräte, Ar- beitshilfen, Werkzeuge, Zubehör)	Dauer des Stresses Ermüdung Schmerz oder Diskomfort Hunger oder Durst Extreme Temperaturen Strahlung Extreme Schwerkkräfte Extreme Druckverhält- nisse Unzureichende Sauerstoff- zufuhr Vibration Bewegungseinengung Fehlen physischer Übung Unterbrechung des circa- dianen Rhythmus	

Bei näherer Betrachtung der Tabelle wird allerdings deutlich, daß Swain und Guttman nicht explizit festlegen, wie sich die PSF auf menschliche Fehler auswirken bzw. ob bestimmte PSF bestimmte Fehlertypen hervorrufen. In der Tabelle sind ähnliche PSF teilweise unterschiedlichen Klassen zugeordnet (z.B. Lärm als externer PSF oder als Stressor). Der Zusammenhang von Fehlertypen und PSF geht in diesem Modell nur

implizit aus den Angaben zur Quantifizierung menschlicher Fehler hervor, welche von Swain und Guttman (1983) in Tabellen zur Zuverlässigkeit menschlicher Handlungen beschrieben sind und keinen direkten Bezug mehr zu Tabelle 5 haben (z.B. verdoppelt sich die Fehlerwahrscheinlichkeit beim Übergang von normalem Streß auf hohen Streß). Andere Einteilungen von PSF finden sich unter anderem bei Embrey (1983), der eine nicht verbindliche Auswahl an PSF zusammengestellt hat. Um eine eindeutige Zuordnung der PSF zu ermöglichen, ist eine Strukturierung des Zusammenhangs von PSF und Fehlertypen erforderlich. Wie dieser Zusammenhang hergestellt werden kann, zeigen die beiden folgenden Fehlereinteilungen.

• **Die Fehlereinteilung von Seifert und Brauser**

Seifert und Brauser (1987) strukturieren den Zusammenhang von menschlichen Fehlern, Fehlertypen und Einflußfaktoren, indem sie die Beziehungen zwischen Einflußfaktoren und bestimmten Fehlertypen in einem Modell zusammengefaßt haben (Bild 6). Dazu kombinieren sie eine kausale Fehlerkategorisierung mit einer aktionalen Einteilung möglicher Hauptursachen.

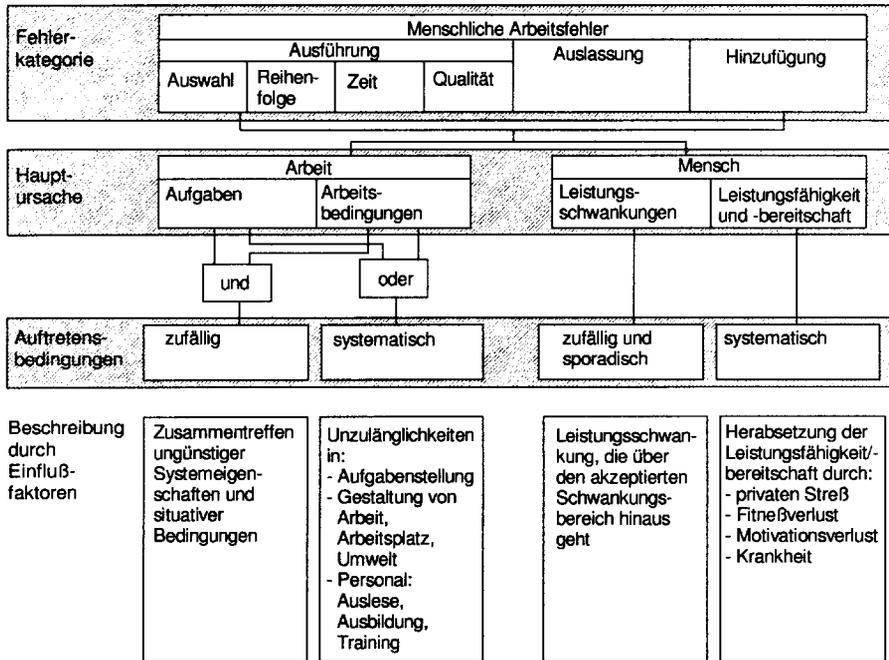


Bild 6 Einteilung von Seifert und Brauser.

Bei diesem Ansatz wird deutlich, worin sich aktionale von kausalen Fehlermodellen unterscheiden: Aktionale Einteilungen legen den Schwerpunkt auf mögliche Verbesserungen im Arbeitssystem, indem die Auftretensbedingungen für einen Fehler in verbesserbar (systematisch) oder weitgehend nicht verbesserbar (sporadisch, zufällig) eingeteilt werden. Das systematische Fehlverhalten hat dabei die Eigenschaft, durch verschiedene Einflußfaktoren beschrieben werden zu können, wohingegen bei sporadischem oder zufälligem Fehlverhalten keine Einflußfaktoren angegeben werden können.

• **Die multi-kausale Fehlereinteilung von Rasmussen**

Rasmussen (1986) stellt den Zusammenhang von PSF und Fehlertypen über ein Wirkungsdiagramm dar (Bild 7).

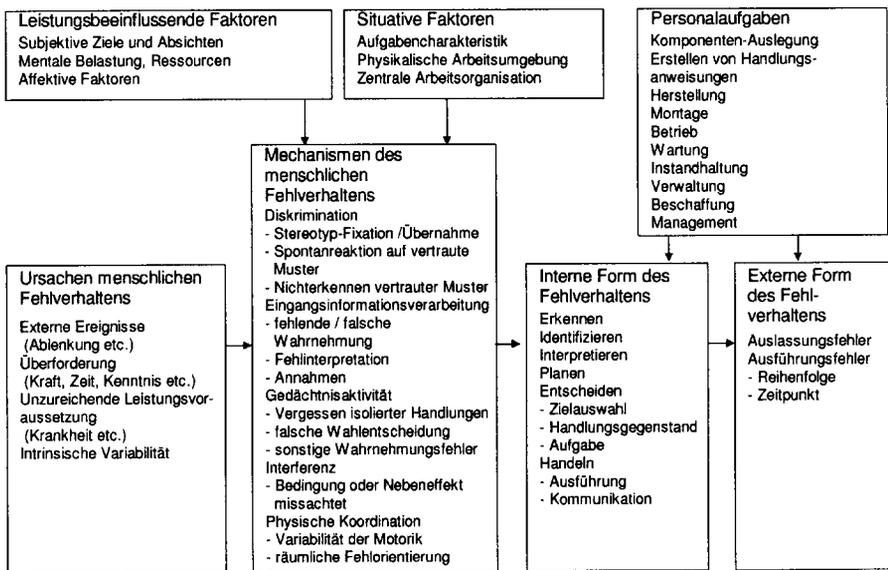


Bild 7 Multi-Aspekt einer aktionalen Betrachtung menschlicher Fehler nach Rasmussen.

Sieht man diesen Zusammenhang innerhalb des Belastungs- Beanspruchungsmodells (vgl. Bubb, 1992), so unterscheidet Rasmussen zwischen 'Leistungsbeeinflussende Faktoren', 'Situative Faktoren' und 'Personalaufgaben' auf Seiten der Belastung sowie

zwischen 'Ursachen menschlichen Fehlverhaltens', 'Mechanismen des menschlichen Fehlverhaltens' und 'Interne Form des Fehlverhaltens' auf Seiten der Beanspruchung. Die Belastungsfaktoren werden durch vertikale Wirkpfeile dargestellt und beziehen sich auf die Umgebung und Situation. Beanspruchungsfaktoren werden durch horizontale Wirkpfeile dargestellt und beziehen sich auf die Person. Die Belastungsseite bildet also alle auf den Menschen wirkenden äußeren Faktoren ab, wohingegen die Beanspruchungsseite die Möglichkeiten des Menschen beschreibt, die Belastungsfaktoren zu bewältigen (coping). Beide Faktorengruppen führen zusammenwirkend zur 'Externen Form des Fehlverhaltens'.

1.4 Ansätze für ein Modell zur Analyse menschlicher Fehler

Im letzten Abschnitt wurden verschiedene Modellvorstellungen über den menschlichen Fehler vorgestellt. Um zu einem Modell zu gelangen, welches zur Erfassung von menschlichen Fehlern in Ereignissen geeignet ist, werden in diesem Abschnitt Gemeinsamkeiten und Unterschiede dieser Fehlermodelle diskutiert und darauf aufbauend ein behaviouristischer und ein kognitivistischer Ansatz für die Erfassung menschlicher Fehler in Ereignissen entwickelt.

1.4.1 Diskussion der Modellvorstellungen

Die Betrachtung der verschiedenen Fehlermodelle zeigte, welche Punkte in der Beschreibung eines Fehlers von Bedeutung sind. So fällt insbesondere bei der Betrachtung der kausalen Fehlermodelle und des Fehlermodells von Swain und Guttman auf, daß das prinzipielle Vorgehen in der Kausalattribution bei allen Modellen gleich ist. Bild 8 verdeutlicht dieses gestaffelte Vorgehen.

In einer ersten Stufe wird in einem (wie auch immer gearteten) Modell eine Formalisierung der Beschreibung erreicht. Alle aus der Sicht des gewählten Modells relevanten Beobachtungen, die zum Fehlerereignis gehören, werden hier beschrieben. Darauf erfolgt eine Zuordnung von phänomenologischen Fehlereinteilungen (Fehler-Taxonomien) auf jeweils einen Teil dieses Modells. Hierdurch werden die Fehler beschrieben, die in dem Fehlerereignis aufgetreten sind. Um die Bedingungen zu bestimmen, unter denen das Fehlerereignis aufgetreten ist, werden in einer dritten Stufe die Einflußfaktoren für die Fehlerereignisse in Form von PSFs (Performance Shaping Factors) angegeben. Die Berücksichtigung von PSFs stellt somit einen weiteren Schritt in der Feh-

lerbeschreibung dar, indem neben einer Fehlerlokalisierung durch phänomenologische Beschreibungen eine Benennung von Bedingungen stattfindet (z.B. mangelhafte Gestaltung zweier Bedienknöpfe). Die Benennung von PSFs ermöglicht es auch, Verbesserungen in der Gestaltung des technischen Systems herauszuarbeiten (z.B. weist der Einflußfaktor "Ähnliche Gestaltung zweier Bedienknöpfe für unterschiedliche Teilsysteme" darauf hin, daß die Bedienknöpfe unterschiedlich gestaltet sein sollten). Die Ansätze von Seifert und Brauser sowie der Multi-Aspekt von Rasmussen versuchen darüber hinaus, die kausalen Relationen zwischen Modell, Fehlertypen und Einflußfaktoren abzubilden. In Bild 8 sind diese kausalen Relationen durch Verbindungslinien zwischen den Beschreibungsstufen angedeutet.

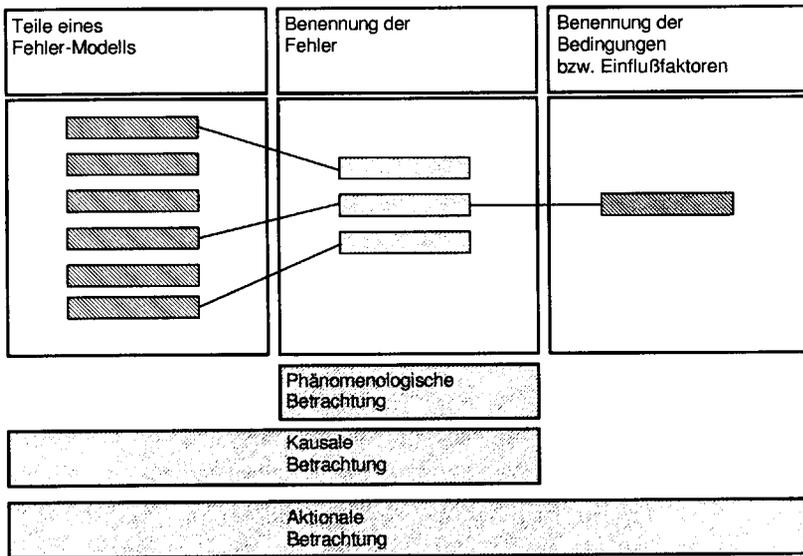


Bild 8 Gestaffeltes Vorgehen einer Fehlerbeschreibung.

Die Betrachtung der verschiedenen Fehlermodelle zeigt weiterhin, daß kausale Fehlermodelle sich auf den Menschen als Betrachtungsgegenstand beschränken, wohingegen aktionale Fehlermodelle den Menschen und sein Umfeld berücksichtigen. Dementsprechend können kausale Fehlermodelle eher als kognitivistische und aktionale Fehlermodelle eher als behaviouristische Ansätze bezeichnet werden. Offen blieb in den vorhergehenden Abschnitten, welcher dieser beiden Ansätze eher geeignet ist, menschliche Fehler in Ereignissen zu erfassen. Folgende Punkte müssen bei der Entscheidung für einen Ansatz berücksichtigt werden:

- In den kausalen Fehlereinteilungen (der kognitivistischen Sichtweise) stellt der Mensch bei einem aufgetretenen Fehler die einzige mögliche Fehlerursache dar. Dies resultiert aus der Beschränkung des Betrachtungsgegenstandes auf den Menschen. Diese Beschränkung ist für die Erfassung menschlicher Fehler in Ereignissen nicht sinnvoll, wie bereits in der Diskussion zu den eingangs zitierten Definitionen für den menschlichen Fehler deutlich wurde. So werden Wechselwirkungen von System und Operateur als mögliche Fehlerquelle ausgeschlossen und allgemein als "menschliches Versagen" klassifiziert. Somit wird die Mensch-Maschine Umgebung, in welcher der Operateur tätig ist, ignoriert und Fehlerursachen, die tatsächlich durch den Informationsfluß im Arbeitssystem oder durch technische Faktoren bedingt sind, auf den Menschen projiziert. Aus diesem Grunde ist es mit einer auf den Menschen beschränkte Definition auch nicht möglich, Verbesserungsmaßnahmen innerhalb des technischen Systems zu finden bzw. das Zusammenspiel technischer und menschlicher Faktoren zu beschreiben.
- Wenn man eine Erfassung menschlicher Fehler in Ereignissen vornehmen will, führt die kognitivistische Vorgehensweise zu Problemen in der praktischen Durchführbarkeit. Die Informationen, die für diese Modelle erforderlich sind, sind nicht oder nur schwer aus Ereignissen zu erfassen (vgl. Bubb, 1992; p89). Die kognitivistische Vorgehensweise ist also der behaviouristischen in der Durchführbarkeit unterlegen.

Aus diesen Überlegungen erscheint es sinnvoll, einen behaviouristischen Ansatz zur Fehlermodellierung zu wählen, der um kognitivistische Aspekte ergänzt wird.

1.4.2 Ein behaviouristischer Ansatz zur Fehlermodellierung

In welche Richtung sich Modelle zur Fehlerbeschreibung entwickeln müssen, um behaviouristische (und damit aktionale) Betrachtungen zuzulassen, zeigen die Weiterentwicklungen der Fehlermodelle in der Arbeitswissenschaft: Das Umfeld des Menschen muß mit in das Fehlermodell einbezogen werden. Dieser zentrale Aspekt des Umfeldes des Menschen, der insbesondere durch den Multi-Aspekt von Rasmussen ausgedrückt wird, wird idealerweise durch das Mensch-Maschine-System (im folgenden MMS) beschrieben. Bild 9 zeigt das allgemeine Mensch-Maschine-System (vgl. Bubb, 1992).

Im MMS kann eine Handlung nach den Gesichtspunkten Aufgabenstellung bzw. Ziel, Informationsumsetzung durch den Menschen (einschließlich Wahrnehmung und motorischer Handlung bzw. Tätigkeit), Informationsumsetzung durch das technische System bzw. der Maschine (einschließlich Bedienelement bzw. Arbeitsmittel und Systemgröße), Systemausgang bzw. Handlungsergebnis und Rückmeldung bzw. Handlungskontrolle untergliedert werden. Innerhalb des MMS wird der handelnde Operator mit einer Aufgabenstellung betraut. Durch Verarbeiten der Aufgabe und der Rückmeldung des aktuellen Systemzustandes löst der Operator eine Aktion auf ein Bedienelement eines technischen Systems aus. Die Aktion hat ihrerseits Konsequenzen für das Verhalten der Systemgröße, die dem Operator zurückgemeldet wird. Das gesamte System ist in Umgebungsbedingungen eingebettet, die sowohl die Stufen (z.B. Wahrnehmung, Motorik) als auch die Informationswege (z.B. Rückmeldung) beeinflussen können.

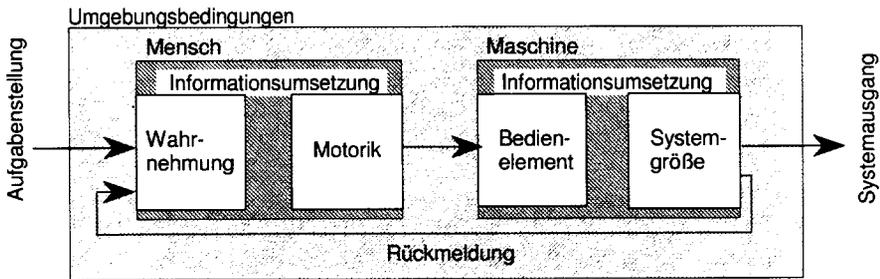


Bild 9 Das Grundschemata des MMS.

Durch dieses Modell wird es möglich, alle bisher besprochenen aktionalen Faktoren abzubilden. Die fehlende bzw. falsche Informationsnutzung (vgl. Hacker) wird durch die Verbindungen von Aufgabenstellung und Rückmeldung an den Menschen abgebildet. Die Einteilung von Swain ist mit dem Teilsystem 'Mensch' des MMS und seinen direkten Verbindungen nahezu identisch. Auch die Unterteilung von Brauser und Seifert in Aufgabenbedingungen (entspricht der Aufgabenstellung) und Arbeitsbedingungen (entspricht der Handlung-Rückmeldung Schleife) findet sich im MMS genauso wieder, wie der Multi-Aspekt von Rasmussen (z.B. sind die situativen Faktoren von Rasmussen in der Aufgabenstellung und in den Umgebungsbedingungen des MMS abgebildet). Ferner ist das MMS in der Lage, über den Multi-Aspekt von Rasmussen hinaus, die Wechselwirkung zwischen dem technischen System (der Maschine) und dem Menschen als Bediener abzubilden, da beide als ein Gesamtsystem betrachtet werden.

Bisher ist das MMS jedoch ein reines Beschreibungsmodell für menschliche Handlungen in Arbeitssystemen (vgl. DIN 4003). Wie aus dem Ansatz des MMS ein Fehlermodell entwickelt werden kann, zeigten die Überlegungen zu den bisherigen Fehlermodellen, wie sie in Bild 8 zusammengefaßt sind. Da das dort dargestellte gestaffelte Vorgehen unabhängig vom gewählten Fehlermodell ist, muß dieses Vorgehen folglich auch für das Modell des Mensch-Maschine-Systems gelten. Zur Ausweitung des MMS zu einem Fehlermodell muß also zu jeder Stufe des MMS folgendes genannt werden:

1. Eine phänomenologische Fehlerbeschreibung mittels einer Fehler-Taxonomie.
2. Eine kausale Fehlerbeschreibung durch die Identifikation wesentlicher Schwachstellen im Informationsfluß des MMS.
3. Eine aktionale Fehlerbeschreibung mittels einer Taxonomie für Bedingungen bzw. Einflußfaktoren.
4. Darstellung des Wirkungszusammenhangs von Fehlertypen und Einflußfaktoren durch ihr gemeinsames Auftreten in Ereignissen.

Zusammenfassend ist das MMS auch aus der Sicht der in dieser Arbeit vorgestellten Definition eines menschlichen Fehlers und aus der Sicht der Diskussionen zur Schuldfrage ein idealer Ausgangspunkt für eine Erfassung und Bewertung menschlicher Handlungen in Ereignissen. Offen blieb bisher, wie innerhalb des MMS die Modellvorstellungen zur menschlichen Informationsverarbeitung berücksichtigt werden können.

1.4.3 Ein kognitivistischer Ansatz zur Fehlermodellierung

Zwei Modelle sind derzeit auf dem Gebiet der kognitiven Fehler führend: das Modell von Rasmussen (1986) und das Nachfolgemodell von Reason (1990), welche beide bereits oben dargestellt wurden. Zunächst werden die Probleme dieser Modelle vorgestellt, um nachfolgend eine Modellvorstellung zur Behandlung kognitiver Fehler in dieser Arbeit zu entwickeln.

Innerhalb der Ansätze von Rasmussen und Reason stellt die Einteilung in fertigkeitbasiertes, regelbasiertes und wissensbasiertes Verhalten eine zentrale Annahme dar. Bereits aus der Darstellung der Modelle weiter oben ging hervor, daß der Übergang zwischen diesen Stufen in beiden Modellen abhängig vom Übungsgrad der Person ist, innerhalb von bestimmten Situationen adäquate Reaktionsmuster abzurufen. Ist eine

Situation weniger vertraut, muß eine entsprechend höhere VerhaltensEbene gewählt werden, um situationsgerecht reagieren zu können. Der Mechanismus, mit dem die verschiedenen VerhaltensEbenen angewählt werden, ist in beiden Modellen ähnlich und prinzipiell mit dem Holst'schen Reafferenzprinzip (siehe Bubb, 1992; p32) oder dem Konzept der kognitiven Dissonanz (Festinger, 1957) vergleichbar:

Im Ansatz von Rasmussen werden die verschiedenen VerhaltensEbenen durch die weiter oben dargestellten Strategien der topographischen und symptomatischen Suche angesprochen. Findet sich durch Anwendung der Suchstrategien kein adäquates Verhaltensmuster auf einer niedrigen Ebene, so wird die nächst höhere Ebene eingenommen. Je höher dabei die VerhaltensEbene ist, desto mehr bewußte Aufmerksamkeit ist erforderlich: Auf der fertigkeitbasierten Ebene laufen die Informationsverarbeitungsprozesse vollkommen unbewußt ab. Auf der regelbasierten Ebene ist bewußte Aufmerksamkeit bei der Auswahl der Regeln erforderlich, welche dann wiederum ohne Aufmerksamkeit durchgeführt werden können. Auf der wissensbasierten Ebene laufen die Verarbeitungsprozesse ausschließlich unter bewußter Kontrolle ab.

Im Ansatz von Reason wurde dieser Mechanismus des Übergangs zwischen den VerhaltensEbenen weiter formalisiert. Bei Reason herrscht fertigkeitbasiertes Verhalten, falls vorhandene Fertigkeiten fehlerfrei auf die Situation passen. Die regelbasierte Ebene wird eingenommen, wenn Abweichungen der Situation von den geübten Verhaltensweisen festgestellt werden und bekannte Regeln zur Beherrschung der Situation angewendet werden können. Die wissensbasierte Ebene wird angefordert, falls die Abweichung der Situation vom gelernten Verhalten so groß ist, daß keine passenden Regeln gefunden werden können. Der Ansatz von Reason stellt also eine Formalisierung des Ansatzes von Rasmussen dar, da er den Übergang zwischen den Ebenen anhand der Möglichkeiten der Ebenen definiert (z.B. wird die regelbasierte Ebene eingenommen, wenn passende Regeln vorhanden sind). Rasmussen legt dagegen lediglich fest, daß die Ebene immer dann erhöht wird, wenn in der Anwendung der Suchstrategien kein adäquates Verhaltensmuster gefunden wird.

In den Modellen von Rasmussen und Reason können somit zwei prinzipiell unterschiedliche Aspekte identifiziert werden, die für die Wahl der VerhaltensEbene ausschlaggebend sind. Dies ist zum einen die Vertrautheit mit der äußeren Situation und zum anderen der Mechanismus, der die Art der bewußten Verarbeitung der Situation steuert. Die beiden Aspekte können in der Terminologie des Belastungs-/Beanspruchungsmodells (siehe Bubb, 1992; p20) so beschrieben werden, daß die äußere Situati-

on zur kognitiven Belastung führt, die den Apparat der inneren Verarbeitung kognitiv beansprucht. Beide Aspekte sollen im folgenden näher dargestellt werden.

Der **Aspekt der kognitiven Beanspruchung** bezieht sich auf den Mechanismus, durch den die verschiedenen Verhaltensebenen angesprochen werden. Die zu den Modellen von Rasmussen und Reason durchgeführte Diskussion machte deutlich, daß bei der Betrachtung der kognitiven Beanspruchung insbesondere das Phänomen der bewußten Verarbeitung und der Automatisierung von Verhaltensweisen berücksichtigt werden muß.

Welche Faktoren hierfür wichtig sind, zeigten bereits die philosophischen Betrachtungen zum menschlichen Fehler. Die dort vorgenommenen Einteilungen sind über die kognitive Psychologie bis hin zur Softwareergonomie bekannt, wie beispielsweise im GOMS-Modell von Kieras und Polson (1985). GOMS steht dabei für Goal (Zieldefinition), Operations (Auswahl der Operationen), Methods (Auswahl der Operatoren) und Selection Rules (Auswahlregeln für Operatoren). Das GOMS-Modell wird vornehmlich zur Bestimmung der Komplexität von Interaktionswegen und -zeiten in der Bedienung von Softwareprodukten verwendet. Innerhalb des Modells werden zunächst die Ziele bis hin zu terminalen Teilzielen untergliedert. Zu jedem terminalen Teilziel können dann Operationen, Methoden und Regeln angegeben werden, die zur Zielerreichung beitragen. Insgesamt können somit drei zentrale Faktoren der kognitiven Beanspruchung identifiziert werden: die Bestimmung des Ziels (Goal), das Wissen, um das Ziel zu erreichen (Operations), sowie die notwendige Verarbeitung zur Erreichung des Ziels (Methods and Selection Rules). Befunde zur Aufmerksamkeitssteuerung zeigen darüber hinaus, wie Aufmerksamkeit und Informationsverarbeitung zusammenspielen und welche kognitiven Fehler zu erwarten sind. Damit ergibt sich folgende Einteilung:

1. Verarbeitung: Für die Fokussierung von Aufmerksamkeit auf eine bestimmte Information ist zunächst ein Ungleichgewicht (mismatch) zwischen erwarteter und tatsächlich eingetretener Situation erforderlich, die zu einer Orientierungsreaktion führt (vgl. Schandry, 1981; p56). Die Fokussierung von Aufmerksamkeit auf das Ungleichgewicht führt zu einer bewußten Erfassung der Ist/Soll-Abweichung. Diese bewußte Verarbeitung ist erforderlich, um eine situationsgerechte Auswahl von Handlungsalternativen zur Kompensation des Ungleichgewichtes zu finden (eine unbewußte Verarbeitung würde keine situationsgerechte Auswahl von Handlungsalternativen ermöglichen). Die Ist/Soll-Abweichung ist dabei nicht an ein bestimmtes Abstraktionsniveau des vorhandenen Wissens in Form von Fertigkeiten, Re-

geln bzw. Analogien (und somit nicht an die Verhaltensebenen nach Rasmussen) gebunden. Mögliche kognitive Fehler liegen hier in der unzureichenden Verarbeitung der Information, um das Ungleichgewicht zu erfassen.

2. Information: Die Person versucht die festgestellte Ist/Soll-Abweichung bzw. Dissonanz über Konsonanzbestrebungen wieder auszugleichen (Festinger, 1957). Für die Auswahl der entsprechenden Handlungsalternativen sind bestimmte Ankerinformationen, sogenannte Hinweisreize (cues), erforderlich. Die Hinweisreize liefern Startpunkte für die Suche nach möglichen Wegen zur Kompensation (vgl. Sanders, 1975). Sie können entweder von außen gegeben sein oder im Wissen der Person liegen. Mögliche kognitive Fehler liegen hier in fehlenden oder unzureichenden Informationen zu möglichen Handlungsalternativen bzw. im Fehlen entsprechender Hinweisreize, die zur Auslösung kognitiver Dissonanz führen. Bei unzureichender Information sind kognitive Fehler dadurch gekennzeichnet, daß dem Menschen zwar bewußt ist, daß eine Abweichung vom Normalverhalten vorliegt, diese kann aber nicht weiter spezifiziert werden.
3. Zielbestimmung: Die über die Hinweisreize gefundenen möglichen Wege zur Kompensation werden über einen Ähnlichkeitsvergleich (similarity matching) oder über das Kriterium der Häufigkeit (frequency gambling) als Lösung für die aktuelle Situation ausgesucht (vgl. Reason, 1990). Die gefundene Lösung (also das Ziel der Handlung) wird mit der zur Verfügung stehenden Information sowie vorhandenen Regeln bzw. Strategien entweder unter bewußter Kontrolle (closed loop) oder ohne bewußte Kontrolle (open loop) auf die Situation angewendet (vgl. Schmidt, 1975). Mögliche kognitive Fehler liegen hier in der Zielreduktion durch einen unvollständigen Ähnlichkeitsvergleich oder durch die Dominanz einer falschen Lösung. Entsprechend der späten Phase in der Problemlösung sind kognitive Fehler hier durch volles Bewußtsein über das Problem und durch eine verstärkte kognitive Dissonanz gekennzeichnet.

Um den **Aspekt der kognitiven Belastung** zu klassifizieren, erscheint es sinnvoll, das Ebenenmodell von Rasmussen heranzuziehen und mit dem Aspekt der Aufmerksamkeitssteuerung als kognitive Beanspruchung zu kombinieren. Tabelle 6 stellt diesen Zusammenhang dar. In der Tabelle ergeben sich insgesamt 9 Felder für die Klassifikation von kognitiven Fehlern. Diesen Zusammenhang stellte in ähnlicher Form auch Freese (in Zapf et al., 1989) her. Dort wurden lediglich zur Einteilung der kognitiven Beanspruchung die gedächtnispsychologischen Konstrukte situative Rückmeldung, Gedächtnis und Zielauswahl genutzt, welche prinzipiell den in der Tabelle benutzten Begriffen entsprechen: Die situative Rückmeldung entspricht der Verarbeitung, das

Gedächtnis der Information und die Zielauswahl der Zielreduktion. Bemerkenswert ist, daß Gewohnheitsfehler nicht auf der fertigkeitbasierten sondern auf der regelbasierten Ebene zu finden sind. Gewohnheitsfehler sind also ein Versehen bei der Auswahl von Regeln. Damit berücksichtigt diese Einteilung auch das bereits beim Modell von Rasmussen diskutierte Phänomen, daß Gewohnheiten auf jeder Verarbeitungsstufe für das Zustandekommen von Fehlern von Bedeutung sind.

Tabelle 6 Erweiterung des Modells von Rasmussen um den Faktor der Aufmerksamkeitssteuerung.

<i>Kognitive Beanspruchung: Grad der Aufmerksamkeit</i> <i>Kognitive Belastung: Verhaltensebene</i>	<i>Verarbeitung</i>	<i>Information</i>	<i>Zielreduktion</i>
<i>Fertigkeitsbasiert (z.B. alltägliche Handlung)</i>	Unbewußtes Versehen	Versehen bezüglich des Problems	Versehen bezüglich der Problemlösung
<i>Regelbasiert (z.B. regelmäßige Handlung)</i>	Erkennungsfehler Verletzung (routine violation)	Untertassungsfehler Regelbasierter Fehler (rule-based mistake)	Gewohnheitsfehler Aufmerksamkeitsfehler (attentional failure)
<i>Wissensbasiert (z.B. unregelmäßige Handlung)</i>	Urteilsfehler (exceptional violation)	Merkfehler (memory failure)	Denkfehler (knowledge-based mistake)

Der in der Tabelle beschriebene Zusammenhang stellt zwar eine nützliche Erweiterung des Ansatzes von Rasmussen dar; die dort dargestellte Unterscheidung erscheint aber für die Erfassung kognitiver Fehler ungeeignet. Ein wesentlicher Punkt der Kritik ist dabei, daß die Verhaltensebenen (1) nicht diskret sind, sondern eher ein Kontinuum darstellen sowie (2) vom Übungsgrad der Person abhängen und somit sowohl personenspezifisch als auch für eine einzelne Person situationsspezifisch sind (u.a. Wickens, 1984). Auch Moieni et al. (1994) konnten die Verhaltensebenen von Rasmussen nicht empirisch nachweisen. Vielmehr fand man an systemtechnischen Merkmalen ausgerichtete Einteilungen. Die Verhaltensebenen von Rasmussen sind somit ungeeignet, die Qualität der äußeren Situation eindeutig und unabhängig von den Personen zu beschreiben.

Um den Aspekt der kognitiven Belastung unabhängig vom Übungsgrad der Person zu beschreiben, ist folglich ein anderer Ansatz zu wählen. Dabei kommt es darauf an, die charakteristischen Eigenschaften der Situation eindeutig und personenunabhängig zu beschreiben. Da als behaviouristisches Modell zur Erfassung menschlicher Fehler das MMS gewählt wurde, bietet sich zur Beschreibung der Belastungsseite die systemer-

gonomische Klassifikation nach Bubb (1992) an. Tabelle 7 stellt die systemergonomische Klassifikation sowie eine Beschreibung der Einteilung dar. Die Systemergonomie baut auf dem Ansatz des MMS auf und stellt eine gegenüber dem Übungsgrad der Personen unabhängige Klassifikation anhand der äußeren Situation dar. Sie ermöglicht zudem eine eindeutige Klassifikation der charakteristischen Eigenschaften der Situation (vgl. auch Billows, 1993).

Tabelle 7 Die systemergonomische Klassifikation zur Modellierung der kognitiven Belastung.

<i>Systemergonomische Einteilung</i>	<i>Ausprägung</i>	<i>Beschreibung</i>
<i>Aufgabeninhalt</i>		
Bedienung	simultan	Die gleichzeitige Betätigung mehrerer Bedienelemente ist erforderlich
	sequentiell	Die Betätigung muß in einer bestimmten Reihenfolge erfolgen
Dimensionalität	mehrdimensional	Vom technischen System werden mehrere veränderbare Freiheitsgrade (bzw. Parameter) vorgegeben
	eindimensional	Vom technischen System ist nur ein veränderbarer Freiheitsgrad (bzw. Parameter) vorgegeben
Führungsart	dynamisch	Das Aufgabenziel wird innerhalb eines engen zeitlichen Fensters fortwährend verändert (z.B. Tracking-Aufgabe)
	statisch	Das Aufgabenziel ist zeitlich unverändert
<i>Aufgabenauslegung</i>		
Darstellungsart	Kompensationsaufgabe	Der Unterschied zwischen Aufgabenstellung und Aufgabenerfüllung wird dargeboten. Der Mensch kann nur die Abweichungen erkennen.
	Folgeaufgabe	Der Mensch muß den Unterschied zwischen Aufgabenstellung und Aufgabenerfüllung selbst erkennen.
Aufgabenart	monitiv	Der Mensch hat eine überwachende Tätigkeit, nimmt nur Informationen auf, um über den Systemzustand zu entscheiden.
	aktiv	Der Mensch ist aktiv an der Prozeßkontrolle beteiligt, indem er ständig Informationen aufnimmt, verknüpft und agiert.
<i>Kompatibilität</i>		
Kompatibilität	innere	Zusammenhang bzw. Sinnfälligkeit zwischen den Informationen auf der Eingabeseite des Menschen und seinen inneren Vorstellungen
	äußere	Zusammenhang der Informationen auf der Eingabeseite des Menschen untereinander (Wirklichkeit, Anzeigen, Bedienelemente)
<i>Rückmeldung</i>		
Rückmeldung		Der Mensch erhält in irgendeiner Form eine Information über die Handlungsausführung (Tastsinn, Anzeigen oder Geräusche etc.)

Durch die vorangegangenen Überlegungen kann für die Erfassung kognitiver Fehler innerhalb des behaviouristischen Ansatzes des MMS insgesamt die folgende Vorgehensweise vorgeschlagen werden, durch die es möglich wird, aus Ereignissen erste Informationen über Prozesse der Informationsverarbeitung zu gewinnen, die dem menschlichem Fehlverhalten zugrunde liegen.

1. Beschreibung eines menschlichen Fehlers im behaviouristischen Ansatz des MMS gemäß des in Bild 8 dargestellten gestaffelten Vorgehens.
2. Systemergonomische Klassifikation der Beschreibung im MMS zur Einordnung der kognitiven Belastung.
3. Klassifikation der Beschreibung im MMS mit den kognitiven Beanspruchungsfaktoren Verarbeitung, Information und Zielreduktion.

1.4.4 Weiteres Vorgehen

Dieses Kapitel stellte Ansätze zur Beschreibung menschlicher Fehler dar. Aus der Betrachtung der verschiedenen Fehlermodelle konnte ein theoretischer Ansatz zur Analyse menschlicher Fehler entwickelt werden. Hierdurch konnten theoretische Grundlagen dafür erarbeitet werden, wie menschliche Fehler untersucht werden sollten. Um auch die praktischen Anforderungen zu berücksichtigen, werden im folgenden Kapitel Methoden zur qualitativen und quantitativen Bewertung menschlicher Zuverlässigkeit und Methoden zur Erfassung von Betriebserfahrung untersucht.

2 Verfahren zur Beurteilung menschlicher Zuverlässigkeit

Im diesem Kapitel werden die praktischen Anforderungen zusammengestellt, die ein Verfahren zur Erfassung menschlicher Fehler aus der Betriebserfahrung erfüllen muß. Diese Anforderungen dienen zur Evaluation des im vorhergehenden Kapitel herausgearbeiteten theoretischen Ansatzes.

Neben den theoretischen Fragestellungen zum menschlichen Fehler des letzten Kapitels stellt sich in der Praxis insbesondere bei Industrien mit Gefahrenpotential immer das Problem, dieses Potential möglicher Fehler zu bewerten, um Aussagen darüber zu gewinnen, (1) wie hoch das Gesamtrisiko eines Schadens innerhalb eines technischen Systems ist, (2) welches Ausmaß der menschliche Fehler z.B. in Relation zu technischen Fehlern annimmt bzw. welcher technische oder menschliche Fehler die höchste Bedeutung besitzt und (3) welche Möglichkeiten zur Reduktion des Risikos am effektivsten sind. Zentraler Begriff der Beurteilung eines technischen Systems ist dabei das Risiko. Es wird folgendermaßen definiert (u.a. Hauptmanns et al., 1987):

$$\text{Risiko} = \text{Erwartete Schadenshäufigkeit} * \text{Erwarteter Schadensumfang} \quad (1)$$

Dabei wird der Schadensumfang in irgendeinem Maßstab angegeben, der die Folgen für Personen und Umwelt quantifiziert (z.B. Letale Dosis, Kontaminierte Fläche oder Raum, Geldeinheiten). Der Begriff des Risikos ist nicht von den Begriffen Sicherheit, Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit (bzw. Produktivität) zu trennen. Der Begriff Sicherheit bezieht sich auf den Schadensumfang; die Begriffe Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit auf die Schadenshäufigkeit. Zur Beurteilung des Risikos technischer Systeme gibt es zwei generelle Vorgehensweisen: die prospektive und die retrospektive Beurteilung.

Die **prospektive Beurteilung** nimmt eine Bewertung auf der Basis potentieller Fehler im technischen System vor. Die prospektive Beurteilung kann auch als deduktives Verfahren bezeichnet werden. Sie kann entweder deterministisch oder probabilistisch durchgeführt werden. In der deterministischen Beurteilung wird qualitativ analysiert, welche Ausfälle möglich sind und ob Möglichkeiten zur Beherrschung der Störung vorhanden sind (siehe z.B. HAZOP-Verfahren dargestellt in Bartels et al., 1990). In der probabilistischen Beurteilung wird zusätzlich hierzu die Wahrscheinlichkeit berücksichtigt, mit der ein System ausfallen kann. Ein anerkanntes Verfahren zur probabilistischen Beurteilung ist die PSA (Probabilistische Sicherheitsanalyse), die für die Beurtei-

lung der menschlichen Zuverlässigkeit um die HRA (Human Reliability Analysis) ergänzt wird (siehe DRS-B, 1990). Probabilistische prospektive Verfahren benötigen Daten über die Wahrscheinlichkeit des Ausfalls und sind somit datenintensiver als deterministische Verfahren.

Die **retrospektive Beurteilung** nimmt eine Bewertung aufgrund von tatsächlichen Ereignissen vor. Die Beurteilung wird dabei entweder rein qualitativ oder mit einfachen häufigkeitsanalytischen Verfahren quantitativ vorgenommen. Typische Quellen einer retrospektiven Beurteilung sind die in der Betriebserfahrung tatsächlich vorgekommenen Ereignisse oder Untersuchungen an Simulatoren. Bei der retrospektiven Beurteilung handelt es sich um induktive Verfahren. Sie versuchen, aus der vorliegenden Betriebserfahrung mögliche Ursachen und Verbesserungsmöglichkeiten für die beobachteten Fällen zu finden.

In retrospektiven Verfahren werden somit spezifische situative Informationen gesammelt und eng umrissene Aussagen über das Zustandekommen eines Ereignisses gewonnen. Damit diese Verfahren auch Daten für die prospektiven probabilistischen Verfahren liefern, muß es möglich sein, die verschiedenen spezifischen situativen Informationen zusammenzufassen. Somit kann das Ziel dieser Arbeit auch in folgende Frage umformuliert werden: Wie muß ein retrospektives Verfahren gestaltet sein, damit es sowohl eine spezifische Analyse der situativen Informationen eines Ereignisses ermöglicht als auch Daten für probabilistische prospektive Verfahren liefert? Um diese Frage zu beantworten, werden in den folgenden Abschnitten die verschiedenen Verfahren der prospektiven und retrospektiven Beurteilung menschlicher Fehler daraufhin untersucht, welche Anforderungen hinsichtlich der Beurteilung menschliche Fehler bestehen.

2.1 Beurteilung der menschlicher Zuverlässigkeit in der PSA

Eine wesentliche Aufgabe der PSA besteht darin, bedeutende Risikobeiträge und mögliche Abhilfen quantitativ zu beschreiben. Wie PSA-Studien im Bereich der Kraftwerke zeigen, spielt der Mensch eine nicht unerhebliche Rolle für das Risiko des technischen Systems. An einigen zu bewertenden Handmaßnahmen der deutschen Risikostudie für Kernkraftwerke sind Operateurmaßnahmen mit bis zu 70% an dem Ergebnis der Zuverlässigkeitsanalyse beteiligt (DRS-B, 1990). Ob eine quantitative Beurteilung des menschlichen Einflusses überhaupt erforderlich ist, wird oft kontrovers diskutiert, da menschliche Leistungsfähigkeit nur bedingt in Zahlen zu fassen ist.

Daß durch eine PSA quantitative Informationen zur Fehlerbeurteilung zur Verfügung stehen, wird aber auch für rein qualitative Fragestellungen insbesondere immer dann bedeutsam, wenn zwischen verschiedenen Sicherheitsvorkehrungen oder Maßnahmen innerhalb eines großtechnischen Betriebes entschieden werden muß. Durch die Quantifizierung bedeutender Risikobeiträge ergeben sich also Ansätze für Optimierungsmaßnahmen, die vom Sicherheitsaspekt her vordringlich zu bearbeiten sind. Somit stellt die PSA auch ein Instrument dar, einen technischen Betrieb möglichst effektiv qualitativ zu verbessern. Dies gilt besonders für den Fall, daß Vorkehrungen im Bereich des Personals gegenüber Automatisierungsmaßnahmen oder anderen technischen Vorkehrungen abgewogen werden müssen. Sie ist ferner immer dann notwendig, wenn das Risiko verschiedener technischer Systeme verglichen werden soll (z.B. Vergleich osteuropäischer Kraftwerke mit westeuropäischen). Auch können durch die quantitative Beurteilung Beiträge des Menschen am Risiko eines technischen Systems ausgedrückt werden.

2.1.1 Vorgehen in einer PSA

Das Vorgehen in einer PSA setzt sich aus unterschiedlichen Schritten einer formalisierten Beschreibung des technischen Systems und der Eingriffe des Menschen zusammen. Die unterschiedlichen Beschreibungsstufen stellen die grundlegende Vorschrift dar, das Risiko des technischen Systems zu berechnen. Die folgenden aufeinander aufbauenden Schritte bzw. Beschreibungsstufen können aus der Sicht der menschlichen Zuverlässigkeit unterschieden werden:

- Definition des auslösenden Ereignisses (IE - Initiating Event)
- Erstellen von Ereignisabläufen (OET - Operation Event Tree)
- Erstellen von Fehlerbäumen (OET - Operation Error Tree)
- Bestimmen von Fehlerwahrscheinlichkeiten (HEP - Human Error Probabilities) für menschliche Handlungen mit einem HRA-Verfahren

Wie innerhalb dieser Schritte eine Berechnung des Risikos einer technischen Anlage vorgenommen wird, wird im folgenden kurz beschrieben.

- **Definition des auslösenden Ereignisses**

Im ersten Schritt wird ein auslösendes Ereignis definiert und die Häufigkeit pro Jahr bestimmt, mit der dieses Ereignis zu erwarten ist (z.B. zu erwartende Häufigkeit eines Dampferzeugerheizrohrlecks in einem Druckwasser-Reaktor pro Jahr).

- **Erstellen von Ereignisabläufen**

Im darauf folgenden Schritt werden mögliche Störungen in Form von Ereignisabläufen durchgespielt. Die Ereignisabläufe werden dabei systematisch aufgebaut, indem zunächst die Frage nach einem möglichen Ausfall eines Systems ("Was wäre wenn?") und darauf die Frage nach möglichen Eingriffsmöglichkeiten zur Beherrschung der Störung ("Was ist dann möglich?") gestellt wird. Ein typischer Ereignisablauf ist in Bild 10 dargestellt.

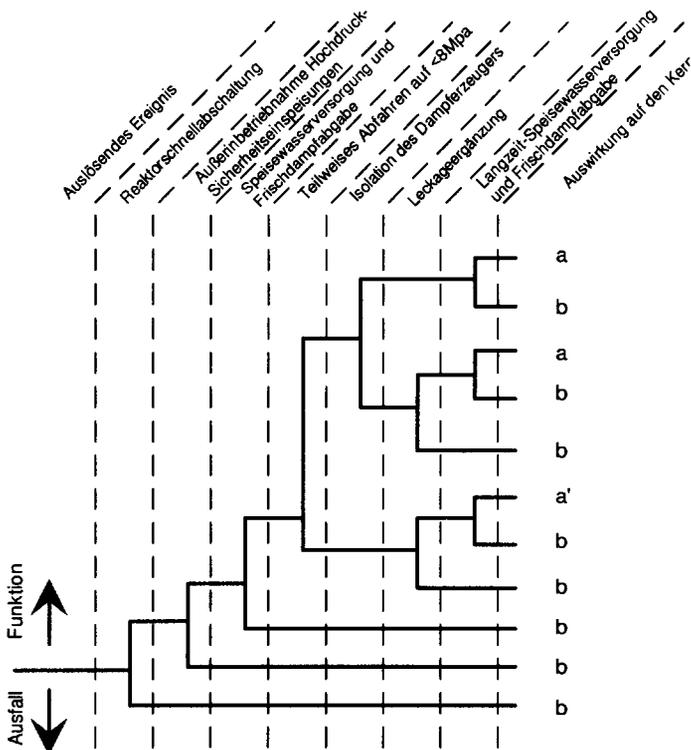


Bild 10 Ereignisablaufdiagramm für ein Dampferzeugerheizrohrleck (nach DRS-B, 1990).

Das Bild zeigt den Ablauf eines Dampferzeugerheizrohrlecks in einem Druckwasser-Reaktor. Auf der linken Seite steht das angenommene auslösende Ereignis. Tritt es ein, so kann es durch bestimmte Systemfunktionen beherrscht werden. Die Systemfunktionen selbst stehen mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit p zur Verfügung (Funktion) und können mit der Wahrscheinlichkeit $q=1-p$ ausfallen (Ausfall). Insgesamt ergibt sich damit die erwartete Häufigkeit einer Sequenz innerhalb des Ablaufes durch das Produkt der erwarteten Häufigkeit des auslösenden Ereignisses und der Wahrscheinlichkeit für die Verfügbarkeit bzw. für den Ausfall der Systemfunktionen, die zur Beherrschung erforderlich sind. Am Ende des Ereignisablaufes können verschiedene Klassen von Systemzuständen identifiziert werden, z.B. (a) Beherrschung der Störung, (a') Beherrschung der Störung mit Schäden in der Anlage oder (b) nicht beherrschbare Störung mit Kernschmelze.

- **Erstellen von Fehlerbäumen**

Um die komplexen Zusammenhänge der technischen Systeme, die hinter den Systemfunktionen stehen, in der PSA zu berücksichtigen, wird für jede Systemfunktion ein Fehlerbaum konstruiert, der zur Berechnung der Verfügbarkeit der Systemfunktion dient. Nimmt man beispielsweise an, daß die Systemfunktion 'Leckageergänzung' durch das Einschalten einer Pumpe X gewährleistet ist, kann dieser Sachverhalt durch einen Fehlerbaum der Pumpe X dargestellt werden. Der Fehlerbaum enthält dann alle Details, die zur Verfügbarkeit bzw. zum Ausfall der Pumpe X beitragen können (Bild 11).

In dem Fehlerbaum wird zunächst die Systemfunktion als sogenanntes Top-Ereignis definiert. Ausgehend vom Top-Ereignis werden die Teilfunktionen, die zu einem fehlerhaften Verhalten der Systemfunktion beitragen können, durch logische Verknüpfungen (UND, ODER) mit dem Top-Ereignis verbunden. Sind zwei Teilfunktionen redundant zueinander, werden sie UND-verknüpft (z.B. ist die Funktion Einspeisung nicht gewährleistet, wenn die Automatik die Pumpe nicht startet und der Operateur, als Redundanz zur Automatik, die Pumpe nicht startet). Sind beide Teilfunktionen gleichermaßen für die Erfüllung der Funktion notwendig, werden sie ODER-verknüpft (z.B. kann die Automatik ausfallen, da sie keinen Startbefehl erhalten hat, oder selbst gestört ist). Zur Modellierung jeder Teilfunktion können wiederum komplexe Fehlerbäume erforderlich sein. Dies setzt sich solange fort, bis die Möglichkeiten des Ausfalls hinreichend detailliert modelliert sind. Auf der untersten Ebene eines Fehlerbaumes werden sogenannte Basisereignisse angegeben (schraffierte Kästen im Bild). Die Schnitt-

menge von Basisereignissen, die ausreicht, die Systemfunktion ausfallen zu lassen (die also im Fehlerbaum einen Ausfall des Top-Ereignisses verursachen), werden als minimale Schnittmengen bezeichnet (minimal cuts).

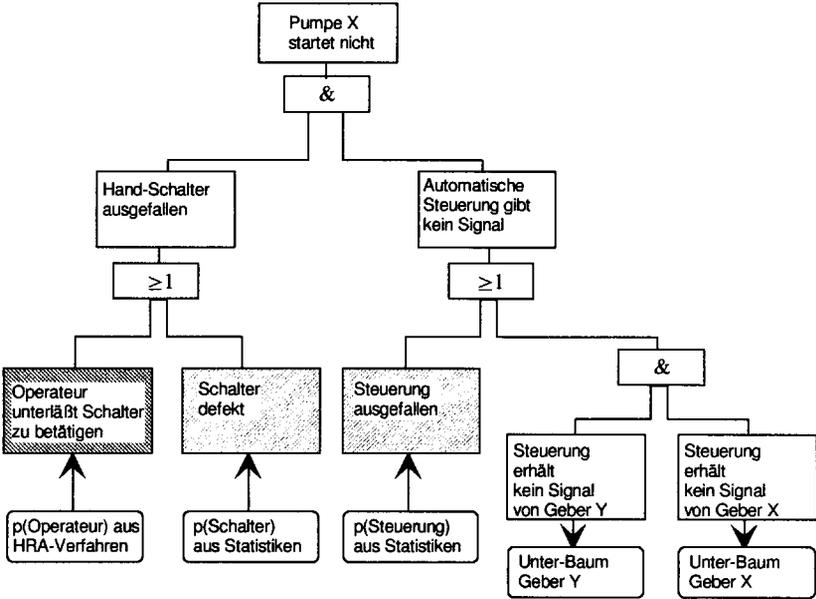


Bild 11 Einfacher hypothetischer Fehlerbaum mit menschlichen und technischen Basisereignissen (" ≥ 1 " entspricht ODER, "&" entspricht UND).

Durch dieses Vorgehen wird ein logischer Baum aller Faktoren, die zum Fehler in der Systemfunktion führen können, aufgespannt. Die Wahrscheinlichkeit für den Ausfall der Systemfunktion wird innerhalb des Fehlerbaumes entsprechend der Regeln der Wahrscheinlichkeitsrechnung bestimmt. Stark vereinfachend geht man folgendermaßen vor: Sind zwei Ereignisse ODER-verknüpft, werden die Wahrscheinlichkeiten addiert, sind sie UND-verknüpft, werden sie multipliziert.

Im Gegensatz zur Darstellung eines Ereignisablaufes, in dem Pfade für Erfolg und Mißerfolg angegeben werden, werden in Fehlerbäumen die einzelnen Knoten mit logischen Symbolen verknüpft. Der formale Gehalt beider Ansätze ist aber gleich; beide können ineinander überführt werden. Je nach Beschaffenheit und Komplexität der zu untersuchenden Fehlersequenz eignen sich eher umfangreiche Ereignisablaufdiagramme mit kleinen Fehlerbäumen oder eher kleine Ereignisablaufdiagramme mit umfangreichen Fehlerbäumen.

Die Fehlerbäume stellen den Schritt dar, bei dem technische und menschliche Fehler für das Gesamtergebnis der PSA zusammenfließen. Im Bild 11 sind zur Verdeutlichung die technischen Basisereignisse einfach schraffiert und menschliche Basisereignisse doppelt schraffiert. Zur Berechnung der Zuverlässigkeit eines technischen Basisereignisses wird die Ausfallwahrscheinlichkeit der Komponente angegeben. Zur Bestimmung der Ausfallwahrscheinlichkeit eines Basisereignisses mit einer Operateurhandlung werden Fehlerwahrscheinlichkeiten für diese Handlung benötigt.

- **Bestimmung von Fehlerwahrscheinlichkeiten für menschliche Handlungen**

Zur Einbindung menschlicher Handlungen in eine PSA ist die Angabe von Wahrscheinlichkeiten für einen menschlichen Fehler auf der Ebene der Basisereignisse notwendig. Die Wahrscheinlichkeiten werden als HEP (Human Error Probability) bezeichnet und sind folgendermaßen definiert (vgl. Bubb, 1992):

$$HEP_i = \frac{\text{Anzahl der fehlerhaft durchgeführten Aufgaben des Typs } i}{\text{Anzahl aller durchzuführenden Aufgaben des Typs } i} \quad (2)$$

Diese Fehlerwahrscheinlichkeiten werden dadurch bestimmt, daß innerhalb eines standardisierten Vorgehens bestimmte HRA-Verfahren angewendet werden.

2.1.2 Vorgehen bei einer HRA

Um Fehlerwahrscheinlichkeiten (HEP) über menschliche Handlungen zu erhalten, müssen bei der Beurteilung der menschlichen Zuverlässigkeit zwei Schritte durchgeführt werden: Im ersten Schritt werden qualitative Angaben über die zu beurteilende Situation gesammelt. Im zweiten Schritt wird die Situation mit Hilfe eines HRA-Verfahrens quantitativ bewertet. Für diesen Beurteilungsprozeß wurde von der IAEA (International Atomic Energy Agency) ein Verfahren mit dem Namen SHARP (Systematic Human Action Reliability Procedure) vorgeschlagen, welches festlegt, wie bei einer Erfassung und Bewertung menschlicher Zuverlässigkeit in einer PSA vorzugehen ist (IAEA-499, 1987; Hannaman & Spurgin, 1984b).

Das Verfahren SHARP wurde von Hannaman und Spurgin (1984b) entwickelt. Es bietet die Möglichkeit, die Einbindung der menschlichen Zuverlässigkeit in eine PSA sowie

den Prozeß der Datensammlung für eine HRA zu systematisieren und zu standardisieren. Es ist eine Verfahrensvorschrift für eine systematische Aufgabenanalyse und Berücksichtigung von Einflußfaktoren (PSF) und nicht mit den HRA-Verfahren zu verwechseln, die innerhalb von SHARP verwendet werden können, um HEP-Angaben zu gewinnen. SHARP untergliedert den Prozeß der Einbindung in die 7 Stufen gemäß Bild 12.

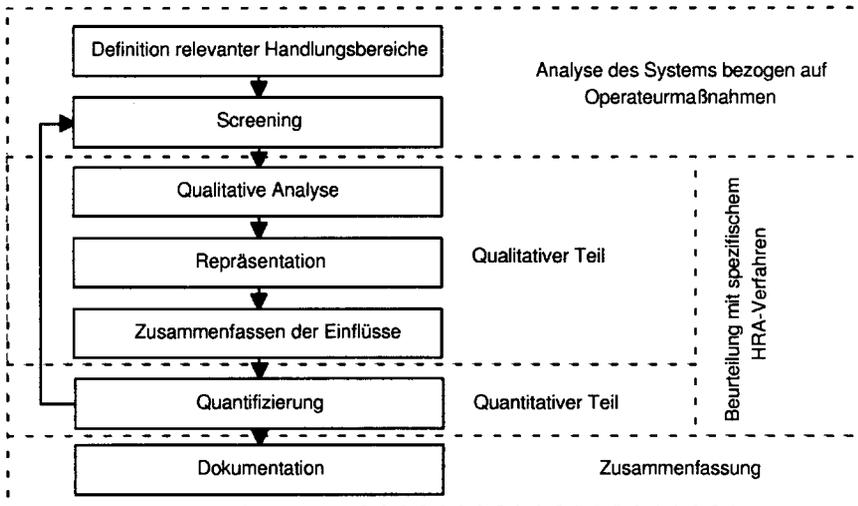


Bild 12 Analyseschritte in SHARP.

Stellt sich nach einer Quantifizierung heraus, daß weitere Handmaßnahmen von Bedeutung für das Ergebnis der PSA sind, ist eine erneute Bewertung beginnend mit einem Screening vorzunehmen. Das Vorgehen setzt sich iterativ fort, bis keine bedeutenden Operateurhandlungen mehr zu bewerten sind.

Im folgenden werden die verschiedenen Schritte von SHARP im Hinblick auf die wesentlichen Informationen, die sie benötigen, kurz beschrieben.

- **Definition relevanter Handlungsbereiche**

Dieser Schritt dient dazu, diejenigen menschlichen Handlungen zu identifizieren, für die eine HRA-Analyse erforderlich ist. Hierzu werden fünf verschiedene Typen menschlicher Handlungen unterschieden (Typ 1-5). Diese fünf Typen können nach IAEA-50 (1992) bzw. IAEA-538 (1990) in drei Handlungsbereiche (A, B, C) unterteilt werden.

- Handlungsbereich A/Typ 1 - Personalhandlungen während des bestimmungsgemäßen Betriebs der Anlage: Unter diesem Typ werden alle Handlungen des Kraftwerkpersonals zusammengefaßt, die vor dem Eintreten einer Störung stattgefunden haben, aber zu sogenannten latenten Fehlern im technischen System geführt haben (z.B. falsche Ventilstellungen nach der Wartung einer Armatur).
- Handlungsbereich B/Typ 2 - Personalhandlungen, die ein auslösendes Ereignis zur Folge haben: Unter diesem Typ sind alle Handlungen des Personals zusammengefaßt, die direkt zu Störungen im Betriebsablauf führen, sogenannte aktive Fehler (z.B. Primärkreisleck als Folge einer Fehlbedienung).
- Handlungsbereich C - Personalhandlungen nach Störfalleintritt: Im Bereich Typ C sind alle Handlungen des Personals zu fassen, die nach dem Eintritt einer Störung vorgenommen werden, um die Störung zu bewältigen (z.B. Einschalten des Notkühlsystems). Innerhalb dieses Handlungsbereichs haben fehlerkorrigierende Handlungen (recovery actions) eine besondere Bedeutung. Unter diesem Aspekt kann der Handlungsbereich C weiter unterteilt werden in die Typen 3 bis 5:

Typ 3: Personalhandlungen, die auf der Grundlage feststehender Regeln durchzuführen sind und günstige Auswirkungen auf den weiteren Störfallablauf haben.

Typ 4: Personalhandlungen, die den Störfallablauf in ungünstiger Weise beeinflussen.

Typ 5: Personalhandlungen, die auf der Grundlage des verfügbaren Wissens durchzuführen sind und bei korrekter Diagnose und fehlerfreier Ausführung günstige Auswirkungen auf die Beherrschung der Störung haben.

An dieser Stelle soll angemerkt werden, daß die Unterteilung des Handlungsbereichs C in der Literatur zum Teil uneinheitlich gehandhabt wird. IAEA-50 (1992) faßt unter dem Typ C4 z.B. nur fehlerhafte Ausführungen geplanter Personalhandlungen. Bei Hirschberg (1990) werden unter Typ C4 dagegen alle fehlerhaft ausgeführten Personalhandlungen zusammengefaßt. Ein Vergleich dieser verschiedenen Klassifikationsmöglichkeiten legt insgesamt den Schluß nahe, daß eine Aufteilung gemäß Tabelle 8 alle Möglichkeiten sinnvoll zusammenfaßt, indem der Typ C4 nochmals danach unterteilt wird, ob eine Handlung geplant oder ungeplant ist.

Menschliche Handlungen aus dem Bereich A sind in der Regel in den Ausfallraten der technischen Komponenten enthalten und gehen direkt in die Bestimmung der Ausfall-

wahrscheinlichkeit einer technischen Komponente ein, sind also aus der Sicht der menschlichen Zuverlässigkeit indirekt in der Fehlerwahrscheinlichkeit eines technischen Basisereignisses enthalten. Menschliche Handlungen aus dem Bereich B sind in der Regel in den Häufigkeiten der auslösenden Ereignisse enthalten.

Tabelle 8 Einteilung des Handlungsbereiches C.

<i>Grundlage der Handlung Auswirkungen auf den Störungsablauf</i>	<i>geplant</i>	<i>ungeplant</i>
<i>günstig</i>	Typ C3	Typ C5
<i>ungünstig</i>	Typ C4	Typ C6

In einigen Fällen kann es sein, daß die menschlichen Handlungen des Bereichs A nicht in den Ausfallwahrscheinlichkeiten der technischen Komponenten oder daß menschlichen Handlungen vom Bereich B nicht in den Häufigkeiten der auslösenden Ereignisse enthalten sind. Typischerweise ist dies der Fall, wenn die Ausfallwahrscheinlichkeit eines Basisereignisses anhand einer Materialprüfung oder die Häufigkeit eines auslösenden Ereignisses durch einen Fehlerbaum bestimmt worden ist. In diesen Fällen müssen auch zu diesen beiden Handlungsbereichen HRA-Untersuchungen durchgeführt werden, wie sie im folgenden für den Handlungsbereich C beschrieben werden. Für menschliche Handlungen im Bereich C werden die folgenden Schritte des SHARP-Verfahrens zur Bestimmung der Wahrscheinlichkeiten für einen menschlichen Fehler notwendig.

- **Screening der Handlungsbereiche**

Da nicht alle Handlungen des Personals von gleicher Bedeutung für die Sicherheit eines technischen Systems sind, müssen die relevanten Handlungen mit einem sogenannten Screening herausgefiltert werden. Um diejenigen Handlungen zu identifizieren, die zu signifikanten Beiträgen bei einem betrachteten Störfallablauf führen, werden zunächst in der ersten Phase des Screenings (qualitative judgement) diejenigen Handlungen bestimmt, die eine Beeinträchtigung der Systemverfügbarkeit bewirken können und demzufolge im Fehlerbaum zu berücksichtigen sind. In der zweiten Phase der groben quantitativen Abschätzung (quantitative course) werden diese Handlungen dann mit pessimistischen Fehlerwahrscheinlichkeiten (z.B. 0,5 oder 1) versehen und eine erste Screening-Berechnung der PSA vorgenommen. In einer anschließenden

dritten Phase findet eine Feinabschätzung (quantitative fine course) statt. Hier werden diejenigen Handlungen, die im weiteren Verlauf der HRA detaillierter betrachtet werden, identifiziert, indem ihr Beitrag für eine Systemverfügbarkeit aus der Screening-Berechnung bestimmt wird. Maße für diesen Beitrag sind dabei, ob die menschliche Handlung Teil einer minimalen Schnittmenge einer Systemverfügbarkeit ist oder ob sie in einer Importanzrechnung als bedeutsam eingestuft wird. Die Phasen des Screenings erfordern Daten über menschliche Handlungen in unterschiedlichen Auflösungsgraden, die als Grob-, Detail- und Sensitivitätsanalyse bezeichnet werden.

Durch diese ersten beiden Schritte des SHARP-Verfahrens (Definition und Screening) sind nun diejenigen menschlichen Handlungen bestimmt worden, die mit einem HRA-Verfahren untersucht und quantifiziert werden müssen. Für diese Quantifizierung stehen eine Reihe von HRA-Verfahren zur Verfügung, die im nächsten Abschnitt dargestellt werden. Da die nun folgenden Schritte des SHARP-Verfahrens eng mit dem gewählten HRA-Verfahren verknüpft sind, werden diese Schritte hier nur allgemein beschrieben.

- **Qualitative Analyse**

Zur qualitativen Analyse wird zunächst eine Aufgabenanalyse durchgeführt. Art und Detaillierungsgrad der Aufgabenanalyse ist dabei primär vom gewählten HRA-Verfahren abhängig. Der Detaillierungsgrad der Aufgabenanalyse ist aber auch vom Analysegrad bzw. vom Grad der Detaillierung des Fehlerbaumes einer PSA abhängig, da dieser bereits eine am technischen System orientierte Aufgabenanalyse darstellt.

- **Repräsentation**

Nachdem man mittels Screening relevante, d.h. für den Ausfall eines Systems bedeutende Handlungen identifiziert hat und für diese in einem weiteren Schritt eine Aufgabenanalyse durchgeführt hat, werden die Ergebnisse der Aufgabenanalyse in einem Formalismus repräsentiert, der durch das gewählte HRA-Verfahren vorgeschrieben wird, um die Fehlerwahrscheinlichkeiten zu bestimmen. Das Verfahren THERP (Technique for Human Error Rate Prediction) sieht hierfür z.B. einen HRA-Ereignisbaum (Human Error Event Tree) vor. Das Verfahren HCR (Human Cognitive Reliability Model) nimmt eine Repräsentation in einer sogenannten Zeitzuverlässigkeitskurve vor. Beide Verfahren werden im nächsten Abschnitt genauer erläutert.

- **Zusammenfassung der Einflüsse**

Gemäß des gewählten HRA-Verfahrens müssen Einflußfaktoren, welche die Fehlerwahrscheinlichkeit modifizieren, zusammengefaßt und in den Repräsentationsformalismus eingebunden werden.

- **Quantifizierung**

Gemäß des gewählten HRA-Verfahrens werden nun quantitative Aussagen in Form von Fehlerwahrscheinlichkeiten (HEP) über die untersuchte menschliche Handlung bestimmt.

- **Dokumentation**

Abschließend werden die Schritte der Vorgehensweise bei der Beurteilung zur Prüfung und Nachvollziehbarkeit dokumentiert.

2.2 Verfahren zur Bewertung der menschlichen Zuverlässigkeit

Innerhalb des SHARP-Verfahrens können unterschiedliche HRA-Verfahren genutzt werden, um eine Fehlerwahrscheinlichkeit für ein Basisereignis zu bestimmen. Diese werden im folgenden kurz beschrieben. Abschließend werden die HRA-Verfahren im Hinblick darauf diskutiert, welche Anforderungen diese an eine systematische Auswertung von Ereignissen im Hinblick auf Aspekte der menschlichen Zuverlässigkeit stellen.

2.2.1 HRA-Verfahren

In der Literatur sind eine Fülle von HRA-Verfahren dokumentiert, die zur Quantifizierung menschlicher Handlungen genutzt werden können. Zusammenfassungen finden sich u.a. in Swain (1989), Berg und Schott (1992), Reason (1990). Einen Überblick über neuere Verfahren bietet darüber hinaus Reer (1995) oder Gerdes (1993). Näheres zum Informationsbedarf verschiedener HRA-Verfahren findet sich auch in IAEA-538 (1990). Alle Verfahren benötigen zur Bewertung menschlicher Handlungen Daten. Der Begriff Daten umfaßt dabei sowohl qualitative Angaben zu Fehlerbedingungen und

Einflußfaktoren wie auch sogenannte Zuverlässigkeitskenngrößen (HEP- Human Error Probabilities) zur Quantifizierung. Da nicht alle Verfahren gleichermaßen bedeutend sind, sollen in diesem Abschnitt zur Bestimmung der Anforderung an eine Ereignis- auswertung nur fünf wesentliche HRA-Verfahren vorgestellt werden. Dies sind:

- THERP (Technique for Human Error Rate Prediction)
- ASEP (Accident Sequence Evaluation Program)
- HCR (Human Cognitive Reliability Model)
- PHRA (Probabilistic Human Reliability Analysis)
- SLIM (Success Likelihood Index Method)

Zwei Gründe sprechen für diese Auswahl: (1) Eine Untersuchung von Werner et al. (1992) zeigte, daß in den meisten PSA-Untersuchungen weltweit von der Fülle der existierenden Verfahren hauptsächlich die Verfahren THERP (mit ASEP), HCR, PHRA und SLIM verwendet worden sind. (2) Diese Auswahl stellt einen repräsentativen Querschnitt darüber dar, welche Quellen für Daten über die menschliche Zuverlässigkeit typischerweise in HRA-Verfahren genutzt werden. Generell gibt es vier Quellen, auf denen die Daten in HRA-Verfahren basieren können: Expertenschätzungen, Simulatorstudien, Experimente sowie Betriebserfahrung. Im SLIM-Verfahren basieren die Daten zur menschlichen Zuverlässigkeit auf Expertenschätzungen, im HCR-Verfahren und im PHRA-Verfahren auf Simulatorstudien sowie im THERP-Verfahren (mit ASEP) nach Aussage von Swain (1992) hauptsächlich auf Betriebserfahrung und Experimenten.

- **THERP - Technique for Human Error Rate Prediction**

THERP (Technique for Human Error Rate Prediction) ist die am weitesten verbreitete Methode zur Beurteilung von Personalhandlungen (Swain & Guttmann, 1983). Das Verfahren wird hier etwas genauer dargestellt, da im Kapitel 5 ein Vergleich der Angaben dieses Verfahrens mit den Angaben zur menschlichen Zuverlässigkeit durchgeführt wird, die aus der Betriebserfahrung gewonnen worden sind.

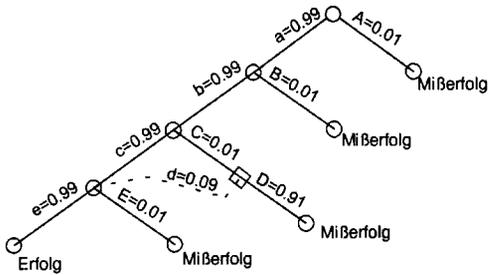
Der Mensch wird in diesem Verfahren als Systemkomponente betrachtet und ähnlich den technischen Komponenten behandelt. Um der, gegenüber technischen Komponenten, größeren Variabilität des menschlichen Verhaltens Rechnung zu tragen, ist für

die Beurteilung der menschlichen Zuverlässigkeit eine detaillierte Aufgabenanalyse erforderlich. Sie gliedert sich in die folgenden Schritte:

1. Ermittlung der Systemfunktionen, bei denen Personalhandlungen erforderlich sind.
2. Aufgabenanalyse zu den menschlichen Handlungen, welche die Systemfunktionen beeinträchtigen können.
3. Schätzung der Wahrscheinlichkeiten für menschliches Fehlverhalten bei diesen Handlungen.
4. Identifizierung von Schwachstellen und Ableitung von Empfehlungen für Verbesserungen, um in einer Neubewertung die Fehlerwahrscheinlichkeiten zu reduzieren.

Innerhalb von THERP stellt der sogenannte HRA-Aktionsbaum das Verfahren dar, um Wahrscheinlichkeiten abzuschätzen. Reichart (1992) bezeichnet diesen auch als Probability Tree Diagram (PTD). Bild 13 zeigt einen HRA-Aktionsbaum nach Swain und Guttman (1983). Der HRA-Aktionsbaum stellt eine Zusammenfassung der notwendigen Teilaufgaben des Personals dar, welche durch eine Aufgabenanalyse bestimmt worden sind. Um für die Teilaufgaben Fehlerwahrscheinlichkeiten (im Bild mit Großbuchstaben gekennzeichnet) und Erfolgswahrscheinlichkeiten (im Bild mit Kleinbuchstaben gekennzeichnet) angeben zu können, müssen neben der Art der Tätigkeit (z.B. 'Erkennen einer Meldung' oder 'Schalten einer Pumpe') die wesentlichen Einflußfaktoren (PSF) auf diese Handlungen bekannt sein. Um diese zu bestimmen, wird unter Berücksichtigung der bereits in Kapitel 1 dargestellten Einflußfaktoren (Tabelle 5) eine Ortsbesichtigung vorgenommen, bei welcher die für die Teilaufgaben relevanten PSF untersucht werden.

Für die darauffolgende Bestimmung der Fehlerwahrscheinlichkeiten einer Teilhandlung wird in THERP ein umfangreiches Tabellenwerk zur Verfügung gestellt. Das Tabellenwerk ist in Anhang 5 dargestellt. Nach festgelegten Vorschriften wird innerhalb des Tabellenwerkes nach Einträgen gesucht, die der zu bewertenden Teilhandlung entsprechen (vgl. Anhang 5). Dieser Wert wird dann zur Bestimmung der Wahrscheinlichkeit für einen menschlichen Fehler in den HRA-Aktionsbaum übernommen. In einigen Fällen muß die Beeinflussung einer Teilaufgabe durch PSF auch durch Korrekturfaktoren auf die Fehlerwahrscheinlichkeiten berechnet werden (z.B. im Streßmodell).



$$P_{\text{Gesamt-MIßERFOLG}} = A + (a \cdot B) + (a \cdot b \cdot C \cdot D) + (a \cdot b \cdot C \cdot d \cdot E) + (a \cdot b \cdot c \cdot E)$$

Handlungen

- A/a: Wartenoperateur unterläßt die Beauftragung der folgenden Aufgaben
- B/b: Schichtpersonal unterläßt die Kontrolle des Schalters MU-13
- C/c: Schichtpersonal unterläßt die Kontrolle bzw. Öffnen der DH-Ventile
- D/d: Fehlerkorrektur durch den Schichtleiter
- E/e: Schichtpersonal unterläßt den Verschuß der DH-Räume

HEP-Wahrscheinlichkeiten aus Tabellen

- A=0.01 (0.005-0.05)
- B=0.01 (0.005-0.05)
- C=0.01 (0.005-0.05)
- D=0.09 (0.009-0.9)
- E=0.01 (0.005-0.05)

Bild 13 Aktionsbaum und Fehlerwahrscheinlichkeiten (nach Swain & Guttman, 1983).

Abschließend wird der HRA-Aktionsbaum systematisch nach der Möglichkeit sogenannter Recovery-Faktoren und Abhängigkeiten zwischen Teilaufgaben untersucht (im Bild der Knoten D). Recovery-Faktoren sind Möglichkeiten, einen gemachten Fehler zu beheben (z.B. die Möglichkeit, daß der Schichtleiter einen Fehler eines Operators entdeckt und korrigiert). Abhängigkeiten von Teilaufgaben bestehen, wenn der Erfolg bzw. Mißerfolg einer zuvor durchgeführten Teilaufgabe einen direkten Einfluß auf die folgende Teilaufgabe hat (z.B. besteht vollständige Abhängigkeit zwischen Operateur und Schichtleiter, wenn beide gemeinsam mit der Lösung eines Problems beschäftigt sind). Die Abhängigkeiten werden in einer 5-stufigen Skala von unabhängig bis vollständig abhängig eingestuft und über Korrekturformeln mit den Fehlerwahrscheinlichkeiten verrechnet. Für die Durchführung des Verfahrens THERP werden Informationen über die folgenden Bereiche benötigt:

- Detaillierte Beschreibung der Aufgabe
- Parameter der Mensch-Maschine-Schnittstelle (z.B. Displays, Bedienelemente)
- Beschreibung der Einflußfaktoren: Streß, Arbeitsplatzgestaltung, ergonomische Gestaltung der Arbeitsmittel, Erfordernis schriftlicher oder mündlicher Prozeduren, Ausstattung und Erfahrung des Personals, organisatorische Faktoren (z.B. Management und Verwaltung)
- Die zur Verfügung stehende Zeit zur Diagnose

- Faktoren zur erfolgreichen Aufgabenbewältigung (einschließlich Recovery-Faktoren)
- Abhängigkeit der verschiedenen Aufgaben

Das Verfahren THERP wurde und wird in vielen PSA-Studien verwendet. Da das Verfahren sowohl für PSA-Studien in Deutschland als auch in den USA intensiv genutzt wurde, sind auch seine Vor- und Nachteile bereits an vielen Stellen diskutiert worden (Swain, 1989; Reichart, 1985; Reer & Mertens, 1993; Hollnagel, 1992; DRS-B, 1990; Fujita, 1992). Obwohl das THERP-Verfahren eine detaillierte Aufgabenanalyse und Bewertung vornimmt, gehört zu den Hauptkritikpunkten an dem Verfahren, daß es mangelnde Realitätsnähe besitzt. Der Grund für diese Kritik liegt im methodischen Vorgehen des Verfahrens und in den der Bewertung zugrundeliegenden Daten über die menschliche Zuverlässigkeit.

Bezüglich des methodischen Vorgehens besteht insbesondere das Problem, daß zur Definition der Aufgabenteile und Aufgabenzerlegung nicht genügend Hilfen geboten werden. Teilaufgaben können selbst wiederum Teilaufgaben enthalten, so daß das Problem der "Explosion des HRA-Aktionsbaumes" besteht (vgl. Reer & Mertens, 1993, p5). Ferner muß der menschliche Fehler in den HRA-Aktionsbäumen wie der Ausfall einer technischen Komponente modelliert werden, was aus psychologischer Sicht eine unzureichende Vereinfachung der menschlichen Variabilität und Komplexität darstellt (vgl. Heslinga & Arnold, 1993). Diese Vereinfachung zeigt sich unter anderem auch darin, daß nur Abhängigkeiten zwischen zwei aufeinanderfolgenden Teilaufgaben modelliert werden können (vgl. Berg & Schott, 1992).

Bezüglich der Quantifizierung stellt sich der Vorteil des Verfahrens, eine detaillierte Untersuchung der Aufgabe durchzuführen, als Nachteil heraus: Das in THERP zur Verfügung stehende Datenmaterial deckt nicht den Informationsbedarf, der tatsächlich bei einer HRA-Untersuchung gefordert ist. Teilweise entspricht das Datenmaterial, welches in THERP bereitgestellt wird, nicht der Realität der Situation, die in einer HRA-Untersuchung bewertet werden muß, so daß Interpretationsspielräume zu Unsicherheiten in der Bewertung führen. Auch stammen die Daten zum Teil aus unterschiedlichen technischen Bereichen, so daß sie nicht direkt auf das zu bewertende technische System angewendet werden können, oder sie basieren auf Expertenschätzungen. Diese Unsicherheiten können derzeit nur durch hohe Unsicherheitsfaktoren ausgeglichen werden (vgl. Reer & Mertens, 1993; DRS-B, 1990; Berg & Schott, 1992; Reichart, 1992). Ein typisches Beispiel dieser Unzulänglichkeit der Daten ist die Zeit-

abhängigkeit der Fehlerwahrscheinlichkeit einer menschlichen Handlung. Zeitabhängigkeit wird in THERP als direkter Parameter nur im sogenannten Diagnosemodell berücksichtigt. In allen anderen Fällen wird Zeitabhängigkeit nur durch Anpassung des Streßniveaus modelliert (Reichart, 1992; Hollnagel, 1992). THERP nimmt weiterhin eine logarithmische Normalverteilung menschlicher Fehler an. Die Gültigkeit dieser Annahme, die von Swain und Guttman (1983) aufgrund von Plausibilitätsüberlegungen gemacht wurde, konnte bisher aber noch nicht bestätigt werden (vgl. auch Reer, 1988).

- **ASEP - Accident Sequence Evaluation Program**

Die Methode ASEP (Accident Sequence Evaluation Programme) ist eine verkürzte und leicht modifizierte Version von THERP (Swain, 1987). Sie kann sehr viel schneller als THERP durchgeführt werden, ist aber konservativer (pessimistischer). Die Methode dient zur groben Abschätzung der Fehlerwahrscheinlichkeiten von Personalhandlungen. Das Verfahren unterteilt sich in die folgenden Schritte:

1. Screening: Grobe Aufgabenanalyse und Bewertung der Tätigkeiten vor Eintritt einer Störung. In der Aufgabenanalyse wird u.a. danach unterschieden, ob eine Tätigkeit vor Ort bzw. in der Warte durchzuführen ist und ob schriftliche Hilfsmittel zur Verfügung stehen.
2. Nominal-Analyse: Bestimmung der zur Verfügung stehenden Zeit und Bewertung der Fehlerwahrscheinlichkeit nach einem Zeit-Zuverlässigkeitsmodell für Tätigkeiten nach Störfalleintritt. Das Zeit-Zuverlässigkeitsmodell setzt dabei die für die Bewältigung der Tätigkeit zur Verfügung stehende Zeit in eine direkte Beziehung mit einer Fehlerwahrscheinlichkeit.
3. Abhängigkeits-Analyse: Bestimmung der Abhängigkeiten zwischen verschiedenen Aufgabenteilen ähnlich wie im THERP-Verfahren.
4. Recovery-Analyse: Bestimmung der möglichen Maßnahmen zur Fehlerkorrektur ähnlich wie im THERP-Verfahren.

ASEP benötigt dazu die folgenden Informationen über die Aufgaben, die vor und nach einem Störfall erforderlich sind:

Für Handlungen vor Störfalleintritt (Handlungsbereich A und B):

- Grobe Aufgabenbeschreibung orientiert an der Information über das technische System
- Beschreibung der Art des zu bewertenden Fehlers
- Schriftliche Prozeduren
- Mögliche Recovery-Faktoren
- Abhängigkeit der einzelnen Aufgaben

Für Aufgaben nach Störfalleintritt (Handlungsbereich C):

- Die Zeit, die verfügbar ist, um eine korrekte Diagnose zu erstellen und die Handlungen durchzuführen, die nötig sind, die Anlage in einen sicheren Zustand zu überführen (T_m)
- Die Zeit, die notwendig ist, die Handlungen korrekt auszuführen (T_a)
- Das Zeitfenster für die Aufgabe ($T_d = T_m - T_a$)

ASEP entschärft das Problem des THERP-Verfahrens, eine detaillierte Aufgabenanalyse durchführen zu müssen und Daten von hinreichend genauer Qualität zur Verfügung stellen zu müssen. ASEP kann aus diesem Grunde sehr viel schneller durchgeführt werden als THERP. Allerdings geht dieser Vorteil zu Lasten der Genauigkeit der Aussage. ASEP liefert sehr pessimistische Angaben über die Zuverlässigkeit menschlicher Handlungen und bietet sich demzufolge primär als Screening-Verfahren an, welches vor dem THERP-Verfahren eingesetzt werden kann, um die Anzahl der mit THERP zu bewertenden Handlungen weiter zu reduzieren. Dies wird auch von Swain (1989) selbst vorgeschlagen.

- **HCR - Human Cognitive Reliability Model**

Die experimentelle Fehlerforschung konnte zeigen, daß Fehlerraten mit der zur Verfügung stehenden Zeit und der Erfahrung der Person variieren (vgl. Wickens, 1984). Die Fehlerrate sinkt mit der zur Verfügung stehenden Zeit und auch mit der Anzahl der Übungsdurchgänge einer Person für eine bestimmte Aufgabe. Dieser Zusammenhang ist in der psychologischen Literatur auch als 'Fitts Law' bekannt (Fitts, 1954). Aufgrund der gegenläufigen Wirkungen dieser Größen (Fehlerrate gegenüber zur Verfügung stehender Zeit bzw. Übungsdurchgängen) wird dieser Zusammenhang auch als

Speed-Accuracy Trade-Off bezeichnet. Dieser Zusammenhang wurde von Hannaman und Spurgin (1984a) im Human Cognitive Reliability Model (HCR) aufgegriffen.

Das HCR-Modell stellt eine Methode dar, Wahrscheinlichkeiten für menschliche Fehler nach Störfalleintritt zu bestimmen, indem das zur Verfügung stehende Zeitfenster betrachtet wird. In einer Zeit-Zuverlässigkeitskurve wird dazu die Wahrscheinlichkeit für eine Fehlhandlung als Funktion einer "normierten Zeit" angesehen. Die "normierte Zeit" stellt dabei das Verhältnis zwischen der insgesamt zur Verfügung stehenden Zeit und der erforderlichen Zeit dar, um die Störung zu bewältigen. Die Wahrscheinlichkeiten für einen Fehler bei einer gegebenen normierten Zeit wurden aus Simulatorversuchen mit Betriebspersonal ermittelt. Die ermittelten Wahrscheinlichkeiten können ferner über die Angabe von Übungsniveaus und PSF modifiziert werden, indem die Zeit, die zur Aufgabenbewältigung benötigt wird, künstlich gestreckt wird, wenn die Erfahrung des Personals schlecht, der Streßlevel hoch oder die ergonomische Qualität der Mensch-Maschine-Schnittstelle bzw. der Prozeduren unzureichend ist.

Ferner werden unterschiedliche Kurven für die drei Übungsniveaus fertigkeitbasiert, regelbasiert und wissensbasiert angegeben (vgl. das Fehlermodell von Rasmussen zur Definition und Diskussion der Übungsniveaus in Kapitel 1). Über die Angabe von Übungsniveaus können mit dem HCR-Modell kognitive Aufgaben beurteilt werden, indem Verhalten auf der fertigkeitbasierten Ebene mit einer vergleichsweise niedrigen Fehlerrate, Verhalten auf der regelbasierten Ebene mit einer mittleren Fehlerrate und Verhalten auf der wissensbasierten Ebene mit einer hohen Fehlerrate versehen wird.

Das Verfahren erfordert dementsprechend Informationen über die folgenden Teilbereiche, damit HEPs bestimmt werden können:

- Die zur Verfügung stehende Zeit und die Zeit, die das Personal benötigt, eine Aufgabe zu bewältigen.
- Die kognitive Beanspruchung des Personals aufgeteilt in fertigkeitbasiert, regelbasiert und wissensbasiert.
- Die Erfahrung des Personals, der Streßlevel und die ergonomische Qualität der Mensch-Maschine-Schnittstelle bzw. der Prozeduren.

Hauptkritikpunkt an dem Verfahren ist sicherlich, daß die Abhängigkeiten der Fehlerwahrscheinlichkeiten von verfügbarer und benötigter Zeit unzureichend abgebildet

werden (Reer & Mertens, 1993). Durch die normierte Zeit werden nur Verhältnisse zwischen der zur Verfügung stehenden Zeit und der benötigten Zeit wiedergegeben. Die absolute Höhe der Zeitreserve (z.B. Stunden, Minuten oder Sekunden) wird nicht berücksichtigt. Die Fehlerwahrscheinlichkeit für eine Aufgabe, die 1 Sekunde dauert und bei der 2 Sekunden zur Verfügung stehen, ist also laut HCR identisch mit der Fehlerwahrscheinlichkeit einer Aufgabe, die 100 Minuten dauert und bei der 200 Minuten zur Verfügung stehen. Unsicherheitsbänder, welche die absolute Zeitreserve berücksichtigen, werden zu den Verteilungen nicht angegeben. Verstärkt wird dieser Kritikpunkt dadurch, daß auch die verschiedenen Verteilungen für fertigkeitsbasiertes, regelbasiertes und wissensbasiertes Verhalten auf der Basis einer normierten Zeit durchgeführt werden (vgl. Fujita, 1992).

Daß zusätzlich die Annahme, kognitive Prozesse des Menschen bei der Störfallbeherrschung über die Einteilung in fertigkeitsbasiertes, regelbasiertes und wissensbasiertes Verhalten einzuteilen, problematisch ist, wurde bereits bei der Diskussion des Modells von Rasmussen in Kapitel 1 deutlich. Der in Kapitel 1 beschriebene Mechanismus der Aufmerksamkeitszuwendung impliziert, daß sich der Prozeß der Aufgabenbewältigung nicht nur auf einer Verhaltensebene abspielt und daß die Ebenen eher als ein Kontinuum zu sehen sind.

Ein dritter wesentlicher Schwachpunkt des Verfahrens ist die unzureichend grobe Modellierung der Situation über lediglich drei verschiedene PSFs mit maximal fünf verschiedenen Ausprägungen (Swain, 1989, p7-7). Die zugrundeliegende Situation wird damit nicht angemessen berücksichtigt, bedenkt man z.B., wie komplex Handlungsabläufe über eine Stunde hinweg sein können (siehe Fujita, 1992).

Trotz der gravierenden Schwachpunkte des HCR-Verfahrens wird das Verfahren oft für die Bewertung komplexer Situationen angewendet, da die Methode den deutlichen Vorteil hat, mit der Angabe weniger Parameter schnell zu Fehlerwahrscheinlichkeiten zu kommen und kognitive Fehler (z.B. in Diagnosesituationen) berücksichtigen zu können.

- **PHRA - Probabilistic Human Reliability Analysis**

Aufgrund der Vorteile des HCR-Verfahrens wurde es von EDF (Electricite de France, dem französischen Elektrizitätshersteller) intensiv weiterentwickelt. Ziel der Weiterentwicklung des HCR-Verfahrens durch EDF war es, die Hauptkritikpunkte am HCR-

Verfahren, die Unangemessenheit für spezifische Situationen und das Problem der normierten Zeit, zu beseitigen (vgl. auch Worledge et al., 1988). Das von EDF entwickelte Verfahren wird im folgenden als PHRA-Verfahren (Probabilistic Human Reliability Assessment) bezeichnet (siehe Mosneron-Dupin et al., 1990). Das PHRA-Verfahren wurde in Frankreich zur Bewertung menschlicher Handlungen in der EPS 900 Studie und der darauf aufbauenden EPS 1300 Studie entwickelt. Es wird z.B. von Wurst (1993) oder Reer (1995) im Überblick dargestellt.

In dem Verfahren wird zwischen Normalbetrieb und Betrieb nach einer Störung unterschieden. Für den Normalbetrieb werden vier Situationsklassen unterschieden: Alar-me, Prüfungen, administrative Kontrollen und periodische Prüfungen. Für diese Klassen werden mit einfachen Bewertungsvorschriften Fehlerwahrscheinlichkeiten berechnet. Zur Bewertung der Zuverlässigkeit menschlicher Handlungen nach Eintritt einer Störung wurden 200 Simulatorexperimente durchgeführt. Aus den Experimenten wurden verschiedene Zeit-Zuverlässigkeitskurven für unterschiedlich komplexe Störungen ermittelt. Bei der Bewertung werden Fehlerwahrscheinlichkeiten aus den Zeit-Zuverlässigkeitskurven bestimmt. Es wird jedoch keine normierte Zeit zur Beurteilung genutzt und die Modifikation der zu beurteilenden Situation geschieht nicht anhand der Verhaltensebenen von Rasmussen, sondern anhand von bestimmten Situationstypen, die im Experiment vorgegeben waren. Bild 14 nach Mosneron-Dupin (1994) zeigt die Ergebnisse der Experimente.

Im Bild stellen P1 und P1' Kurvenverläufe für einfache Diagnoseaufgaben typischer Störungen, P3 schwere Diagnoseaufgaben mit sich widersprechenden Informationen sowie P2 eine Mischform beider Bedingungen dar.

Entsprechend der Ähnlichkeit zum HCR-Verfahren benötigt das PHRA-Verfahren die folgenden Informationen:

- Die Zeit zur Diagnose (ist gleich der zur Verfügung stehenden Zeit abzüglich der Zeit, die das Personal benötigt, die Störung zu bewältigen)
- Beschreibung der Komplexität der Situation, um die entsprechende Kurve aus dem Zeit-Zuverlässigkeitsmodell identifizieren zu können.

Ein häufig genannter Kritikpunkt am PHRA-Verfahren ist, daß die zugrundeliegenden Daten zu den Experimenten und damit die Methode der Datengewinnung für die quantitativen Vorhersagen nicht allgemein zugänglich sind. Ferner ist eine Anwendung

der Daten auf andere Situationen als diejenigen, die den Kurvenverläufen zugrunde liegen, schwierig und muß durch subjektive Einschätzungen beurteilt werden. Unbekannt ist derzeit auch, ob diese Diagnosekurven auch auf die deutschen Verhältnisse übertragbar sind.

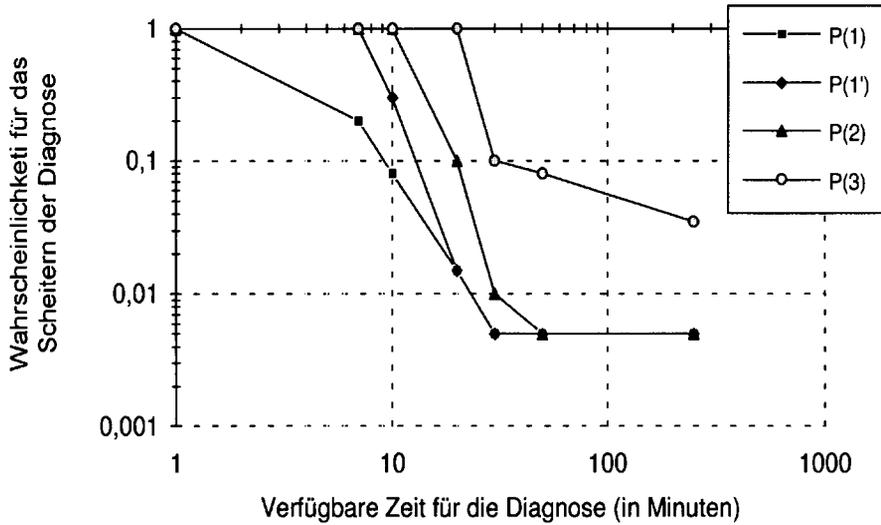


Bild 14 Zeit-Zuverlässigkeitskurven aus den Simulatorexperimenten von EDF.

- **SLIM - Success Likelihood Index Method**

Das SLIM-Verfahren (Success Likelihood Index Method) ermittelt Fehlerwahrscheinlichkeiten auf der Basis von Expertenschätzungen (Edwards et al., 1977). Die Experten müssen in diesem Verfahren die Zuverlässigkeit menschlicher Handlungen auf der Grundlage einer Anzahl von Einflußgrößen (PSF - Performance Shaping Factors) einschätzen. Durch die Expertenschätzung versucht SLIM das Problem zu umgehen, daß Daten über menschliches Fehlverhalten oft fehlen oder nicht hinreichend auf die zu bewertende Situation passen. Andererseits resultieren hier Ungenauigkeiten in den Daten durch den Schätzprozeß, die im erheblichen Maße von den Experten abhängen, die diese Schätzungen durchführen.

Im SLIM-Verfahren wird eine Handlungskomplex zunächst in einzelne Aufgaben zerlegt. Danach werden PSFs, die den Erfolg der Aufgaben beeinflussen können, durch Experten nach ihrer Wichtigkeit für den Handlungskomplex eingestuft. Dabei wird zwischen Einflüssen des Trainings, der Prozeduren, der Rückmeldung, der Risikowahr-

nehmung und des Zeitdrucks unterschieden. Aus den Expertenschätzungen wird dann ein Index (SLI- Success Likelihood Index) bestimmt. Der SLI stellt eine Rangfolge der einzelnen Aufgabe im Hinblick auf die Zuverlässigkeit des Menschen dar. Um diese Rangfolge in einen Wahrscheinlichkeitswert für einen menschlichen Fehler zu überführen, wird der SLI der einzelnen Aufgaben über zwei sogenannte Ankeraufgaben, für die sowohl Expertenschätzungen vorliegen als auch HEP-Werte bekannt sind, kalibriert. Zur Kalibrierung wird ein psychologisches Skalierungsverfahren aufbauend auf dem 'Law of Comparative Judgement' nach Thurstone (1927) verwendet. Embrey et al. (1984) haben das Verfahren unter dem Namen SLIM-MAUD (MAUD für Multi Attribute Utility Decomposition) verfeinert, um die Ungenauigkeiten in den Schätzungen der Experten zu verringern.

Folgende Informationen werden für SLIM benötigt, um aus Expertenschätzungen Wahrscheinlichkeitswerte zu bestimmen:

- Eine detaillierte Beschreibung des Falles, dessen Fehlerwahrscheinlichkeit abgeschätzt werden soll.
- Eine Beschreibung der PSFs und der Wechselwirkung verschiedener PSFs.
- Einstufung der Wichtigkeit dieser PSFs in Bezug auf die Aufgaben des Operateurs.
- Mindestens zwei Ankeraufgaben, die zur Bestimmung der Kalibrierungswerte für die übrigen Aufgaben herangezogen werden können. Die Ankeraufgaben müssen einander ähnlich sein.

Der Hauptkritikpunkt am SLIM-Verfahren ist die Methode der Datengewinnung, der Expertenschätzung. Expertenschätzverfahren stellen zwar die einfachste Möglichkeit zur Bestimmung von Wahrscheinlichkeiten dar; sie sind aber immer mit zusätzlichen Unsicherheiten in den Daten behaftet, da Expertenschätzungen immer subjektiv sind. Die Unsicherheiten werden dadurch verstärkt, daß die Qualifikation der Experten, welche die Schätzung durchzuführen haben, nicht spezifiziert wird (Swain, 1989; Reichart, 1985). Ein weiterer Unsicherheitsfaktor ist die geringe Anzahl der PSFs, die es den Experten erschwert, ein genaues Bild über die Einflußfaktoren auf die zu bewertende Situation zu gewinnen (vgl. Swain, 1989). Entsprechend ist nur mit wenig konsistenten Ergebnissen zu rechnen (vgl. Berg & Schott, 1992). Dies belegen auch Untersuchungen von Comer et al. (1984). Sie haben verschiedene Schätzverfahren, darunter die direkte numerische Schätzung (DNE - Direct Numerical Estimation) und den Paarvergleich (PC - Paired Comparison), auf ihre Anwendbarkeit zur Bestimmung von Wahr-

scheinlichkeiten untersucht. Insgesamt gesehen wird dort festgestellt, daß Experten-schätzverfahren zwar in sich konsistente Ergebnisse liefern, aber von der Genauigkeit der abgeleiteten HEP-Angaben her eine unbefriedigende Lösung darstellen. Ein weiterer Kritikpunkt, den auch die Untersuchungen von Comer belegen, ist die Kalibrierung der Schätzwerte mit sogenannten Ankeraufgaben. SLIM schreibt z.B. nur zwei Ankeraufgaben vor, so daß die HEP-Werte stark von den zugrundegelegten Ankeraufgaben abhängen und keine Unsicherheiten in der Kalibrierung bestimmt werden können. Weiterhin sind die theoretischen Grundlagen der Skalierung über Ankeraufgaben fragwürdig (Swain, 1989; Bubb, 1992) und es werden weder Hilfen für die Ermittlung der Fehlerwahrscheinlichkeiten der Ankeraufgaben noch Hilfen für die Bestimmung der Ähnlichkeit der beiden Ankeraufgaben angegeben (vgl. Swain, 1989).

2.2.2 Diskussion der HRA-Verfahren

Der vorhergehende Abschnitt zeigte, welche spezifischen Informationen verschiedene HRA-Verfahren benötigen bzw. welche Parameter die unterschiedlichen HRA-Verfahren nutzen, um HEP-Werte zu bestimmen. Diese müssen durch ein Verfahren zur Analyse von Ereignissen bereitgestellt werden, falls für die PSA sinnvolle Informationen aus der Betriebserfahrung gewonnen werden sollen.

Um darüber hinaus herauszuarbeiten, welcher Erkenntnisgewinn aus der Sicht der HRA-Verfahren von einer Auswertung der Betriebserfahrung erwartet wird, sollen nun verfahrensübergreifende Aspekte der Verfahren zur Beurteilung menschlicher Zuverlässigkeit in einer PSA betrachtet werden. Hierzu werden die HRA-Verfahren bezogen auf verschiedene Klassifikationsmöglichkeiten diskutiert. Insgesamt gesehen gibt es die folgenden Möglichkeiten, HRA-Verfahren zu klassifizieren:

1. Hinsichtlich der Detaillierungstiefe in holistische und dekompositionelle Verfahren
2. Hinsichtlich des generellen Vorgehens anhand der Schlüsselparameter zur Bewertung in Fehler-bezogene, PSF-bezogene, Zeit-bezogene Verfahren
3. Hinsichtlich der Datenqualität

- **Detaillierungstiefe**

HRA-Verfahren können hinsichtlich des Detaillierungsgrades ihrer quantitativen Bewertung in dekompositionelle und holistische Verfahren unterschieden werden (vgl. Hes-

linga & Arnold, 1993; Gerdes, 1993; Zimolong, 1992). Dekompositionelle Verfahren nehmen eine quantitative Bewertung der Zuverlässigkeit menschlicher Handlungen durch Aufschlüsseln einer Situation in Teilsituationen bis zu einem bestimmten Auflösungsgrad vor. Sie bewerten die Teilsituationen und schließen daraus auf die Zuverlässigkeit der Gesamtsituation. Ein typisches dekompositionelles Verfahren ist das THERP-Verfahren. Holistische Verfahren nehmen eine quantitative Bewertung einer Situation in ihrer Gesamtheit vor, ohne die Gesamtsituation aufzuschlüsseln. Ein typisches Verfahren ist das HCR-Verfahren.

Zu den holistischen Verfahren ist insbesondere von der methodischen Seite her anzumerken, daß sie nur ein grobes Abbild der Realität in der Anlage geben, wenn keine Aufgabenanalyse durchgeführt wird (Fujita, 1992), denn ein befriedigendes Abbild der Realität in der Anlage (die sogenannte face validity) ist nur durch eine detaillierte Aufgabenanalyse möglich (Swain, 1989). Diese Kritik gilt insbesondere für die Verfahren, die ihre Bewertung auf Zeit-Zuverlässigkeitskurven stützen. Im wesentlichen gehen dort nur die Zeiten in die Bewertung ein, die dem Personal zur Verfügung stehen. Andere Aspekte (z.B. Komplexität der Situation, Anzahl der durchzuführenden Arbeiten) werden nicht berücksichtigt.

Den dekompositionellen Verfahren wird aus psychologischer Sicht vorgeworfen, für eine Quantifizierung menschlicher Fehler unbefriedigend zu sein, da sie einen menschlichen Fehler über einen HRA-Aktionsbaum modellieren und damit wie einen Komponentenausfall behandeln, was eine vereinfachte Annahme über die Komplexität einer menschlichen Handlung darstellt (vgl. Heslinga & Arnold, 1993).

Hinsichtlich der Erfassung menschlicher Fehler aus der Betriebserfahrung kann hieraus gefolgert werden, daß ein Verfahren zur Erfassung menschlicher Fehler aus Ereignissen sowohl detaillierte Information für dekompositionelle Verfahren liefern muß als auch allgemeine Information für holistische Verfahren.

- **Generelles Vorgehen**

Die Einteilung anhand der Schlüsselparameter klassifiziert die HRA-Verfahren nach ihrer prinzipiellen Vorgehensweise in der Bewertung. Sie können in Fehler-bezogene Verfahren (THERP und ASEP), Zeit-bezogene Verfahren (HCR und PHRA) und PSF-bezogene Verfahren (SLIM) eingeteilt werden (vgl. Reer, 1995).

Fehler-bezogene und Zeit-bezogene Verfahren orientieren sich an Vorgaben vom System. Diese Vorgaben müssen bei einer Erfassung menschlicher Fehler aus der Betriebserfahrung berücksichtigt werden. Dabei sind insbesondere die den Verfahren zugrundeliegenden Verteilungsannahmen (logarithmische Normalverteilung und logarithmisch-lineare Zeitzuverlässigkeitskurve) zu untersuchen. Bezüglich der PSF-bezogenen Verfahren, die derzeit in verschiedene Richtungen weiterentwickelt werden (z.B. HEART von Williams, 1986 oder INTENT von Gertman et al., 1992) ist prinzipiell anzumerken, daß die Menge und die Strukturierung von PSF keinesfalls methodisch festgelegt und stark abhängig vom Experten ist, der die Situation zu beurteilen hat (vgl. Embrey et al., 1984). Dieses Vorgehen ist demzufolge solange unzureichend, bis eine Methode zur Strukturierung von PSF gefunden wird. Zusätzlich ist derzeit weder die Größe der Wirkung einzelner PSF bekannt, noch können Aussagen über Wechselwirkungen verschiedener PSF gegeben werden (vgl. Hollnagel, 1992), so daß die HEP-Werte, die in diesen Verfahren durch Expertenschätzungen generiert werden, nicht überprüfbar sind.

Bezüglich dieses Kritikpunktes ist sicherlich eine Stärke in einer systematischen Auswertung von Betriebserfahrung zu sehen. Wenn die Identifikation von PSF durch ein methodisches Vorgehen festgelegt wird, ist die Betriebserfahrung in der Lage, sowohl realitätsnahe PSF als auch Zusammenhänge verschiedener PSF sowie die Größe dieses Zusammenhangs zu bestimmen.

- **Datenniveau**

Bei der Beurteilung der verschiedenen Methoden muß weiterhin die Qualität der Daten berücksichtigt werden, welche diese Methoden zur Quantifizierung nutzen. Es existieren die folgenden unterschiedlichen Möglichkeiten: Expertenschätzverfahren, Experimente, Simulatorstudien oder eine empirische Erfassung von Daten aus der Betriebserfahrung. Expertenschätzverfahren stellen die einfachste Möglichkeit zur Gewinnung von Daten über die menschliche Zuverlässigkeit dar. Bei den Simulatorstudien werden vorher festzulegende betriebliche Abläufe und Störungen innerhalb eines Simulators durchgeführt und das Verhalten der Operateure bei der Beherrschung der Störung qualitativ oder quantitativ analysiert und ausgewertet. Experimente liefern im Labor gewonnene Daten mit standardisierten und definierten Randbedingungen. In der Betriebserfahrung liegt schließlich realitätsnahes Datenmaterial in Form von Ereignissen vor. Die Vor- und Nachteile der verschiedenen Datenquellen können anhand des Da-

tenniveaus der Daten diskutiert werden. Allgemein wird zwischen Absolut-, Relativ- und Ordinal-Skalen-Niveau unterschieden (siehe auch Bubb, 1992):

Verfahren mit **Absolut-Skalen-Niveau** sind in der Lage, echte HEP-Werte in den Grenzen von 0 bis 1 zu liefern. Verfahren mit Relativ-Skalen sind nur in der Lage, Aussagen über den Abstand zu treffen ("Wenn $HEP_1=0.1$ und $HEP_2=0.2$, dann ist Ereignis 1 doppelt so wahrscheinlich wie Ereignis 2"). Verfahren mit Ordinal-Skalen können nur Rangfolgen aufstellen, wie z.B. Ereignis 1 ist wahrscheinlicher als Ereignis 2. Jedes HRA-Verfahren muß Daten auf Absolut-Skalen-Niveau liefern, um in einer PSA eingesetzt werden zu können. Bei genauerer Betrachtung der verschiedenen Verfahren stellt sich jedoch heraus, daß dies in den seltensten Fällen von den Verfahren erfüllt wird.

Experimente und Simulatorstudien stellen die einzige Möglichkeit dar, Daten auf **Relativ-Skalen-Niveau** und damit zumindest einen statistischen Schätzwert für Daten auf Absolut-Skalen-Niveau zu liefern. Hier besteht aber insbesondere das Problem der Übertragbarkeit der gewonnenen Wahrscheinlichkeiten auf die zu beurteilende Situation. Da das THERP-Verfahren nach Swain (1992) zumindest teilweise auf experimentellen Daten basiert, stellt es zu einem (wenn auch unbekanntem) Teil ein Verfahren auf Absolut-Skalen-Niveau dar. Auch das PHRA-Verfahren ist dieser Kategorie zuzuordnen, da es auf Simulatorstudien basiert.

Verfahren mit Expertenschätzungen machen typischerweise Angaben auf **Ordinal-Skalen-Niveau**. Diese Verfahren nutzen Skalierungsverfahren, um das Datenniveau zu "heben" (vgl. Fischer, 1974). Dabei müssen jedoch sowohl der mathematische Ansatz des Skalierungsverfahrens als auch seine zugrundeliegenden Voraussetzungen plausibel und prüfbar sein. Ein typisches Beispiel ist das SLIM-Verfahren, welches aus Daten auf Ordinal-Skalen-Niveau Schätzungen auf Absolut-Skalen-Niveau generiert, indem das Absolut-Skalen-Niveau der Ankeraufgaben zur Kalibrierung der ordinal-skalierten Expertenschätzungen für die einzelnen Aufgaben verwendet wird.

Da jedes HRA-Verfahren, unabhängig davon, ob es holistisch oder dekompositionell ist bzw. ob es orientiert an PSF oder an Fehlertypen ist, Daten zur Bestimmung der Wahrscheinlichkeit eines menschlichen Fehlers benötigt, sind die zugrundeliegenden Daten besonderer Kritik ausgesetzt. Diese Kritik ist um so stärker, je niedriger das Datenniveau der Verfahren ist. Daten sind oft unzureichend genau oder sie weisen mangelnde Realitätsnähe auf (vgl. Fujita, 1992; Reer & Mertens, 1993). Erhöht wird

diese Unsicherheit in den Daten dadurch, daß HRA-Verfahren bisher kaum einer systematischen Untersuchung zur Validität unterzogen werden (Zusammenstellungen und weitere Diskussionen in ACSNI, 1991; Zimolong, 1990; Zimolong, 1992).

Neben der Ungenauigkeit der vorhandenen Daten sind die Verfahren auch nicht in der Lage, Daten für neuere Problemfelder zu liefern. So kann die Unvollständigkeit der Methoden (z.B. im Bereich der organisatorischen Effekte oder kognitiven Fehler) zu einer Fehleinschätzung des Gesamtrisikos führen (vgl. Bley et al., 1992; Reer & Mertens, 1993). Kognitive Fehler werden nur unzureichend berücksichtigt, sind aber insbesondere für die Einschätzung der menschlichen Zuverlässigkeit in zukünftigen technischen Systemen (z.B. Bildschirmwarten) von Bedeutung (Reichart, 1992; Reer & Mertens, 1993) sowie, gemeinsam mit organisatorischen Aspekten, für anlageninterne Notfallmaßnahmen (AM - Accident Management).

Da die Datengrundlagen ein Hauptproblem bei den HRA-Verfahren sind, ist dieses Problem vornehmlich zu beachten. Sowohl die Validierung vorhandener Datenquellen als auch die Bewertung kognitiver und organisatorischer Fehler sollte durch die Daten aus der Betriebserfahrung möglich sein. Eine Methode zur Auswertung der Daten aus der Betriebserfahrung muß darüber hinaus flexibel genug sein, um unterschiedliche Vorgehensweisen (Fehler-, PSF- oder Zeit-bezogen) gleichermaßen abzudecken.

2.3 Verfahren zur Analyse von Betriebserfahrung

In den beiden vorhergehenden Abschnitten wurden die Anforderungen an ein Verfahren zur Erfassung menschlicher Fehler aus der Sicht des Prozesses der prospektiven Beurteilung dargestellt. Die Anforderungen zielen dort auf eine eher quantitative Bewertung menschlicher Zuverlässigkeit ab. In diesem Abschnitt sollen nun retrospektive Verfahren vorgestellt werden, die eher zur qualitativen Analyse von Ereignissen herangezogen werden. Die folgenden retrospektiven Verfahren können unterschieden werden: arbeitswissenschaftliche Bewertungssysteme, Verfahren zur Analyse von Ereignissen und Systeme zur Ereignismeldung.

2.3.1 Arbeitswissenschaftliche Bewertungssysteme

Zur Bewertung der Arbeitsumgebung der Menschen sind verschiedene Verfahren entwickelt worden. Sie dienen indirekt zur qualitativen Analyse der Einflußfaktoren auf

die menschliche Zuverlässigkeit und sind damit prinzipiell auch für die Analyse von Ereignissen von Bedeutung. Sie können in folgende Gruppen unterschieden werden:

- Checklisten zur ergonomischen Bewertung: In dieser Gruppe sind Verfahren zusammengefaßt, die eine qualitative ergonomische Bewertung von Arbeitssystemen vornehmen. Die bekanntesten sind u.a. das Tätigkeit Bewertungssystem (TBS) von Hacker et al. (1983), der Fragebogen zur Arbeitsanalyse (FAA) von Frieling und Hoyos (1978), das Arbeitswissenschaftliche Erhebungsverfahren zur Tätigkeitsanalyse (AET) von Rohmert und Landau (1978), das Ergonomische Datenbank System (EDS) von Jastrzebska-Fraczek und Schmidtke (1992) sowie verschiedene ergonomische Checklisten wie z.B. die von Eggerdinger et al. (1986) entworfene Checkliste zur Gestaltung von Bildschirmsystemen, die Richtlinien zur Prozedurgestaltung in SR2055 (1995) oder Checklisten aus der amerikanischen bzw. japanischen Literatur (vgl. O'Hara, 1994 oder Fujita, 1992).
- Taxonomien zur Beschreibung von Ereignissen: In dieser Gruppe sind Verfahren zusammengefaßt, die zur Klassifikation von Ereignissen herangezogen werden. Diese Verfahren werden sowohl von Betreibern (z.B. von EDF - Electricite de France in Frankreich oder dem RWE - Rheinisch Westfälische Elektrizitätswerke in Deutschland) als auch von Aufsichtsbehörden verwendet (z.B. das HACCS - Human Action Classification System in den USA erstellt bei der NRC - Nuclear Regulatory Commission von Barriere et al., 1994). Wilpert et al. (1994) stellen einige dieser Verfahren im Überblick vor. In Anhang 2 sind einige der hier genannten Taxonomien zusammengestellt, die im Datenbanksystem (Anhang 1) genutzt werden.

Zusammenfassend kann man feststellen, daß arbeitswissenschaftliche Bewertungssysteme auf bestimmte Fragestellungen hin optimiert sind und nur Teilbereiche ergonomischer Probleme abdecken (z.B. Motivation, Personalführung, ergonomische Gestaltung von Arbeitsplätzen). Sie zeigen aber weiterhin, daß für eine vollständige Analyse menschlicher Einflüsse und der Bedingungen für menschliche Fehler prinzipiell ein breites Spektrum von ergonomischem Wissen bereitgestellt werden muß, welches innerhalb dieser Bewertungssysteme benutzt wird (Kognition, Organisation, Kommunikation etc.).

Taxonomien zur ergonomischen Bewertung oder zur Beschreibung von Ereignissen bestehen ferner aus festgelegten Deskriptoren und sind für eine detaillierte Untersuchung ungeeignet, da sie die Variabilität der in den Ereignissen zu beobachtenden Informationen nicht abbilden und die Zusammenhänge der Fehlerentstehung nicht beschreiben können. Dadurch geht bei diesen Verfahren insgesamt betrachtet der Zu-

sammenhang zwischen einzelnen Aspekten der Fehlersituation verloren. Ferner ist ein hoher Interpretationsspielraum bei der Anwendung der Taxonomien gegeben, sobald kein Deskriptor auf das zu beschreibende Ereignis angewendet werden kann. Dies führt zu Ungenauigkeiten in der Ereignisbeschreibung, so daß einfache Taxonomien nur bedingt für die Ereignisbeschreibung nutzbar sind. Dies wird dadurch verstärkt, daß Ereignisse eine enorme Variabilität und Komplexität besitzen und jedes Ereignis für sich seine spezifische Fehler- und Bedingungskonstellation besitzt.

2.3.2 Verfahren zur Analyse von Ereignissen

Aufgrund der eingeschränkten Nutzbarkeit einfacher Taxonomien zur Analyse von Ereignissen sind in Arbeiten der IAEA (International Atomic Energy Agency) und der NRC (Nuclear Regulatory Commission) zwei Verfahren zur Analyse der Ursachen von Ereignissen entstanden, die in diesem Abschnitt vorgestellt werden. Es sind die Verfahren ASSET und HSYS.

- **Das Verfahren ASSET**

ASSET (Assessment of Safety Significant Events Team) ist ein Verfahren, welches von der IAEA zur Analyse menschlicher Fehler in Kernkraftwerken entwickelt worden ist (vgl. IAEA-632, 1991). Zentrale Annahme des ASSET-Verfahrens ist, daß Stötereignisse (vom Unfall bis zur Betriebsstörung) durch latente Schwächen (latent weaknesses) verursacht werden. Die latenten Schwächen werden als Direkt-Ursachen (direct causes) bezeichnet, die innerhalb des Ereignisses in der Fehlerkette zu Tage treten. Ihnen liegen Grund-Ursachen (root causes) als Bedingungen zugrunde, die beispielsweise in der mangelnden Instandhaltung, Qualitätskontrolle oder Betriebsüberwachung liegen können und die latenten Schwächen verursachen. ASSET besitzt eine Reihe von Entsprechungen zu anderen Analyseverfahren (wie z.B. MORT in Johnson, 1980), die zur Analyse organisationaler Sicherheitsbarrieren eingesetzt werden (siehe dazu z.B. Becker et al., 1995). Im ASSET-Verfahren wird folgendermaßen vorgegangen (vgl. Deutschmann, 1994):

1. Analyse des Ereignisses (Was ist passiert?): Zur Analyse des Ereignisses wird es zunächst in einzelne Vorkommnisse zerlegt.

2. Analyse der Direkt-Ursache (Warum ist es passiert?): Darauf wird für jedes identifizierte Vorkommnis der Vorkommnis-Typ bestimmt. Der Vorkommnis-Typ kann dabei die Arbeitsmittel, die Vorschriften bzw. Prozeduren oder das Personal betreffen und stellt die Direkt-Ursache für das Vorkommnis dar.
3. Analyse der Grund-Ursache (Warum wurde es nicht verhindert?): Zu jedem Vorkommnis-Typ wird die latente Schwäche gesucht, die Grund-Ursache für das Vorkommnis war. Dazu bietet das ASSET-Verfahren als mögliche latente Schwächen Mängel in der Instandhaltung, Qualitätskontrolle oder Betriebsüberwachung an.
4. Einleitung korrigierender Maßnahmen (Was muß getan werden?): Zu jedem Ereignis werden Korrekturmaßnahmen vorgeschlagen. Die Korrekturmaßnahmen sollten die Ausrüstung, die Vorschriften und das Personal umfassen sowie kurz- und langfristige Maßnahmen beinhalten.

Zur Durchführung der Schritte bietet ASSET Formblätter und Flußdiagramme an, die bei der Analyse der Ursachen der Ereignisse helfen. Das Vorgehen von ASSET bestätigt damit das in Bild 8 (Kapitel 1) dargestellte gestaffelte Vorgehen zur Fehlerbeschreibung. Zusätzlich zu dem dort dargestellten Vorgehen ist aus der Sicht der retrospektiven Analyse die Wirksamkeit von Verbesserungsmaßnahmen zu berücksichtigen.

Eine genaue Betrachtung der möglichen Grund-Ursachen zeigt, daß ASSET die Ursachen für menschliche Fehler auf das Management des Betriebes reduziert. Beispielsweise können fehlerhafte Prozeduren nach ASSET nur durch mangelnde Qualitätssicherung oder Wartung der Prozeduren zustande kommen. Fehler, die neben diesen Faktoren auf die komplexen Wechselwirkungen zwischen dem Benutzer der Prozedur und den spezifischen Eigenschaften der Situation zurückzuführen sind, werden in diesem Verfahren nicht betrachtet. Abschließend stellt das Verfahren im Sinne der Diskussionen zur Schuldfrage also ein einseitiges Verfahren zur Ursachenanalyse dar. Ferner ist es nicht durch zusätzliche Erkenntnisse über Zusammenhänge bei der Fehlerentstehung, die aus den Ereignissen gewonnen worden sind, erweiterbar.

- **Das Verfahren HSYS**

Das Verfahren HSYS (Human System) wurde von Harbour und Hill (1991) zur Ursachenanalyse in den USA entwickelt. Ausgangspunkt des Verfahrens ist ein Fehlermodell ähnlich des von Reason (1976), welches bereits in Kapitel 1 vorgestellt wurde. Es unterteilt menschliche Fehler auf der ersten Ebene anhand der Verarbeitungsstufen nach Sternberg (1969). Ausgehend von diesem psychologischen Modell wird ein Fehlerbaum möglicher Ursachen aufgebaut. In hierarchisch untergeordneten Ebenen werden Faktoren für die Fehlerentstehung bis hin zu terminalen Faktoren differenziert. Jeweils höherliegende Knoten stellen dabei Ursachen für tieferliegende Knoten dar. Bild 15 stellt einen Teilausschnitt der Hierarchie von HSYS dar. Wie aus dem Bild zu entnehmen, sind zur Ursachenbestimmung auf der untersten Ebene der Hierarchie überprüfbare Faktoren wie z.B. Qualifikation, Training, Arbeitsplatzgestaltung genannt. Diese Faktoren werden als nicht ausreichend klassifiziert, wenn sie innerhalb eines Ereignisses eine Handlung beeinflusst haben. Analog zur Fehlerbaumtechnik können Wirkungsmechanismen abgeleitet werden, indem die nächst höhere Ebene betrachtet wird.

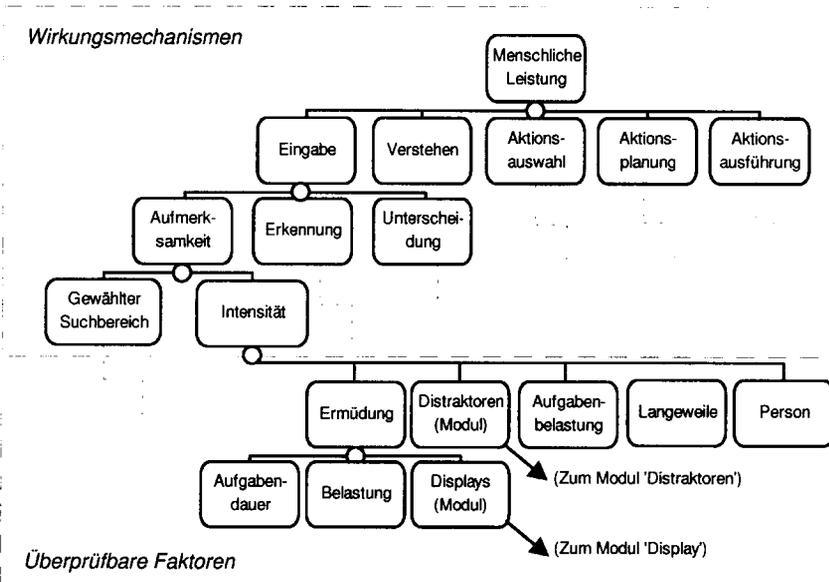


Bild 15 Teilausschnitt der Hierarchie von HSYS.

Bezüglich des zugrundeliegenden theoretischen Modells ist anzumerken, daß die dort vorgenommene Unterteilung der Verarbeitungsstufen nach Sternberg mit dem derzeit diskutierten Stand über Eigenschaften der menschlichen Informationsverarbeitung nicht übereinstimmt. Wie bereits in Kapitel 1 dargestellt, wird dies allein dadurch deutlich, daß das Modell von Reason (1976), welches auf diese Verarbeitungsstufen zurückgreift, mögliche Übungseffekte und Gewohnheitseffekte in der menschlichen Informationsverarbeitung nicht berücksichtigt. Gewohnheitseffekte führen dazu, daß keine sequentielle Verarbeitung mehr angenommen werden kann (vgl. Kapitel 1). Somit modelliert bereits das Grundgerüst des HSYS-Verfahrens menschliches Verhalten unzutreffend.

Zusätzlich hat das Modell auch formale Schwächen. So ist der in dem Modell aufgebaute Fehlerbaum nicht streng hierarchisch organisiert. Analysen können zu mehrfachen Lösungen führen. Bei identischer Information auf der untersten Ebene führt das Modell beispielsweise zu Fehlerursachen sowohl in der Eingabestufe als auch in der Stufe der Aktionsauswahl. Ferner ist die Hierarchie in HSYS aufgrund von theoretischen Überlegungen entstanden und stellt keine empirisch zu findenden bzw. gefundenen Zusammenhänge dar. Sie ist auch nicht durch diese erweiterbar.

Wenn innerhalb eines Ereignisses Fehler bezogen auf die überprüfbaren Faktoren identifiziert wurden, erlaubt das Verfahren HSYS jedoch eine Bestimmung von übergeordneten Einflußfaktoren, indem die Hierarchie nach oben (bottom up) verfolgt wird. Ist ein Einflußfaktor identifiziert, können weitere handlungsbestimmende Faktoren identifiziert werden, indem die Hierarchie nun nach unten (top down) analysiert wird. Hierdurch können Wechselwirkungen mehrerer Einflußfaktoren, die am Fehlerereignis beteiligt waren, abgebildet werden.

2.3.3 Systeme zur Ereignismeldung

Neben den bisher dargestellten Verfahren zur retrospektiven Beurteilung menschlicher Zuverlässigkeit gibt es verschiedene Systeme zur Ereignismeldung, die insbesondere für eine weitergehende Dokumentation und Auswertung innerhalb von Datenbanken Verwendung finden. Sie können in drei Klassen eingeteilt werden: Erfassungsbögen, Datenbanksysteme und Ereignisbeschreibungen.

- **Erfassungsbögen**

In Erfassungsbögen werden Ereignisse dadurch beschrieben, indem sie in vorgegebenen Kategorien klassifiziert werden. Sie dienen zur Übersicht über ein Ereignis. Übliche Erfassungsbögen sind Anzeigenformulare oder Mängelmeldungen über technische Komponenten. Allen Erfassungsbögen ist gemein, daß ein Ereignis durch Ankreuzen bestimmter Kategorien (ca. 30) erfaßt wird. Wilpert et al. (1994) schlagen einen Erfassungsbogen für menschliche Fehler auf der Basis mehrerer Kategoriensysteme aus der Literatur vor.

Durch die festen Kategorien der Erfassungsbögen ist lediglich eine starre Beschreibung des Ereignisses in den vorbestimmten Kategorien möglich. Um Ereignisse, die nicht in das vorgedachte Schema passen, dennoch abbilden zu können, sind Restkategorien vorhanden, in denen freie Angaben erfolgen können. Durch die beschränkte Anzahl an Kategorien ist eine detaillierte Beschreibung eines Ereignisses mit den Erfassungsbögen nicht möglich. Fehler, die auf den Operateur oder auf Interaktionen des Operateurs mit dem technischen System oder auf Wechselwirkungen beruhen, sind mit diesen Mitteln nicht beschreibbar. Auch geht bei diesen Verfahren der Wirkungszusammenhang zwischen ereignisspezifischen Informationen, Handlungen, Fehlern und Einflußfaktoren verloren.

- **Datenbanksysteme**

Datenbanksysteme dienen zur Sammlung von Ereignisbeschreibungen, um nachfolgend eine fallübergreifende Analyse zu ermöglichen (z.B. Feststellung der Wirksamkeit von Verbesserungsmaßnahmen, Übertragung von Fehlerursachen auf andere Anlagen). Sie dienen somit zum nationalen wie internationalen Austausch von Informationen zwischen verschiedenen Anlagen und Anlagentypen. Datenbanksysteme sind auch Quellen für Detailanalysen eines Ereignisses und liefern Informationen zu systematischen Fehlern oder menschlichen Einflüssen. Sie stellen ferner Daten zur Verfügung, für die in prospektiven Beurteilungsverfahren derzeit keine Angaben vorhanden sind, wie z.B. Probleme bei Nicht-Vollast Betrieb.

Datenbanken von praktischer Bedeutung in der Kernkraftwerksindustrie sind international die Datenbank NUCLARR (Nuclear Computerized Library for Assessing Reactor Reliability - beschrieben in Reece et al., 1994), das IRS (Incident Reporting System, dargestellt in IAEA-632, 1991) und national die Datenbank BEVOR (Besondere Vor-

kommissionen, siehe Kotthoff & Voswinkel, 1981). Es existieren weitere Datenbanken zur Ereignissammlung (z.B. in Deutschland, in den USA oder Frankreich), die allerdings nicht öffentlich zugänglich sind.

Die Datenbank NUCLARR wurde von der NRC (Nuclear Regulatory Commission) entwickelt, um den Datenbedarf bei der Beurteilung menschlicher Handlungen in Kernkraftwerken zu decken. In NUCLARR werden Fehlerwahrscheinlichkeiten menschlicher Handlungen (HEP) aus unterschiedlichen Quellen (Experimente, Simulatortests, Literaturangaben, Betriebserfahrung) gesammelt. Um die Daten anwenden zu können, werden auch Informationen über Aufgaben der Operateure, Fehler und Fehlerbedingungen, unter denen die Fehlerwahrscheinlichkeit bestimmt worden ist, dokumentiert. Tabelle 9 zeigt die Struktur eines Datensatzes in NUCLARR (übersetzt aus Reece et al., 1994).

Tabelle 9 Struktur eines Datensatzes in NUCLARR (nach Reece et al., 1994).

<i>Hersteller</i>	<i>Personal</i>	<i>Aufgabenbeschreibung</i>	<i>HEP-Angaben</i>	<i>PSFs</i>	<i>Information</i>
(Hersteller der Anlage)	z.B.: Wartpersonal, Instandhaltung	(kurze Aufgaben- und Fehlerbeschreibung in einem Satz)	Median Mittelwert Fehlerfaktor Obere Grenze Untere Grenze	Verfügbare Zeit Handlungszeit Erfahrung Rückmeldung Prozeduren Ausstattung Streß Überwachung Kontrolle Training	(Verwaltungs- information)

Das Incident Reporting System (IRS) enthält weltweit meldepflichtige Ereignisse aus Kernkraftwerken. Das System wurde 1980 für OECD-Mitgliedsländer (OECD - Organization for Economic Cooperation and Development) eingeführt, um den internationalen Erfahrungsaustausch über Ereignisse in nuklearen Anlagen zu gewährleisten. 1983 hat die IAEA dieses System für Nicht-OECD-Länder (ehemaliger Ostblock, Asien und Südamerika) übernommen. Im Prinzip ist das IRS ähnlich aufgebaut wie die BEVOR der GRS.

Die Datenbank BEVOR wurde von der GRS zur Dokumentation nationaler meldepflichtiger Ereignisse innerhalb von Deutschland aufgebaut. Die BEVOR besitzt einige Datenfelder für standardisierte Angaben (wie Anlage, Anlagentyp, Datum und andere Verwaltungsinformationen) sowie einen freien Textteil für die Beschreibung des Ereignisses.

nisses, der in verschiedene Kapitel unterteilt ist (siehe Tabelle 10). Die Datenbank wurde für eine nachvollziehbare Dokumentation einzelner Ereignisse konzipiert.

Tabelle 10 Kategorien der Datenbank BEVOR.

<i>Allgemeine Angaben in festen Datenfeldern</i>	<i>Kurzbeschreibung in Textform bezüglich der Kapitel</i>
Vorgangsnummer	Überschrift
Datum	Beschreibung des Ereignisses
Anlage / Anlagentyp	Erkennung
Sicherheitskennzeichen (z.B. RESA)	Auswirkung
Schwere des Ereignisses	Ursache
Betroffenes System, Komponente	Behebung
Schlüsselbegriffe zur Ereignis- Identifikation	Vorkehrungen

Die Datenbanken unterscheiden sich von den Erfassungsbögen darin, daß hier nicht allein eine kategoriale Einteilung der Ereignisse stattfindet. Hier ist in zusätzlichen Datenfeldern eine Kurzbeschreibung des Ereignisses möglich, die weitere Informationen zum Fehler innerhalb des Ereignisses liefert. Es ist somit eine detailliertere Analyse menschlicher Eingriffe während des Ereignisses möglich. Die Größe des Feldes für die Ereignisbeschreibung unterscheidet sich stark zwischen einem Feld von 254 Zeichen in NUCLARR bis hin zu beliebig langem Freitext in der Datenbank BEVOR. Umgekehrt ist zu bedenken, daß feste Datenfelder für eine standardisierte und häufigkeitsanalytische Auswertung der Daten von Vorteil sind. Damit können im wesentlichen zwei Arten der Erfassung eines Ereignisses unterschieden werden: die standardisierte Erfassung durch die Angabe von Deskriptoren oder die freie Beschreibung des Ereignisses in Textform. Die Methode, Begriffe anzugeben, führt zu konsistenteren, leichter auszuwertenden Angaben als die Textform. Die Textform ist vorzuziehen, wenn detaillierte Angaben zum Ereignishergang, eine Darstellung der Zusammenhänge oder ein Nachvollziehen des Vorganges gefordert sind.

Untersucht man den Inhalt der verschiedenen Meldeeinrichtungen im Hinblick auf menschliche Fehler, so sind Erfassungsbögen nur für eine allgemeine Klassifizierung menschlicher Fehlhandlungen geeignet. Für detailliertere Analysen kommen nur die Datenbanksysteme und Ereignisbeschreibungen in Frage. NUCLARR stößt bei dem Wunsch nach einer detaillierten Betrachtung eines Ereignisses aufgrund der unzureichenden Aufgabenbeschreibung schnell an Grenzen. BEVOR und IRS bilden Ereignisse bereits so ab, daß zumindest eine grobe Analyse menschlicher Fehler möglich ist.

• Ereignisbeschreibungen

Ereignisbeschreibungen dienen dazu, eine genaue Vorstellung über die Fehler während des Ereignisses zu gewinnen und gezielte Vorkehrungen gegen mögliche Wiederholungen einzuleiten. Die Ereignisbeschreibungen unterscheiden sich von den bisher vorgestellten Methoden dadurch, daß in ihnen das Ereignis nur in Textform beschrieben wird. Zusammenfassend gehen sie gemäß einer Einteilung nach Tabelle 11 vor.

Tabelle 11 Zusammenfassung der Einteilungen von Ereignisbeschreibungen.

Angaben bezogen auf eine Anlage

- Kennnummer
- Quelle
- Datum
- Dauer, Ausfallzeiten, zeitliche Abfolge des Ereignisses
- Systemzustand vor und nach der Störung (z.B. Abschaltung, Leistungsbetrieb)

Angaben zum Ereignisgang

- Fehlerkennzeichnung (Überschrift)
- Zusammenfassung des Ereignisses (Klassifikation der Schwere des Ereignisses nach International Nuclear Event Scale - INES Maßstab, Fehlerursache)

Beschreibung des Ereignisgangs nach den folgenden Merkmalen:

- Betroffenes technisches System
- Situation (Rundgang, Wiederkehrende Prüfungen)
- Beteiligtes Personal (Personen bzw. Personengruppen) und deren Kommunikation
- Erkennbare Symptome (erfolgreiche oder erfolglose Erkennung der Signalisierung von Prozeßgrößen in Warte oder vor Ort)
- Durchgeführte Aktionen (Unmittelbare, geplante, vorbeugende Aktionen, Schalthandlungen, Prozeduren)
- Beobachtbare Fehler und Zusammenhänge von Fehlern
- Ursachen und Einflußfaktoren (Maschine: Konstruktion, Verschleiß, Materialfehler, Mensch: Unachtsamkeit, Fehlinterpretation, Versäumnisse)
- Komplexität des Fehlers (Verkettung technischer und menschlicher Fehler)
- Bewältigung des Ereigniszustandes

Bewertung des Ereignisses

- Bewertung aus sicherheitstechnischer Sicht (Reaktorabschaltung, Aktivitätsfreisetzung, Sicherheitsstufen)
- Bewertung aus ergonomischer Sicht
- Vorkehrungen, Maßnahmen gegen Wiederholung
- Übertragbarkeit des Ereignisses auf andere Systeme

Gegenüber den bisher vorgestellten Methoden ist die Information in den Ereignisbeschreibungen sehr detailliert. U.a. werden die folgenden Ereignisbeschreibungen in Deutschland genutzt: Weiterleitungsnachrichten (WLN), Stellungnahmen von Technischen Überwachungsvereinen (TÜV) und der Reaktor Sicherheitskommission (RSK). Ereignisbeschreibungen sind nicht standardisiert und abhängig von dem Verlauf des Ereignisses. Sie sind insbesondere in der Lage, Wirkungszusammenhänge darzustellen.

len und nehmen dazu eine ähnliche Kapiteleinteilung vor, wie in der Datenbank BE-VOR verwendet wird. Sie unterteilen in der Regel in Beschreibung des Ereignisses, Erkennung, Auswirkung und Behebung sowie Ursache, sicherheitstechnische bzw. anlagenübergreifende Bedeutung und Vorkehrungen.

Wie aus der Tabelle ersichtlich, bilden Ereignisbeschreibungen insbesondere Wechselwirkungen bzw. Wirkungszusammenhänge des technischen Systems mit den Personen ab. Ferner wird deutlich, daß in Ereignissen meist mehrere Personen zusammenwirken und die Erkennbarkeit der Symptome eine wichtige Rolle für ein mögliches Eingreifen des Menschen spielt.

2.4 Anforderungen an ein Modell zur Beurteilung menschlicher Zuverlässigkeit auf der Basis von Betriebserfahrung

In den vorherigen Abschnitten dieses Kapitels wurden Anforderungen an ein Modell zur Erfassung menschlicher Fehler zusammengetragen, die sich aus dem Prozeß der prospektiven Beurteilung menschlicher Zuverlässigkeit und der retrospektiven Analyse von menschlichen Einflüssen ergeben. Um diese zu einem Anforderungsprofil an ein Verfahren zur Analyse von Ereignissen mit menschlichem Einfluß zu verdichten, sind drei Hauptaspekte zu unterscheiden:

- Anforderungen an die zu erfassende Information
- Anforderungen an die Struktur der bereitzustellenden Daten und deren Auswertung
- Anforderungen an den erwarteten Erkenntnisgewinn durch die Auswertung

2.4.1 Anforderungen an die zu erfassende Information

Innerhalb der vorhergehenden Abschnitte dieses Kapitels wurden verschiedene Informationen genannt, welche die verschiedenen HRA-Verfahren als Bewertungsparameter benötigen, um menschliche Handlungen zu beurteilen. Diese müssen aus Ereignissen gewonnen werden. Sie können gemäß Tabelle 12 zusammengefaßt werden.

Tabelle 12 Anforderungen an die zu erfassende Information.

Be- reich	Anforderungen
Angaben zur Situation:	
P	Die Zeit, die beim Schadensbild verfügbar ist, um die richtigen Handlungen einzuleiten und auszuführen (diese wird von den technischen Randbedingungen des Systems vorgegeben).
P, R	Unmittelbare, geplante oder vorbeugende Aktionen (z.B. Wiederkehrende Prüfung oder ad-hoc Handlung).
Angaben zu Aufgabenstellung und Tätigkeiten:	
P	Die sich aus der Aufgabe ergebende benötigte Zeit zur Diagnose und korrekten Handlungs-ausführung.
P, R	Die Aufgaben der Operateure, die sich aus der Anforderung des Systems ergeben, sowie eine Beschreibung der Handlungen bzw. Teilaufgaben.
Angaben zur Person:	
P, R	Die Qualifikation der Person, welche die Aufgabe zu bewältigen hat (z.B. Wartenpersonal, Instandhaltungspersonal).
P, R	Der Grad der kognitiven Beanspruchung sowie Einflußfaktoren (z.B. Erfahrung, Streßfaktoren, Wahrnehmungs- und Handlungsfähigkeiten und Ermüdung).
P, R	Die Art des Fehlers (Omission, Commission).
Angaben zur Wahrnehmung, Bedienung und Rückmeldung:	
P, R	Die Mensch-Maschine-Schnittstelle und die Arbeitsmittel sowie deren ergonomische Gestalt-ung.
P, R	Die Erkennbarkeit des aktuellen Systemzustandes über die verfügbaren Informationssysteme.
Angaben zur Organisation und Kommunikation:	
P, R	Die zur Verfügung stehenden Prozeduren oder Arbeitsanweisungen (z.B. Betriebshandbuch).
P, R	Interaktionen mehrerer Personen (u.U. an unterschiedlichen Orten).
Angaben zur Umgebung:	
P, R	Einflußfaktoren aus der Umgebung (z.B. Lärm, Gase, Beleuchtung etc.).
Angaben zum technischen System:	
P, R	Die Komponenten des technischen Systems, die fehlerhaft waren oder für die Beherrschung der Störung benötigt wurden.
Angaben zum Systemausgang:	
P, R	Die radiologische bzw. sicherheitstechnisch bedeutsame Auswirkung auf die Anlage und die Umgebung.
R	Maßnahmen zur Vorkehrung gegen Wiederholungsfälle.

2.4.2 Anforderungen an die Struktur der bereitzustellenden Daten und deren Auswertung

Die Informationen müssen in einer bestimmten Art und Weise vorliegen, um für den Beurteilungsprozeß nutzbar zu sein. Die Anforderungen können folgendermaßen zusammengefaßt werden:

- Qualitative Angaben über menschliche Zuverlässigkeit: Eine wesentliche Anforderung an die bereitzustellenden Daten ist die vollständige und umfassende Berücksichtigung der Fehlerarten und der bei einer Handlung wirksamen Einflußfaktoren. Damit muß eine Erfassungsmethode umfangreiches ergonomisches und organisatorisches Wissen bezüglich möglicher Einflußfaktoren berücksichtigen. Eine entsprechende Unterstützung bei der Identifikation von Fehlern und PSFs muß bei der Auswertung der Betriebserfahrung gewährleistet sein.
- Quantitative Angaben über menschliche Zuverlässigkeit: Zur Nutzung der Daten für eine probabilistische Analyse menschlicher Handlungen sind neben qualitativen Aussagen Angaben über Wahrscheinlichkeiten für menschliche Fehler gefordert. Fehlerraten oder Fehlerhäufigkeiten reichen für eine PSA nicht aus.
- Detaillierungsgrad der Information: Die Information, die zur Bewertung der menschlichen Zuverlässigkeit erforderlich ist (vgl. Tabelle 12), muß dem Detaillierungsgrad der Analyse angepaßt sein. Eine unterschiedliche Detaillierung ist z.B. bei holistischen gegenüber dekompositionellen Verfahren oder bei Screening-Betrachtungen (Grob- und Detailanalyse) erforderlich. Informationen müssen auf unterschiedlichen Detaillierungsstufen angegeben und ausgewertet werden können.
- Methodik zur Auswertung der gesammelten Information: Die Auswertungsmethode muß in der Lage sein, Ähnlichkeiten in den Fällen herauszufinden, um eine entsprechende statistische Analyse zu ermöglichen. Die Ähnlichkeiten können sich dabei u.a. auf die Schlüsselparameter der HRA-Verfahren beziehen (Fehler-, Zeit- oder PSF-bezogen), auf die Handlungstypen, die bei einer PSA unterschieden werden (Die Handlungsbereiche A, B, C), oder auf getroffene Maßnahmen zur Vorkehrung. Hierzu muß eine Ereignisbeschreibung so flexibel sein, daß die Variabilität möglicher Ereignisse sowie Wirkungszusammenhänge in komplexen Ereignissen abgebildet werden können.

2.4.3 Anforderungen an den erwarteten Erkenntnisgewinn durch die Auswertung von Betriebserfahrung

Die in den letzten Abschnitten zusammengestellten Anforderungen weisen auch auf die Bedeutung der Validierung des vorliegenden bzw. auf die Ergänzung des nicht vorliegenden aber benötigten Datenmaterials hin. Im einzelnen wurden genannt:

- Validierung des Datenmaterials und der Annahmen, welche in HRA-Analysen gemacht werden: Durch die Betriebserfahrung sollte die Realitätsnähe des Datenmaterials geprüft bzw. validiert werden, welches zur Bewertung menschlicher Zuverlässigkeit genutzt wird. Hierzu zählen sowohl zentrale Verteilungsannahmen (die logarithmische Normalverteilung des THERP-Verfahrens und der logarithmisch-lineare Zusammenhang zwischen Zeit und Zuverlässigkeit) als auch eine Validierung der numerischen Angaben zur Zuverlässigkeit (die HEP-Werte). Weiterhin sind die Aussagen zur Genauigkeit der HEP-Werte bzw. die Unsicherheitsbandbreiten zu validieren.
- Realitätsnahe Abbildung der Komplexität der Fehlersituation und der Variabilität menschlicher Handlungen: Zur realitätsnahen Modellierung der Komplexität der Situation müssen die vielfältigen Wirkungszusammenhänge bzw. Wechselwirkungen zwischen situativen Bedingungen, Einflußfaktoren und Möglichkeiten des Eingreifens des Menschen abgebildet werden. Hierzu müssen vor allem Aussagen über Zusammenhänge der verschiedenen Aufgaben und der Bedingungen für den menschlichen Fehler (PSFs) gewonnen werden. Dies schließt auch Aussagen zum sicherheitstechnischen Nutzen bzw. zur Wirksamkeit von Vorkehrungsmaßnahmen und Recovery-Faktoren ein.
- Ergänzung des nicht vorliegenden, aber benötigten Datenmaterials für aktuelle Bewertungsprobleme innerhalb der HRA: Neuere technische Entwicklungen (wie z.B. die Bildschirmwarten) und Forderungen nach einer probabilistischen Bewertung von bisher nicht berücksichtigten sicherheitsrelevanten Aspekten (z.B. Nicht-Vollast Zustände und Notfallmaßnahmen) erfordern Aussagen zu kognitiven und organisatorischen Einflüssen. Hier sollten durch die Auswertung von Betriebserfahrung zumindest qualitative Aussagen über mögliche Einflüsse getroffen werden können. Weiterhin gilt es herauszuarbeiten, inwieweit bisher probabilistische Bewertungen menschliche Eingriffe realitätsnah abdecken, z.B. den Aspekt der schadensvergrößernden Einflüsse zu untersuchen (u.a. Verwechslungsfehler).

3 Ein allgemeines Modell zur Analyse menschlicher Fehler in Ereignissen

Im vorhergehenden Kapitel wurden aus der Sicht von HRA-Verfahren Anforderungen und Fragestellungen herausgearbeitet, die durch die Auswertung von Ereignissen aus der Betriebserfahrung beantwortet werden sollen. Die zentrale Frage in diesem Kapitel ist, wie diese Vielzahl an Anforderungen und Erwartungen methodisch umgesetzt werden muß. Dazu wird aus den bisher gemachten Überlegungen ein Beschreibungsmodell entwickelt, welches in der Lage ist, diejenigen Informationen aus Ereignissen zu erfassen und zu analysieren, die für eine Beurteilung der menschlichen Zuverlässigkeit erforderlich sind.

3.1 Grundlagen des Beschreibungsmodells

Zunächst ist es erforderlich, ein generisches Beschreibungsmodell aufzubauen. Es muß aus dem Grunde generisch, also allgemeingültig, sein, da es auf möglichst alle beobachtbaren Ereignisse anwendbar sein muß. Ferner muß das Modell in der Lage sein, alle Informationen über menschliche Fehler aus den Ereignissen in der Art und Weise zu sammeln, wie es für eine Auswertung im Hinblick auf die diskutierten Anforderungen notwendig ist.

3.1.1 Generisches Beschreibungsmodell zur Analyse von Ereignissen

In Kapitel 1 wurde aus verschiedenen Fehlermodellen, die aus der Literatur bekannt sind, ein Ansatzpunkt für ein Modell entwickelt, welches zur Erfassung von menschlichen Fehlern aus der Betriebserfahrung eingesetzt werden kann. Hierzu wurde das in der Ergonomie übliche Mensch-Maschine-System (MMS) gewählt und dargestellt, wie es zu einem Fehlermodell weiterentwickelt werden kann. Das MMS wurde gewählt, da es mögliche Fehler-Ursachen auf das Mensch-Maschine System sowie den Informationsfluß und Wechselwirkungen zurückführt und nicht allein auf den Menschen reduziert. Zusätzlich wurde diskutiert, wie dieses Modell kognitive Faktoren durch den Belastungs-/Beanspruchungsansatz berücksichtigen kann. Die Untersuchung der Anforderungen von Verfahren zur Analyse menschlicher Handlungen (HRA-Verfahren) und von Methoden zur Ereignisauswertung in Kapitel 2 zeigte, welche Informationen aus der Betriebserfahrung gesammelt werden müssen, um für eine Bewertung der menschlichen Zuverlässigkeit in einer HRA nutzbar zu sein. Die gemeinsamen Punkte,

die in den verschiedenen HRA-Verfahren identifiziert wurden, wurden in Tabelle 12 (Kapitel 2) zusammengefaßt.

Betrachtet man diese Ergebnisse, muß das MMS um folgende grundsätzlichen Komponenten erweitert werden, um die praktischen Anforderungen von HRA-Verfahren und von Methoden zur Erfassung von Betriebserfahrung mit dem Beschreibungsansatz aus Kapitel 1 zu einem Beschreibungsmodell zu kombinieren:

- Trennung von Systemzustand und Rückmeldung: Der tatsächliche Systemzustand wird dem Operateur in der Regel nicht zurückgemeldet. Er bekommt den Zustand des Systems nur mittelbar (z.B. über Displays) mitgeteilt. Der Systemzustand kann vom Operateur nur über Symptome beurteilt werden. Der Operateur gleicht die Symptome mit seinem Wissen über das System ab und führt eine entsprechende Aktion aus.
- Ergänzung von Auftragserteilung und Auftrags erledigung: Es ist erforderlich, interpersonelle bzw. organisationspsychologische Aspekte aufzunehmen, da Ereignisse meist durch mehrere Personen zustande kommen (vgl. Beispiel aus Tabelle 1 in Kapitel 1 und ASSET-Verfahren zur Ereignisanalyse in Kapitel 2). Um diese Aspekte abzubilden, kann das MMS um die Komponenten 'Auftragserteilung' und 'Auftrags erledigung' erweitert werden. Durch diese Erweiterung ist es möglich, interpersonelle Einflüsse abzubilden, wie sie in komplexen Fehlerereignissen immer auftreten.
- Ergänzung im situativen Kontext: Der situative Kontext muß Angaben über das Zeitfenster enthalten, um für Zeit-Zuverlässigkeitsbetrachtungen nutzbar zu sein. Die zeitlichen Angaben sind wichtig für die Abschätzung der für eine Entscheidung zur Verfügung stehenden Zeit (insbesondere für Typ C Handlungen nach dem Eintritt einer Störung, vgl. Kapitel 2).

Kombiniert man diese grundsätzlichen Aspekte mit dem Ansatz des MMS, so erhält man ein erweitertes MMS (Bild 16). Informationselemente sind in der Abbildung mit arabischen Ziffern gekennzeichnet, Informationsflüsse mit Buchstaben. Das erweiterte MMS kann nach folgenden Gesichtspunkten beschrieben werden (vgl. auch Bubb, 1992): Eine Aufgabe (1) wird z.B. in Form einer Auftragserteilung, eines Auftrags-scheines oder einer Prozedur (1*) vom Operateur (4) wahrgenommen (1-a-3). Nach

Erfassen der Aufgabe und des aktuellen Systemzustandes löst der Operateur eine Aktion am Bedienelement eines Systems aus (5-c-6). Die Aktion hat ihrerseits Konsequenzen für das Verhalten der Systemgröße (e-10). Die Systemgröße ist abhängig vom Systemverhalten der Maschine (7), die u.a. durch die Dynamik des Prozesses und den Automatisierungsgrad des technischen Systems gekennzeichnet ist. Auf das Systemverhalten hat der Operateur keine direkte Einflußmöglichkeit. Ferner wird ihm die Systemgröße nur mittelbar über Symptome des Systemverhaltens zurückgemeldet (9-d-3). In der Regel werden die Symptome über ein Display visuell oder auditiv zurückgemeldet. Ist die Aufgabe erfüllt oder gescheitert, so kann der Operateur die Erfüllung oder Nichterfüllung an den Aufgabensteller zurückmelden (5-b-2). Das gesamte MMS steht unter Einfluß von situativen Faktoren (u.a. Zeitfenster) und unter Einflüssen der Umgebung (z.B. Lärm).

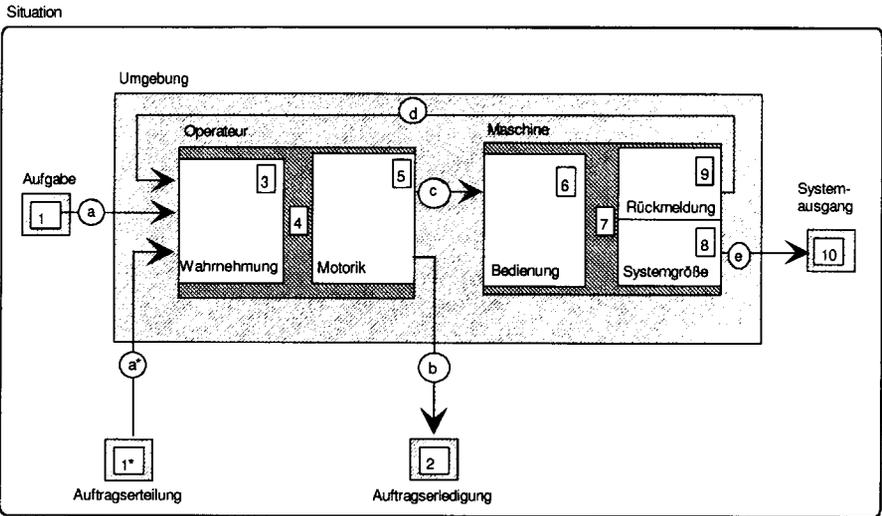


Bild 16 Das MMS als generisches Element zur Erfassung menschlicher Handlungen.

Da das MMS ein klassisches ergonomisches Modell ist, ist es insbesondere in der Lage, ergonomische und organisatorische Faktoren abzubilden. Um darüber hinausgehende Informationen abzubilden, die bei Ereignissen ebenfalls von Bedeutung sein können, wurde es um den Kommunikationsaspekt (z.B. Auftragserteilung und -meldung) und um situative Informationen (z.B. Zeitfenster für eine Handlung) ergänzt. Weiter unten wird dargestellt, wie die Berücksichtigung des Kommunikationsaspektes

zusätzlich erlaubt, komplexere Ereignisse, an denen mehrere Personen beteiligt sind, zu beschreiben, indem mehrere MMS miteinander verbunden werden. Das erweiterte MMS stellt also zum einen eine strukturierte Vorschrift dar, ereignisrelevante Informationen zu sammeln. Zum anderen ist es der grundlegende Baustein für eine Ereignisbeschreibung und wird aus diesem Grund im folgenden als generisches MMS bezeichnet. Die Aspekte, die mit dem MMS zusammengefaßt werden, sind auch in IAEA-538 (1990) als bedeutend für die Erfassung von Informationen für HRA-Analysen eingestuft worden.

Zur Beschreibung eines Ereignisses müssen die Informationselemente und Informationsflüsse im MMS betrachtet werden. Ein Fehler am Systemausgang des MMS kann dabei durch eine oder mehrere Schwachstellen innerhalb des MMS zustande kommen. Der Systemausgang stellt die Nachführgröße und somit die Konsequenz aus Fehlern innerhalb des Mensch-Maschine Systems dar. Der Systemausgang stellt also den Merkmalswert dar, der auf Fehler innerhalb des MMS hinweist (vgl. Definition in Kapitel 1). Um diesen Fehler zu untersuchen und zu verstehen, müssen gemäß des gestaffelten Vorgehens, wie es in Bild 8 (Kapitel 1) herausgearbeitet wurde, zu jeder Komponente des MMS folgende Fragen gestellt werden:

- Welche objektive Information liegt vor? (z.B.: Welche Aufgabe hatte der Operateur?)
- Welcher Fehler wurde begangen? (z.B. Unterlassung)
- Welche fehlerbegünstigenden Bedingungen lagen vor? (z.B. Zeitdruck)

- **Objektive Information**

Innerhalb des generischen Mensch-Maschine Modells kann eine objektorientierte Fehlerbeschreibung stattfinden, d.h. im MMS werden zunächst die Informationen zu einem Ereignis gesammelt, die tatsächlich während des Ereignisses beobachtbar waren. Tabelle 13 zeigt mögliche Beispiele bezogen auf die Komponenten bzw. Klassen des generischen MMS.

Tabelle 13 Beschreibung der Komponenten im MMS.

MMS Komponente	Bezeichnung	Beschreibung
Situation		In welcher Situation fand das Ereignis statt? Alle allgemeinen Informationen, die für die beobachtete Fehlhandlung von Bedeutung sind. <i>Beispiel: Während der Revision, Wiederkehrende Prüfung, 10 Minuten nach Ereigniseintritt.</i>
Aufgabe	1-a-3	Welche Aufgabe hatte die Person? Alle Aufgaben, die an eine Person gestellt werden. Die Beschreibung der Aufgaben geschieht mit Hilfe verfahrenstechnischer Begriffe. <i>Beispiel: Kühlmitteldruck an Behälter xy prüfen</i>
Person	3-4-5	Welche Person war an dem Ereignis beteiligt? Die Person, die an der Aufgabenerfüllung beteiligt ist. <i>Beispiel: Elektriker durchführen, Operateur überwachen</i>
Tätigkeit	5-c-6	Was war zu tun? Alle Tätigkeiten, die zur Erfüllung einer Aufgabe erforderlich sind. <i>Beispiel: Kühlmitteldruck eingestellt, Schalter betätigt</i>
Rückmeldung	9-d-3	Welche Informationsmittel haben der Person den Zustand der Anlage gemeldet; wie hat sie den Fehler gemerkt? Alle Gegenstände oder Systeme, welche die Systemgröße an die Person zurückmelden. <i>Beispiel: Druckwert am Bildschirm ablesen</i>
Auftragserteilung	1*-a*-3	Welche organisatorischen Hilfen hatte die Person zur Verfügung? Alle Personen oder Gegenstände (Prozeduren, Anruf per Telefon), durch welche die Aufgabe der Person aufgetragen wurde. <i>Beispiel: Schriftliche Anweisung xy befolgen</i>
Auftrags-erledigung	5-b-2	Welche organisatorischen Aufgaben hatte die Person zu erledigen, wem mußte sie wie über ihre Arbeit berichten? Alle Personen oder Gegenstände, denen eine Aufgabenerledigung bekannt gemacht wird. <i>Beispiel: Arbeiterlaubnisschein schriftlich ausfüllen</i>
System	8-e-10	Welches Teilsystem, welche Systemkomponente war betroffen? Alle technischen Systeme, auf welche die Aufgabenerfüllung eine Wirkung hatte bzw. an denen Schäden entstanden sind. <i>Beispiel: Druck im Behälter xy angestiegen.</i>
Umgebung		An welchen Orten fand das Ereignis statt? Die Räumlichkeiten, in denen die Person die Aufgabe zu erfüllen hatte. <i>Beispiel: Warte, Vor Ort</i>

• **Begangene Fehler**

Wurde die objektive Information erfaßt, so können in einem nächsten Schritt die Schwachstellen innerhalb des MMS identifiziert werden, indem zu jeder Komponente des MMS beobachtbare Fehler angegeben werden (z.B., ob das Ablesen des Druckwertes am Bildschirm unterlassen wurde oder der Kühlmitteldruck auf einen zu hohen Wert eingestellt wurde). Generell kann dazu die Fehlertaxonomie von Swain und

Guttman (1983) für jede einzelne Komponente des MMS angewendet werden (Tabelle 14).

Tabelle 14 Allgemeine Taxonomie zur Fehleridentifikation innerhalb des MMS (angelehnt an Swain & Guttman, 1983, p3-7).

<i>Taxonomie</i>	<i>MMS-Komponente, für welche die Taxonomie gilt</i>
Unterlassungsfehler unterlassen	Aufgabe Auftragserteilung Rückmeldung Person
Ausführungsfehler (auswählen) falsch (einstellen) fehlerhaft	Person Tätigkeit Auftragserledigung System
Zeitfehler zu früh zu spät	
Qualitative Fehler zu wenig zu viel	

Dabei sind Ausführungsfehler (errors of commission) der Informationsausgabeseite des Menschen zuzuordnen (der Bedienung) und Unterlassungsfehler (errors of omission) der Informationseingabeseite (der Aufgabenstellung).

- **Fehlerbegünstigende Bedingungen**

Konnte ein Fehler in einer Komponente des MMS identifiziert werden, so kann gemäß des gestaffelten Vorgehens, wie es in Bild 8 (Kapitel 1) dargestellt wurde, eine Angabe der Fehlerbedingungen (PSF) erfolgen. Dazu können PSF den verschiedenen Komponenten des MMS zugeordnet werden. Beispielhaft ist dies in Bild 17 für einige PSF aus der Literatur gezeigt worden. Anhang 2 zeigt die Zuordnung weiterer PSF zu den MMS-Komponenten. Die identifizierten Fehlerbedingungen stellen nicht allein Ursachen im Sinne von notwendigen Bedingungen für die Fehler dar, wie es in Kapitel 1 diskutiert wurde; sie ermöglichen auch, Ansätze für Verbesserungsmöglichkeiten und zur Vermeidung zukünftiger Fehler zu finden, wie weiter unten gezeigt wird.

Umgebung		Situation		Auftragserteilung/-rückmeldung
Temperatur Luftqualität Strahlung Sauberkeit	Beleuchtung Lärm Vibration	Arbeitszeit Pausen Schichtwesen Prüfsituation	Vergütungs- wesen Gruppenstruktur, Organisations- struktur	Kommunikationsmittel Gestaltung von Prozeduren Vom Management geforderte Aufgabe
Aufgabe			Rückmeldung	
Komplexität Schwierigkeit Dimension Präzision	Risiko Zeitdruck	Bedeutung Nutzen	Oberfläche Inkonsistenz Design Kompatibilität	Wiederholfrequenz Hilfen Warnungen
Person			Tätigkeit	System
Streß Aufmerksamkeit Motivation Erfahrung Arbeitsmethoden Training Persönlichkeit Intelligenz Fertigkeit Emotion Wissen Physische Faktoren Ermüdung Hunger / Durst Unterforderung	Informationsbe- lastung bei Inter- pretation und Entscheidung Gedächtnisbelas- tung (STM, LTM) Kognitive Belas- tung (Rechnen, skill-, rule-, knowledge-based)	Persönliche Konsequenzen	Auswahl Handhabbarkeit Zugänglichkeit Monotonie Control-Display Verhältnis Control-Order Dynamik	Zuverlässigkeit Wartungsintervalle Plötzlichkeit des Auftritts Automatisierungs- grad Verkettung Vermaschung

Bild 17 Zuordnung fehlerbegünstigender Bedingungen aus der Literatur zu den MMS-Komponenten

3.1.2 Ausweitung des generischen MMS auf Arbeitssysteme

Die genaue Betrachtung von Ereignissen zeigt, daß diese meist durch das Zusammenwirken mehrerer Personen an unterschiedlichen Orten zustande gekommen sind. Das Zusammenwirken mehrerer Personen kann dabei als Arbeitssystem bezeichnet werden und durch die beiden MMS-Komponenten Auftragserteilung und Auftrags erledigung modelliert werden. Das generische Mensch-Maschine Modell kann hierdurch Ereignisse abbilden, die durch eine komplexe Ereignis- und Fehlerkette gekennzeichnet sind. Um dieses zu verdeutlichen, zeigt Bild 18 zunächst ein einfaches Arbeitssystem mit hierarchischer Organisation, wie es oft anzutreffen ist.

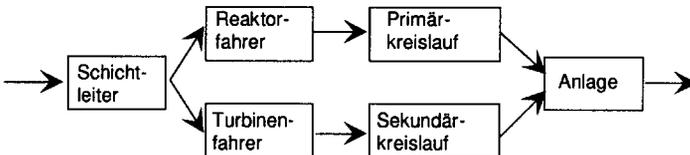


Bild 18 Ein einfaches Arbeitssystem.

Betrachtet man nun die einzelnen Teilfade der Abbildung als einzelne MMS, so erhält man eine Beschreibung des Arbeitssystems, wie es in Bild 19 dargestellt ist.

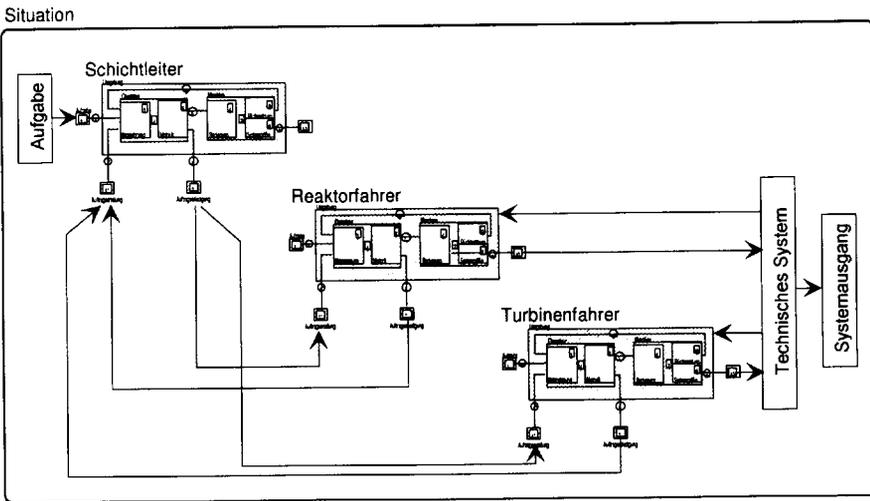


Bild 19 Beschreibung komplexer Ereignisse im Arbeitssystem.

Wie aus der Abbildung ersichtlich, kann ein komplexes Arbeitssystem dadurch beschrieben werden, daß einzelne Mensch-Maschine Systeme genutzt werden, um den Gesamtkomplex des Vorkommnisses in verschiedene Untersysteme aufzuteilen. Insgesamt ergibt sich somit ein Netz verschiedener Teilsysteme, die über die Aufgabenstellung und Aufgabenerledigung miteinander verbunden sind.

3.2 Analyse von Ereignissen

Der vorhergehende Abschnitt stellte ein generisches Modell zur Beschreibung menschlicher Fehler vor. In diesem Abschnitt soll das dort vorgestellte Vorgehen zu einem vollständigen Verfahren für die Analyse von Ereignissen ausgebaut werden. In welchen Schritten Ereignisse aus der Betriebserfahrung bezüglich menschlicher Fehlhandlungen zu erfassen und zu analysieren sind, wurde bereits in Kapitel 1 und 2 angesprochen. Die folgenden Schritte, innerhalb derer das generische MMS als Beschreibungsmodell erforderlich ist, sind zu unterscheiden:

1. Ereignisidentifikation
2. Zerlegung des Handlungsablaufes

3. Analyse des Handlungsablaufes und der Schwachstellen
4. Analyse der kognitiven Belastung und Beanspruchung
5. Analyse der Maßnahmen zur Anlagenoptimierung

3.2.1 Ereignisidentifikation

In der Analyse von Ereignissen besteht zunächst die Schwierigkeit, menschlich und technisch bedingte Ereignisse voneinander abzugrenzen. Eine Abgrenzung ist erforderlich, um diejenigen Fälle identifizieren zu können, bei denen eine Untersuchung menschlicher Fehler notwendig wird. Als Ausgangspunkt für eine Identifikation kann dabei die bereits in Kapitel 1 vorgeschlagene Fehlerdefinition verwendet werden. Wendet man diese auf das generische MMS an, so müssen alle Ereignisse untersucht werden, bei denen ein Fehler im Informationsfluß innerhalb eines MMS identifiziert werden kann.

Gemäß dieser Definition können aufgetretene Ereignisse also dadurch in menschlich und technisch bedingt eingeteilt werden, indem untersucht wird, ob (1) Informationen über ein MMS vorliegen oder nicht, (2) Informationen über Schwachstellen im MMS gefunden werden können oder nicht. Beide Kriterien können identifiziert werden, indem Ereignisse auf Worte hin untersucht werden, die Hinweise auf diese beiden Möglichkeiten geben. In Fall 1 muß danach gesucht werden, ob objektive Information über ein MMS vorhanden ist (z.B. der Begriff 'Anweisung', 'Prüfung', 'Betriebshandbuch' o.ä.). In Fall 2 muß danach gesucht werden, ob es Hinweise für einen Fehler innerhalb einer Komponente des MMS gibt (z.B. die Worte 'falsch erkannt'). Anhang 6 stellt die Begriffe zusammen, die innerhalb dieser Arbeit als Prädiktoren für die Ereignisidentifikation genutzt worden sind. Bei einem Ereignis kann ferner unterschieden werden, ob das technische System fehlerlos oder fehlerhaft gearbeitet hat. Generell ergeben sich damit die Möglichkeiten, die in Tabelle 15 zusammengefaßt sind.

Die Tabelle unterteilt in technisch bedingte Störungen im Betrieb und Störungen aufgrund von Fehlern im MMS. Die folgenden Fallunterscheidungen können getroffen werden:

- **Ein technisches Ereignis (T):** Betriebliche Abläufe oder Störungen, die ohne Einwirkung (oder Verursachung) des Menschen ablaufen (Fall 1 und 2). Sie werden irgendwann entdeckt und behoben.

- **Ein Human-Factor relevantes Ereignis (HR):** Betriebliche Abläufe oder Störungen, bei denen der Mensch in irgendeiner Form erfolgreich (Fall 3 und 4) in das Geschehen eingreift. Diese sollen im folgenden als HR-Ereignisse bezeichnet werden.
- **Ein Human-Factor Ereignis (HF):** Störungen, bei denen ein MMS Urheber ist (Fall 5) oder durch ein MMS ein fehlerhafter Eingriff in ein bereits fehlerhaftes technisches System vorgenommen wurde (Fall 6). Diese sollen im folgenden HF-Ereignisse genannt werden.

Tabelle 15 Zustände im betrieblichen Ablauf.

<i>Verhalten vom technischen System Mensch-Maschine System (MMS)</i>	<i>fehlerlos</i>	<i>fehlerhaft</i>
<i>Keine Information über ein MMS</i>	1 Normaler Betrieb innerhalb der Automatik	2 Technisches Ereignis, das die Automatik abfängt
<i>keine Schwachstelle im MMS</i>	3 Normaler Betrieb bei Handmaßnahmen	4 Mensch behandelt Störfall bestimmungsgemäß
<i>Schwachstelle im MMS</i>	5 Auslösendes Ereignis durch MMS initiiert	6 Ereignis nach Störungseintritt durch MMS initiiert

Obwohl in dieser Arbeit schwerpunktmäßig HF-Ereignisse ausgewertet werden, sollte bedacht werden, daß HR-Ereignisse auch eine wichtige Bedeutung für die Beurteilung menschlicher Zuverlässigkeit haben, denn HR-Ereignisse spiegeln die Leistungsfähigkeit des Menschen wider, auch in zum Teil sehr komplexen Situationen mit hohen Anforderungen richtig und fehlerfrei zu handeln. HF-Ereignisse beziehen sich demgegenüber nur auf das fehlerhafte Verhalten innerhalb einer Ereigniskette und damit auf die Schwierigkeit, eine Situation zu bewältigen. Ferner sollte erwähnt werden, daß Handlungen, die dem Fall 1 und 3 entsprechen, prinzipiell nur unvollständig erfaßt werden können, da diese keinen Anlaß für eine Ereignismeldung geben. Demgegenüber sind die Fälle 2, 4, 5 und 6 immer erfaßbar, wenn sie oberhalb einer bestimmten Meldeschwelle liegen. Die Höhe der Meldeschwelle ist dabei davon abhängig, welcher Organisation das Ereignis gemeldet wird (Anlage, Betreiber, Aufsichtsbehörde).

3.2.2 Zerlegung eines Ereignisses für Analysen

Wurde ein HF-Ereignis identifiziert, so müssen die für die Fehlerkette bedeutenden MMS herausgearbeitet werden oder mit anderen Worten das im Ereignis zu beobachtende Arbeitssystem aufgebaut werden. Dazu können generische MMS baukastenartig

zu einem komplexen Ereignisablauf zusammengebaut werden, indem sie durch die MMS-Komponenten Auftragserteilung und Auftragserledigung miteinander in Beziehung gesetzt werden. Ein Ereignis kann dabei nach folgenden Gesichtspunkten in verschiedene einzelne MMS zerlegt werden:

- **Phasen des Ereignisablaufs:** Die Phasen des Ereignisablaufs sind von besonderer Wichtigkeit für das Verständnis über die Fehlerkette. Im Kapitel 2 wurden die Handlungsbereiche A, B, C vorgestellt. Diese können genutzt werden, um die Ereignisphasen zu beschreiben und ein Ereignis in situationsbezogene Sinneinheiten zu unterteilen. Typ A Handlungen sind alle Handlungen vor Eintritt einer Störung, unter Typ B Handlungen sind ereignisauslösende Handlungen der Operateure zu verstehen, Typ C Handlungen sind alle Handlungen nach Eintritt einer Störung.
- **Beteiligte Personen:** Eine weitere markante Unterteilung von Ereignissen in einzelne MMS ist immer durch die beteiligten Personen möglich, da diese meist unterschiedliche Teilaufgaben zu bewältigen haben. Beteiligte Personen können nach den betrieblichen Bereichen eingeteilt werden, denen sie, angelehnt an DIN 31051, DIN 32541, DIN 55350 und KTA 3501, zugeordnet werden können:
 - Herstellung:** Die Herstellung umfaßt die Erstellung und Neuerstellung eines Sollzustandes und bezieht sich damit auf das technische Design und die Konstruktion der Anlage. Fehler bei der Herstellung führen meist zu latenten Auslegungsfehlern.
 - Instandsetzung:** Die Instandhaltung umfaßt alle Arbeiten zur Wartung, Inspektion und Instandsetzung. Wartungstätigkeiten können in der Anlage sofort (aktive Fehler) oder später (latente Fehler) zu einem Ereignis führen.
 - Nutzung:** Die Nutzung umfaßt die bestimmungsgemäße Verwendung einer Betrachtungseinheit oder Tätigkeiten zur Kompensation eines Mangels. Fehler bei der Nutzung können (1) ein Ereignis auslösen oder (2) bei bereits fehlerhaftem Systemzustand den Störungsablauf verändern.
- **Handlungsort:** Ein zusätzliches Merkmal zur Einteilung der MMS stellt der Ort dar, an dem die Person tätig ist. Typische Einteilungen sind Vor-Ort, Warte oder örtlicher Leitstand.

Die gesamte Fehlersituation ist durch alle Informationen innerhalb des gesamten Ereignisablaufes charakterisiert. Insgesamt betrachtet kann die Fehlersituation komplexer Ereignisse als Kombination verschiedener MMS dargestellt werden. Bild 20 zeigt beispielhaft die Sequenz eines hypothetischen Beispiels (vgl. auch Anhang 3).

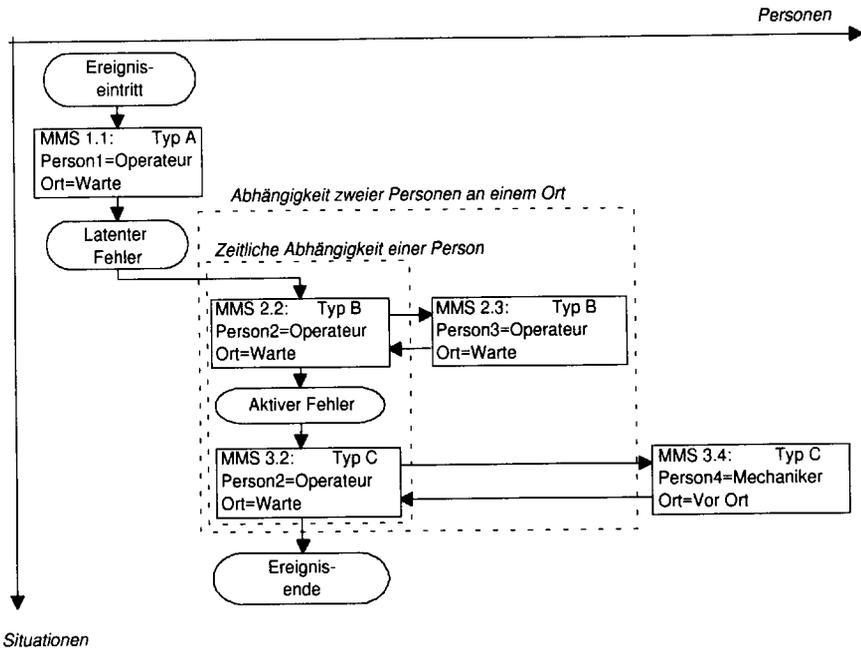


Bild 20 Ereigniszerlegung und Beispiele für Abhängigkeiten verschiedener MMS.

Die im Bild dargestellte Ereigniszerlegung repräsentiert eine Aufgabenanalyse, welche die Flußdiagramm-Technik, wie sie in Bubb (1993) dargestellt ist, mit einer Zeitverlaufsanalyse ("time line analysis" nach Meister, 1985) kombiniert. Personen, Orte und Ereignisphasen sind die Faktoren, nach denen eine Ereigniszerlegung geschehen kann. Die Darstellung hat darüber hinaus den Vorteil, daß die Ereigniszerlegung auch dazu genutzt werden kann, um Abhängigkeiten zwischen verschiedenen MMS darzustellen. Abhängigkeiten müssen u.a. für PSA-Analysen betrachtet werden (z.B. Abhängigkeiten von Personen oder Wirksamkeit des "4-Augen Prinzips"). In der Abbildung sind zwei mögliche Abhängigkeiten beispielhaft eingezeichnet, auf die weiter unten genauer eingegangen wird.

3.2.3 Analyse des Handlungsablaufes

Nachdem das Ereignis in einzelne MMS zerlegt worden ist, erfolgt eine Detailanalyse der einzelnen MMS so, wie es bereits bei der Beschreibung des generischen MMS dargestellt wurde. Dieses Vorgehen soll nun in eine formalisierte Anordnung gebracht werden. Zur Formalisierung muß festgelegt werden, wie eine Beschreibung der Fehler

und Fehlerbedingungen vorzunehmen ist. Dazu veranschaulicht Bild 21 zunächst die allgemeine Definition eines Fehlers als Abweichung des Ist-Wertes vom Sollzustand über eine Toleranzschwelle hinaus (vgl. Bubb, 1992).

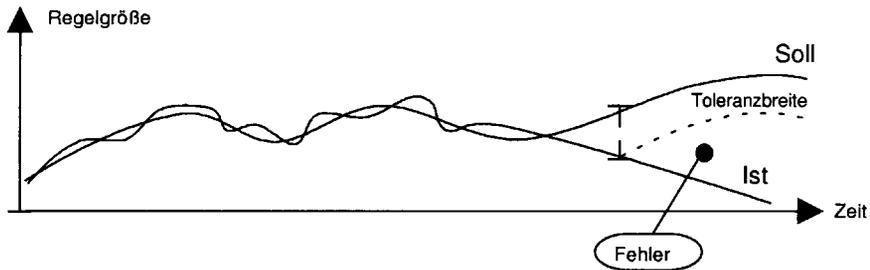


Bild 21 Veranschaulichung der allgemeinen Definition eines Fehlers.

Eine fehlerhafte Abweichung kann auf zwei Arten beschrieben werden: Über die bestimmenden Begriffe der Fehlerdefinition oder durch eine vektorielle Notation. Bild 22 stellt beide Beschreibungsmöglichkeiten gegenüber. Es kann festgehalten werden, daß die vektorielle Notation dieselbe Information beinhaltet wie die Notation über die Fehlerdefinition; sie erspart aber Beschreibungsaufwand.

Zur effizienteren Beschreibung wird ein Erfassungsschema gewählt, welches die vektorielle Notation benutzt. Die Notation besteht nach Bild 22 dabei aus drei Stufen: der Angabe eines Objektes ("Ventil"), der Angabe einer Aktion ("öffnen") und der Angabe eines Fehlers ("zu viel"). Ferner können Detailinformationen in einer weiteren Spalte als Attribut bzw. Element des Objektes oder der Angabe ergänzt werden ("um 50%").

Die Attribut- bzw. Element-Spalte dient auch dazu, eine Ereignisbeschreibung auf einem beliebigen Detaillierungsniveau durchführen zu können. Ober-/Unterbegriff-Strukturen, wie sie für eine detaillierte Auswertung der Ereignisse erforderlich sind, können auf diese Art und Weise abgebildet werden. Typische Beispiele sind "Ventil - motorbetriebenes Ventil" oder "Anweisung - Betriebshandbuch (BHB)". Um auch Fehlerbedingungen (PSF) abzubilden, können diese Beschreibungsstufen um eine fünfte Stufe ergänzt werden. Auch für die PSF kann die Element-Spalte dann zur detaillierten Beschreibung der Eigenschaften oder Fehlerbedingungen genutzt werden. Wie bereits in Kapitel 2 beschrieben, ist dies besonders wichtig für die Ereignisanalyse, da ein breites Spektrum an ergonomischem Wissen auf beliebigem Detaillierungsniveau für die Er-

eignisanalyse relevant sein kann und dementsprechend für die Analyse bereitgestellt werden sollte.

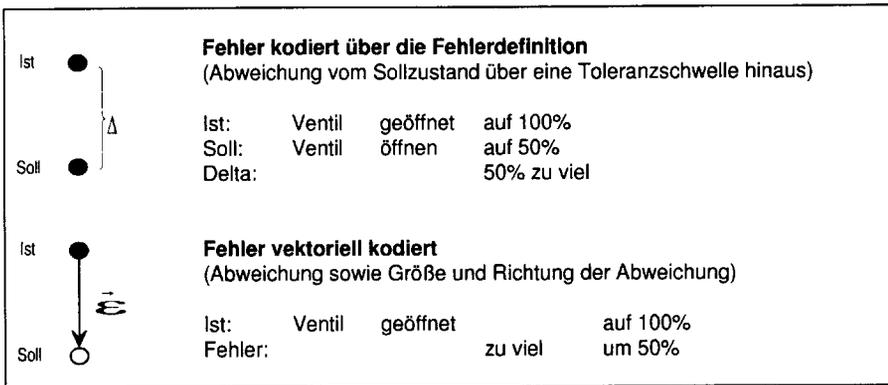


Bild 22 Beschreibung von Fehlern als Ist-Soll Abweichung oder in vektorieller Notation.

Durch dieses Vorgehen wird eine semantische Analyse eines Ereignisses vorgenommen wie sie in Tabelle 16 dargestellt ist. Die Tabelle zeigt einen Ausschnitt der Beschreibungstabelle für die MMS-Komponenten 'Aufgabe', 'Person', 'Tätigkeit' und 'Rückmeldung'. Anhand des Beispiels "Ventil öffnen" wird demonstriert, wie eine Fehlerbeschreibung erfolgen kann. Wie ein komplexes reales Ereignis in der Beschreibungstabelle dargestellt wird, ist in Anhang 3 dargestellt.

Im einzelnen können die Zeilen in der Tabelle folgendermaßen erklärt werden: In Zeile 0 stehen vorhergehende Informationen zu einer anderen Komponente des MMS. In Zeile 1 beginnt mit dem Satzanfängszeichen ("Satz 1") eine neue Sinneinheit. Die Bildung von Sinneinheiten ist notwendig, um eine eindeutige Zuordnung von Objekten, Aktionen, Fehlern und Einflußfaktoren in der Datenstruktur abzubilden (analog zum Punkt in der natürlichen Sprache). In der Sinneinheit wird zunächst die Objektstruktur aufgebaut (Oberbegriff: Ventil, Unterbegriff: Typ X). Beide sind mit der MMS-Komponente "Aufgabe" verbunden. In Zeile 2 erfolgt mit der Angabe eines Verbs eine Beschreibung der Aktion, die an dem Objekt 'Ventil' ausgeübt wird, und anschließend eine Fehlerlokalisierung. Ein Fehler wird dabei in der oben dargestellten vektoriellen Notation abgebildet. Konnte ein Fehler identifiziert werden, so können in einem weiteren Schritt Einflußfaktoren gesucht werden, die diesen Fehler bedingt haben. In der Tabelle wurde beispielsweise der Einflußfaktor 'Zeitdruck' für den Unterlassungsfehler angegeben. Damit beschreiben z.B. Zeile 1 und 2 den Umstand, daß das Öffnen eines

Ventils vom Typ X unter Zeitdruck unterlassen wurde. Auch können in einem MMS sowohl mehrere Fehlerarten als auch mehrere Einflußfaktoren angegeben werden; z.B. wurde in der Tabelle ein Unterlassungsfehler und ein Einstellungsfehler mit den Einflußfaktoren 'Beschriftung' mit dem Unterfaktor 'unzureichende Lesbarkeit' sowie 'Zeitdruck' beobachtet.

Tabelle 16 Darstellung der Möglichkeiten zur Fehlerbeschreibung anhand eines hypothetischen Beispiels.

<i>Zeile</i>	<i>Komponente</i>	<i>Satz</i>	<i>Objekt</i>	<i>Aktion (Verbal)</i>	<i>Angabe (Fehler)</i>	<i>Eigenschaft (PSF)</i>	<i>Element (Unterbegriff)</i>
0	:						
1	Aufgabe	Satz 1	Ventil				Typ X
2	"	"	"	öffnen	unterlassen	Zeitdruck	hoch
3	Person	Satz 2	Wartpersonal				
4	Tätigkeit	Satz 3	Ventil				Regler
5	"	"	"	geöffnet			
6	"	"	Regler	eingestellt	zu viel		
7	"	"	"			Beschriftung	Lesbarkeit
8	"	"	"			Beschriftung	unzureichend
9	"	"	"			Lesbarkeit	schlecht
10	Rückmeldung	Satz 4	Meldung				Stellungsmeldung
11	"	"	Stellungsmeldung	erkennen			
12	"	Satz 5	Anzeige				Manometer
13	"	"	Manometer	ablesen			
14	:						

Zeile 4 und 6 sowie 7 und 9 zeigen auch, wie die Begriffe in den Spalten (Objekt, Aktion, Angabe, Eigenschaft, Element) bis zu einem beliebigen Auflösungsgrad differenziert werden können, indem ein Unterbegriff in der Element-Spalte des Oberbegriffes angegeben wird und der Unterbegriff in einer darauffolgenden Zeile desselben Satzes in der Objekt- bzw. Eigenschafts-Spalte wieder aufgenommen wird. Insgesamt beinhaltet der hypothetische Satz 1 in der Tabelle also dieselbe Information wie ein Fließtext der Form: "Das Öffnen des Ventils Typ X wurde aufgrund von Zeitdruck unterlas-

sen. Ferner wurde beim Öffnen eines weiteren Ventils der Regler zu hoch eingestellt. Bei der Untersuchung des Fehlers stellte sich heraus, daß die Beschriftung schlecht lesbar war."

Der Aufbau der Beschreibungstabelle geschieht implikativ. Das heißt, daß nur dann eine Aktion angegeben werden darf, wenn ein Objekt angegeben wurde. Gleiches gilt für die Angabe eines Fehlers, der die Angabe einer Aktion erfordert. Fehlerbedingungen können schließlich nur dann angegeben werden, wenn ein Fehler identifiziert wurde. Insgesamt gesehen wird die Tabellenstruktur dabei von links nach rechts aufgebaut. In der Beschreibungstabelle repräsentiert damit jedes leere Tabellenfeld eine Frage, die durch die Analyse des Ereignisses beantwortet werden muß.

Damit bei der Erfassung auch alle relevanten Faktoren identifiziert werden und ein Ereignis daraufhin untersucht wird, ob diese in dem Ereignis eine Rolle gespielt haben, muß zur Beantwortung der durch die Tabellenstruktur gestellten Fragen eine komplexe Taxonomie zur Verfügung gestellt werden. Taxonomien sind auch erforderlich, um über eine einheitliche Sprache für die Erfassung, Analyse und Beurteilung von Fällen die Auswertbarkeit der Ereignisse sicherzustellen. Dabei kann unterschieden werden in die Situation beschreibende Begriffe (Objekt- und Aktionstaxonomien), den Fehler beschreibende Begriffe (Fehlertaxonomien) und die Ursache bzw. die leistungsbeeinflussenden Faktoren beschreibende Begriffe (Ursachentaxonomien). Diese Taxonomien müssen auch durch neue Begriffe erweiterbar sein, um die Variabilität der Ereignisse berücksichtigen zu können. Innerhalb des generischen MMS können aufgrund des strukturierten Vorgehens alle genannten Arten von Taxonomien berücksichtigt werden, indem folgende Taxonomien aufgeteilt auf die MMS-Komponenten und die Beschreibungsstufen bereitgestellt werden:

- Eine Gegenstands-Taxonomie für die Objekt-Spalte
- Eine Handlungs-Taxonomie für die Aktions-Spalte
- Eine Fehler-Taxonomie für die Angaben-Spalte
- Eine Ursachen-Taxonomie für die Eigenschafts-Spalte

Die Taxonomien können zusätzlich bezogen auf die MMS-Komponenten untergliedert werden (z.B. Ursachen bezogen auf die Aufgabe oder Tätigkeit etc.). Taxonomien, die in der Literatur zu finden sind, wurden auf die Komponenten des MMS aufgeteilt (Anhang 2). Durch die Strukturierung der PSF gemäß den MMS-Komponenten erlaubt das Beschreibungsmodell, alle Arten von Taxonomien und damit einen weiten Bereich

möglicher Einflußfaktoren zu berücksichtigen. Wie ein Vergleich der verschiedenen Quellen ferner zeigt, sind die Begriffe, die in Taxonomien verwendet werden, stark mit dem Ziel der Fragestellung bei der Ursachenanalyse verbunden. In den westlichen Industriestaaten werden hauptsächlich kognitive, organisatorische und systemergonomische Fehlerursachen untersucht (z.B. Bubb, 1992; Cacciabue, 1992; Embrey, 1992; Modarres et al., 1992; Fujita, 1992). Diese sind insbesondere auf aktuelle Untersuchungen und Fragestellungen ausgerichtet (z.B. Nicht-Vollast Zustände, Wartungsfehler). In osteuropäischen Taxonomien herrschen dagegen klassische ergonomische Fehlerbedingungen vor (vgl. GosAtomNadzor, 1992).

3.2.4 Analyse der kognitiven Belastung und Beanspruchung

In Kapitel 1 wurde mit dem systemergonomischen Ansatz eine Taxonomie zur Beschreibung der kognitiven Belastung gefunden. Weiterhin wurde eine einfache Taxonomie für die Beschreibung der kognitiven Beanspruchung aufgestellt. Die kognitive Beanspruchung wird im Beschreibungsmodell durch einzelne Fehlerbedingungen bzw. Einflußfaktoren modelliert, die der MMS-Komponente 'Person' zugeordnet sind. Diese Faktoren sind bereits in Kapitel 1 herausgearbeitet worden: Information bzw. Wissen, Verarbeitung und Zielreduktion.

Zur Beschreibung der kognitiven Belastung, die innerhalb eines MMS vorherrscht, wird die systemergonomische Taxonomie genutzt. Die kognitive Belastung wird einem MMS zugeordnet und innerhalb der Ereignisbeschreibung gesondert für jedes identifizierte MMS angegeben. Bei der Anwendung der Systemergonomie auf die einzelnen MMS des Ereignisses kann gemäß der Konventionen vorgegangen werden, die in Tabelle 17 dargestellt sind. Kognitiv belastendere systemergonomische Ausprägungen sind in der Tabelle mit "(+)" gekennzeichnet.

Im Gegensatz zu der in Tabelle 7 (Kapitel 1) vorgenommenen systemergonomischen Einteilung ist in Tabelle 17 der kognitiv belastende Faktor 'Rückmeldung' nicht mehr aufgeführt, da er bereits explizit in der Struktur des generischen MMS enthalten ist.

Tabelle 17 Regeln zur systemergonomischen Klassifikation kognitiver Belastung.

<i>Systemergonomischer Aspekt</i>	<i>Ausprägung (Belastung)</i>	<i>MMS Merkmal</i>
Bedienung	Simultan (+)	Die Sätze zur Beschreibung der Aufgaben und Tätigkeiten sind unabhängig voneinander zu bearbeitende Einheiten.
	Sequentiell	Die Sätze zur Beschreibung der Aufgaben und Tätigkeiten bauen aufeinander auf.
Dimensionalität	Mehrdimensional (+)	Im MMS werden mehrere Systemparameter genannt.
	Eindimensional	Im MMS wird ein Systemverhalten genannt.
Führungsart	Dynamisch (+)	Aufgabe und Rückmeldung im MMS bilden einen geschlossenen Regelkreis (closed loop) mit begrenztem Zeitfenster.
	Statisch	Aufgabe und Rückmeldung im MMS stellen einen offenen Regelkreis (open loop) ohne zeitliche Begrenzung dar.
Darstellungsart	Kompensation (+)	Es wird nur die Abweichung von Zielzustand (Aufgabe) und Ist-Zustand (Rückmeldung) dargeboten.
	Folge	Zielzustand (Aufgabe) und Ist-Zustand (Rückmeldung) werden nebeneinander dem Menschen dargeboten.
Aufgabenart	Monitiv (+)	Im MMS wird keine Tätigkeit genannt.
	Aktiv	Im MMS werden Tätigkeiten genannt.
Kompatibilität	Innere (+)	Der Zusammenhang zwischen Informationen auf der Eingabe-seite des Menschen muß von der Person selbst hergestellt werden.
	Äußere	Der Zusammenhang zwischen Informationen auf der Eingabe-seite des Menschen wird durch die äußere Darstellung hergestellt.

3.2.5 Aspekte hinsichtlich der Anlagentoptimierung

Die Untersuchungen zu den Verfahren der Ereignisauswertung (Kapitel 2), insbesondere zum ASSET-Verfahren, machten zusätzlich zu der bisher angesprochenen Vorgehensweise deutlich, daß eine Einschätzung der Wirksamkeit von Vorkehrungsmaßnahmen erforderlich wird. Um auch diesen Aspekt zu berücksichtigen, können in einem abschließenden Schritt der Ereignisanalyse getroffene Vorkehrungen bzw. durchgeführte Verbesserungsmaßnahmen in das Beschreibungsmodell aufgenommen werden, indem sie an die Beschreibungstabelle angehängt werden. Auch die Beschreibung der Vorkehrungen kann mit Hilfe der Beschreibungsstufen Objekt-Aktion-Angabe-Eigenschaft-Element vorgenommen werden. Typische Verbesserungen sind in Tabelle 18 dargestellt. Auch hier können aufgrund der Benutzung von Sätzen mehrere Vorkehrungen zu einem Ereignis genannt werden.

Tabelle 18 Beschreibung von Verbesserungen im Beschreibungsmodell.

<i>Komponente</i>	<i>Satz</i>	<i>Objekt</i>	<i>Aktion (Verbal)</i>	<i>Angabe (Fehler)</i>	<i>Eigenschaft (PSF)</i>	<i>Element (Unterbegriff)</i>
Vorkehrung	Satz 1	Personal	schulen			
"	Satz 2	Ventil				Kennzeichnung
"	"	Kennzeichnung	verbessern			

3.3 Fehlerarten und Fehlerbedingungen im Beschreibungsmodell

Im vorhergehenden Abschnitt wurde dargestellt, wie vorzugehen ist, um mit dem generischen MMS ein Ereignis zu analysieren. Gemäß eines alten Grundsatzes der Physik, daß ein neues Modell oder Verfahren mindestens denselben Erklärungswert haben muß wie vorangegangene Modelle und in der Lage sein muß, dieselben Beobachtungen zu erklären, soll dieser Abschnitt die Leistungen und Möglichkeiten des Beschreibungsmodells zusammenfassen. Diese sollten denjenigen der in Kapitel 1 und 2 angesprochenen Fehlermodelle und Beurteilungsverfahren entsprechen. In diesem Abschnitt werden dazu drei Fragen beantwortet:

1. Welche Fehlerarten und Fehlerbedingungen sind aus dem Beschreibungsmodell ableitbar?
2. Wie entsprechen sie den Fehlerarten der in der Literatur genannten Modelle?
3. Wie kann das Beschreibungsmodell zur Bewertung menschlicher Handlungen genutzt werden?

3.3.1 Fehlerbeschreibungen innerhalb des Modells

Die zu unterscheidenden Fehlerbeschreibungen basieren darauf, daß es immer dann zu einem fehlerhaften Systemausgang im MMS und damit zu einem beobachtbaren Fehler im Arbeitssystem kommt, wenn eine Schwachstelle innerhalb des MMS zu beobachten ist, die zu Konsequenzen am Systemausgang führt. Die Fehlerbeschreibungen können demzufolge in zwei Arten unterteilt werden: (1) Fehlerbedingungen, die sich aus dem Informationsfluß innerhalb des MMS ergeben (z.B. falsches Einstellen eines Ventils aufgrund fehlender Rückmeldung). In diesem Fall handelt es sich bei dem menschlichen Fehler um einen Folgefehler aus einer Schwachstelle innerhalb des

MMS, die auf den Menschen einwirkt. Direkte Einwirkungen auf den Menschen sind durch die Aufgabe, die Auftragserteilung und Rückmeldung möglich. Indirekte Einwirkungen sind Bedienung, System sowie Umgebung, Organisation und Situation. Folgefehler werden innerhalb der Beschreibungstabelle abgebildet, indem in der Spalte 'Angabe' ein Fehler vermerkt wird. (2) Fehlerbedingungen, die bei einem identifizierten Fehler vorherrschen (z.B. schlechte Gestaltung einer Prozedur). Diese werden in der Spalte 'Eigenschaften' innerhalb der Beschreibungstabelle abgebildet. Fehlerbedingungen sind notwendige Bedingungen für eine Schwachstelle im MMS und weisen auf Verbesserungsmöglichkeiten bezüglich dieser Komponente hin.

Insgesamt ergeben sich dadurch verschiedene Möglichkeiten der Fehlerbeschreibung innerhalb des Beschreibungsmodells. Sie können gemäß der in Kapitel 1 vorgenommenen Einteilung als phänomenologische, kausale und aktionale Fehlerbeschreibungen bezeichnet werden:

- Phänomenologische Fehlerbeschreibungen (Schwachstellen im MMS): Dies sind alle Fehler, die innerhalb der einzelnen Komponenten des MMS identifiziert werden können.
- Kausale Fehlerbeschreibung (Folgefehler im MMS): Dies sind alle Fehlerbedingungen, die innerhalb des Informationsflusses im MMS begründet sind und Wirkungszusammenhänge zwischen verschiedenen MMS-Komponenten abbilden.
- Aktionale Fehlerbeschreibung (Einflußfaktoren - PSF): Dies sind alle Fehlerbedingungen, die als Eigenschaften innerhalb eines MMS angegeben werden können.

• **Phänomenologische Fehlerbeschreibung**

Ein Fehler in einem MMS ist immer dann möglich, wenn eine MMS-Komponente fehlerhaft ist. Die folgenden Fehlerzustände können unterschieden werden:

- Unterlassung (Omission): Fehler aufgrund des Auslassens einer Handlung können nur dann auftreten, falls eine Aufgabe ansteht, aber nicht durchgeführt wird. Eine Unterlassung ist somit der Eingabeseite des Menschen im MMS zuzuordnen (Aufgabe, Auftragserteilung, Rückmeldung).
- Fehlerhafte Handlungsausführung (Commission): Fehler aufgrund einer falschen Handlung können nur dann auftreten, falls eine Tätigkeit nicht zur Erfüllung einer gestellten Aufgabe diente. Eine fehlerhafte Handlungsausführung ist somit der Ausgabeseite des Menschen im MMS zuzuordnen (Tätigkeit, Auftragserledigung).

- **Menschlicher Fehler:** Ein menschlicher Fehler liegt vor, wenn alle Informationen innerhalb der übrigen Komponenten des MMS fehlerfrei zur Verfügung stehen.
- **Menschlicher Irrtum:** Ein Mensch befindet sich im Irrtum, wenn die fehlerhafte menschliche Handlung durch andere Komponenten im MMS bedingt ist.

Neben diesen Grundfehlertypen können die folgenden weiteren Fehlertypen aus den Grundfehlertypen abgeleitet werden:

- **Verwechslungsfehler:** Ein Verwechslungsfehler ist gegeben, wenn innerhalb eines MMS eine Aufgabe unterlassen und an deren Stelle fälschlicherweise eine andere Tätigkeit ausgeführt wird (z.B. Soll: Ventil A öffnen; Ist: Ventil A öffnen unterlassen und Ventil B öffnen falsch).
- **Sequenzfehler:** Ein Sequenzfehler (Reihenfolgefehler) ist gegeben, wenn innerhalb eines MMS eine Tätigkeit zu früh und eine andere Tätigkeit zu spät durchgeführt wurde (z.B. Soll: Erst Ventil A öffnen, dann Ventil B; Ist: Ventil B geöffnet zu früh und Ventil A geöffnet zu spät).

- **Kausale Fehlerbeschreibung**

Eine weitere Fehlermöglichkeit besteht darin, daß der Informationsfluß innerhalb des MMS gestört ist. Typische Beispiele sind Fehler in der Aufgabenstellung, die zu kognitiven Fehlern (z.B. Mißverstehen) oder zu Handlungsfehlern (z.B. Einstellen eines zu hohen Wertes) führen. Diese kausalen Fehlerbeschreibungen ergeben sich durch die Wirkungszusammenhänge zwischen den Komponenten des MMS bzw. durch die Informationsflüsse im MMS. In Bild 16 sind diese als Pfeile zwischen den einzelnen Komponenten des MMS gekennzeichnet. Der menschliche Fehler ist bei einer kausalen Fehlerbeschreibung immer als Folgefehler von anderen Fehlern im MMS zu sehen.

Ist beispielsweise eine Anzeige funktional schlecht gruppiert, führt diese Verletzung ergonomischer Regeln zu einem Fehler in der Rückmeldung, welcher sich für den Menschen in einer schlechten Erkennbarkeit des Systemzustandes äußert. Der Fehler bezieht sich damit auf die Rückmeldestrecke im MMS. Durch diesen kausalen PSF 'Rückmeldung fehlerhaft' ergibt sich dann beispielsweise ein Unterlassungsfehler der Person (z.B. Pumpe nicht gestartet). Somit ist der menschliche Fehler ein Folgefehler aus den Wirkungszusammenhängen im MMS und nicht durch den Menschen ursächlich bedingt. Insbesondere ergeben sich die folgenden Einteilungen:

- **Aufgabenfehler.** Aufgabenfehler liegen vor, wenn Fehler in der Aufgabenstellung (z.B. unpräzise Aufgabe) oder Fehler im Aufgabeninhalt vorliegen (z.B. schlechte zeitliche Organisation des Ablaufes der Teilaufgaben). Aufgabenfehler können immer auch organisatorischer Natur sein (z.B. fehlerhafte Auftragserteilung durch fehlerhaftes schriftliches Material).
- **Ausführungsfehler.** Fehler, die durch eine fehlerhafte menschliche Handlung eingeleitet worden sind. Im MMS sind "reine", d.h. ausschließlich auf den Menschen bezogene Ausführungsfehler nur dann gegeben, wenn ausschließlich Wahrnehmungsfehler des Ist-Zustandes, Fehler in der Informationsverarbeitung oder Handlungsfehler beobachtbar waren, ohne daß weitere Fehler im MMS identifiziert worden sind. Auch Ausführungsfehler können organisatorischer Natur sein (z.B. fehlerhafte Auftrags erledigung aufgrund fehlender Kommunikationsmittel).
- **Ergonomische Fehler.** Unter ergonomischen Fehlern sind all die Fehler zu fassen, die durch mangelndes Design der Arbeitsmittel (Bedienung und Rückmeldung) geschehen sind. Sie sind durch Fehler in der Gestaltung oder Anordnung von Bedienelementen, Fehler bei der Systemrückmeldung (z.B. Fehlanzeige eines Display) oder Fehler in der Signalübermittlung (der Rückmeldung) gekennzeichnet.
- **Systemergonomische Fehler.** Zusätzlich können aus der Sicht der Systemergonomie Fehler in der Auslegung des technischen Systems bestehen. Faktoren, die zu einem Fehlverhalten des Menschen führen können, sind u.a. die Dynamik des Systems, die Kompatibilität von Handlung und Rückmeldung, die Dimensionalität des Systems oder die Art der Bedienung. Typische Beispiele für Fehler mit systemergonomischer Bedeutung sind Kopplungen und Vermaschungen des technischen Systems in einer Fehlerkette, die dazu führen, daß eine eindimensionale, sequentiell zu bedienende Aufgabe zu einer mehrdimensionalen, simultan zu bedienenden Aufgabe wird. Damit berücksichtigt die Systemergonomie auch die Anforderungen an den Menschen, die durch das dynamische Verhalten eines technischen Systems zustande kommen.
- **Fehler bei bestimmten situativen Bedingungen oder Umgebungsbedingungen.** Unter Fehlern durch mangelnde Gestaltung der Umgebung sind klassische leistungsbeeinflussende Faktoren zu verstehen (Lichtgebung, Temperatur, Akustik etc.). Unter situativen Gegebenheiten werden alle Faktoren gefaßt, welche vom übergreifenden Aspekt her für die Entstehung der Fehlerkette von Bedeutung sein könnten (z.B. ist ein und derselbe menschliche Eingriff, wie beispielsweise das Öffnen von Ventil A, unter An- und Abfahrbedingungen anders einzuordnen als bei Vollastbetrieb).

Durch die kausale Fehlerbeschreibung werden die gefundenen Schwachstellen im MMS differenzierter betrachtet. Dadurch können mögliche Ansatzpunkte für Verbesserungen bei menschlichen Fehlern dadurch gefunden werden, daß man die jeweilige ergonomische Bedeutung der betroffenen Komponente im MMS untersucht. Das folgende Beispiel soll diesen Erklärungswert der kausalen Fehlerbeschreibung erläutern: Wird ein Signal, welches akustisch und optisch auf einen gestörten Betriebszustand hinweist, unter Lärmbedingungen nicht erkannt, so ergeben sich über die Betrachtung dieses Ereignisses im MMS die folgenden Schwachstellen und Verbesserungsmöglichkeiten, je nachdem, ob man den Menschen als notwendige (aber nicht hinreichende) Bedingung betrachtet:

- Wahrnehmung (unterlassen) \Rightarrow Wahrnehmungsverstärkung: Die aus ergonomischer Sicht abwegigste Verbesserungsmöglichkeit ist eine Trainingsmaßnahme, um den Operateur darauf hinzuweisen, daß er in bestimmten Situationen und in regelmäßigen Abständen die optische Signalisierung zu kontrollieren hat.
- Unzureichende Rückmeldung (zu wenig) \Rightarrow Displayverstärkung: Die Signalgebung kann so verbessert werden, daß das Signal gehört werden kann.
- Störende Umgebungseinflüsse (zu viel) \Rightarrow Verbesserung des Signalfusses: Eine andere Maßnahme wäre, den Signalfuß zu verbessern, indem störende Umgebungseinflüsse (störende Schallquellen) gedämmt werden.

Aus dem Beispiel ist ersichtlich, daß allein durch die Betrachtung der Schwachstellen im MMS mögliche Verbesserungsmaßnahmen zusammengestellt werden können. Der Wirkungsgrad der Verbesserungsmaßnahmen ist jedoch von Fall zu Fall abzuschätzen. Bei Fehlern des Menschen sind gezielte Trainingsmaßnahmen denkbar, bei mangelnder ergonomischer Gestaltung der Rückmeldung sollten bauliche Maßnahmen durchgeführt werden. So sind im obigen Beispiel zwar prinzipiell Schulungsmaßnahmen bei mangelnder ergonomischer Gestaltung denkbar. Der Wirkungsgrad wäre jedoch geringer als bei baulichen Maßnahmen und die Wahrscheinlichkeit eines erneuten Auftretens des Fehlerereignisses höher.

Welche Abhilfemaßnahmen durchgeführt werden sollten, kann bestimmt werden, indem das Fehlverhalten der gefundenen Schwachstellen im MMS genauer analysiert wird. Hierzu müssen die beteiligten Faktoren, die zum Fehlverhalten der Komponente des MMS geführt haben, in einer aktionalen Fehlerbeschreibung genauer untersucht werden.

- **Aktionale Fehlerbeschreibung**

In einer aktionalen Fehlerbeschreibung werden Fehlerbedingungen (PSF) für einen Fehler einer Komponente im MMS angegeben. In der Literatur werden diese Fehlerbedingungen meist in innere und äußere PSF eingeteilt (vgl. Swain & Guttmann, 1983). Nach Bubb (1992) ist diese Einteilung identisch mit dem Belastungs-/Beanspruchungskonzept, da die äußeren Einflußfaktoren der Belastung und die inneren der Beanspruchung des Menschen zugeschrieben werden. Die Einteilung in innere und äußere PSF kann auch über die MMS-Komponenten vorgenommen werden; das MMS nimmt jedoch eine differenziertere Betrachtung vor, da die äußeren Einflußfaktoren bezogen auf die MMS-Komponenten unterteilt werden. Damit können bezüglich der aktionalen Fehlerbedingungen die in Bild 17 und Anhang 2 dargestellten PSF von Bedeutung sein, insbesondere aber die folgenden.

- MMS-Komponente Aufgabe: Komplexität und Zeitbedarf der Aufgabe (z.B. Verflechtung von verschiedenen Maßnahmen bzw. Abhängigkeiten zwischen Wirksamkeiten von Maßnahmen).
- MMS-Komponente Operateur: Informationsverarbeitung des Operateurs, die durch das Wissen der Operateure über den Systemzustand und durch Ziele möglicher Maßnahmen beeinflusst wird.
- MMS-Komponente Tätigkeit und Bedienung: Vielfalt der durchzuführenden Maßnahmen sowie der Zeitbedarf für die Maßnahmen. Schwierigkeit der Durchführung der Tätigkeiten in der Warte oder vor Ort und ergonomische Gestaltung der erforderlichen Hilfsmittel.
- MMS-Komponente Rückmeldung und deren Wahrnehmung: Meldungen und Informationen zur Kontrolle der Einleitungskriterien und der Wirksamkeit einer Maßnahme. Beobachtbarkeit des Systemzustandes bzw. des Störungsbildes. Durch das Störungsbild bedingt können bestimmte Systemgrößen unter Umständen nicht mehr beobachtet werden (z.B. Ausfall der Füllstandsmessung durch Ausfall aller Signalgeber).

- MMS-Komponente technisches System: Systemtechnische Abhängigkeiten verschiedener Sicherheitssysteme und der Systeme, die bei der Durchführung einer Maßnahme eingesetzt werden. Dabei spielen auch die Prozeßdynamik und das Prozeßverhalten sowie die zur Verfügung stehende Zeit eine Rolle.
- MMS-Komponente Auftragserteilung und Auftrags erledigung: Erforderlicher organisatorischer Aufwand in Form von Prüfanweisungen, Handbüchern, telefonischer Kommunikation etc.

Neben dem direkten Einfluß der Fehlerbedingungen kann zusätzlich eine **Wechselwirkung verschiedener PSF** von Bedeutung für die Suche nach Verbesserungsmaßnahmen sein. Die Analyse von Wechselwirkungen ermöglicht, das Wirkungsgefüge der Fehlerkette auf breiterer Basis zu analysieren (z.B. weisen die schlechte Gestaltung von Displays und die schlechte Anordnung von Bedienelementen auf eine Inkompatibilität der Wahrnehmung zur Tätigkeit hin). Wechselwirkungen geben somit ein genaueres Bild von der situativen Information und den spezifischen Wirkungsbeziehungen der Einflußfaktoren. Sie sind wichtig, um die Fehlerkette zu verstehen, die in einer ganz bestimmten Situation von Bedeutung war. Auch weisen Wechselwirkungen auf zusätzliche Einflußfaktoren (PSF) hin, die nicht direkt beobachtet werden konnten, so daß die beobachteten Wechselwirkungen von PSF als Indikatoren für übergeordnete Einflußfaktoren (z.B. organisatorische Mängel) interpretiert werden können.

Bezüglich der Bedeutung von Wechselwirkungen verschiedener PSF kann eine Einteilung von Bubb (1994) in direkt wirkende PSF und indirekt wirkende PSF herangezogen werden (Bild 23).

Direkt wirkende PSF sind diejenigen, die innerhalb der unmittelbaren Arbeitsumgebung des handelnden Menschen wirken. Indirekte wirkende PSF beziehen sich auf Wirkungsbeziehungen zwischen direkt wirkenden PSF und somit auf das Management des Arbeitsprozesses. In einer Ereignisanalyse können direkt wirkende PSF durch die ergonomische Analyse im MMS beobachtet werden. Sie werden also in der Eigenschafts-Spalte der Beschreibungstabelle eingetragen. Auf die indirekt wirkenden PSF kann geschlossen werden, indem man das gemeinsame Auftreten bzw. die Wechselwirkungen direkt wirkender PSF analysiert.

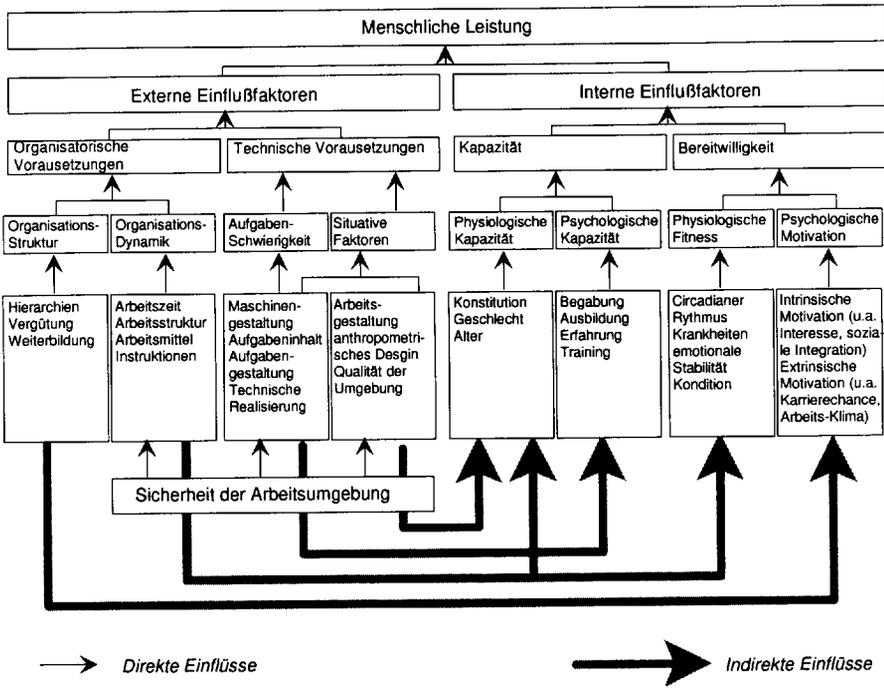


Bild 23 Direkt wirkende und indirekt wirkende PSF auf die menschliche Leistung (nach Bubb, 1994).

3.3.2 Fehlermodelle im Beschreibungsmodell

Ziel des Beschreibungsmodells ist, zu gewährleisten, daß für möglichst viele verschiedene Fehlermodelle und HRA-Verfahren Informationen gesammelt werden können. Welche der üblichen psychologische Fehlermodelle durch das Beschreibungsmodell abgebildet werden können, wird im folgenden zusammengefaßt. Dazu wird an die Diskussion der Fehlermodelle zum Abschluß von Kapitel 1 angeknüpft. Dort wurde bezüglich der kognitiven Fehlermodelle, die den kausalen Fehlermodellen entsprechen, bereits eine Lösung für die Abbildung kognitiver Prozesse ausgearbeitet. Alle in Kapitel 1 genannten kognitiven Fehlermodelle sind somit über die Analyse der kognitiven Belastung mit Hilfe der Systemergonomie und der kognitiven Beanspruchung durch die Aspekte der kognitiven Psychologie bereits im Beschreibungsmodell berücksichtigt. Bisher wurde nicht untersucht, inwieweit die aktionalen Fehlermodelle von Hacker, Swain und Guttman, Seifert und Brauser sowie von Rasmussen im Beschreibungsmodell wiedergefunden werden können.

- **Hacker**

Wie bereits in Kapitel 1 beschrieben, unterteilt das Modell von Hacker (1986) in fehlende bzw. falsche Informationsnutzung. Im vorgestellten Beschreibungsmodell wird fehlende Informationsnutzung durch Unterlassungsfehler auf der Aufgabenseite abgebildet. Falsche Informationsnutzung wird durch Ausführungsfehler abgebildet. Die bei Hacker zusätzlich aufgeführten kognitiven Verarbeitungsstufen, die zu falscher Informationsnutzung führen können (z.B. falsches Entwerfen von Aktionsprogrammen), sind durch den Ansatz der kognitiven Belastung und Beanspruchung abgedeckt.

- **Swain und Guttman**

Swain und Guttman (1983, p4-10) nehmen zur Identifikation fehlerträchtiger Situationen ein einfaches MMS an. Es unterscheidet das Teilsystem 'Mensch' und seine Verbindungen zu Rückmeldung und Bedienung (vgl. Bild 5 in Kapitel 1). Dieser Ansatz ist mit den MMS-Komponenten des Beschreibungsmodells nahezu identisch. Das Beschreibungsmodell erweitert den Ansatz von Swain und Guttman um zusätzliche Komponenten und ist damit in der Lage, die von Swain und Guttman genannten Einflußfaktoren, die weitestgehend losgelöst vom MMS beschrieben werden, mit dem Beschreibungsmodell in Verbindung zu bringen (vgl. Bild 17 gegenüber Tabelle 5 aus Kapitel 1). Wie bei Hacker werden die von Swain und Guttman aufgeführten kognitiven Verarbeitungsstufen im Teilsystem 'Mensch' bereits durch den Ansatz der kognitiven Belastung und Beanspruchung abgedeckt.

- **Seifert und Brauser**

Das Fehlermodell von Seifert und Brauser (1987) konzentriert sich auf die Wirkungsmechanismen zwischen Einflußfaktoren und Fehlertypen. Vergleicht man das Modell mit dem in diesem Kapitel dargestellten Beschreibungsmodell, so stellt man fest, daß das gestaffelte Vorgehen der Fehlerbeschreibung von objektiver Information über Fehlerarten zu Fehlerbedingungen den Beziehungen im Fehlermodell von Seifert und Brauser entspricht. Somit werden die in Seifert und Brauser angesprochenen Zusammenhänge im Beschreibungsmodell durch den tabellarischen Aufbau mit den Beschreibungsstufen Objekt-Aktion-Angabe-Eigenschaft-Element abgebildet.

- **Rasmussen's Multi-Aspekt**

Bereits in Kapitel 1 wurde festgestellt, daß der Multi-Aspekt von Rasmussen (1986) innerhalb des Belastungs-/Beanspruchungsmodells gesehen werden kann. Die Aspekte auf Seiten der Belastung besitzen dabei eine direkte Entsprechung im Beschreibungsmodell: Der Aspekt 'Personalaufgaben' entspricht der Eingabeseite des Menschen im MMS. Der Aspekt 'Situative Faktoren' hat eine direkte Entsprechung zur Situation im Beschreibungsmodell. Die Aspekte 'Leistungsbeeinflussende Faktoren' (PSF) und 'Ursachen menschlichen Fehlverhaltens' wurden in diesem Kapitel bereits intensiv diskutiert und werden im Beschreibungsmodell weitaus differenzierter betrachtet, als es in der von Rasmussen (1986) vorgestellten Abbildung der Fall ist. Die Aspekte auf Seiten der Beanspruchung ('Mechanismen des menschlichen Fehlverhaltens' und 'Interne Form des Fehlverhaltens') sind wiederum durch den Ansatz der kognitiven Belastung und Beanspruchung abgedeckt.

- **Reason**

Wie in Kapitel 1 dargestellt unterteilt Reason in intentionale und nicht-intentionale Fehler. Beide Fehlertypen beziehen sich auf die kognitiven Prozesse des Menschen, die bei einer Fehlhandlung wirksam sind. Intentionale Fehler werden vom Menschen mit Absicht, also bewußt begangen, nicht-intentionale Fehler ohne Absicht, also unbewußt. Aufgrund der Diskussion im ersten Kapitel darüber, daß kognitive Dissonanz erforderlich ist, um eine bewußte Zielvorstellung und damit eine Handlungsintention zu entwickeln, können intentionale Fehler im Beschreibungsmodell als Fehler aufgrund von fehlerhaften Zielvorstellungen (Zielreduktion) und nicht-intentionale als Fehler aufgrund fehlerhafter Informationsverarbeitung (Verarbeitung) angesehen werden.

3.3.3 Spezifische Aspekte des Beschreibungsmodells bezüglich der HRA-Verfahren und Anlagenoptimierung

Um die Informationen, die im Rahmen des Beschreibungsmodells gewonnen werden können, in HRA-Analysen oder zur Anlagenoptimierung verwenden zu können, müssen zusätzlich zu den besprochenen Fehlermodellen weitere Aspekte abgebildet werden, die in Kapitel 2 angesprochen wurden. Dies sind:

- Unterstützung des Screenings
- Übertragbarkeit der einzelnen Ereignisse
- Darstellung von Handlungsbereichen und -typen
- Analyse latenter und aktiver Fehler
- Wirksamkeiten von Recoveries
- Abhängigkeiten zwischen Handlungen
- Wirksamkeiten von Maßnahmen zur Anlagenoptimierung
- Sicherheitstechnische Bedeutung bzw. Konsequenzen des Fehlers

All diese Aspekte werden durch Begriffskombinationen innerhalb des Beschreibungsmodells abgebildet. Wie diese Muster aussehen, soll im folgenden dargestellt werden.

- **Unterstützung des Screenings**

Eine HRA-Bewertung vollzieht sich in der Regel von Grobanalysen zu Feinanalysen (vgl. Kapitel 2). In der frühen Phase einer PSA müssen dabei zunächst diejenigen Handlungen gefunden werden, die zu signifikanten Beiträgen für das Gesamtrisiko des betrachteten Ereignisablauf führen. Um diese Handlungen herauszufiltern, ist eine grobe Abschätzung erforderlich. In der Feinanalyse werden anschließend nur diejenigen Handlungen bewertet, die bei der Grobanalyse einen wichtigen Beitrag aufweisen.

Das Beschreibungsmodell ist in der Lage, diese Abstraktionsvorgänge zu unterstützen: Grobanalysen und Feinanalysen können durch den Abstraktionsgrad der Abfragen zur Wiedergewinnung der mit dem Beschreibungsmodell gesammelten Daten berücksichtigt werden. Ist z.B. in der Grobanalyse zu bewerten, wie groß das Potential eines Unterlassungsfehlers ist, so muß nur nach Unterlassungsfehlern gesucht werden. In der Feinanalyse ist darauf z.B. gefordert, alle Ereignisse zu finden, bei denen es unterlassen worden ist, ein Ventil von der Warte aus zu öffnen.

Gegenläufig zum Detaillierungsgrad beim Screening verhält sich die Übertragbarkeit der Daten, da Angaben zur menschlichen Zuverlässigkeit auf dem Niveau von Grobanalysen prinzipiell allgemeingültiger bzw. besser übertragbar sind als Angaben zu Feinanalysen.

- **Übertragbarkeit der einzelnen Ereignisse**

Bei der Auswertung von Ereignissen für eine Bewertung menschlicher Zuverlässigkeit stellt sich immer die Frage, inwieweit die gesammelten Ereignisse überhaupt miteinander vergleichbar sind. Das Problem der Übertragbarkeit von Ereignissen besteht dabei im wesentlichen darin, daß jedes Ereignis in einer ganz spezifischen Bedingungskonstellation aufgetreten ist, die in anderen Ereignissen in der Form nicht vorliegt. Um dennoch Ereignisse übertragen und damit Ereignisse vergleichen zu können, müssen diese bezüglich bestimmter Merkmale oder Randbedingungen übereinstimmen. Diese Merkmale oder Randbedingungen müssen aus der ergonomischen Sicht in irgendeiner Form miteinander vergleichbar sein.

Dadurch, daß als Ausgangspunkt für das Beschreibungsmodell das in der Ergonomie übliche MMS gewählt wurde, ist auch eine Übertragbarkeit verschiedener Ereignisse gewährleistet, da das Modell per Definitionem darauf ausgerichtet ist, verschiedene Arbeitssysteme auf gleiche ergonomische Randbedingungen zu untersuchen (vgl. Bubb, 1993).

Die Zusammenfassung verschiedener Daten zur ergonomischen Analyse gelingt im Beschreibungsmodell durch die strukturierte Form der Ereignisdarstellung bezogen auf die Komponenten des MMS und die Beschreibungsstufen (Objekt, Aktion, Angabe, Eigenschaft, Element). Beispielsweise können alle Unterlassungsfehler, die durch fehlende Rückmeldung zustande kamen, dadurch zusammengefaßt werden, daß in der Angaben-Spalte der MMS-Komponente 'Aufgabe' das Wort 'unterlassen' und in der Angaben-Spalte 'Rückmeldung' das Wort 'fehlt' benutzt wird. Durch die Übereinstimmung dieser ergonomischen Randbedingung ist eine Übertragbarkeit verschiedener Ereignisse auf eine Fragestellung (z.B. "Wie hoch ist der Anteil an Unterlassungen durch fehlende Rückmeldung?") möglich, obwohl die Ereignisse bezüglich der technischen Komponenten nicht direkt vergleichbar sein müssen. Eine Übertragbarkeit von Ereignissen wird im Beschreibungsmodell also dadurch gewährleistet, daß das MMS Grundlage des generischen Beschreibungsmodells ist. Innerhalb der Beschreibungstabelle wird die Übertragbarkeit dadurch möglich, daß nach ergonomisch relevanten Fehler-Mustern gesucht wird statt nach spezifischen Aspekten, die beim Ereignis von Bedeutung waren.

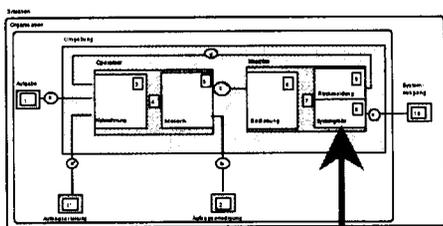
- **Darstellung von Handlungsbereichen und -typen**

Die Unterscheidung von Handlungsbereichen innerhalb des MMS ist wichtig, um die verschiedenen Möglichkeiten der Modellierung menschlicher Eingriffe in einer PSA richtig wiederzugeben. In Kapitel 2 wurde bereits dargestellt, daß Handlungen aus dem Bereich A in den Ausfallraten der technischen Komponenten, Handlungen aus dem Bereich B in den Eintrittshäufigkeiten und Handlungen aus dem Bereich C in den Basisereignissen und Ereignisabläufen berücksichtigt werden müssen. Im generischen Beschreibungsmodell wird der Handlungsbereich A durch Aufgaben- oder Tätigkeitsfehler innerhalb des MMS abgebildet, ohne daß diese zu einem beobachtbaren fehlerhaften Systemzustand führen (latenter Fehler). Bei diesen Handlungen ist also das System fehlerhaft, aber nicht der Systemausgang. Handlungen aus dem Bereich B werden im MMS durch Aufgaben- oder Tätigkeitsfehler innerhalb des MMS abgebildet, bei denen ein fehlerhafter Systemzustand und als direkte Folge ein fehlerhafter Systemausgang beobachtbar ist. Handlungen aus dem Bereich C sind eine direkte Reaktion auf den gestörten Systemausgang. Sie führen entweder zu einem fehlerfreien Systemausgang im MMS, sind also zustandsverbessernd (Recoveries), oder führen erneut zu einem fehlerhaften Systemausgang im MMS, sind also zustandsverschlechternd. Diese Handlungen sind im MMS also dadurch zu erkennen, daß die primäre Aufgabe des Operateurs darin besteht, eine Störung zu beheben. Den gesamten Sachverhalt faßt Bild 24 zusammen.

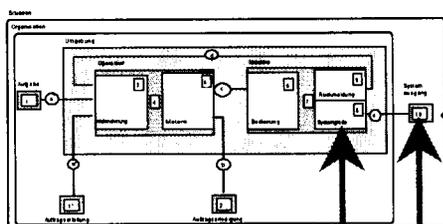
- **Analyse latenter und aktiver Fehler**

In Kapitel 1 wurden latente und aktive Fehler unterschieden. Latente Fehler sind von besonderer Bedeutung, da diese verdeckt (also zu einem unbekanntem Ausmaß und nicht direkt beobachtbar) die Anlagensicherheit schwächen können. Sie sind nur dann beobachtbar, wenn der Fehler durch ein Versagen der Komponenten bei einer Anforderung des Systems aufgedeckt wird bzw. sich manifestiert.

Im Beschreibungsmodell werden latente Fehler abgebildet, indem ein fehlerhaftes System vorliegt, dieses jedoch noch nicht zu einem falschen Systemausgang geführt hat. Aktive Fehler führen dagegen zu einem fehlerhaften System und zu einem falschen Systemausgang. Bereits bei der Diskussion der Handlungstypen wurde gezeigt, wie beide Fehlerarten als Fehlermuster innerhalb des MMS abgebildet werden (Bild 24).

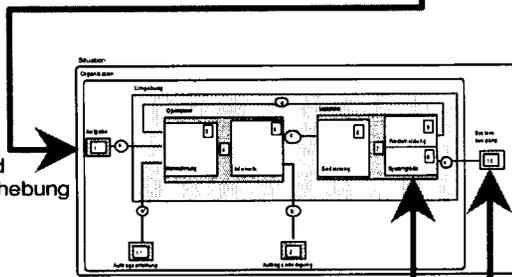


Typ A (latenter Fehler)



Typ B (aktiver Fehler)

Typ C:
Situation ist Störung und
Aufgabe ist Störungsbehebung



Typ C (verschlechternd)

➔ Für den Handlungstyp charakteristische Schwachstellen im MMS

Bild 24 Charakteristische Schwachstellen im MMS zur Klassifikation der Handlungsbereiche A, B und C.

• **Wirksamkeiten von Recoveries - Fehlerkorrekturen**

Bei Recoveries (wörtlich übersetzt: Fehlerkorrekturen) können folgende Typen unterschieden werden:

1. Fehlerkorrekturen, die von der Person selbst oder von einer anderen bereits vor der Handlungsausführung gemacht werden.

2. Fehlerkorrekturen, die von der Person selbst oder von einer anderen unmittelbar nach der fehlerhaften Handlungen durchgeführt werden und die fehlerhafte Handlung selbst rückgängig machen.
3. Fehlerkorrekturen, die nach einer fehlerhaften Handlung durchgeführt werden und aus der Inbetriebnahme von Ersatzsystemen bestehen.
4. Fehlerkorrekturen, die nach einer fehlerhaften Handlung durchgeführt werden und die Auswirkungen einer Fehlhandlung oder eines fehlerhaften technischen Systems durch die Reparatur einer technischen Komponente korrigieren.

Recoveries werden im Beschreibungsmodell dadurch abgebildet, daß ein Ausführungsfehler durch Handlungen, die in einem nachgeordneten MMS beschrieben sind, erfolgreich rückgängig gemacht worden ist. Dabei ist jedoch zu bedenken, daß Recoveries vom Typ 1 in der Betriebserfahrung nicht als Ausführungsfehler beobachtbar sind. Allenfalls kann auf diese dadurch geschlossen werden, daß zwei Personen miteinander in Abhängigkeit stehen (z.B. durch Kommunikation). Diese Art von Recoveries können somit, wie im nächsten Punkt dargestellt, durch die Berücksichtigung von Abhängigkeiten abgebildet werden. Recoveries vom Typ 4 sind dadurch gekennzeichnet, daß die fehlerkorrigierende Maßnahme aus der Reparatur einer technischen Komponente besteht und nicht aus Schaltmaßnahmen wie beim Typ 2 und 3. Bei Typ 2 bezieht sich die Korrekturmaßnahme auf dasselbe technische System wie die fehlerhafte Handlung, bei Typ 3 auf ein anderes technisches System.

- **Abhängigkeiten zwischen Handlungen**

Die Bestimmung von Abhängigkeiten ist insbesondere für die Einschätzung von Möglichkeiten zur Fehlerentdeckung in den HRA-Verfahren von Bedeutung. Bereits Bild 20 bezüglich der Ereigniszerlegung machte deutlich, wie Abhängigkeiten im Beschreibungsmodell berücksichtigt werden können. Insgesamt können die dort angesprochenen Abhängigkeiten zwischen Personen, Situationen und Orten nach Tabelle 19 unterschieden werden. Die dort vorgenommene Rangfolge wurde aufgrund von Plausibilitätsüberlegungen erstellt (Gleichheit von Situationen kann als sehr bedeutsam, Gleichheit von Personen als bedeutsam und Gleichheit von Orten als weniger bedeutsam eingestuft werden). Hinweise für die Gültigkeit dieser Einteilung und Rangfolge finden sich in organisationspsychologischen Untersuchungen (siehe dazu z.B. Schuler, 1995; p 327)

Tabelle 19 Abbildung möglicher Abhängigkeiten im Beschreibungsmodell.

Nr.	Situationen	Personen	Orte	Abhängigkeit
1	gleich	gleich	gleich	vollständig abhängig, da alle Merkmale gleich sind
2	gleich	gleich	ungleich	hoch, da die beiden entscheidenden gleich sind
3	ungleich	gleich	gleich	mittel, da nur jeweils einer der entscheidenden gleich ist
4	gleich	ungleich	gleich	mittel, da nur jeweils einer der entscheidenden gleich ist
5	ungleich	gleich	ungleich	gering, da nur ein Merkmal übereinstimmt
6	ungleich	ungleich	gleich	gering, da nur ein Merkmal übereinstimmt
7	gleich	ungleich	ungleich	gering, da nur ein Merkmal übereinstimmt
8	ungleich	ungleich	ungleich	vollständig unabhängig, da kein Merkmal übereinstimmt

• **Wirksamkeiten von Maßnahmen zur Anlagenoptimierung**

Innerhalb des Beschreibungsmodells können auch Wirksamkeiten von Maßnahmen zur Anlagenoptimierung beurteilt werden, indem die Komponenten des MMS, für die Schwachstellen und Einflußfaktoren identifiziert worden sind, mit den getroffenen Maßnahmen verglichen werden (eine unzureichende Gestaltung der Rückmeldung müßte z.B. ergonomische Maßnahmen nach sich ziehen und keine Personalschulung). Die Optimierungsmaßnahmen müssen den typischen Eigenschaften der als Schwachstelle identifizierten MMS-Komponente entsprechen (siehe Tabelle 20).

Tabelle 20 Vorhersage optimaler Wirksamkeiten von Maßnahmen zur Anlagenoptimierung.

Gefundene Schwachstelle im MMS Verbesserung des Informationsflusses bezüglich	Person - Person	Organisation - Aufgabe (Aufgabenstellung) - Auftragserteilung - Auftragsrückmeldung	Technik - System	Ergonomie - Aufgabe (Aufgabeninhalt) - Tätigkeit - Rückmeldung
Person	↗			
Organisation		↗		
Technik			↗	
Ergonomie				↗

Wie in Tabelle 20 dargestellt, sollte sich generell eine Übereinstimmung zwischen den gefundenen Schwachstellen im MMS und den getroffenen Maßnahmen ergeben, falls die Maßnahme ein adäquates Mittel zur Vermeidung von ähnlichen Fehlern und somit zur Anlagenoptimierung ist. Es ist weiterhin anzumerken, daß bezüglich der Aufgabe immer zwei Aspekte unterschieden werden müssen: (1) der organisatorische Aspekt des Prozesses der Aufgabenstellung und (2) der ergonomische Aspekt, der durch den Aufgabeninhalt begründet ist.

- **Sicherheitstechnische Bedeutung bzw. Konsequenzen des Fehlers**

Die sicherheitstechnische Bedeutung eines Ereignisses wird durch die technischen Systeme bestimmt, die innerhalb des Ereignisses beschädigt wurden oder bei Anforderung nicht richtig reagiert haben.

Beide Aspekte werden im Beschreibungsmodell dadurch abgebildet, daß die Konsequenzen des Fehlers immer als System und Systemausgang im MMS beschrieben werden. Da auch dies eingeteilt in die Beschreibungsstufen Objekt-Aktion-Angabe-Eigenschaft-Element geschieht, ist eine Analyse der sicherheitstechnischen Bedeutung möglich, indem beispielsweise die Objekt-Spalte der MMS-Komponente 'System' nach sicherheitstechnisch bedeutenden Komponenten durchsucht wird.

3.4 Diskussion

Zur Auswertung von Ereignissen wurde in diesem Kapitel ein semantisches Analyseverfahren entwickelt. Das Verfahren ist in der Lage, die Informationen zu erfragen, die für verschiedene Fehlermodelle, HRA-Analysen oder Anlagenoptimierungen erforderlich sind. Dies konnte anhand einer Diskussion von Fehlermodellen und spezifischen Aspekten der bisher genutzten HRA-Verfahren gezeigt werden.

Herauszuheben ist, daß das Verfahren eine Schuldzuweisung an eine Person vermeidet, indem das Ereignis ausgehend von der Fehlersituation und nicht ausgehend von den beteiligten Personen analysiert wird. Dieses Merkmal des Beschreibungsmodells wurde bereits in Kapitel 1 als maßgeblich für eine Ereignisauswertung diskutiert. Das gewählte Beschreibungsmodell entspricht somit auch der Intention der in Kapitel 1 aufgeführten Definition eines menschlichen Fehlers, da es das Arbeitssystem möglichst vollständig und nicht einseitig ausgerichtet beschreibt. Durch das gewählte ge-

staffelte Vorgehen erlaubt es weiterhin eine standardisierte Erfassung von Ereignissen.

Abschließend sollen nun die Leistungsmerkmale des Beschreibungsmodells zusammengefaßt und wesentliche Unterschiede zu bisherigen Verfahren der Ereignisauswertung angesprochen werden.

3.4.1 Leistungsmerkmale des Beschreibungsmodells

Zusammenfassend können folgende Leistungsmerkmale des Beschreibungsmodells festgehalten werden:

- Durch die Erfassung der Informationen bezogen auf die Komponenten des MMS geht das Beschreibungsmodell situationsbezogen vor statt den Fehler des Menschen in den Mittelpunkt der Analyse zu stellen. Es analysiert ein Ereignis damit unabhängig von der Frage nach der Schuld einer Person am Ereignis.
- Durch die Verwendung der Beschreibungsstufen (Objekt-Aktion-Angabe-Eigenschaft-Element) besitzt das Beschreibungsmodell sowohl eine hohe Flexibilität bei der Ereignisbeschreibung, die der Ereignisvariabilität Rechnung trägt, als auch die Möglichkeit einer konsistenten und detaillierten Analyse von Ereignissen bezüglich menschlicher Fehler.
- Durch die Bildung von Sätzen in den Beschreibungsstufen bleibt der Wirkungszusammenhang zwischen Fehlern und Einflußfaktoren erhalten und bietet breitere Analysemöglichkeiten als unabhängige Angaben.
- Durch eine Elementspalte ist das Beschreibungsmodell in der Lage, verfahrenstechnisches und ergonomisches Wissen in einem beliebigen Auflösungsgrad zu berücksichtigen.
- Die durch die Beschreibungsstufen und die Komponenten des MMS aufgespannte Beschreibungstabelle gewährleistet eine bessere Übertragbarkeit der gesammelten Angaben als es bei einfachen Taxonomien der Fall ist, da ergonomische Randbedingungen vergleichbar werden.
- Das Vorgehen bei der Ereignisbeschreibung stellt sowohl ein Schema zur Erfassung relevanter Informationen als auch zur Analyse eines Ereignisses dar und verbindet so die Ereignisbeschreibung und Ereignisanalyse.

- Fehlertypen und Fehlermodelle, wie sie aus der Literatur bekannt sind und innerhalb der HRA-Verfahren oder Ereignisauswertung verwendet werden, können als Begriffsmuster im Beschreibungsmodell dargestellt werden.

Mit den hier aufgeführten Leistungsmerkmalen wurden bereits viele der zum Abschluß von den in Kapitel 2 dargestellten Anforderungen umgesetzt. Nicht angesprochen wurde, inwieweit das hier vorgestellte Beschreibungsmodell sich von den bisher genutzten Verfahren zur Ereignisauswertung unterscheidet. Dementsprechend sollen zum Abschluß dieses Kapitels wesentliche Unterschiede zu bisherigen Verfahren für die Ereignisauswertung diskutiert werden.

3.4.2 Unterschiede zu bisherigen Verfahren zur Ereignisauswertung

Das Verfahren hat einen entscheidenden Unterschied zu bisher existierenden Verfahren zur Analyse und Auswertung von Ereignissen, die in Kapitel 2 dargestellt worden sind. Die dort dargestellten Verfahren beschreiben und analysieren ein Ereignis dadurch, daß einer oder mehrere Deskriptoren gesucht werden, die den Ereignishergang optimal charakterisieren. Dadurch sind mögliche Antworten stark standardisiert und leicht auswertbar.

Das in diesem Kapitel vorgestellte Verfahren beschreibt ein Ereignis innerhalb standardisierter Beschreibungsstufen und nicht durch zuvor festgelegte Deskriptoren. Hier ist also das Vorgehen bei der Ereignisbeschreibung selbst analytisch: Die Beschreibungsstufen sind festgelegt, die benutzten Begriffe zur Beschreibung sind aber kaum standardisiert. Damit besitzt das Verfahren ähnliche Möglichkeiten wie freier Text; die vielfältigen und unterschiedlichen Aspekte verschiedener Ereignisse können aber durch die gewählte Beschreibungsstruktur dennoch im bestimmten Rahmen einheitlich beschrieben werden. Durch dieses Vorgehen sind die Angaben aber auch nicht mehr mit einfachen Mitteln (z.B. Häufigkeitszählungen von Deskriptoren) auswertbar.

Insgesamt gesehen stehen beide Vorgehensweisen in einer sogenannten Trade-Off Beziehung, d.h. bei Aspekten, bei denen die eine Herangehensweise Vorteile besitzt, besitzt die andere ihre Schwachstellen. Die Trade-Off Beziehung bezieht sich sowohl auf die Erfassung von Informationen als auch auf die Auswertung von Information aus den gesammelten Ereignissen. Die wesentlichen Aspekte des Trade-Off, die sich bezüglich der Erfassung und Auswertung der Daten ergeben, sind in Bild 25 zusammenfassend dargestellt. Allgemein weisen standardisierte Verfahren mit festgelegten Des-

kriptoren Vorteile bezüglich der Reliabilität und offene Verfahren Vorteile bezüglich der Validität auf.

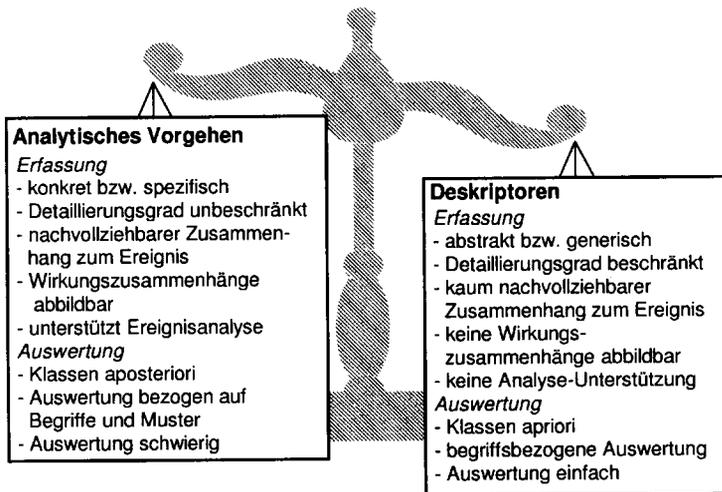


Bild 25 Trade-Off zwischen der analytischen Vorgehensweise gegenüber Deskriptoren.

Dabei scheinen deskriptor-orientierte Verfahren aus dem Grunde dem hier entwickelten analytischen Verfahren überlegen zu sein, da sie mögliche Antworten stark standardisieren und die gesammelte Information damit leicht auswertbar ist. Damit stellt sich die Frage, warum das hier entwickelte Beschreibungsmodell erforderlich ist, und nicht ein deskriptor-orientiertes Verfahren gewählt wird. Zur Beantwortung dieser Frage können folgende Aufwände unterschieden werden, um aus Ereignissen Angaben für die menschliche Zuverlässigkeit zu gewinnen und die vielfältigen Bewertungsparameter für eine Bewertung menschlicher Zuverlässigkeit zu berücksichtigen:

- Aufwand bei der Beschreibung des Ereignisherganges
- Aufwand bei der Analyse der Ereignisse
- Nutzen für die Beantwortung ereignisübergreifender Fragestellungen
- Aufwand bei der Auswertung der Information

- **Aufwand bei der Beschreibung des Ereignisherganges**

Deskriptor-orientierte Verfahren scheinen aus dem Grunde für eine Ereignisanalyse von Vorteil zu sein, da sie Ereignisse einfach dadurch beschreiben, daß bestimmte

Begriffe gefunden werden, die wesentliche Merkmale des Ereignisses wiedergeben. Hinsichtlich der Erfassung von Information besteht nun bei deskriptor-orientierten Verfahren die Hauptschwierigkeit darin, möglichst sinnvolle Deskriptoren zu finden, die (1) überschaubar zu handhaben sind und (2) den Ereignishergang treffend zu charakterisieren vermögen. Damit sind aber auch die Darstellungsmöglichkeiten der deskriptor-orientierten Verfahren immer beschränkt, da jedes Ereignis ganz spezifische Merkmale hat, die durch eine festgelegte Taxonomie nicht beachtet werden können und für eine spätere Analyse verloren gehen.

Würde man versuchen, spezifische Merkmale eines Ereignisses durch deskriptor-orientierte Verfahren abzubilden, so wird schnell die Grenze der Anwendbarkeit erreicht. Legt man beispielsweise Tabelle 14 zur Fehlerbeschreibung zugrunde, so sind allein zur vollständigen Beschreibung aller möglichen Fehlerarten, die innerhalb des MMS abgebildet werden können, mindestens $n = (4 * 1) + (4 * 6) = 28$ Deskriptoren erforderlich (4 mögliche fehlerhafte MMS-Komponenten mit einer Fehlerart auf der Eingabeseite der Person und vier mögliche fehlerhafte MMS-Komponenten mit sechs Fehlerarten auf der Ausgabeseite). Dabei sind noch keine Wirkungsbeziehungen unterscheidbar (z.B. Fehler auf der Eingabeseite und Folgefehler auf der Ausgabeseite der Person). Die Berücksichtigung weiterer Effekte (z.B. Wechselwirkungen mit technischen Komponenten oder Art der fehlerhaften Handlungen wie 'falsch geöffnet' oder 'falsch geschlossen' etc.) würde die Anzahl der Deskriptoren weiter erhöhen. Damit ist leicht einzusehen, daß deskriptor-orientierte Verfahren bei der Analyse von Ereignissen auf detailliertem Niveau schnell an die Grenze der Durchführbarkeit stoßen.

Ereignisse so zu erfassen, daß sowohl konsistente als auch detaillierte Angaben über menschliche Fehler möglich sind, ist mit dem deskriptor-orientierten Ansatz also prinzipiell nicht möglich. Besonders deutlich wird dieser Nachteil, wenn Wirkungszusammenhänge zwischen verschiedenen Aspekten untersucht werden sollen, die bei einem Ereignis eine Rolle gespielt haben, denn Wirkungszusammenhänge können durch voneinander unabhängige Deskriptoren nicht abgebildet werden. Dagegen lassen die in diesem Kapitel vorgestellten Beschreibungsstufen (eingeteilt in Objekt, Aktion, Angabe, Eigenschaft, Element) eine Sprache in Form von einfachen Sätzen zu (z.B. "Ventil schließen unterlassen aufgrund unzureichender Kennzeichnung"). Damit besitzt die im Beschreibungsmodell benutzte standardisierte Sprache ähnliche Darstellungsmöglichkeiten und einen ähnlichen Informationsgehalt wie freier Text; jedes Ereignis kann mit seinen spezifischen Merkmalen und deren Wirkungszusammenhängen beschrieben werden (vgl. Sträter, 1991).

- **Aufwand bei der Analyse der Ereignisse**

Durch das strukturierte Vorgehen wird man auch bei der Ereignisanalyse geführt (von beobachtbaren Informationen über Fehler zu Einflußfaktoren). Eine solche Unterstützung bei der Analyse ist mit deskriptor-orientierten Verfahren in dieser Form nicht möglich.

Ein weiterer Vorteil der standardisierten Sprache ist, daß die Angaben, die in den Beschreibungsstufen gemacht werden, genau dem Detaillierungsgrad entsprechen, der für eine Auswertung der Betriebserfahrung im Hinblick auf Angaben zur menschlichen Zuverlässigkeit in HRA-Analysen gefordert ist (vgl. Tabelle 21).

Tabelle 21 Unterschied zwischen Deskriptoren und standardisierter Sprache.

<i>Erforderliches Detaillierungsniveau für eine Nutzung der Information in einer HRA-Analyse (entspricht dem Detaillierungsniveau des Beschreibungsmodells)</i>	<i>Beschreibung durch einen Deskriptor</i>
Operateur unterläßt Schritt in Prozedur	"Unterlassene Maßnahme"
Operateur unterläßt telefonische Benachrichtigung von Schichtleiter	"Kommunikation fehlerhaft"

Damit ist der Beschreibungsaufwand des in diesem Kapitel vorgestellten Verfahrens aus dem Grunde notwendig, um den Detaillierungsgrad zu erreichen, der für eine Auswertung der Ereignisse hinsichtlich verschiedener HRA-Verfahren erforderlich ist. Eine vollständig ausgefüllte Beschreibungstabelle ist Bedingung (stop rule) dafür, daß die Analyse hinsichtlich einer HRA-Fragestellung vollständig ist.

- **Nutzen für die Beantwortung ereignisübergreifender Fragestellungen**

Bei der Auswertung der Information haben deskriptor-orientierte Verfahren einen vermeintlichen Vorteil, daß lediglich danach gesucht werden muß, welcher Deskriptor wie häufig in welchem Ereignis eine Rolle gespielt hat. Betrachtet man jedoch das Vorgehen, wie ein Deskriptor für ein Ereignis vergeben wird, stellt sich dieser Vorteil als wesentlicher Faktor dafür heraus, daß deskriptor-orientierte Verfahren zu einem höheren Aufwand bei der Auswertung von Ereignissen führen.

Deskriptor-orientierte Verfahren gehen bei der Ereignisanalyse so vor, daß sich eine analysierende Person mit dem Ereignishergang beschäftigt und anschließend das Ereignis bestimmten Deskriptoren zuordnet. Dadurch geht der unmittelbare Zusammen-

hang zwischen Ereignishergang und Ereignisklassifikation verloren, da Deskriptoren und Ereignisbeschreibung unabhängig voneinander sind. Will eine andere Person die Klassifikation nachvollziehen, so ist sie gezwungen, das Ereignis erneut im Ganzen durchzuarbeiten.

Das gleiche Problem tritt auf, wenn Ereignisse nach Aspekten untersucht werden sollen, die nicht durch einen Deskriptor beschrieben wurden, wie das folgende Beispiel zeigt: Der in Tabelle 21 genannte Deskriptor "Unterlassene Maßnahme" kann nicht dazu benutzt werden, alle Fälle zu finden, bei denen ein Prozedurschritt unterlassen wurde. Wenn dieser Deskriptor zur Suche aller unterlassenen Prozedurschritte verwendet wird, ist es erforderlich, alle Ereignisse, bei denen der Deskriptor "Unterlassene Maßnahme" vergeben wurde, nochmals dahingehend zu untersuchen, ob die unterlassene Maßnahme als Prozedurschritt ausgewiesen war oder nicht. An diesem Problem der Deskriptoren ändert sich im Prinzip auch dann nichts, wenn ein weiterer Deskriptor "Unterlassener Prozedurschritt" eingeführt wird, da bei einer geringfügig anders gelagerten Fragestellung (z.B. Unterlassen des Öffnens eines Ventils) das gleiche Problem bei der Wiedergewinnung der Information auftritt.

Auch eine Kombination zweier Deskriptoren schränkt zwar den Aufwand der Suche ein, bietet aber immer noch keine eindeutigen Lösungen. Würde man z.B. nach allen Ereignissen suchen, bei denen der Deskriptor "Unterlassene Maßnahme" und der Deskriptor "Prozedur" angegeben wurde, so ist damit zwar der Suchraum eingeschränkt; zur endgültigen Klärung, ob ein Prozedurschritt oder eine andere Maßnahme unterlassen wurde, müssen aber wiederum alle gefundenen Ereignisse erneut untersucht werden, da die beiden Deskriptoren auch unabhängig voneinander vergeben worden sein könnten.

Für Auswertung bezüglich menschlicher Zuverlässigkeit bedeutet ein deskriptor-orientiertes Vorgehen somit, daß für jeden neuen zu untersuchenden Aspekt auf mühsame Einzelanalysen der Ereignisse zurückgegriffen werden muß. Es wurde bereits festgestellt, daß Taxonomien aus diesem Grund immer auf bestimmte Fragestellungen hin ausgerichtet sind und somit immer eine einseitige und damit unvollständige Analyse von Ereignissen erlauben. Deskriptoren nehmen somit zwar eine Informationsreduktion bei der Ereigniserfassung vor; dies geht jedoch auf Kosten des Aufwandes bei einer detaillierten Auswertung.

Zusammenfassend stoßen Deskriptoren immer dann an die Grenze der sinnvollen Anwendbarkeit, wenn dasselbe Datenmaterial hinsichtlich vielfältiger Aspekte ausgewertet werden muß. Sie sind somit nicht für die Auswertung von Ereignissen zur Analyse menschlicher Zuverlässigkeit geeignet, da hier eine Vielzahl unterschiedlicher Bewertungsparameter zu berücksichtigen ist (vgl. Kapitel 2). Das in diesem Kapitel entwickelte Beschreibungsmodell gewährleistet demgegenüber eine Nachvollziehbarkeit der Ereignisbeschreibung, da ein Ereignis in den Beschreibungsstufen gleichzeitig erfaßt, analysiert und dokumentiert wird. Diese Integration ist möglich, da die Ereignisanalyse ausgehend von allgemeinen Fragen zu Informationen, die beim Ereignis beobachtbar waren (Objekt-, Aktions-Spalte) aufgebaut wird und darauf erst Fehlerangaben (Angaben-Spalte) und Einflußfaktoren (Eigenschafts-Spalte) benannt werden. Hierdurch ist gewährleistet, daß der Wirkungszusammenhang zwischen Aktionen, Fehlern und Einflußfaktoren dargestellt wird und festgelegt ist, worauf der Einflußfaktor gewirkt hat. Somit ist das Modell in der Lage, neben dem Fehler selbst die spezifischen situativen Zusammenhänge von Fehlern abzubilden.

- **Aufwand bei der Auswertung der Information**

Das Beschreibungsmodell verlangt jedoch ein Verfahren zur Auswertung der gesammelten Daten, welches in der Lage ist, nach Begriffsmustern in den Ereignissen zu suchen. Um einen spezifischen Aspekt, der für eine HRA-Untersuchung von Bedeutung ist, aus den Ereignissen herauszufiltern (z.B. das Unterlassen eines Prozedurschrittes), wird nicht nach dem Deskriptor 'Prozedurschritt unterlassen' in den gesammelten Ereignissen gesucht, sondern nach dem situationsbeschreibenden Muster wie in Tabelle 22 dargestellt.

Tabelle 22 Situationsbeschreibendes Muster zur Suche nach den Ereignissen, bei denen ein Prozedurschritt unterlassen wurde.

<i>Komponente</i>	<i>Objekt</i>	<i>Aktion (Verbal)</i>	<i>Angabe (Fehler)</i>	<i>Eigenschaft (PSF)</i>	<i>Element (Unterbegriff)</i>
Auftragserteilung	Prozedur				Prozedurschritt
"	"		unterlassen		

Damit ist das Beschreibungsmodell erst dann sinnvoll einsetzbar, wenn ein Modell zur Auswertung gefunden wird, welches auf ähnlich einfache Weise Analysen von Begriffsmustern zuläßt, wie dies derzeit bei Häufigkeitsanalysen von Deskriptoren möglich ist. Ein solches Auswertungsmodell wird im folgenden Kapitel entwickelt.

4 Modell zur Auswertung der Informationen aus den Ereignissen

Das Beschreibungsmodell, welches im vorhergehenden Kapitel vorgestellt wurde, liefert eng an die natürliche Sprache angelehnte Daten in Form von Einzelsätzen und ist somit in der Lage, die in den Ereignissen zu beobachtenden Wirkungszusammenhänge so abzubilden, wie man es bisher nur von Ereignisbeschreibungen in Textform kennt (z.B. in Mosey, 1990). Wie im letzten Kapitel bereits festgestellt, ist ein Auswertungsmodell notwendig, da die Informationen, die im Beschreibungsmodell enthalten sind, mit einfachen häufigkeitsanalytischen Verfahren nicht auswertbar sind. Hierin liegt sicherlich auch ein Grund dafür, daß eine derart komplexe Methode zur Ereignisbeschreibung und -analyse, wie sie im vorhergehenden Kapitel dargestellt worden ist, derzeit noch keine praktische Verwendung gefunden hat, obwohl sie gegenüber einfacheren Verfahren einen höheren Erklärungswert hat. Auf der anderen Seite ist die aus den Ereignissen gesammelte Information nur dann sinnvoll einsetzbar, wenn sie neben einem hohen Erklärungswert auch ohne großen Aufwand auszuwerten ist und allgemeine Aussagen gewonnen werden können. Damit ist ein Verfahren, welches die im letzten Kapitel entwickelte Beschreibungsstruktur auswerten kann, untrennbar damit verbunden, ob die dort vorgestellte analytische Verfahrensweise überhaupt anwendbar ist, um Aussagen über die menschliche Zuverlässigkeit zu gewinnen.

Wie aber kann eine Vielzahl der mit Hilfe des Beschreibungsmodells gesammelten Ereignisse so ausgewertet werden, daß qualitative und quantitative Angaben zur menschlichen Zuverlässigkeit möglich werden? Die Beantwortung dieser Frage ist Ziel dieses Kapitels. Wie bereits in Kapitel 3 angedeutet, ist die Auswertung der Daten, die durch das Beschreibungsmodell gewonnen werden können, im Grunde genommen ein methodisches Problem, die hohe Anzahl an möglichen Relationen zwischen den Begriffen zu verarbeiten, die innerhalb des Beschreibungsmodells zur Ereignisbeschreibung genutzt werden. Zur Entwicklung des Auswertungsmodells sollen zunächst die gewünschten Auswertungsaspekte und die Struktur der im Beschreibungsmodell gewonnenen Daten dargestellt werden. Anschließend werden Probleme, das Auswertungsmodell mit Hilfe einfacher Datenbank-Algorithmen zu realisieren, angesprochen, und es wird versucht, diese Probleme mit Hilfe von Verfahren aus der künstlichen Intelligenz (KI) zu beheben. Darauf aufbauend wird abschließend ein Auswertungsmodell entwickelt und diskutiert.

4.1 Auswertungsaspekte

Um eine Vorstellung von der Problematik der Ereignisauswertung zu vermitteln, zeigt Bild 26 einen Ausschnitt eines Teils der Tabelle 16 aus Kapitel 3 als semantisches Netz. Bei der Ereignisauswertung müssen nun mehrere solcher semantischen Netze einzelner Ereignisse im Ganzen ausgewertet werden. Das Problem bei der Auswertung ist dabei, daß aufgrund der Variabilität der Ereignisbeschreibungen die benutzten Begriffe in nahezu beliebiger Kombination auftreten können. Beispielsweise kann in allen gesammelten Ereignissen die Angabe 'unterlassen' einem Ventil oder Schalter zugeordnet sein oder der Aktion 'öffnen' oder 'schließen' etc. Auch Einflußfaktoren können mehreren Objekten zugeordnet sein (z.B. kann die Anordnung von Signallampen, Schaltern, Ventilen o.ä. unzureichend sein). Ferner kann jeder Begriff in einem beliebigen MMS (als Auslöser oder bei der Fehlerkorrektur) und dort in mehreren MMS-Komponenten vorkommen (z.B. 'Ventil' bezogen auf Aufgabe oder bezogen auf 'Tätigkeit').

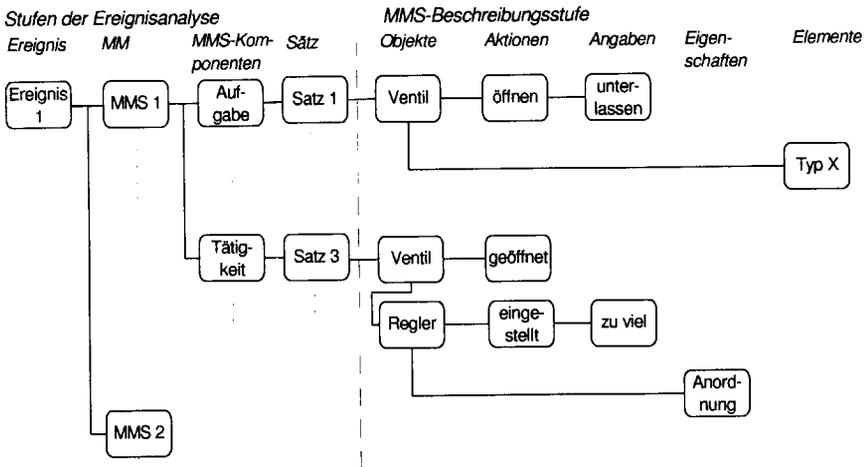


Bild 26 Ein einfaches Beispiel einer mit dem Beschreibungsmodell gewonnenen Datenstruktur.

Allgemeines Problem bei der Auswertung ist es, die Information aus mehreren gesammelten Ereignissen so zu reduzieren, daß sie für die gewünschten Auswertungsmöglichkeiten genutzt werden können. Dementsprechend werden im folgenden die er-

forderlichen Auswertungsmöglichkeiten zusammengestellt und anhand des Beispiels aus Bild 26 erläutert.

4.1.1 Erforderliche Auswertungsmöglichkeiten

Bereits in Kapitel 2 wurde deutlich, wie vielschichtig die Fragestellungen der HRA sind. Um alle diese Fragestellungen zufriedenstellend mit Daten versorgen zu können, reicht eine einfache häufigkeitsanalytische Auswertung der Informationen des Beschreibungsmodells nicht, wie zum Abschluß von Kapitel 3 festgehalten werden konnte. Die Hauptmerkmale, die das Auswertungsmodell besitzen soll, können unter Berücksichtigung der Ergebnisse der vorhergehenden Kapitel gemäß Bild 27 zusammengefaßt werden. Diejenigen Aspekte, nach denen Ereignisse ausgesucht werden sollen, werden dabei als Daten- oder Zugriffsschlüssel bezeichnet, der Prozeß der Datenwiedergewinnung wird allgemein als Retrieval bezeichnet (siehe Wiederhold, 1981).

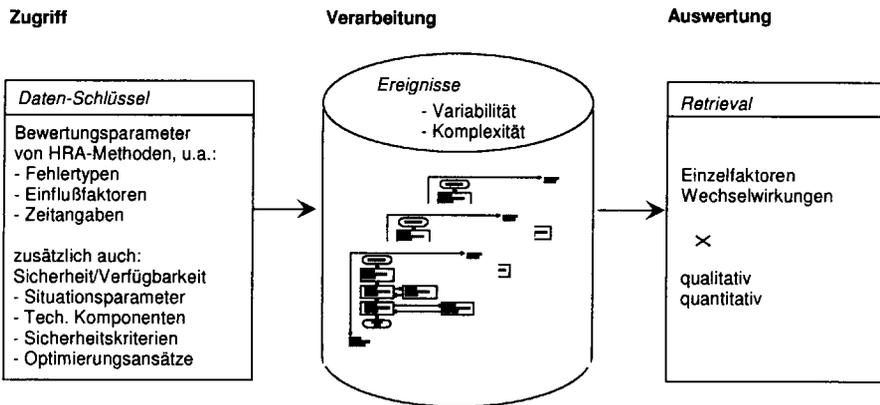


Bild 27 Geforderte Auswertungsmöglichkeiten aus den gesammelten Ereignissen.

- **Zugriff auf die gesammelten Daten**

Die Auswertungsmethode muß unterschiedliche Zugriffsmöglichkeiten auf die Daten (in Datenbanktermini sogenannte Datenschlüssel) zulassen. In Kapitel 2 wurden beispielsweise als erforderliche Zugriffsmöglichkeiten die Bewertungsansätze der HRA-Verfahren genannt (Fehlertypen, Einflußfaktoren und Zeit). Für andere Fragestellungen müssen zusätzlich andere Zugriffsmöglichkeiten gegeben sein. Ist beispielsweise

ein Ventil vom Typ X von sicherheitstechnischer Bedeutung, müssen bestimmte Fehler und Einflußfaktoren bezogen auf dieses Ventil bestimmt werden können. Idealerweise muß daher jeder Begriff oder jede Begriffskombination als Datenschlüssel für die Auswertung der Ereignisse genutzt werden können.

Eine sinnvolle Ereignisauswertung muß dabei auch in der Lage sein, wesensgleiche Ereignisse, also Ereignisse, die sich bezüglich bestimmter Merkmale oder Merkmalsmuster entsprechen, zu finden (z.B. Einflußfaktoren bei Fehlhandlungen an Ventilen). Da die Ereignisbeschreibungen eine hohe Variabilität besitzen, muß das Auswertungsmodell dazu folgende Eigenschaften besitzen:

1. **Klassenbildung:** Jeder Begriff, der zur Ereignisbeschreibung dient, muß als einzelner Begriff aber auch bezogen auf eine Klasse ausgewertet werden können (z.B. Fehlerarten bei einem Ventil vom Typ X oder bezogen auf die Klasse 'Ventil'). Diese Eigenschaft ist notwendig, damit die Auswertungsmethode flexibel genug ist, um Angaben auf unterschiedlichem Detaillierungsniveau auszuwerten.
2. **Variabler Zugriff:** Ein Zugriff auf ein Ereignis muß immer über jede Klasse, jeden Begriff oder jede Kombination mehrerer Klassen oder Begriffe (über ein Merkmalsmuster) möglich sein (z.B. sollen Häufigkeiten für Unterlassungsfehler bei allen Ventilen oder nur bei Ventilen vom Typ X bestimmt werden). Ferner sollte es unerheblich sein, ob die Häufigkeit ausgehend von einem Fehler (z.B. 'unterlassen'), von einem Objekt (z.B. 'Ventil') oder von einem Einflußfaktor (z.B. 'Anordnung') bestimmt wird.

• **Verarbeitung der gesammelten Daten**

Die Variabilität und Komplexität der Ereignisse birgt weitere Probleme bei der Verarbeitung der Daten. Bei der Verarbeitung der gesammelten Daten muß folgendes möglich sein:

1. **Lernfähigkeit:** Aufgrund der Variabilität bzw. Vielfalt der möglichen Ereignisse muß das Verfahren durch neue Begriffe und Klassen erweiterbar sein, und man muß auch bezogen auf diese neu gebildeten Klassen die Daten auswerten können (z.B. muß ein bisher noch nie in Ereignissen vorgekommenes Ventil vom Typ X in die Begriffshierarchie bereits vorhandener Ventile eingeordnet werden können). Damit wäre die Auswertungsmethode in der Lage, neue Begriffe sinnvoll in bereits vorhandene zu integrieren, also fähig zu lernen.

2. Ähnlichkeitsbestimmung: Über die zugreifende Abfrage müssen alle Ereignisse wiedergefunden werden, die sich bezüglich der Merkmalsmuster der Abfrage entsprechen (z.B. alle Unterlassungsfehler an Ventilen).
3. Beliebiger Detaillierungsgrad: Jede Abfrage muß unabhängig davon, wie detailliert sie gestellt wird, zu einer eindeutigen Lösung führen (z.B. müssen Häufigkeiten für allgemeine Aussagen zu Fehlhandlungen an Ventilen aber auch für Unterlassungsfehler an Ventilen vom Typ X bestimmt werden können).
4. Kombinationen: Nicht nur zu einzelnen Begriffen sondern zu jeder Kombination von Begriffen oder Klassen muß eine eindeutige Lösung angegeben werden können. Dies bedeutet z.B., daß Schnittmengen und Vereinigungsmengen trotz unterschiedlicher Detaillierungsgrade richtige Häufigkeiten liefern müssen (z.B. darf die Schnittmenge aus '(Ventil \cap unterlassen) \cup (Typ X \cap unterlassen)' die Menge 'Ventil \cap unterlassen' nicht überschreiten, da diese eine Obermenge der ersten Abfrage ist).

- **Auswertung der gesammelten Daten**

Das Auswertungsmodell soll ermöglichen, Einflüsse zwischen beschreibenden Faktoren, Fehlerarten und Einflußfaktoren zu identifizieren und deren Bedeutung zu quantifizieren. Zwei Zielrichtungen sind dafür bei der Bewertung der menschlichen Zuverlässigkeit von Bedeutung: (1) Quantitative Vorhersagen über Fehlerhäufigkeiten und die Häufigkeit von Einflußfaktoren, um die menschliche Zuverlässigkeit zu bewerten. (2) Qualitative Angaben über Einflußfaktoren und deren Wechselwirkungen, um mögliche Einflüsse verschiedener Faktoren zu bestimmen und Verbesserungsmöglichkeiten zu finden. Dazu muß die Auswertungsmethode in der Lage sein, eine Datenwiedergewinnung (retrieval) bezüglich der folgenden beiden Aspekte durchführen zu können:

1. Häufigkeiten: Zu jedem Begriff, zu jeder Klasse oder zu jeder Kombination von Begriffen und Klassen muß die Häufigkeit des Auftretens bestimmt werden können. Dies ist zur Bildung quantitativer Angaben notwendig. D.h., es muß die Häufigkeit jeder beliebigen Aussage bestimmt werden können, um Fragen der folgenden Art beantworten zu können: "Wie oft sind Unterlassungsfehler an Ventilen vorgekommen?"
2. Relationen: Zu jedem Begriff, jeder Klasse oder jeder Kombination von Begriffen und Klassen muß es möglich sein, jede beliebige Relation zu einem anderen Begriff oder einer anderen Klasse herzustellen. Dies ist zur Bestimmung von qualitativen Angaben erforderlich. D.h., es muß jede beliebige Relation bestimmt werden

können, um Fragen der folgenden Art beantworten zu können: "Welche Einflußfaktoren sind bei Unterlassungsfehlern an Ventilen zu beobachten?"

4.1.2 Die Datenstruktur des Beschreibungsmodells

Die Auswertungsmöglichkeiten, die im vorhergehenden Abschnitt beschrieben worden sind, müssen sich auf die Datenstruktur des Beschreibungsmodells beziehen. Dementsprechend werden zunächst folgende formalen Vereinbarungen zur Beschreibung der Datenstruktur des Beschreibungsmodells getroffen:

- **Objekte und Klassen**

Alle Ereignisbeschreibungen bestehen aus einer Anzahl bedeutungstragender Begriffe. Ein bedeutungstragendes Element (z.B. ein Begriff, ein Objekt oder eine Klasse) wird in der Forschung zur künstlichen Intelligenz (KI) allgemein als Entität bezeichnet (vgl. Shastri, 1988). Für jede Entität wird die folgende Schreibweise festgelegt:

$$\begin{array}{ll} \text{Entität} & \text{,wenn sie keine weiteren Unterbegriffe enthält} & (3) \\ \text{[Entität]} & \text{,wenn sie weitere Unterbegriffe enthält} \end{array}$$

Damit ergibt sich für jede MMS-Komponente bzw. jede Beschreibungsstufe:

$$\begin{array}{l} \text{[MMS-Komponente]} \in \{ \text{[Situation]}, \text{[Aufgabe]}, \text{[Person]}, \text{[Tätigkeit]}, \\ \text{[Rückmeldung]}, \text{[Auftragserteilung]}, \text{[Auftragserledigung]}, \text{[Umgebung]}, \\ \text{[System]} \} \end{array}$$

oder

$$\begin{array}{l} \text{[Beschreibungs-Stufe]} \in \{ \text{[Objekt]}, \text{[Aktion]}, \text{[Angabe]}, \text{[Eigenschaft]}, \\ \text{[Element]} \} \end{array}$$

oder für die Fehlertaxonomie

$$\text{[Angabe]} \in \{ \text{unterlassen}, \text{falsch}, \text{fehlerhaft}, \text{zu viel}, \text{zu wenig}, \dots \}$$

Ein bestimmtes Element bzw. ein bestimmter Begriff einer Menge von Entitäten wird folgendermaßen indiziert:

$$\text{[Entität]}_i \quad (4)$$

Die Zuweisung einer Entität zu einer übergeordneten Klasse wird Instantiierung genannt und durch den Operator "=" vorgenommen. Die erste Angabe im obigen Beispiel ist also:

Angabe \neq *unterlassen*

Die Häufigkeit, mit der eine Entität beobachtet worden ist, wird angegeben mit:

$h([Entität])$ (5)

In der Beschreibungsstruktur ist jede Entität bezüglich der MMS-Komponenten und der Beschreibungsstufen festgelegt. Dieser Sachverhalt wird durch zwei mit den Punktoperator "." getrennte Entitäten dargestellt. Damit ergeben sich beispielsweise für einen Unterlassungsfehler bei einer Aufgabe oder die Taxonomie zur Personenbezeichnung folgende Instantiierungen:

Aufgabe.Angabe = *unterlassen* (6)

oder

$[Person.Objekt] \in \{Wartepersonal, Wartungspersonal, Herstellerpersonal, \dots\}$

- **Aussagen und deren Wertigkeit**

Das Auswertungsmodell soll dazu dienen, Aussagen über die menschliche Zuverlässigkeit aus den gesammelten Ereignissen zu gewinnen. Alle Entitäten, die in den Ereignissen zur Beschreibung benutzt werden, werden dabei zur Grundmenge Ω zusammengefaßt.

Jede Aussage A besteht dann aus einer oder mehreren Entitäten $[E] \in \Omega$, die mit logischen Operatoren Op verknüpft werden. Folgende Operatoren werden gewählt: Als grundlegende Operationen sollen UND-Verknüpfungen und ODER-Verknüpfungen zweier Begriffe möglich sein. Auch NICHT-Aussagen sollen möglich sein. Sie sind aber einseitig; d.h., sie nehmen eine Operation an einem Begriff vor, verknüpfen diesen aber nicht mit einem anderen. Um solche NICHT-Aussagen mit anderen verknüpfen zu können, wird im folgenden die UND NICHT-Verknüpfung eingeführt. Sie nimmt eine Verknüpfung eines Begriffes mit dem Komplement eines anderen Begriffes vor (z.B. gilt für alle Ventile außerhalb der Warte die Aussage $A = [Objekt] \neq \text{Ventil UND NICHT$

[Umgebung]_j=Warte). Mit diesen Überlegungen sind die logischen Operatoren zur Konstruktion von Aussagen gegeben durch (vgl. Ameling, 1990):

$$Op \in \{UND, UND NICHT, ODER\} \quad (7)$$

Bezüglich der Formulierung der Aussagen soll die folgende Konvention vereinbart werden: Der erste Begriff einer Aussage ist mengentheoretisch betrachtet immer mit der Grundmenge Ω verknüpft. Dieser Umstand wird meist bei der Formulierung von Aussagen vernachlässigt, soll aber im folgenden berücksichtigt werden, um auch für den ersten Begriff einer Aussage einen Operator angeben zu können (diese Konvention dient auch der Gleichbehandlung aller Elemente einer Aussage und bringt Vorteile bezüglich des im weiteren Verlaufs dieses Kapitels dargestellten Auswertungsmodells). Der mengentheoretische Ausdruck $A = Ventil \cap \text{öffnen} \cap \text{unterlassen}$ entspricht also und in logischer Notation dem Ausdruck $A = \Omega \text{ UND Ventil UND öffnen UND unterlassen}$ oder vereinfacht $A = \text{UND Ventil UND öffnen UND unterlassen}$.

Werden verschiedene Entitäten zu einer Aussage verknüpft, so sind ODER-verknüpfte Entitäten gleichberechtigt und könnten zu einer Klasse zusammengefaßt werden (z.B. könnte die Aussage $A = \text{UND 'öffnen' ODER 'schließen' ODER 'einstellen'}$ zur Klasse $K = \text{'betätigen'}$ zusammengefaßt werden). Sie können aber auch explizit nebeneinander stehenbleiben. In diesem Fall beziehen sich die ODER-verknüpften Begriffe auf den vorhergehenden UND- bzw. UND NICHT-verknüpften Begriff und bei der Auswertung müssen sie wie eine Klasse behandelt werden. Beispielsweise ist die Aussage $A = \text{UND 'Ventil' UND 'öffnen' ODER 'schließen' ODER 'einstellen' UND NICHT 'unterlassen'}$ folgendermaßen abzarbeiten:

$$\begin{aligned} A = & \text{UND 'Ventil'} \\ & (\text{UND 'öffnen' ODER 'schließen' ODER 'einstellen'}) \\ & \text{UND NICHT 'unterlassen'} \end{aligned}$$

Demzufolge soll die Wertigkeit einer Aussage über die Anzahl der UND- bzw. UND NICHT-verknüpften Entitäten definiert werden als:

$$\begin{aligned} \text{Wertigkeit einer Aussage } A = & \quad (8) \\ \text{Anzahl aller } \{UND; UND NICHT\}\text{-verknüpften Entitäten } [E] \end{aligned}$$

Besteht eine Aussage B aus mehreren n -wertigen Aussagen $[A]$ so wird jede Aussage B als Satz bezeichnet, wenn die Aussage folgendermaßen zusammengesetzt ist:

$$B = \text{UND } [Objekt]_i \text{ UND } [Aktion]_j \text{ UND } [Angabe]_k \\ \text{UND } [Eigenschaft]_l \text{ UND } [Element]_m \quad (9)$$

Dabei können Sätze auch unvollständig sein. Gültige Sätze sind also z.B.

$$B_1 = \text{UND Ventil UND öffnen}$$

$$B_2 = \text{UND öffnen UND unterlassen UND Zeitdruck}$$

etc.

Eine Aussage mit mehreren Sätzen wird als komplexe Aussage bezeichnet. Die Satz-Wertigkeit der komplexen Aussage C ist dann analog der Wertigkeit einer einfachen Aussage durch die Anzahl der {UND; UND NICHT}-verknüpften Sätze $[B]$ gegeben durch:

$$\text{Satz-Wertigkeit einer komplexen Aussage } C = \\ \text{Anzahl aller \{UND; UND NICHT\}-verknüpften Aussagen } [B] \quad (10)$$

- **Relationen und Kombinationen zwischen Entitäten**

Alle Entitäten, die zur Ereignisbeschreibung genutzt werden, stehen in Relation zueinander. So wurde in Kapitel 3 beispielsweise dargestellt, daß der Aufbau der Beschreibungstabelle ausgehend von der Objekt-Spalte implikativ vorgeht; d.h., bei einem bestimmten Objekt kommen nur bestimmte Aktionen in Frage. Formal wird eine solche Implikation dargestellt als Relation zwischen zwei Entitäten. Allgemein gelten folgende Regeln:

$$\begin{aligned} \text{Gerichtet (1 auf 2):} & \quad [Entität_1] \text{---}g_{12}\text{---} \rightarrow [Entität_2] \\ \text{Gerichtet (2 auf 1):} & \quad [Entität_1] \text{---} \leftarrow g_{21} \text{---} [Entität_2] \\ \text{Ungerichtet:} & \quad [Entität_1] \text{---}g_{12}\text{---} [Entität_2] \end{aligned} \quad (11)$$

mit:

g Häufigkeit, mit der die Relation auftritt

Wurde beispielsweise der Begriff 'Ventil' genutzt, kommen nur ganz bestimmte Aktionen mit einer Häufigkeit von $g > 0$ in Frage (z.B. öffnen, schließen). Dies bedeutet:

$$[\text{Objekt}] = \text{Ventil} \xrightarrow{g > 0} [\text{Aktion}] \in \{\text{öffnen, schließen, ...}\}$$

Ferner kann definiert werden, daß eine Relation immer dann ungerichtet ist, falls gilt:

$$h([\text{Entität}_1] \xrightarrow{g_{12}} [\text{Entität}_2]) = h([\text{Entität}_1] \xleftarrow{g_{21}} [\text{Entität}_2]) \quad (12)$$

und damit

$$g_{12} = g_{21}$$

In der Struktur zur Beschreibung von Ereignissen kommen ausschließlich ungerichtete Relationen vor. Es gilt somit immer $g_{ij} = g_{ji}$. Die Häufigkeit für einen bestimmten Fehler bei einem bestimmten Einflußfaktor ist beispielsweise unabhängig davon, ob diese Häufigkeit ausgehend vom Fehler oder ausgehend vom Einflußfaktor bestimmt wird. Die Richtung zeigt also nur an, von welcher Entität ausgehend die Relation betrachtet wird. Um die möglichen Relationen des Beschreibungsmodells zu klassifizieren, kann eine in der Informatik übliche Einteilung von Datenbeziehungen herangezogen werden, welche in Bild 28 dargestellt ist (siehe auch Wiederhold, 1981; Ebert, 1993; Gerster, 1972).

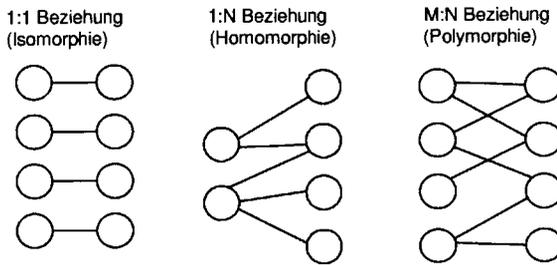


Bild 28 Mögliche Beziehungen zwischen Daten.

In Worten der Datenbankterminologie handelt es sich bei der Datenstruktur der Ereignisbeschreibung damit um vielfache M:N-Beziehungen, denn beispielsweise stehen die Begriffe, die zur Beschreibung von Objekten genutzt werden, in einer M:N-Beziehung zu Begriffen in der Angaben-Spalte (den Fehlerarten). So kann ein Ventil zu viel oder zu wenig geöffnet werden; es kann aber auch eine elektronische Baugruppe durch einen Fehler bei der Einstellung mit zu viel oder zu wenig Spannung versorgt werden. Gleiches gilt für die übrigen Beschreibungsstufen sowie für die Stufen der Ereignisana-

lyse (Ereignis, MMS, MMS-Komponenten, Sätze). Tabelle 23 zeigt zusammenfassend die möglichen Beziehungen zwischen den Entitäten des Beschreibungsmodells.

Tabelle 23 Beziehungen in der Datenstruktur der Ereignisbeschreibung.

Beziehung	Stufen der Ereignisanalyse				Beschreibungsstufen der MMS-Komponenten				
	Ereignis	MMS	MMS-Komponente	Satz	Objekt	Aktion	Angabe	Eigenschaft	Element
Ereignis									
MMS	M:N								
Komponente	M:N	M:N							
Satz	1:N	1:N	1:N						
Objekt	M:N	M:N	M:N	M:N					
Aktion	M:N	M:N	M:N	M:N	M:N				
Angabe	M:N	M:N	M:N	M:N	M:N	M:N			
Eigenschaft	M:N	M:N	M:N	M:N	M:N	M:N	M:N		
Element	M:N	M:N	M:N	M:N	M:N	M:N	M:N	M:N	

Die Tabelle verdeutlicht das bereits am Ende von Kapitel 3 diskutierte Problem, welches herkömmliche Verfahren bei der Auswertung komplexer Ereignisbeschreibungen haben: Die Auswertung aller Beziehungen wird in herkömmlichen Abfragesprachen (z.B. SQL - Structured Query Language) sequentiell durchgeführt und ist nur mit erheblichem Aufwand realisierbar, da sie für 1:N Beziehungen konzipiert sind. Aufgrund dieser Restriktion muß jede sequentiell arbeitende Datenbank die Daten in einer sogenannten Normalform organisieren, um eine eindeutige Wiedergewinnung der Datensätze zu ermöglichen (vgl. Ebert, 1993 oder Wiederhold, 1981). Die Normalform fordert unter anderem, daß jeder Datensatz eindeutig bzw. redundanzfrei sein muß. Um Häufigkeiten und Zusammenhänge darzustellen, sind in derartigen Abfragesprachen somit mehrere Datenstrukturen (Tabellen) erforderlich, die sich nach folgender Formel bestimmen lassen:

$$h = n(n - 1) \tag{13}$$

mit:

h Anzahl der erforderlichen Tabellen

n Anzahl der zu verbindenden Entitäten in N:M Beziehung

Um Häufigkeiten und Zusammenhänge aller Informationen der in Tabelle 23 dargestellten Datenstruktur z.B. über SQL-Abfragen auszuwerten, wären also insgesamt für die 9 Spalten $(9 * 9 - 9) - 3 = 69$ Datentabellen inklusive Verwaltungsaufwand erforderlich (durch den Ausdruck "-3" werden die drei 1:N-Beziehungen berücksichtigt).

Wie bereits angesprochen, ist darüber hinaus bei einer Auswertung die Zusammenfassung von Daten in Klassen erforderlich. Auf diese Klassen muß auch zugegriffen werden können, um dadurch allgemeinere Aussagen treffen zu können (z.B. alle Unterlassungsfehler oder alle Personen auf der Warte oder alle analogen Anzeigen oder die Zusammenfassung der Ausführungsfehler 'zu viel' und 'zu wenig' zur Klasse 'quantitative Fehler'). In einer SQL-Abfrage müßte dieses durch aufwendige Neugestaltung der SQL-Abfrage oder der Datenbankstruktur realisiert werden. Jede neu gebildete Klasse würde dabei die Anzahl der erforderlichen Datenstrukturen nach Gleichung 13 bei $n+1$ neuen gegenüber n alten Klassen um

$$[(n+1)(n+1-1)] - [n(n-1)] = 2n \quad (14)$$

mit:

n *Anzahl zusätzlichen Entitäten in N:M Beziehung bzw. der neu gebildeten Klassen*

erhöhen. Anzumerken ist, daß es für diese Betrachtung unerheblich ist, ob zur Wiedergewinnung der Information Datenstrukturen (Tabellen) von 1:N-Beziehungen aufgebaut werden oder ob dies durch eine Abfrage (z.B. mit SQL) geschieht, da eine Abfrage nichts anderes darstellt als eine durch sequentielle Verarbeitung einer Ursprungstabelle gewonnene Ergebnistabelle. Zieht man ferner in Betracht, daß das Erfassungsmodell eine Differenzierung der Begriffe in beliebig detaillierte Unterbegriffe erlaubt, führt dies zu einer zusätzlichen Erhöhung der zu berücksichtigenden Beziehungen zwischen den einzelnen Begriffen, da jeder Detaillierungsgrad eines Begriffes formal wie eine neue Klasse behandelt werden kann.

Eine weitere Erhöhung des Auswertungsaufwandes ist zu erwarten, falls nicht nur zwei-wertige Aussagen miteinander in Verbindung gebracht werden müssen (z.B. Unterlassungen bei Prozeduren) sondern drei- oder mehr-wertige (z.B. Unterlassungen bei Prozeduren unter Zeitdruck). Diese mehrparametrischen Abfragen bzw. Abfragen von bedingten Häufigkeiten würden wiederum die Anzahl der Objekte, unter Berücksichtigung aller möglichen Kombinationen, um

$$\sum_{i=2}^k \binom{n}{i} = \sum_{i=2}^k \frac{n!}{i!(n-i)!} \quad (15)$$

mit:

n Anzahl der Entitäten, die zusammengefaßt werden sollen

k Maximal gewünschte Wertigkeit von Aussagen

erhöhen. Würde man beispielsweise bei $n=100$ Begriffen versuchen, beliebige Kombinationen von jeweils $k=3$ Bedingungen aufzustellen, ergäben sich bereits 166.650 Möglichkeiten, neue Objekte oder Relationen mit den vorhandenen Begriffen aufzustellen. Für jede dieser Möglichkeiten wäre es erforderlich, eine Häufigkeit anzugeben, wenn alle kombinatorisch möglichen Beziehungen häufigkeitsanalytisch ausgewertet werden sollen. Ist es auch gewünscht, für jede dieser Kombinationen diejenigen Faktoren zu finden, mit denen sie sich in Wechselwirkung befinden, so sind insgesamt genauso viele Datenstrukturen in Form von 1:N Beziehungen wie Objekte erforderlich, da für jedes Objekt i die Relationen $[Objekt]_j - g > 0 - [Wechselwirkende\ Faktoren]$ gesucht sind.

Wie dieses Beispiel zeigt, wird gerade durch die Abfrage von Begriffs-Kombinationen die praktische Anwendungsgrenze von einfachen Auswertungsverfahren erreicht. Um an die Diskussion zum Anschluß von Kapitel 3 anzuschließen, muß auch aufgrund dieses Problems der kombinatorischen Zunahme von Relationen zwischen Entitäten bzw. Begriffen ein deskriptor-orientiertes Verfahren für die detaillierte Beschreibung und Analyse von Ereignissen verworfen werden. Es kann also festgehalten werden, daß nicht allein die Beschreibung sondern auch die Auswertung der Informationen aus dem Beschreibungsmodell durch herkömmliche Verfahren (z.B. SQL bezogen auf bestimmte Deskriptoren) nicht möglich ist, da die Datenstruktur des Beschreibungsmodells ähnlich komplexe Eigenschaften hat wie natürlich-sprachlicher Fließtext.

Dieses Problem bei der Kodierung und Wiedergewinnung von Information unter derartigen Bedingungen (beliebiger Zugriff, Ähnlichkeitsbestimmung, variabler Auflösungsgrad) ist nicht neu. Dabei wird die damit notwendigerweise verknüpfte kombinatorische Zunahme der Anzahl von Relationen in der Forschung zur künstlichen Intelligenz (KI) als kombinatorische Explosion oder allgemein als Relationenproblem bezeichnet (vgl. Kempke, 1988; Sträter, 1991). Ein Ziel der Forschung zur Künstlichen Intelligenz (KI) und der mit ihr verbundenen kognitionspsychologischen Forschung ist es, eine Lösung dieses Kodierungsproblems zu finden. Eine Lösung wird gerade in diesen For-

schungszweigen gesucht, da das menschliche Gedächtnis genau die Leistungen vollbringt, die zur Lösung dieses Kodierungs- und Retrievalproblems erforderlich sind.

4.2 Ansätze für das Auswertungsmodell aus der KI

Zur Lösung des Kodierungs- und Retrievalproblems werden in der Literatur zur KI objekt- und regelorientierte Expertensysteme, Fuzzy-Sets, probabilistische Netze sowie neuronale Netze diskutiert. Neuronale Netze können ferner in assoziative und konnektionistische Netze unterteilt werden, welche sich im wesentlichen darin unterscheiden, daß konnektionistische Netze zu semantischen Aussagen fähig sind und assoziative Netze nicht. In Anhang 4 werden diese verschiedenen Ansätze und ihre wesentlichen Aspekte kurz dargestellt. An dieser Stelle ist lediglich ein Vergleich der Methoden bezüglich der Leistungsmerkmale erforderlich, die das Auswertungsmodell erfüllen muß. In der bisherigen Diskussion wurden dabei folgende Anforderungen angesprochen, welche in Tabelle 24 zusammengefaßt werden:

- Semantische Verarbeitung der Information, um qualitative Aussagen über Begriffe oder Klassen sowie deren Kombinationen und Wechselwirkungen zu erhalten:
Dieses Merkmal erfüllen alle Ansätze dadurch, daß die gesammelten Daten als Relationen und Objekte innerhalb eines Suchraumes bzw. Graphen dargestellt werden (z.B. als semantische Netzwerke). In assoziativen Netzen ist der Grad der Konnektivität der verschiedenen Relationen jedoch so hoch, daß der Zusammenhang zwischen Eingabe- und Ausgabeseite nicht mehr semantisch interpretiert werden kann.
- Bestimmung von Häufigkeiten von Begriffen oder von deren Kombinationen und Wechselwirkungen, um quantitative Aussagen zu erhalten:
Auch dieses Merkmal erfüllen alle Ansätze dadurch, daß innerhalb des Suchraumes eine Gewichtung von Relationen und Objekten vorgenommen wird. Bei den objekt- und regelorientierten Expertensystemen werden Häufigkeiten jedoch lediglich explizit für einzelne Objekte bzw. Relationen angegeben. Es findet dort keine Verarbeitung in dem Sinne statt, daß Häufigkeiten für eine Kombination mehrerer Objekte bzw. Relationen berechnet werden.
- Lernfähigkeit (Einordnung in bzw. Bildung von neuen Klassen), um die Variabilität der Ereignisse verarbeiten zu können:
Lernen geschieht entweder durch Veränderung der Gewichtung von Relationen und Objekten oder durch die Ergänzung neuer Relationen und Objekte. Auch diese Möglichkeit ist in allen Ansätzen gegeben. Regel- und objektorientierte Ex-

pertensysteme sind jedoch bei der Lernfähigkeit jeweils auf die Ergänzung von Regeln oder Objekten beschränkt. Ähnliches gilt für Fuzzy-Sets, die nur durch Veränderung oder Ergänzung von Membershipfunktionen lernfähig sind.

- Ähnlichkeitsbestimmung, um eine Übertragbarkeit verschiedener Ereignisse auf eine Fragestellung zu gewährleisten bzw. um eine bestimmte Situation bewerten zu können, die in unterschiedlichen Ereignissen vorherrschte:

Regelbasierte Systeme können keine Ähnlichkeitsbestimmung zwischen verschiedenen Ereignissen vornehmen, da kein Vergleichsmechanismus vorhanden ist. Dort müssen alle Ähnlichkeiten explizit als Regel formuliert werden. **Objektorientierte Systeme** lassen eine Ähnlichkeitsbestimmung zu, indem Ähnlichkeit als Anzahl der Merkmale definiert wird, in denen sich verschiedene Objektstrukturen entsprechen. Diese Merkmale können über einen geeigneten Inferenzmechanismus miteinander verglichen werden. **Fuzzy-Sets** repräsentieren zwar Ähnlichkeiten über die Membershipfunktion, sie lassen aber keine Ähnlichkeitsbestimmung zu, da eine Membershipfunktion bereits voraussetzt, daß Ähnlichkeiten bestimmt worden sind und auf der der Membershipfunktion zugrunde liegenden Dimension abgebildet werden können. Ähnlichkeiten sind hier also fest definiert. In **probabilistischen, assoziativen und konnektionistischen Netzen** werden Ähnlichkeiten dadurch bestimmt, daß sich zwei zu vergleichende Merkmalsmuster bezüglich der Aktivitätsverteilung in den Netzen entsprechen. Abstraktere Aussagen werden dadurch gewonnen, daß Merkmale auf einer abstrakteren Ebene einer Objekthierarchie verglichen werden. Damit ist gleichzeitig eine Übertragbarkeit verschiedener individueller Ereignisse auf eine Fragestellung (z.B. ein bestimmter Fehlertyp wie 'unterlassen') möglich.

- Variabler Zugriff auf die Begriffe, um die verschiedenen Bewertungsparameter der verschiedenen HRA-Verfahren (im wesentlichen Fehlertypen, Zeitangaben, Einflußfaktoren) mit Angaben versorgen zu können:

Variabler Zugriff unter unterschiedlichen Perspektiven ist prinzipiell nur dadurch möglich, daß gleiche Entitäten unterschiedlichen Klassen zugeordnet werden und eine Auswertung der Entitäten bezogen auf diese unterschiedlichen Klassen stattfinden kann. Diese Eigenschaft von Entitäten, in mehreren Klassen gleichermaßen repräsentiert zu sein, wird als Polymorphie bezeichnet (siehe z.B. Heuer, 1992). Die einfachste Form einer Polymorphie ist eine M:N-Beziehung. **Regelorientierte Systeme** können Polymorphien nur durch einzelne Regeln angeben. **Objektorientierte Systeme** bilden Polymorphien dadurch ab, daß Entitäten vererbt, also an untergeordnete Entitäten weitergegeben werden können. In **Fuzzy-Sets** repräsen-

tieren die Überschneidungsbereiche von Membershipfunktionen polymorphe Beziehungen. **Probabilistische Netze** lassen eine Auswertung von Polymorphismen nur dann zu, wenn sämtliche Übergangswahrscheinlichkeiten zwischen allen Knoten des Netzes bekannt sind. **Konnektionistische Netze** können Polymorphismen dadurch abbilden, daß in der verdeckten Schicht (hidden layer) eine verteilte Repräsentation der semantischen Information vorgenommen wird. **Assoziative Netze** können keine Polymorphismen abbilden, da die Information auf der verdeckten Schicht nicht semantischer Art ist.

- Beliebiger Detaillierungsgrad, um Daten auf verschiedenem Auflösungsgrad für unterschiedliche HRA-Verfahren (insbesondere holistische und dekompositionelle Verfahren) angeben zu können:

Regelbasierte Systeme, Fuzzy-Sets und probabilistische Netze können beliebige Auflösungsgrade nur dadurch erreichen, daß jede Detaillierungsstufe durch eine Menge neuer Regeln bzw. Objekten realisiert wird. Eine Auswertung beliebiger Detaillierungsstufen ist immer mit einer Explosion der sich kombinatorisch ergebenden Relationen bzw. Objekte verbunden. **Objektorientierte Systeme** können einen beliebigen Detaillierungsgrad durch Kapselung der vererbten Objekte bzw. Eigenschaften erreichen. Kapselung bedeutet dabei, daß ein vererbtes Objekt bzw. eine vererbte Eigenschaft einen spezifischen Wert annehmen kann. Eine kombinatorische Explosion wird dadurch eingedämmt, daß auswertbare Kombinationen durch den Vererbungsmechanismus vorgegeben sind. **Assoziative und konnektionistische Netze** erreichen beliebige Auflösungsgrade durch spezifische Auflösung der Objekte in den verdeckten Schichten.

Der durchgeführte Vergleich der KI-Verfahren und der Leistungsmerkmale wird in Tabelle 24 zusammengefaßt.

In der Tabelle bedeutet ↓ bezüglich dieses Merkmals nicht geeignet, ↑ theoretisch geeignet und ↗ theoretisch geeignet und praktikabel. Der Vergleich in der Tabelle zeigt, daß nur konnektionistische Netze alle Leistungsmerkmale des gewünschten Auswertungsmodells erfüllen. Dies ist im wesentlichen die Bestimmung von Häufigkeiten bei gleichzeitiger Forderung nach variablem Zugriff und beliebiger Detaillierung der Information. Dieser Ansatz ist allerdings auch derjenige, der formal am wenigsten festgelegt ist und derjenige, der dem Entwickler die meisten Freiheitsgrade überläßt. In welche Richtung konnektionistische Netze weiterentwickelt werden müssen, zeigt die Diskussion in Anhang 4.

Tabelle 24 Gegenüberstellung der KI-Ansätze bezüglich der Anforderungen des Auswertungsmodells.

A

<i>allgemeine Leistungsmerkmale Ansatz</i>	<i>Semantische Verarbeitung</i>	<i>Lernfähigkeit</i>	<i>Häufigkeiten</i>
<i>Regelorientierte Expertensysteme</i>	↑ ja	↑ durch Modifikation von Gewichten oder Ergänzen neuer Regeln	↓ nur bezogen auf Regeln, nicht auf Objekte
<i>Objektorientierte Expertensysteme</i>	↑ ja	↑ durch Modifikation von Gewichten oder Ergänzen neuer Objekte	↓ nur bezogen auf Objekte, nicht auf Relationen
<i>Fuzzy-Sets</i>	↑ ja	↑ nicht vorgesehen, bedingt durch neue Membershipfunktionen	↑ bezogen auf Membershipfunktion
<i>Probabilistische Netze</i>	↑ ja	↑ durch Modifikation von Gewichten oder neue Objekte / Relationen	↑ bedingt, erfordern Wahrscheinlichkeiten
<i>Assoziative Netze</i>	↓ keine semantische Beziehung zwischen Ein- und Ausgabe	↑ durch Modifikation von Gewichten oder neue Objekte / Relationen	↑ als Relationen und Gewichte von Objekten
<i>Konnektionistische Netze</i>	↑ ja	↑ durch Modifikation von Gewichten oder neue Objekte / Relationen	↑ als Relationen und Gewichte von Objekten

B

<i>spezifische Leistungsmerkmale Ansatz</i>	<i>Ähnlichkeitsbestimmung</i>	<i>Variabler Zugriff</i>	<i>Beliebige Detaillierung</i>
<i>Regelbasierte Systeme</i>	↓ nein, da kein Mechanismus vorhanden	↓ kombinatorische Explosion einzelner Regeln	↓ nur durch Kombination einzelner Regel
<i>Objektorientierte Systeme</i>	↑ durch objektbezogenen Inferenzmechanismus	↑ durch Klassenbildung und Vererbung von Objekten vorgegeben	↑ durch Kapselung vererbter Objekte
<i>Fuzzy-Sets</i>	↓ nein, Ähnlichkeiten müssen bereits bekannt sein	↑ als Überlappungsbereich von Membershipfunktionen vorgegeben	↓ nur durch Kombination einzelner Objekte
<i>Probabilistische Netze</i>	↑ durch Aktivitätsverteilung	↑ nur wenn alle Relationen bekannt sind	↓ nur durch Kombination einzelner Objekte
<i>Assoziative Netze</i>	↑ durch Aktivitätsverteilung	↓ nein, da keine semantische Information	↑ durch verteilte Repräsentation
<i>Konnektionistische Netze</i>	↑ durch Aktivitätsverteilung	↑ durch Konnektivität	↑ durch verteilte Repräsentation

4.3 Entwicklung des Auswertungsmodells

Als Ausgangspunkt für ein Auswertungsmodell wurde ein konnektionistisches Netz ausgewählt. Wesentliche Freiheitsgrade konnektionistischer Netze sind die Topologie des Netzes, die Aktivierung der einzelnen Knoten und der Verarbeitungsmechanismus zwischen den Knoten. Um zu einem Auswertungsmodell zu gelangen, müssen diese typischen Eigenschaften festgelegt werden.

4.3.1 Netztopologie

Um eine geeignete Netztopologie zu finden, soll ein Teil des Beispiels aus Bild 26 in ein konnektionistisches Netz umgesetzt werden: Es wird der Ast 'Ventil öffnen unterlassen' gewählt. Gesucht ist bei der Ereignisauswertung dann die Häufigkeit, mit der diese Begriffskombination in allen gesammelten Ereignissen auftritt. Hierzu muß folgende 3-wertige Aussage erfragt werden:

h (UND Objekt=Ventil UND Aktion=öffnen UND Angabe=unterlassen)

Weiterhin ist für qualitative Analysen aber auch gesucht, mit welchen Faktoren die Aussage *A = Ventil öffnen unterlassen* noch in Verbindung steht. Diese Frage wird durch sämtliche von der Aussage *A* abgehenden Relationen zu Einflußfaktoren beantwortet, bei denen die Häufigkeit $g > 0$ ist. Beispielsweise ergäbe sich folgende Aussage:

(UND Objekt=Ventil UND Aktion=öffnen UND Angabe=unterlassen)

— $g > 0$ →

[Eigenschaft] ∈ {Zeitdruck, Arbeitsvorbereitung, ... }

Bild 29 zeigt die 3-wertige Aussage des Beispiels 'Ventil öffnen unterlassen' als Venn-Diagramm. Der doppelt schraffierte Überschneidungsbereich aus dem Bild stellt dann die prädikatenlogische Aussage *A = 'Ventil öffnen unterlassen'* dar.

Um für diese Aussage Häufigkeiten und Relationen zu anderen Begriffen zu bestimmen, kommen prinzipiell verschiedene Netztopologien in Frage, die in Anhang 4 im Detail diskutiert werden. Die einfachste Möglichkeit ist, die in den Ereignissen benutzten Begriffe mit den Ereignissen in Verbindung zu bringen, in denen sie genutzt werden. Diese Lösung wird als konnektionistisches Netz mit ereignisorientierter Topologie

bezeichnet und hat den Vorteil, daß zur Bildung und Auswertung dieses Netzes nur die Angaben benötigt werden, die direkt aus den mit dem Beschreibungsmodell gesammelten Angaben hervorgehen. Die folgende Lösung kommt also ohne großen Umstrukturierungs- oder Berechnungsaufwand aus.

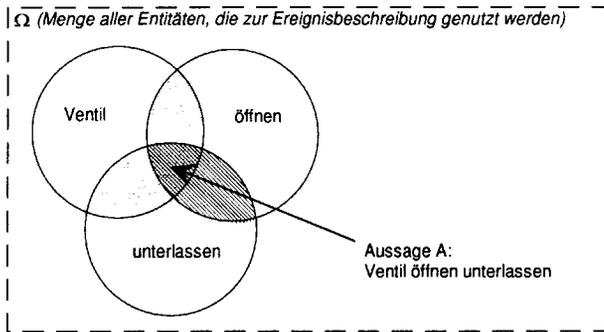


Bild 29 Aussage 'Ventil öffnen unterlassen' als Venn-Diagramm.

Bild 30 zeigt eine ereignisbezogene Topologie. Im Bild wird vereinfachend angenommen, daß nur drei Fälle beobachtet wurden. Die Knoten des Netzes im Bild repräsentieren die Begriffe der Ereignisbeschreibung; die Zahlen in den Knoten die Häufigkeit, mit der die Begriffe vorgekommen sind.

Im Ereignis 1 wurde ein Ventil geöffnet und in den Ereignissen 2 und 3 wurde das Öffnen eines Ventils unterlassen. Da jedes Ereignis einmal vorgekommen ist, ist das Gewicht der Ereignisknoten 1. Das Gewicht der Begriffe ist abhängig davon, wie oft sie insgesamt genutzt wurden (z.B. wurde der Begriff 'unterlassen' in den Ereignissen 2 und 3 also zwei mal genutzt). Ferner wird aus dem Bild das Charakteristische einer ereignisbezogenen Topologie deutlich: Es wird eine einfache Zuordnung der Begriffe, die zur Ereignisbeschreibung genutzt wurden, zu den Ereignissen vorgenommen, in welchen diese Begriffe vorkommen.

In dieser Topologie behält jedes Ereignis innerhalb des Netzes seine ganz spezifische Begriffskonstellation bei; man bezeichnet diese Fähigkeit als Kapselung. Damit ist jeder Begriff verteilt repräsentiert, da er zur Beschreibung unterschiedlicher Ereignisse genutzt wird. Insgesamt ist diese Topologie damit in der Lage, polymorphe Beziehungen abzubilden. Ein Begriff ist aber auch explizit vorhanden, so daß auf ihn als einzelner Begriff zugegriffen werden kann.

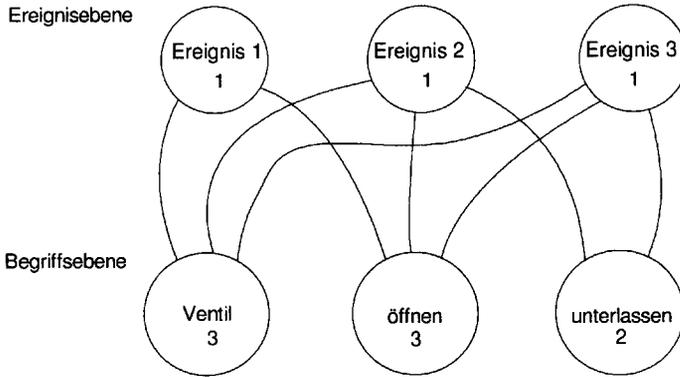


Bild 30 Ereignisbezogene Topologie zur Auswertung der Betriebserfahrung.

Relationen zwischen Begriffen sind in der ereignisbezogenen Topologie nicht als direkte Verbindungen zwischen den Begriffen realisiert sondern als "Umweg" über die Ereignis-Knoten, bei denen die Elemente der Aussage vorhanden sind. Beispielsweise geht die Relation zwischen den Begriffs-Knoten 'Ventil' und 'unterlassen' über die Ereignis-Knoten 'Ereignis 2' und 'Ereignis 3'. Eine Aussage wird hier immer durch zwei Schritte gewonnen: (1) Einer Suche nach den Ereignissen, in denen die einzelnen Elemente der Aussage vorgekommen sind (alle Ereignis-Knoten, die mit 'Ventil' und 'unterlassen' verbunden sind). (2) Einer Abzählung der Ereignisse, in denen alle Elemente der Aussage vorgekommen sind (alle Ereignis-Knoten, bei denen gleichzeitig 'Ventil' und 'unterlassen' vorgekommen sind). In der ereignisbezogenen Topologie sind diese Schritte unabhängig von der Wertigkeit der Aussage und damit ist auch der Verarbeitungsaufwand unabhängig von der Wertigkeit der Aussage.

Es fehlt allerdings eine allgemeine Vorschrift bzw. ein Verarbeitungsmechanismus, um die im statischen Netz enthaltene Information wiederzugewinnen. Wie der Verarbeitungsmechanismus bzw. die Aktivierung der einzelnen Knoten gestaltet sein muß, damit Häufigkeiten und Relationen beliebiger n-wertiger Aussagen bestimmt werden können, wird im folgenden dargestellt.

4.3.2 Aktivierungsfunktion

Zur Verarbeitung von Information besitzen die Knoten konnektionistischer Netze ähnliche Eigenschaften wie neuronale Zellen. Der allgemeine Aufbau eines Knotens ist in Bild 31 dargestellt. Man unterscheidet Dendriten a_j auf der Eingabeseite, ein Axon a_j auf der Ausgabeseite und die Zelle o_j . Zur Verarbeitung der Eingangsinformation und

Umformung in eine Ausgangsinformation nutzt die Zelle eine sogenannte Aktivierungsfunktion $f(o_j)$. Dendriten und Axon besitzen die Gewichtungen w_{ij} für die Eingabeseite und w'_{jk} für die Ausgabeseite.

Die Aktivierungsfunktion $f(o_j)$ wandelt die Summe aller gewichteten Aktivierungen ($w_{ij} * o_j$), die auf den Knoten o_j zugehen, in eine Ausgabeaktivierung a_j um. Innerhalb eines konnektionistischen Netzes gilt üblicherweise eine einheitliche, für alle Knoten festgelegte Aktivierungsfunktion, unabhängig davon, an welcher Stelle sich die Knoten innerhalb des Netzes befinden.

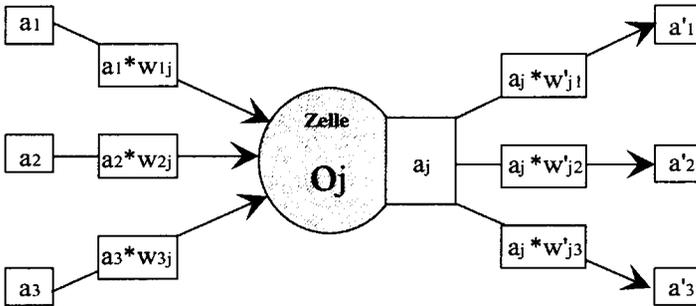


Bild 31 Aufbau einer Zelle im konnektionistischen Netz und Aktivierungsfluß.

Um innerhalb des ereignisbezogen organisierten Zellverbandes Häufigkeiten beliebiger Kombinationen von Begriffen berechnen zu können, muß die Aktivierungsfunktion gemäß Gleichung 16 angewendet werden. Die Aktivierungsfunktion nutzt dabei folgende Umstände: Die Häufigkeit, mit der ein Begriff in allen Ereignissen genannt worden ist, ist durch sein Gewicht o_j gegeben. Da jeder Begriff immer zur Beschreibung eines Ereignisses genutzt wird, gibt er sein Gewicht mit der Stärke von $1/o_j$ an jeden Knoten auf der Ereignis-Ebene ab. Die einzigen Maße, die für die Aktivierungsfunktion bekannt sein müssen, sind also die Häufigkeit, mit der ein Begriff genutzt worden ist, und die Relationen zu den Ereignissen, in denen er genutzt worden ist. Beide Größen können direkt aus dem Beschreibungsmodell gewonnen werden.

$$a_j = \min \left(o_j * \sum_{i=1}^{n_j} w_{ij} * a_i ; o_j \right)$$

und

$$w'_{jk} = \frac{1}{n_j}$$
(16)

mit :

- a_i *Aktivierung des Knotens i*
- w_{ij} *Gewicht der von Knoten i auf Knoten j zugehenden Relation*
- n_i *Anzahl der auf Knoten j zugehenden Relationen*
- o_j *Gewicht des Knotens j (entspricht der Häufigkeit der Nutzung)*
- a_j *Aktivierung des Knotens j*
- w'_{jk} *Gewicht der von Knoten j abgehenden Relation k*
- n_j *Anzahl der von Knoten j abgehenden Relationen*

Warum die Aktivierungsfunktion so lauten muß, zeigt sich, wenn man sich den Verarbeitungsmechanismus verdeutlicht, mit dem beliebige n -wertige Aussagen aus den Ereignissen getroffen werden können.

4.3.3 **Verarbeitungsmechanismus**

Verarbeitung innerhalb konnektionistischer Netze vollzieht sich dadurch, daß eine Eingangsinformation zunächst innerhalb einer Eingangsschicht in eine Aktivierung von Knoten (im Sinne der elektrophysiologischen Aktivierung einer Nervenzelle) umgewandelt wird. Dieses Muster von Eingangsaktivitäten wird darauf über eine oder mehrere verdeckte Schichten hindurch bis zur Ausgabeschicht propagiert. Die Aktivierung der Knoten der Ausgabeschicht repräsentiert dann die Antwort auf die gesuchte Fragestellung; in diesem Fall also die Häufigkeit mit der eine beliebige Begriffskombination innerhalb der gesammelten Ereignisse beobachtet worden ist. Für eine Informationsweitergabe zwischen den einzelnen Knoten sorgt dabei die oben bereits vorgestellte Aktivierungsfunktion. Damit ergibt sich für die ereignisbezogene Topologie das im folgenden dargestellte Prinzip einer konnektionistischen Datengewinnung.

- **Prinzip einer konnektionistischen Datengewinnung**

Im einzelnen sind für eine Verarbeitung von Ereignissen innerhalb der ereignisbezogenen Topologie mehrere Schichten erforderlich. Diese sind exemplarisch in Bild 32 dargestellt. Im Bild wurde das oben bereits aufgeführte Beispiel für eine ereignisbezogene Topologie erweitert. Gegenüber Bild 30 wurde zusätzlich eingeführt: (1) Eine Ergebnisebene und eine Schwellenbestimmung über der Ereignis-Ebene, um die Fälle zu zählen, bei denen eine bestimmte Aussage beobachtet worden ist. (2) Ein Aktivie-

rungsschema, um eine semantische Aussage bzw. Frage in eine vom konnektionistischen Netz lesbare Form (eine Aktivierung) umzusetzen.

Wie eine Frage in ein Aktivierungsschema umgeformt wird, wird weiter unten genauer erläutert, an dieser Stelle soll zunächst das prinzipielle Vorgehen einer konnektionistischen Datengewinnung beschrieben werden:

- Eine Frage wird in eine n -wertige Aussage umgeformt und diese darauf mit einem Aktivierungsschema versehen. Das Aktivierungsschema wird dann in eine Kombination ein-wertiger Aussagen zerlegt und auf die einzelnen Begriffe verteilt. Hierzu wird in diesem Fall eine maximal mögliche Aktivierung von $a_{Frage}=1$ auf alle n einwertigen Aussagen verteilt (der vollständige Formalismus zum Aktivierungsschema wird weiter unten dargestellt). Da prinzipiell jeder Begriff zur Formulierung der Frage genutzt werden kann, sind beliebige Kombinationen von Begriffen und Wertigkeiten von Anfragen möglich.
- Die ein-wertigen Aussagen werden in der ereignisbezogenen Topologie auf die Knoten in der Ereignis-Schicht propagiert. Die Knoten der Ereignisebene zählen zunächst die Anzahl der ein-wertigen Aussagen, die im Ereignis enthalten sind. Dies geschieht gemäß der Aktivierungsfunktion durch Aufsummieren der Aktivierungen. Die Aktivierung der Knoten repräsentiert dann den Anteil der ein-wertigen Aussagen, welche im Ereignis enthalten sind. In einem weiteren Schritt wird eine Schwellenbestimmung durch einen weiter unten beschriebenen Formalismus vorgenommen, um alle Ereignisse zu identifizieren, welche die gesamte n -wertige Aussage enthalten.

Die Schwellenbestimmung prüft, ob die gesamte Aktivierung, die vom Aktivierungsschema abgegeben worden ist, auch am entsprechenden Ereignis-Knoten angekommen ist und entscheidet somit darüber, ob die am Ereignis-Knoten ankommende Aktivierung ausreicht, um die erfragte n -wertige Aussage zu bestätigen. Ist dies nicht der Fall, so wird keine Aktivierung weitergegeben, im anderen Fall sind alle ein-wertigen Aussagen im Ereignis enthalten und es wird nach der Schwellenbestimmung die Aktivierung $a=1$ von der Ereignis-Ebene weitergegeben.

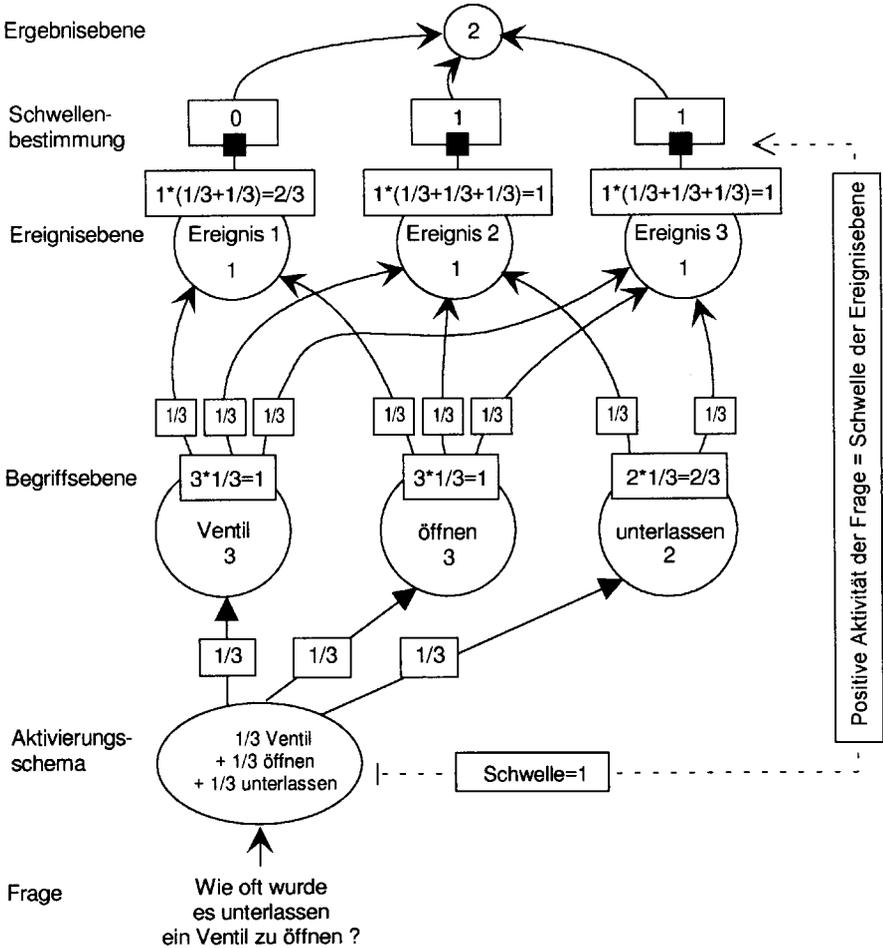


Bild 32 Darstellung des Prinzips einer konnektionistischen Datengewinnung.

Insgesamt betrachtet können im konnektionistischen Modell Häufigkeiten vorhandener Begriffe bzw. Begriffskombinationen also abgefragt werden, indem eine Abfrage von unten nach oben (bottom up) durch das Netz verarbeitet wird. Sind auf der Ereignis-Schicht diejenigen Ereignisse identifiziert, welche die n-wertige Aussage enthalten, können nun durch eine sogenannte Rückpropagierung (back propagation) diejenigen Begriffe gefunden werden, welche zusätzlich in den Ereignissen von Bedeutung waren, indem nun die auf der Ereignis-Schicht vorhandene Aktivierung von oben nach unten (top down) durch das Netz propagiert wird. Dies ist möglich, da das Netz selbst ungerichtet ist und die Verarbeitungsrichtung allein durch die Propagierungsrichtung vorgegeben wird. Bei der Rück-Propagierung werden im einfachsten Fall alle Knoten

auf der Begriffs-Ebene mit einer Aktivierung von 1 versehen, die mit den auf der Ereignis-Ebene als Lösung gefundenen Knoten in Verbindung stehen.

Durch die Propagierung und Rück-Propagierung ist das Netz fähig, aus den Ereignissen quantitative Aussagen (Häufigkeiten des Auftretens bestimmter Fehler durch Propagierung) und qualitative Aussagen (z.B. Wechselwirkungen zwischen Begriffen durch Rück-Propagierung) zu gewinnen. Eine Propagierung und Rück-Propagierung der zwei-wertigen Aussage 'UND Ventil UND öffnen' würde im obigen Netz die Häufigkeit $h=3$ und 'unterlassen' als mögliche Fehlerart ermitteln (bei allen Ereignisknoten wurden die Begriffe 'Ventil' und 'öffnen' angegeben, bei Ereignis 2 und 3 zusätzlich die Angabe 'unterlassen').

- **Schwellenbedingung und Aktivierungsschema**

In der Theorie der konnektionistischen Modelle sind zwei Meßpunkte für die Datenwiedergewinnung erforderlich: Ausgangspunkt und Anfragepunkt. Kohonen (1988) bezeichnet den Anfragepunkt auch als *key* oder *search argument* und den Ausgangspunkt auch als *background* oder *context*. Im oben beschriebenen Netzwerk ist die Ereignis-Ebene der Anfragepunkt und das Aktivierungsschema der Ausgangspunkt. Die Aktivierungen zwischen beiden Meßpunkten bestimmen über die einfache Bedingung der Aktivierungsgleichheit darüber, ob eine Anfrage bzw. Aussage zutrifft oder nicht. Eine Aktivierungsgleichheit zwischen Ausgangspunkt und Anfragepunkt wird dazu mit Hilfe der Schwellenfunktion in eine dichotome Aussage umgesetzt (Aussage trifft zu oder nicht). Hierzu wird folgendermaßen vorgegangen:

Begrenzt man die maximal mögliche Aktivierung im Netz auf $a=1$, ergibt sich aus der Definition der Wertigkeit einer Aussage (Gleichung 8) folgender Zusammenhang:

$$\frac{|UND|}{n} + \frac{|UND NICHT|}{n} = 1 \quad (17)$$

mit:

$ UND $	Anzahl der mit UND verknüpften Begriffe
$ UND NICHT $	Anzahl der mit UND NICHT verknüpften Begriffe
n	Wertigkeit der Aussage

Wenn UND NICHT-Aussagen als negative Aktivierung realisiert werden, ergibt sich als maximal mögliche Aktivierung in einem Netz, die als Schwellenwert bezeichnet wird:

$$s = \frac{|UND|}{n} = 1 - \frac{|UND NICHT|}{n} \quad (18)$$

mit:

s	Schwellenwert
$ UND $	Anzahl der mit UND verknüpften Begriffe
$ UND NICHT $	Anzahl der mit UND NICHT verknüpften Begriffe
n	Wertigkeit der Aussage

Um alle ein-wertigen Aussagen auf der Begriffs-Ebene gleichermaßen am Prozeß der Datengewinnung zu beteiligen, muß die Aktivierung gemäß der folgenden Formel auf die verschiedenen Begriffe in einer n-wertigen Aussage aufgeteilt werden.

$$a_j = \begin{cases} \frac{1}{|UND| + |UND NICHT|} & | j \text{ ist UND - Aussage} \\ -\frac{1}{|UND| + |UND NICHT|} & | j \text{ ist UND NICHT - Aussage} \end{cases} \quad (19)$$

mit:

a_j	Aktivierung des Begriff-Knotens der ein-wertigen Aussage j
j	ein-wertige Aussage j von insgesamt n-wertiger Aussage
$ UND $	Anzahl der mit UND verknüpften Begriffe
$ UND NICHT $	Anzahl der mit UND NICHT verknüpften Begriffe

Diese Aktivierung wird dann durch das Netz propagiert. Wie in Beispielen weiter unten demonstriert wird, reicht diese einfache Aufteilungsbedingung aus, um auch Häufigkeiten für komplexere Aussagen mit UND, UND NICHT bzw. ODER-Verknüpfungen richtig zu berechnen.

Ist die Aktivierung durch das Netz bis zur Ereignis-Ebene propagiert, nimmt die Schwellenfunktion eine Schwellenwertberechnung vor. Durch die Schwellenwertberechnung werden die Knoten identifiziert, für welche die Aussage aus dem Aktivierungsschema zutrifft. Da nur die UND-Aussagen die maximal auf der Ereignisebene ankommende Aktivierung bestimmen, lautet die Schwellenfunktion:

$$a'_j = \begin{cases} 0 & | (a_j < s) \\ 1 & | (a_j \geq s) \end{cases} \quad (20)$$

mit:

- a'_j *korrigierte Aktivierung des Knotens j auf der Ereignisebene nach Schwellenwertberechnung*
- a_j *Aktivierung des Knotens j auf der Ereignisebene vor Schwellenwertberechnung*
- s *Schwellenwert*

Aus der Berechnung des Schwellenwertes wird ersichtlich, daß insgesamt eine Aktivierung im Wertebereich zwischen 0 und 1 innerhalb des Netzes propagiert wird. Die Aktivierung auf der Ereignis-Ebene spiegelt mitunter also die relative Häufigkeit wider, mit der Begriffe der angefragten n-wertigen Aussage innerhalb des Ereignisses enthalten sind. Hieraus ist ersichtlich, daß die Höhe der Aktivierung der Knoten auf der Ereignis-Schicht auch ein Maß dafür ist, inwieweit sich die gefundenen Ereignisse bezüglich der Anfrage ähnlich sind, inwieweit die Ereignisse also auf die angefragte Aussage übertragbar sind.

Die Formel zur Berechnung des Schwellenwertes zeigt weiterhin, daß durch kleine Veränderungen des Schwellenwertes und der Verteilung der Aktivierung auch andere logische Operatoren, wie UND NICHT und ODER, für die Fragenformulierung genutzt werden können. Wie dies funktioniert, wird im folgenden durch Abwandlung des Aktivierungsschemas für das obige Netz gezeigt.

- **UND NICHT-Abfrage im konnektionistischen Netz**

Daß durch diesen Ansatz auch UND NICHT-verknüpfte Aussagen richtig wiedergegeben werden können, ist leicht dadurch ersichtlich, daß die Abfrage *A UND NICHT A* dazu führt, daß diejenigen Aktivitäten, die durch die Aussage *A* aufgebaut worden sind, praktisch durch die Aussage *UND NICHT A* wieder gelöscht werden. Eine Negation wird im konnektionistischen Ansatz also als Hemmung bzw. negative Aktivierung realisiert. Dies ist in Bild 33 dargestellt.

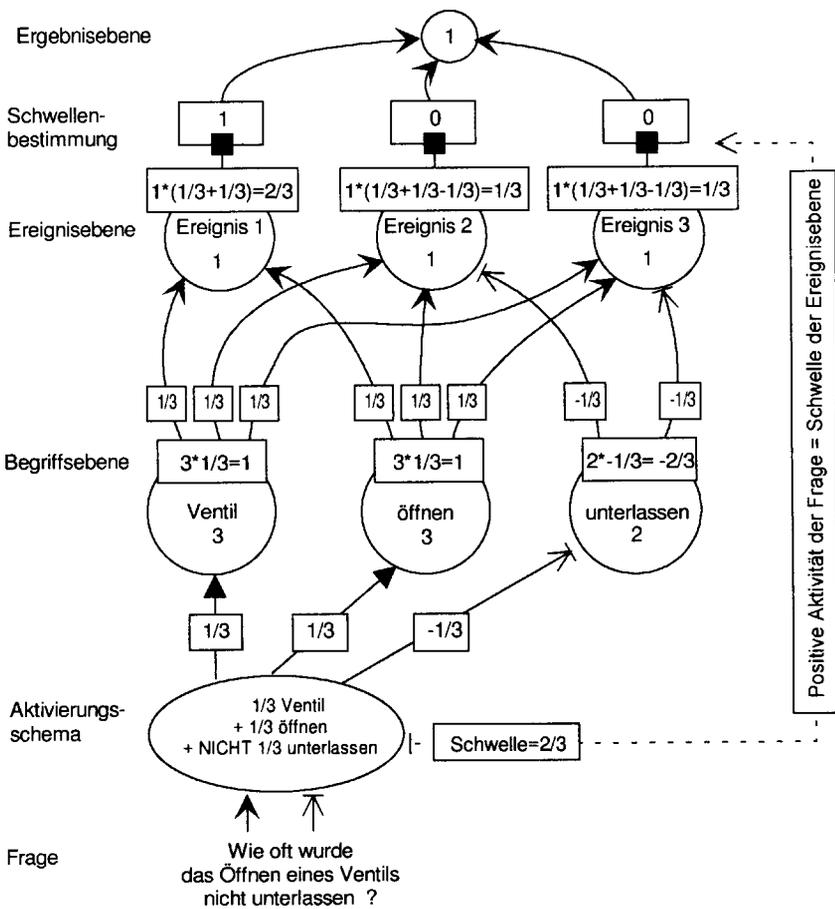


Bild 33 Konnektionistische Datengewinnung bei UND NICHT-Verknüpfung.

Innerhalb des Bildes erhalten nur die UND-verknüpften Aussagen eine positive Aktivierung vom Aktivierungsschema, UND NICHT-verknüpfte Aussagen erhalten eine negative Aktivierung. Verfolgt man die Aktivitäten durch das Netz hindurch, stellt man fest, daß UND NICHT-Verknüpfungen eine Löschung bereits gefundener Lösungen bewirken.

• **ODER-Abfrage**

Zur Verdeutlichung der ODER-Verknüpfung, bietet es sich an, daß Beispiel aus Bild 33 leicht abzuwandeln, indem angenommen wird, daß in den drei Ereignissen je drei unterschiedliche Typen von Ventilen zu öffnen waren (Typ X, Typ Y und Typ Z). Damit ist

innerhalb des Netzes der Knoten 'Ventil' der Oberbegriff für die verschiedenen Ventiltypen (Bild 34). Verfolgt man die Aktivierungen, so ist leicht einzusehen, daß sich der prinzipielle Verlauf der Aktivierungen in der ODER-Verknüpfung 'Ventil Typ X ODER Ventil Typ Y ODER Ventil Typ Z' im Vergleich zu Bild 32 nicht ändert.

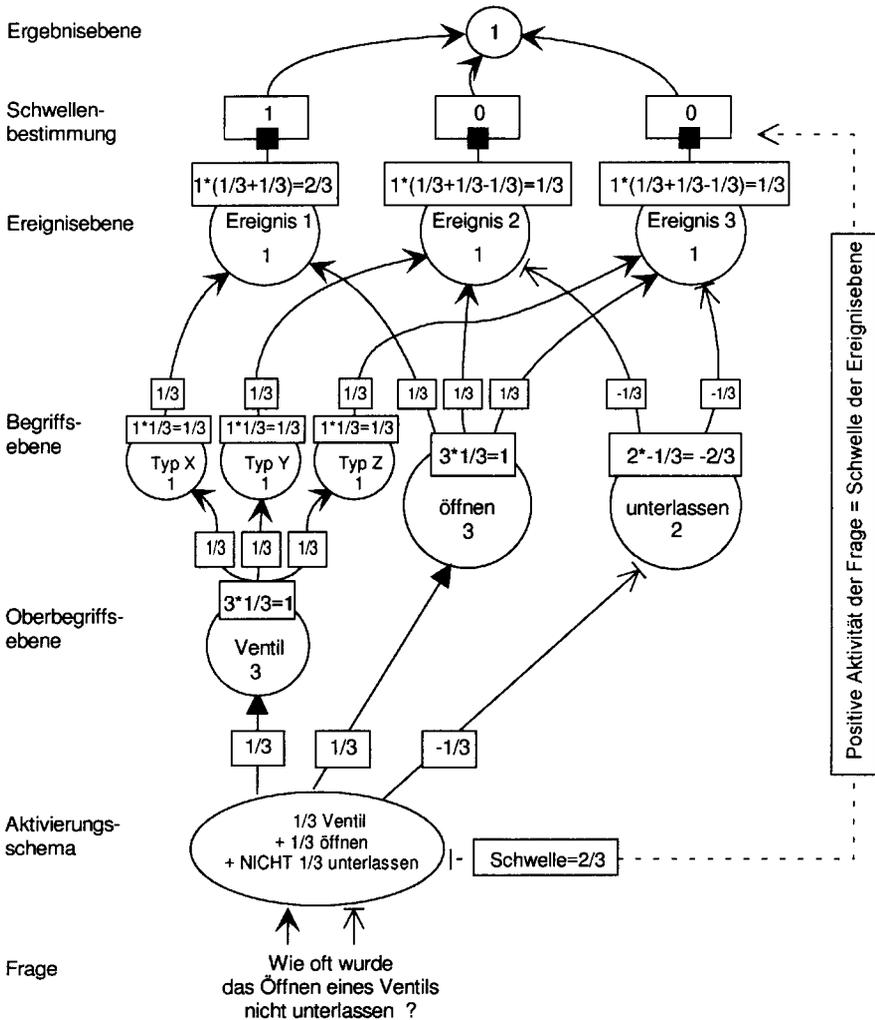


Bild 34 Konnektionistische Datengewinnung bei ODER-Verknüpfung.

Dies bedeutet, daß Ober-/Unterbegriffsstrukturen die Vorhersagegenauigkeit des Netzes nicht beeinflussen. Damit ist das konnektionistische Netz in der Lage, für beliebige Begriffshierarchien auf beliebig detailliertem Niveau korrekte Häufigkeiten anzugeben.

Diese Leistung ist beispielsweise in probabilistischen Modellen nicht ohne weiteres möglich (zu dieser Problematik vgl. Anhang 4).

Innerhalb einer Begriffshierarchie ist das Netz auch in der Lage, korrekte Häufigkeiten für eine Aussage wie 'Ventil öffnen unterlassen aber nicht Ventile vom Typ X' zu liefern. Das Aktivierungsschema verteilt in diesem Fall seine Aktivierung auf die Begriffsknoten der 4-wertige Aussage nach dem folgenden Aktivierungsschema:

UND Ventil UND öffnen UND unterlassen
UND NICHT Typ X

$$\bar{a} = \{a_{\text{Ventil}}=0.25, a_{\text{öffnen}}=0.25, a_{\text{unterlassen}}=0.25, a_{\text{Typ X}}=-0.25\}$$

$$s = 0,75$$

- **Komplexe Aussagen**

Komplexe Aussagen bestehen aus m einzelnen Sätzen mit jeweils n -wertigen Aussagen (siehe Gleichung 10 weiter oben). Eine komplexe Aussage $[A]$ würde beispielsweise die beiden Sätze beinhalten:

$A_1 = \text{UND (Ventil UND öffnen UND unterlassen)}$
 $A_2 = \text{UND (Typ X UND öffnen UND unterlassen)}$

$$\bar{a} = \{a_{\text{Ventil}}=1/6, a_{\text{öffnen}}=1/6, a_{\text{unterlassen}}=1/6, a_{\text{Typ X}}=1/6, a_{\text{öffnen}}=1/6, a_{\text{unterlassen}}=1/6\}$$

$$s = 1,0$$

Komplexe Aussagen, die nur UND-verknüpft sind, können also wie $m \cdot n$ einfache Aussagen behandelt werden. Anders verhält es sich, wenn die beiden Sätze miteinander ODER-verknüpft sind. Die Aussage hierfür könnte lauten:

$A_1 = \text{UND (Ventil UND öffnen UND unterlassen)}$
 $A_2 = \text{ODER (Typ X UND öffnen UND unterlassen)}$

Das Aktivierungsschema für beide Sätze lautet dann:

$$\bar{a}_1 = \{a_{Ventil}=0.3, a_{\text{öffnen}}=0.3, a_{\text{unterlassen}}=0.3\}$$

$$s_1 = 1, 0$$

$$\bar{a}_2 = \{a_{\text{Typ X}}=0.3, a_{\text{öffnen}}=0.3, a_{\text{unterlassen}}=0.3\}$$

$$s_2 = 1, 0$$

Komplexe Aussagen, bei denen Häufigkeiten für mehrere ODER-verknüpfte Sätze bestimmt werden sollen, müssen sequentiell bearbeitet werden, da hier die Möglichkeit besteht, daß die Aktivierungen von einem bestimmten Begriff (hier 'Typ X') zweimal auf die Ereignis-Schicht propagiert werden. Da der entsprechende Knoten auf der Ereignis-Schicht (im Bild der linke Knoten) lediglich die bei ihm ankommenden Aktivierungen aufsummieren würde, würde er eine Aktivierung über dem Schwellenwert erhalten und damit das Netz zu einem falschen Ergebnis kommen. Im Beispiel würde der linke Knoten auf der Ereignis-Ebene im Netz mitgezählt, obwohl dort kein Unterlassungsfehler beobachtet wurde, da er insgesamt die Aktivierungen a_{Ventil} , $a_{\text{öffnen}}$ und $a_{\text{Typ X}}$ erhält und damit die Schwelle $s=1.0$ erreicht. In dem in Anhang 1 dargestellten Programm wurde dieses Problem gelöst, indem das Aktivierungsschema in solchen Fällen für beide Sätze nacheinander durch das Netz propagiert wird.

4.4 Modell zur Auswertung der Ereignisbeschreibungen

Nachdem im vorhergehenden Abschnitt das prinzipielle Vorgehen einer Auswertung der Daten des Beschreibungsmodells dargestellt wurde, soll dieses nun auf die vollständige Datenstruktur des Beschreibungsmodells angewendet werden. Dazu sind geringfügige Erweiterungen der Struktur des Netzes und des Verfahrens zur Verarbeitung komplexer Aussagen innerhalb des Netzes erforderlich.

4.4.1 Struktur des Netzes zur Vorhersage menschlicher Zuverlässigkeit

Die Aktivierungsebene, die Begriffsebene und die Ereignisebene unterscheiden sich vom Aufbau her nicht. Unterschiede herrschen dagegen in den dazwischen liegenden Schichten, den sogenannten verdeckten Schichten (hidden layer). Diese Erweiterungen sind in Bild 35 dargestellt.

Bezüglich der Ereignisebene wurde im Kapitel 3 eine Unterteilung des Ereignisses in einzelne MMS und darauf in einzelne Sätze pro MMS-Komponente vorgenommen (im Bild Ereignis-, MMS-, und Satz-Ebene). Weiterhin erscheint es sinnvoll, die weiter

oben erwähnte Möglichkeit der Klassenbildung bzw. der ODER-Abfrage als eine weitere Ebene systematisch in die Netzstruktur einzubinden (im Bild Begriffs-Ebene). Da das Aktivierungsschema aus beliebig komplexen Aussagen bestehen kann, wird diese Ebene im folgenden Kontext-Ebene genannt.

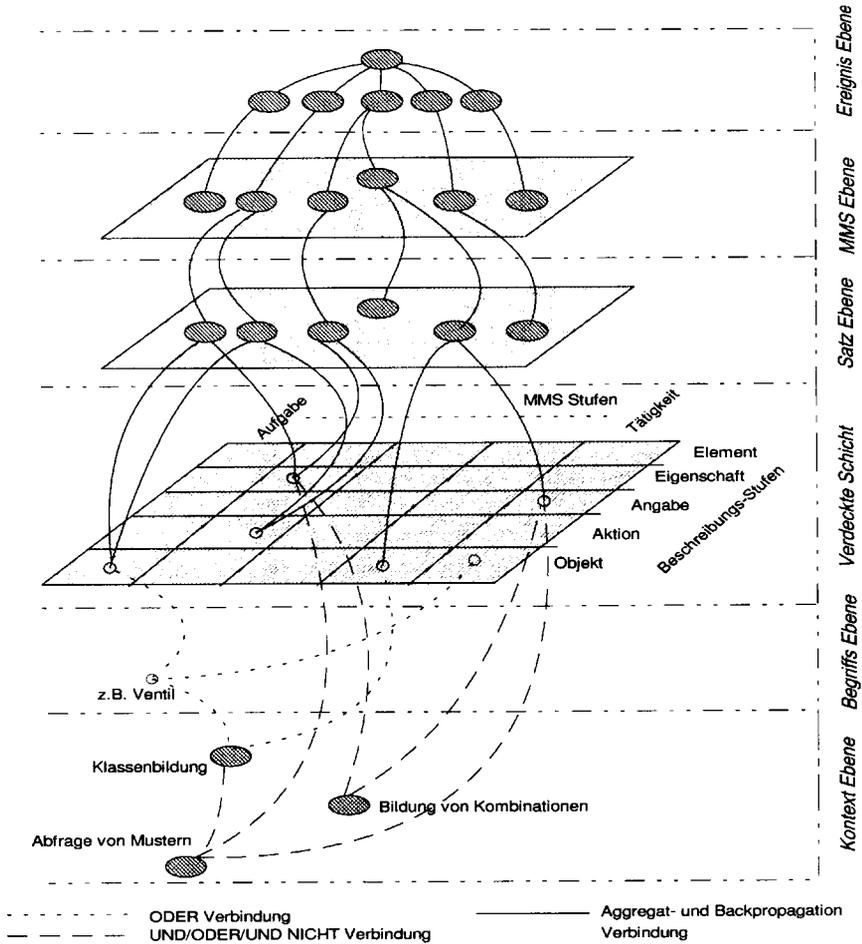


Bild 35 Darstellung des konnektionistischen Netzes zur Auswertung von Betriebs- erfahrung.

Um die Begriffe und Ereignisse richtig miteinander in Beziehung zu setzen, sind zwei Schichten erforderlich: (1) Eine verdeckte Schicht nimmt eine Verknüpfung mit der Begriffsebene und der Satzebene vor. Die verdeckte Schicht stellt die Bedingungen her, unter denen ein Begriff verwendet worden ist (z.B. Die Angabe 'unterlassen' bezogen auf die Aufgabenstufe des MMS oder das Objekt 'Ventil' bezogen auf die Tätigkeitsstu-

fe etc.). Durch die Einführung einer solchen verdeckten Schicht folgt eine verteilte Repräsentation der semantischen Information. (2) Eine Satz-Ebene sorgt für eine korrekte Zuordnung der aufgetretenen Fehler und Einflußfaktoren zu den Begriffen und MMS-Komponenten. Sind beispielsweise die beiden Sätze S_1 ='Ventil öffnen unterlassen' und S_2 ='Schalter schließen' in einem Ereignis bezogen auf die MMS-Komponente 'Aufgabe' genannt worden, muß sichergestellt sein, daß der Fehler 'unterlassen' bei der Auswertung nicht auf den Begriff 'Schalter' bezogen wird.

Die Netzstruktur, wie sie im Bild 35 dargestellt ist, wird im einzelnen wie folgt durchlaufen:

1. Auf der Kontext-Ebene wird eine n -wertige Aussage entsprechend dem oben beschriebenen Prozedere in ein Aktivierungsschema umgewandelt. Jedes Aktivierungsschema (im Bild schraffierte Knoten auf der Kontext-Ebene) kann dabei aus einzelnen Klassen, einer einfachen Kombination von Klassen oder Begriffen oder aus einem komplexen Begriffsmuster bestehen. Ist das Aktivierungsschema aktiviert, dann wird die Aktivierung auf die Begriffsebene propagiert.
2. Auf der Begriffsebene werden die einzelnen ein-wertigen Aussagen auf die Begriffe projiziert, die in den beobachteten Ereignissen zur Beschreibung genutzt worden sind (z.B. wird die Klasse 'Zeitliche Fehler' auf die Begriffe 'zu früh' und 'zu spät' abgebildet). Von hier aus wird die Aktivität weiter in die verdeckte Schicht propagiert. Die Knoten in der verdeckten Schicht sind bezüglich der Beschreibungsstufen und der MMS-Komponenten festgelegt. Jeder Knoten entspricht also einer Aussage der Form '*Aufgabe.Objekt=Ventil*' oder '*Tätigkeit.Angabe=zu früh*'.
3. Bis zur verdeckten Schicht divergiert die Aktivierung, die vom Aktivierungsschema versendet wurde. Nun wird die in der verdeckten Schicht verteilt vorhandene Aktivierung in der nachfolgenden Satz-Schicht gesammelt (aggregiert, im Bild dargestellt mit den durchgezogenen Linien). Dadurch werden all diejenigen Sätze identifiziert, in denen die angefragte i -te Aussage vorgekommen ist.
4. Die MMS-Ebene sammelt die Aktivierung der Satz-Schicht. Sind alle n Aussagen durch das Netz propagiert, haben alle Knoten auf der MMS-Ebene, bei denen die n -wertige Aussage zutrifft, genau die Aktivierung, die vom Aktivierungsschema verschickt worden ist. Sie repräsentieren die Lösung der n -wertigen Anfrage. Durch erneute Aggregation auf der Ereignis-Ebene werden die Fälle identifiziert, bei denen die n -wertige Aussage zutrifft.

5. In einem weiteren Verarbeitungsschritt können nun die Aktivierungen von den Knoten auf der Ereignis-Ebene oder der MMS-Ebene als Aktivierungsmuster durch das Netz zurück propagiert werden. Das Prozedere entspricht den oben dargestellten vier Schritten in umgekehrter Reihenfolge. Durch diese Rück-Propagierung können nun auf der Begriffs-Ebene die Begriffe identifiziert werden, die mit der ursprünglichen Anfrage in Relation stehen und so Wechselwirkungen bestimmt werden.

4.4.2 Verarbeitung komplexer Aussagen innerhalb des Netzes

Bezüglich der Aktivierungsfunktion, der Berechnung des Aktivierungsschemas und der Verteilung der Aktivierungen auf die Knoten der Begriffsebene sind keine Modifikationen des im vorhergehenden Abschnitt dargestellten Vorgehens erforderlich. Um beliebig komplexe Aussagen zu verarbeiten, muß jedoch der Verarbeitungsmechanismus an die Netzstruktur angepaßt werden: Wie bereits weiter oben beschrieben, bestehen komplexe Aussagen aus mehreren Sätzen, wobei jeder Satz aus mehr-wertigen Aussagen bestehen kann. Verschiedene Sätze können wiederum UND, UND NICHT bzw. ODER-verknüpft sein. Solche komplexen Aussagen müssen in einzelne Sätze zerlegt und sequentiell durch das Netz propagiert werden (siehe dazu Bild 36).

Bedenkt man, daß für eine Datenwiedergewinnung in konnektionistischen Netzen immer Ausgangspunkt und Anfragepunkt notwendig sind, so verschiebt sich der Anfragepunkt durch das sequentielle Abarbeiten komplexer Aussagen folgendermaßen: Anfragepunkt für jede ein-wertige Aussage ist die Satzebene, da dort diejenigen Sätze identifiziert werden, in denen der Begriff vorgekommen ist. Wurde ein Satz durch das Netz propagiert (im Bild A₁), so ist durch eine Schwellenberechnung eine Entscheidung erforderlich, welche Knoten auf der Satzebene die Aussage des Satzes verifizieren. Folgt auf diesen Satz ein Satz, der mit dem vorhergehenden ODER-verknüpft ist (im Bild A₂), so muß dieser in analoger Weise bis zur Satzebene propagiert werden. Folgt ein Satz, der mit dem vorhergehenden UND-verknüpft ist (im Bild A₃), so ändert sich kurzfristig der Anfragepunkt für die bisher durch das Netz propagierte Aktivität. Anfragepunkt ist kurzfristig die MMS-Ebene, da nun erst diejenigen MMS identifiziert werden sollen, in denen die bisher propagierten Sätze vorgekommen sind. Darauf folgt erst die Propagierung des nächsten UND-verknüpften Satzes, mit dem das gesamte Prozedere von neuem beginnt.

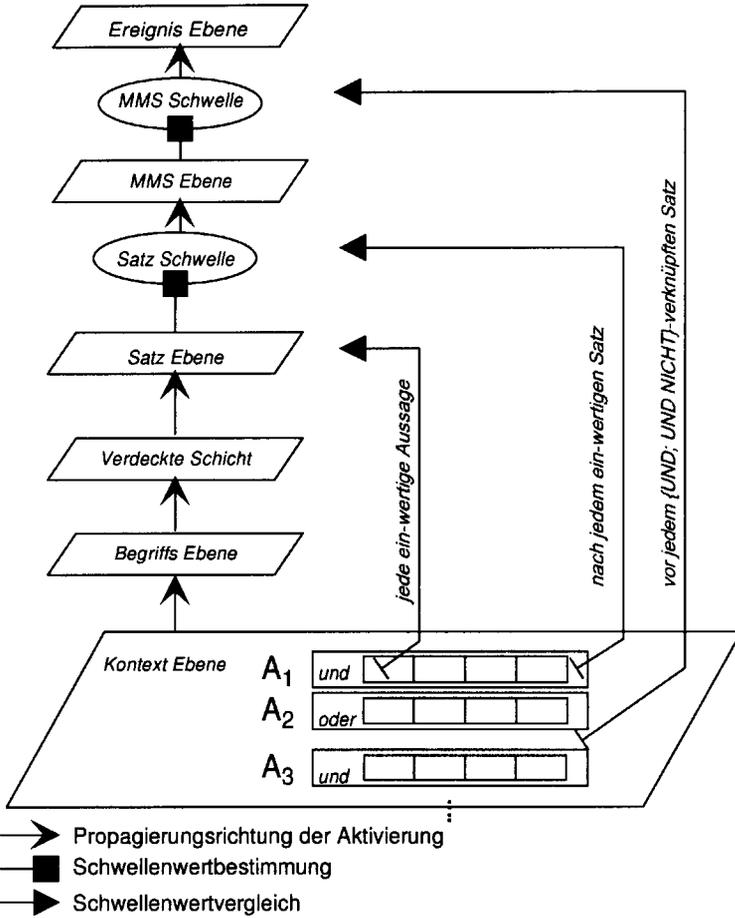


Bild 36 Schwellenwertberechnungen bei komplexen Aussagen.

4.4.3 Unsicherheiten in den Daten

Sind Häufigkeiten für eine Aussage bestimmt worden, ist es auch sinnvoll in irgendeiner Form Aussagen darüber treffen zu können, wie aussagekräftig bzw. sicher die bestimmte Häufigkeit ist. Zur Berechnung der Unsicherheiten von Aussagen können die folgenden Maße betrachtet werden: Ist eine Häufigkeit h_{12} zwischen den Knoten O_1 und O_2 bestimmt worden, dann kann für Unsicherheitsbetrachtungen die theoretisch mögliche maximale und minimale Häufigkeit des gemeinsamen Auftretens genutzt werden. In Anlehnung an die Definition der vollständigen Abhängigkeit und vollständigen Unabhängigkeit zweier Wahrscheinlichkeiten ergibt sich folgendes:

Die maximal mögliche Verbindungsstärke ist über die Annahme der vollständigen Abhängigkeit zweier Objekte gegeben. Die Häufigkeit ist:

$$h_{\max} = \min(h(o_1); h(o_2)) \quad (21)$$

allgemein gilt:

$$h_{\max} = \min(h(o_1); h(o_2); \dots; h(o_i); \dots; h(o_m))$$

Die minimale Verbindungsstärke ergibt sich entsprechend über die Annahme der vollständigen Unabhängigkeit der beiden Objekte. Als Schätzwert für die Häufigkeit soll dienen:

$$h_{\min} = \hat{P}_1 * \hat{P}_2 * h_{\max} = \frac{h(o_1) * h(o_2)}{(h(o_1) + h(o_2))^2} * h_{\max} \quad (22)$$

und

$$\hat{P}_1 = \frac{h(o_1)}{(h(o_1) + h(o_2))} \wedge \hat{P}_2 = \frac{h(o_2)}{(h(o_1) + h(o_2))}$$

allgemein gilt:

$$h_{\min} = \frac{\prod_{i=1}^m (h(o_i))}{\left(\sum_{i=1}^m (h(o_i)) \right)^m} * h_{\max}$$

mit:

o_j Gewichte aller Knoten j , die bei der Anfrage genutzt werden

m Wertigkeit der Aussage (Anzahl der Knoten j)

Die hier vorgestellten Unsicherheitsmaße sind keine Unsicherheiten aufgrund einer bestimmten statistischen Verteilung. Sie sind Unsicherheiten, die durch die verwendeten Begriffe innerhalb einer Ereignisbeschreibung zustande kommen. Aus dieser Definition der Unsicherheit folgt, daß Unsicherheiten nur für mehrwertige Aussagen getroffen werden können. Das Unsicherheitsmaß kann ferner auf einzelne Begriffe oder, bei komplexen Aussagen, auch auf einzelne Sätze bezogen werden. Beide Arten, Unsicherheiten zu berechnen, werden in dem in Anhang 1 beschriebenen Programm

durchgeführt. Im Kapitel 5 und Anhang 6 werden nur Datenunsicherheiten bezogen auf Sätze ausgewertet.

4.4.4 Quantitative und qualitative Aussagen im Modell

Qualitative und quantitative Angaben grenzen sich besonders durch ihren Abstraktionsgrad voneinander ab. In der quantitativen Fragestellung wird ein holistisches Vorgehen verfolgt, um aus der Sicht eines bestimmten Parameters eine Häufigkeit für einen menschlichen Fehler zu bestimmen. In der qualitativen Fragestellung wird dagegen von einem eng umgrenzten situativen Kontext ausgegangen, um für diesen mögliche Einflußfaktoren und Verbesserungen zu finden. Dementsprechend sind Anfragen auf unterschiedlichem Detaillierungsgrad für unterschiedliche Fragestellungen erforderlich. Wie Anfragen gestaltet sein müssen, um qualitative und quantitative Angaben über die menschliche Zuverlässigkeit mit dem Auswertungsmodell zu gewinnen, wird folgend am Beispiel von Fehlerarten, Einflußfaktoren und Wechselwirkungen beschrieben.

- **Fehlerarten**

Einfache Fehlertypen sind Unterlassungen oder Fehler bei der Ausführung einer Tätigkeit (vgl. Tabelle 2, Kapitel 1). Zur Auswertung müssen diese Fehler lediglich abgefragt werden. Dazu einige Beispiele:

Die Häufigkeit eines Unterlassungsfehlers wird durch die folgende Anfrage bestimmt:

$$h(\text{Aufgabe.Angabe}=\text{unterlassen})$$

Die Häufigkeit für einen Zeitfehler bei der Ausführung einer Tätigkeit wäre:

$$h(\text{UND Tätigkeit.Angabe}=\text{zu früh ODER Tätigkeit.Angabe}=\text{zu spät})$$

Ein allgemeiner Fehler bei der Ausführung einer Tätigkeit wäre:

$$h(\text{Tätigkeit.Angabe}=[\text{Angabe}])$$

mit:

[Angabe] Alle möglichen Fehler, wie zu früh, zu spät, unterlassen, falsch, etc.

Ein Verwechslungsfehler bedeutet immer ein Unterlassen einer Aufgabe und gleichzeitiges Ausführen einer anderen, falschen Handlung. Die Häufigkeit, mit der ein Verwechslungsfehler vorkommt, ist somit gegeben durch:

$$h(\text{UND Aufgabe. Angabe}=\text{unterlassen UND Tätigkeit. Angabe}=\text{falsch})$$

Die relative Häufigkeit, mit der ein Unterlassungsfehler beim Öffnen eines Ventils innerhalb der gesammelten Ereignisse zu beobachten ist, wird berechnet durch:

$$h_{rel} = \frac{h(\text{UND Aufgabe. Objekt} = \text{Ventil UND Aufgabe. Aktion} = \text{öffnen UND Aufgabe. Angabe} = \text{unterlassen})}{h(\text{UND Aufgabe. Objekt} = \text{Ventil UND Aufgabe. Aktion} = \text{öffnen})}$$

- **Einflußfaktoren**

Allgemein wird in der menschlichen Zuverlässigkeit angenommen, daß Einflußfaktoren (PSF - Performance Shaping Factors) die Zuverlässigkeit einer Handlung beeinträchtigen können. Die Wirksamkeit der Beeinträchtigung wird dabei als Gewichtungsfaktor für die PSF angegeben (siehe DRS-B, 1990), so daß sich die Wahrscheinlichkeit für einen menschlichen Fehler bei einer Aufgabe vom Typ i ergibt als:

$$P_i = f\left(\frac{w_1}{PSF_1}, \frac{w_2}{PSF_2}, \dots, \frac{w_n}{PSF_n}\right) \quad (23)$$

Dieser Zusammenhang kann mit dem Auswertungsmodell einfach aus den gesammelten Daten gewonnen werden, da jeder Einflußfaktor als Knoten innerhalb des Netzes repräsentiert ist. Die Gewichte w_i ergeben sich somit folgendermaßen aus den Häufigkeiten, mit denen ein Einflußfaktor x bei einem menschlichen Fehler vom Typ i beobachtet wurde: Zunächst werden die Relationen

$$[\text{Fehler vom Typ } i] \xrightarrow{g > 0} [PSF x] = g_x \cdot [Fehler vom Typ i]$$

bestimmt. Darauf ergibt sich das Gewicht w_i durch das Verhältnis der Fehler vom Typ i unter der Bedingung, daß die Eigenschaft PSF x beobachtet wurde und der gesamten Anzahl aller beobachteten Fehler vom Typ i :

$$w_i(PSF_x) = \frac{g_x \cdot [Fehler vom Typ i]}{h([Fehler vom Typ i])}$$

- **Wechselwirkungen von Einflußfaktoren**

Wechselwirkungen von Einflußfaktoren erlauben eine breitere Analyse und eine genauere Vorhersage der Wirksamkeit von Verbesserungsmaßnahmen. Auch Wechselwirkungen lassen sich leicht dadurch bestimmen, indem ausgehend von einem Einflußfaktor $[PSF]_x$ sämtliche Relationen $g > 0$ zu anderen Einflußfaktoren berechnet werden:

$$[PSF]_x \xrightarrow{g > 0} [PSF]$$

Wie solche Relationen durch die Auswertung des konnektionistischen Netzes gewonnen werden könnten, zeigt das Netz in Bild 37 anhand hypothetischer Zusammenhänge von Einflußfaktoren nach Harbour und Hill (1991). Anzumerken ist, daß die Einteilung im Bild keine in der Betriebserfahrung gefundenen Zusammenhänge darstellt. Sie soll lediglich demonstrieren, wie durch die Auswertung der Angaben aus dem Beschreibungsmodell mit Hilfe des konnektionistischen Netzes Wechselwirkungen analysiert werden können. Welche Einflußfaktoren und Wechselwirkungen tatsächlich gefunden worden sind, wird im nächsten Kapitel dargestellt. Die Analyse könnte z.B. folgende Aussagen und Beziehungen zulassen:

- Schluß vom Fehler auf mögliche Ursachen (top down): Woran erkennt man einen personalbedingten Fehler, der auf den Einflußfaktor Motivation zurückzuführen ist? Auf der Ebene der situativen Muster findet man die Faktoren ergonomisches *Design* von Bedienelementen und *Personalauswahl*. Als Ausgangspunkt wird in diesem Fall zur Bestimmung der Zusammenhänge zunächst ein Personalfehler vom Typ i angenommen (Ebene 1) und Relationen zu Einflußfaktoren bestimmt (Ebene 2). In einem weiteren Iterationsschritt werden weitere Einflußfaktoren bestimmt, die mit den Einflußfaktoren auf Ebene 2 zusammenhängen und so fort.
- Schluß von einzelnen Ursachen auf weitere mögliche Ursachen (bottom up): Mit welchen Einflußfaktoren ist zu rechnen, wenn in mangelhafter ergonomischer Arbeitsumgebung gearbeitet wird? Man findet die Faktoren erhöhte *Anforderung* und *Ermüdung* als Hauptfaktoren und *persönliche Fähigkeiten* als untergeordneten Faktor. Bei dieser Art, Wechselwirkungen zu bestimmen, wird lediglich der Ausgangspunkt gewechselt. Das Prozedere zur Bestimmung der Relationen geht nun iterativ von diesem Einflußfaktor aus, führt aber zu identischen Aussagen.

Dieses iterative Vorgehen kann angewendet werden, um ein Ereignis systematisch auf Einflußfaktoren zu analysieren, die einen Fehler vom Typ i verursacht haben können

oder mit einem bestimmten PSF in Verbindung stehen. Jeder Iterationsschritt erfordert dabei die beiden Schritte Propagierung und Rückpropagierung. Somit bietet das konnektionistische Netz neben der Möglichkeit der retrospektiven Bestimmung von Häufigkeiten auch die Möglichkeit der Unterstützung bei der qualitativ orientierten prospektiven Analyse von Ereignissen, indem das im Netz vorhandene Wissen zur Ereignisanalyse eingesetzt wird. Diese Möglichkeit wurde auch in dem in Anhang 1 dargestellten Programm realisiert.

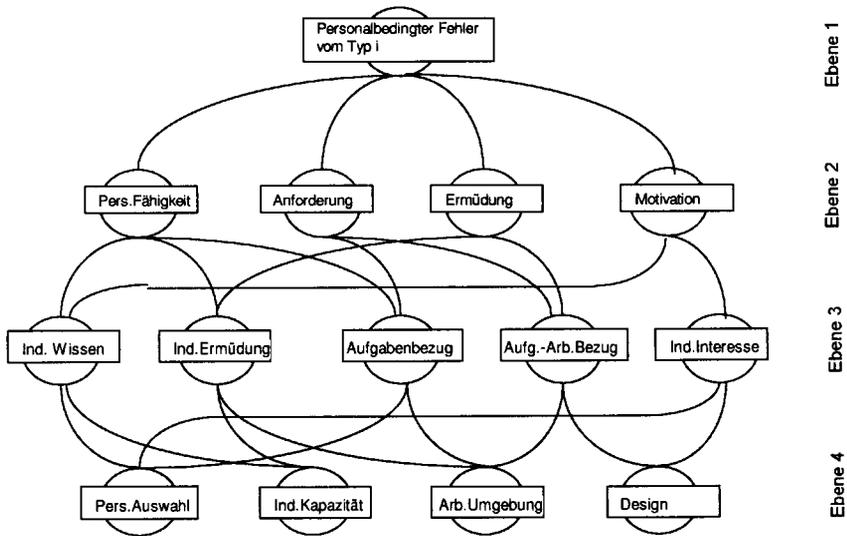


Bild 37 Hypothetische Wechselwirkungen verschiedener Einflußfaktoren.

4.5 Diskussion des Auswertungsmodells

Der konnektionistische Ansatz läßt qualitative und quantitative Analysen der Daten in einem einheitlichen Modell zu. Hierdurch wird es möglich, sowohl Informationen für die Bewertung der menschlichen Zuverlässigkeit als auch für die Optimierung des technischen Systems in einer einheitlichen Datenbasis abzulegen. Auch ermöglicht er, Zusammenhänge von beliebigen Begriffen innerhalb der Datenstruktur zu erfragen (z.B. Beziehungen von Fehlern und Einflußfaktoren). Zulässige logische Verknüpfungen zwischen Begriffen sind dabei UND, ODER, UND NICHT bezogen auf die verschiedenen Komponenten des MMS und die verschiedenen Beschreibungsstufen (Objekt, Aktion, Angabe, Eigenschaft, Element). Durch den konnektionistischen Ansatz können diese Analysemöglichkeiten auf einem beliebigen Detaillierungsgrad der Ereignisbe-

schreibung durchgeführt werden. Dies ist durch einige methodische Fähigkeiten des Auswertungsmodells möglich, die abschließend herausgestellt werden.

4.5.1 Methodische Fähigkeiten des konnektionistischen Netzes

Die Diskussion zur Verarbeitung komplexer Datenstrukturen in diesem Kapitel zeigte, daß beim Versuch, Häufigkeiten für mehr-wertige Aussagen zu bestimmen, früher oder später das Problem der kombinatorischen Explosion eine Auswertung unmöglich macht (Kempke, 1988). Aus diesem Grunde konnte für die Auswertung der Daten, die das Beschreibungsmodell liefert, kein einfacher Auswertungsalgorithmus genutzt werden, der für 1:N Beziehungen konzipiert ist (z.B. ein SQL-basiertes Datenbanksystem). Das Auswertungsmodell muß mehrfache M:N Beziehungen auswerten (u.a. für die Abbildung der Beschreibungsstufen, für die Zusammenführung von Einzelbeobachtungen in Klassen, wie z.B. bestimmte Fehlertypen, oder für einen beliebigen Detaillierungsgrad der Ereignisbeschreibung). Demzufolge wurde ein konnektionistischer Algorithmus entwickelt.

Bei der Entwicklung des Ansatzes wurden bekannte Methoden der Künstlichen Intelligenz (KI) auf einen möglichen Nutzen hin untersucht (Anhang 4). Es stellte sich jedoch heraus, daß diese vornehmlich aus zwei Gründen nicht für eine Auswertung der Angaben des Beschreibungsmodells genutzt werden können: (1) Die Daten, welche die Methoden erfordern, können prinzipiell nicht aus der Betriebserfahrung gewonnen werden (z.B. die Wahrscheinlichkeiten für probabilistische Netze) oder die Gewinnung erfordert einen Aufwand, der größer oder gleich dem Aufwand ist, den man beim einfachen Durchsuchen und Auszählen der Ereignisse benötigen würde (z.B. regelbasierte Expertensysteme). (2) Die Methoden an sich haben Schwächen, die u.a. dazu führen, daß keine Häufigkeiten für polymorphe Abbildungen (um die es sich bei mehrfachen M:N Beziehungen handelt) berechnet werden können. Die methodischen Vorteile des hier entwickelten konnektionistischen Netzes können somit in den folgenden Punkten zusammengefaßt werden.

- **Häufigkeiten für polymorphe Abbildungen**

Der Kernpunkt des hier entwickelten konnektionistischen Netzwerkes ist, daß jede Relation zwischen Begriffen durch einen Umweg über einen Ereignis-Knoten realisiert wird, der für sich genommen alle Informationen eines Ereignisses enthält. Dement-

sprechend ist jede Relation zwischen Anfrageknoten und Ergebnisschicht nicht als eine explizite Relation in dem Netz realisiert, wie es üblicherweise in netzorientierten Ansätzen geschieht, sondern jede Relation ist eine Folge eines Inferenzprozesses bestehend aus Propagierung (von Begriffsschicht zu Ereignis-Schicht) und Rückpropagierung (von Ereignis-Schicht zu Begriffsschicht). Dieser "Umweg" wird von Nauck et al. (1994) auch als dynamische Relation bezeichnet, denn die durch Propagierung/Rückpropagierung aufgebauten Relationen existieren nur zur Laufzeit der Aktivierung also nur, solange die Aktivität innerhalb des Netzes zwischen Anfragepunkt und Kontext aufgebaut ist.

Weiterhin fordern herkömmliche Datenbanksysteme oder symbolverarbeitende Ansätze, daß ein Objekt semantisch eindeutig festgelegt (spezifiziert) sein muß; es ist vorhanden oder nicht vorhanden (*tertium non datur*). Problematisch wird diese Forderung, wenn dasselbe Objekt in unterschiedlichen Kontexten unterschiedlich spezifiziert und verwendet wird. In diesem Fall können die Zuordnungsprobleme nur durch eine Kapselung der spezifischen semantischen Bedeutung der Objekte vermieden werden. Dementsprechend wurde die Forderung nach Objektspezifität in dem hier entwickelten Netz aufgegeben. Hier herrscht verteilte Repräsentation auf der verdeckten Schicht. Dadurch ist das Netz neben der Symbolverarbeitung auch in der Lage, unvollständige Muster zu verarbeiten. Dies wurde möglich, indem die aus den objektorientierten Ansätzen bekannten Konzepte der Polymorphie und Kapselung einzelner Entitäten durch eine verteilte Repräsentation innerhalb der verdeckten Schicht realisiert wurden. Im Vergleich zu bisher entwickelten Ansätzen (vgl. Nauck et al., 1994) ist das hier entwickelte Netz damit zu expliziten Schlußfolgerungen fähig, d.h. exakte Häufigkeiten für beliebige Aussagen zu liefern und dabei gleichzeitig mit unvollständigem Wissen arbeiten zu können.

Damit wurden insgesamt gesehen typische Vorteile der Musterverarbeitung und Symbolverarbeitung verbunden: Die Möglichkeit der expliziten Schlußfolgerungen auf Seiten der Symbolverarbeitung sowie die Möglichkeit der Assoziation und der Verarbeitung unvollständiger Information auf Seiten der Musterverarbeitung. Damit hat der hier vorgestellte Ansatz auch gewisse Relevanz bezüglich der kognitiven Modellbildung, auf die im abschließenden Kapitel 6 noch eingegangen wird.

• **Vermeidung der kombinatorischen Explosion**

Obwohl durch die verteilte Repräsentation innerhalb des konnektionistischen Ansatzes die Redundanz zunimmt und damit die Kodierung aufwendig ist, ist das Netz dennoch im Vergleich zum deskriptor-orientierten Ansatz kodierungsärmer, da nicht jede kombinatorisch mögliche n-wertige Aussage innerhalb des Netzes explizit bereitgehalten werden muß, sondern durch die Propagierung und Rückpropagierung erst gebildet wird. Durch dieses Prozedere und den Einsatz verdeckter Zellen vermeidet der Ansatz damit die kombinatorische Explosion der zur Auswertung erforderlichen Entitäten (Objekte, Verben, Eigenschaften etc.) und Relationen. Dies verdeutlicht Bild 38.

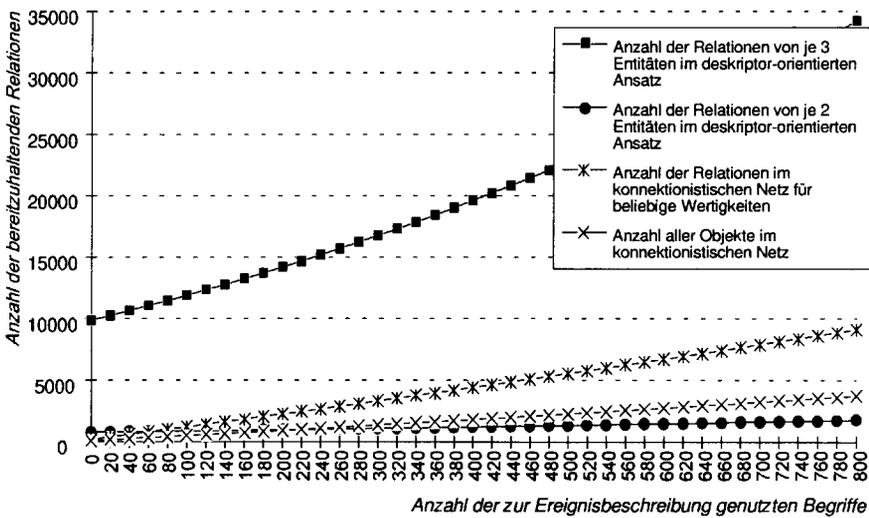


Bild 38 Verlauf der kombinatorischen Explosion des Kodierungsaufwandes für deskriptor-orientierte Verfahren im Vergleich zum konnektionistischen Netz.

In dem Bild ist die Anzahl der erforderlichen Objekte und Relationen für den deskriptor-orientierten Ansatz und für den konnektionistischen Ansatz angegeben, der zur Auswertung von Ereignissen betrieben werden muß. Je höher die Anzahl der Begriffe zur Ereignisbeschreibung und je höher die Wertigkeit der Aussagen, die getroffen werden sollen, desto eher macht sich die kombinatorische Explosion des deskriptor-orientierten Ansatz bemerkbar. Zur Berechnung der Kurven wurde die kombinatorische Explosion mit der weiter oben aufgeführten Gleichung 15 berechnet und angenommen, daß zur Beschreibung des ersten Ereignisses 40 Entitäten erforderlich sind und nach zwei weiteren Ereignissen eine weitere Entität zur Beschreibung der Ereignisse ergänzt werden muß. Dies ist eine sehr pessimistische Annahme. In der Realität liegen

Wachstumsraten und damit der Explosionseffekt wesentlich höher, wie Kapitel 5 zeigen wird. Bezüglich der Wachstumskurve der Objekte und Relationen im konnektionistischen Netz wurden alle erforderlichen Objekte und deren Verbindungen gezählt, um alle Schichten innerhalb des Netzes miteinander zu verbinden (Objekte der Begriffsschicht, der verdeckten Schicht, der Satz-Schicht, der MMS-Schicht und der Ereignis-Schicht). Die Wachstumsrate ist deutlich geringer als beim deskriptor-orientierten Ansatz für 3-wertige Aussagen.

- **Abbildung von Grammatiken als Netzstrukturen**

In der Grammatik wird üblicherweise eine Einteilung der Sprachelemente in Phoneme (Lautzeichen), Morpheme (bedeutungstragende Zeichen), Worte und Sätze vorgenommen (vgl. Dorsch et al., 1994). Um Sprachverarbeitung zu modellieren wird in der Psycholinguistik aufbauend auf den Sprachelementen das Sprachgeschehen als ein Prozeß angesehen, bei dem die Elemente beispielsweise über einen Wahrscheinlichkeitsprozeß (einen Markov-Prozeß) zusammenwirken. McClelland & Rumelhart (1981) haben mit ihrem Worterkennungsmodell gezeigt, daß eine Sprachmodellierung prinzipiell auch mit konnektionistischen Netzen möglich ist. Das problematische in der Sprachverarbeitung ist es, eine geeignete Strukturierung der Sprachelemente zu erreichen. Nimmt man beispielsweise hierarchische Graphen als Organisationsform an (z.B. Chomsky, 1965) besteht das Problem, die Komplexität der Sprache nicht ohne eine kombinatorische Explosion des Modellierungsapparates abbilden zu können und damit prinzipiell dasselbe Problem, welches in der Auswertung der Betriebserfahrung herrscht.

Betrachtet man das hier entwickelte Modell unter diesem linguistischen Gesichtspunkt, stellt es im Prinzip ein Spracherkennungssystem dar, bei dem jedes Sprachelement jeweils als eine Ebene innerhalb des Netzes realisiert ist. Das Netz läßt dabei beliebige Verbindungen zwischen den Ebenen zu, so daß linguistische Zusammenhänge durch die Häufigkeit der Nutzung bestimmter Relationen zustande kommen. Die korrekte Wiedergabe des gelernten Wissens ist dann durch die Propagierung und Rückpropagierung des Aktivierungsschemas gewährleistet. Das hier entworfene Netz startet jedoch erst bei der Wortebene (obwohl es theoretisch auch auf die Ebene der Phoneme und Morpheme ausgebaut werden könnte) und endet auf einer höheren als der Satzebene, denn ein MMS kann grammatikalisch als Abschnitt und ein Ereignis als ein Kapitel angesehen werden. Damit stellt das hier vorgestellte Modell insgesamt also auch einen Beitrag zur Spracherkennung dar.

4.5.2 Besonderheiten bezüglich der Ereignisauswertung

Durch seine methodischen Möglichkeiten kann der hier entwickelte Ansatz typische Probleme der Ereignisauswertung lösen. Damit besitzt dieser Ansatz im Vergleich zu bisherigen Ansätzen zur Ereignisauswertung (z.B. ASSET oder HSYS, siehe Kapitel 2) einige Vorteile, die im folgenden aufgeführt werden.

- **Auswertbarkeit beliebiger Detaillierungsstufen**

Der Algorithmus ist in der Lage, beliebige Detaillierungsstufen verarbeiten zu können. Dies ist dadurch ersichtlich, daß die Ebenen, wie oben festgestellt, lediglich eine grammatikalische Strukturierung vorgeben, nicht jedoch die Inhalte, die das Netz verarbeiten kann. Damit kann eine Ereignisbeschreibung besser nachvollzogen werden, da die originäre Information des Ereignisses erhalten bleibt und nicht auf wenige Deskriptoren reduziert werden muß. Dadurch wird es möglich, auch seltene Ereigniskonstellationen innerhalb derselben Beschreibungsmethode darzustellen wie oft zu beobachtende Ereigniskonstellationen. Herkömmliche Analyseverfahren, wie das im Kapitel 2 dargestellte HSYS oder ASSET, lassen dies nicht zu. Eine Beschreibung eines seltenen Ereignisses gelingt hier nur unvollständig oder verfälschend.

Eine inhaltliche Auswertung der Datenstruktur wird dadurch möglich, daß Begriffe zu Klassen zusammengefaßt werden und Kombinationen von Begriffen und/oder Klassen als Anfrage an das Netz formuliert werden. Damit ist die Auswertung vollständig objektorientiert, d.h. sie kommt ohne zusätzlichen Programmier- oder Verwaltungsaufwand aus. Das hat den Vorteil, daß nicht die gesamte Erfassungs- und Auswertungsstruktur verändert werden muß, um neuartige Fragestellungen zu analysieren. Das hier entwickelte Modell kann beliebige Zusammenhänge (z.B. zwischen Fehlern und Einflußfaktoren) auswerten. Bei deskriptor-orientierten Verfahren ist nur die Fragestellung auswertbar, für welche die Deskriptoren konzipiert worden sind.

- **Variabler Zugriff**

Durch seinen Aufbau ist das Netz in der Lage, beliebig auf das in ihm repräsentierte Wissen zugreifen zu können. Dies ist möglich, da nicht jeder Zusammenhang durch eine direkte Verbindung dargestellt wird, sondern durch eine berechnete Verbindung zwischen der Ereignisebene als Anfragepunkt (*key*) und dem Aktivierungsschema

(*context*) hergestellt wird. Durch eine Festlegung der Knoten, die als *key* oder als *context* benutzt werden, erhält man den gesuchten Zusammenhang als eine erhöhte Aktivierung zwischen diesen Knoten.

Dadurch sind die unterschiedlichsten Zugriffe auf die Information im Netz möglich, wie es für die Analyse menschlicher Zuverlässigkeit innerhalb der verschiedenen HRA-Methoden erforderlich ist. Das Wissen innerhalb des Netzes kann damit z.B. bezogen auf Fehlertypen, auf Einflußfaktoren oder auf zeitliche Parameter ausgewertet werden. Dies ist in herkömmlichen Methoden nicht möglich, denn hier müssen die Zugriffsmöglichkeiten a priori festgelegt sein. Damit wird das Auswertungsmodell auch dem in Kapitel 1 diskutierten Multi-Aspekt des menschlichen Fehlers eher gerecht als herkömmliche Verfahren zur Auswertung von Fehlerbeschreibungen.

- **Ähnlichkeitsbestimmung, Lernfähigkeit und Übertragbarkeit**

Das hier vorgestellte konnektionistische Netz ist fähig, Muster zu verarbeiten. Die Ähnlichkeit zweier Ereignisse wird innerhalb des Netzes als gleiche Aktivität der Knoten auf der MMS- oder Ereignis-Ebene repräsentiert. Dadurch kann das Netz auch unvollständige Daten verarbeiten. Diese Möglichkeiten der Mustererkennung wären in deskriptor-orientierten Verfahren nicht möglich.

Diese Eigenschaft ist von Bedeutung für die Analyse von Ereignissen: (1) Eine Zusammenfassung unterschiedlicher Ereignisse aufgrund eines ähnlichen Musters ist erforderlich, da jedes Ereignis für sich genommen einmalig ist und Ähnlichkeiten verschiedener Ereignisse bezüglich ergonomischer Randbedingungen gefunden werden müssen. (2) Eine Verarbeitung unvollständiger Daten ist erforderlich, da Ereignisbeschreibungen üblicherweise keine vollständigen Angaben über einen Fehler und den vorherrschenden Einflußfaktoren liefern, aber dennoch Angaben über menschliche Zuverlässigkeit möglich sein sollen (z.B. zur Analyse eines Ereignisses, wenn zunächst wenig Information vorhanden ist).

Das konnektionistische Netz ist auch fähig, aus neuen Ereignissen zu "lernen", denn jedes neue Ereignis wird innerhalb der bestehenden Begriffs- und Klassenhierarchie vorhandenen Wissens eingeordnet. Wenn ein neues Ereignis durch bereits im Netz vorhandene Relationen zwischen Begriffen beschrieben werden kann, werden die vorhandenen Relationen verstärkt. Andere Relationen, die nicht häufig beobachtet werden, schwächen dagegen ihre Verbindung in Relation zu den verstärkten ab. Oft be-

obachtete Begriffskonstellationen stellen also die Erfahrung dar, die innerhalb des Netzes repräsentiert ist. Ferner kann das Netz durch spezifische Aspekte des neuen Ereignisses ergänzt werden, indem neue Begriffe in die bereits vorhandene Begriffs- und Klassenhierarchie eingeordnet werden. Durch beide Mechanismen ist das gesamte Netz lernfähig und es wird eine Ähnlichkeitsbestimmung zwischen verschiedenen Ereignissen möglich. Durch diese Eigenschaften des Auswertungsalgorithmus (Lernfähigkeit und Ähnlichkeitsbestimmung) wird die oft als problematisch diskutierte Übertragbarkeit verschiedener Ereignisse ermöglicht.

- **Kontextbezogene Bewertung von Situationen**

Wie Kapitel 1 und 2 zeigten, sind derzeitige Fehler- und Bewertungsmodelle auf einen bestimmte Aspekt menschlicher Zuverlässigkeit festgelegt (z.B. mögliche Fehlerarten oder Einflußfaktoren). Die Komplexität der Situation oder des Kontextes kann in diesen Verfahren nicht berücksichtigt werden, da die Modelle keine Angaben für derartig komplexe Aussagen machen können. Dagegen erlaubt der hier entwickelte Ansatz bestehend aus Beschreibungs- und Auswertungsmodell eine kontextbezogene Auswertung von Ereignissen und damit auch eine kontextbezogene Bewertung menschlicher Zuverlässigkeit. Diese Kontextbezogenheit ist dabei der gemeinsame Nenner unter dem sowohl Dougherty (1992) als auch Mosneron-Dupin (1994) die Lösung für eine genauere und realistischere Bewertung menschlicher Zuverlässigkeit sehen.

Wie eine kontextbezogene Auswertung mit Hilfe dieses Ansatzes möglich ist und welche Ergebnisse erzielt werden können, zeigt die Anwendung dieser Methode auf die Auswertung von Ereignissen, die im folgenden Kapitel dargestellt wird.

5 Ereignisauswertung und Vorhersagen des Verfahrens

Das Verfahren zur Ereignisauswertung, welches in den beiden vorhergehenden Kapiteln entwickelt worden ist, wird in diesem Kapitel zur systematischen Analyse von Ereignissen angewendet. Dazu werden mit Hilfe des in Kapitel 3 vorgestellten Analyseverfahrens Ereignisse aus der Betriebserfahrung inhaltsanalytisch beschrieben und analysiert sowie mit der im Kapitel 4 dargestellten Analysemethodik ausgewertet. Darauf werden qualitative und quantitative Vorhersagen über die menschliche Zuverlässigkeit erarbeitet. Die Beschreibungs- und Analysemethode wurde als Datenbankanwendung in Microsoft ACCESS unter dem Namen CAHR (Connectionism Assessment of Human Reliability) implementiert. Sie gliedert sich in die Erfassung und Analyse der Ereignisse sowie in eine Auswertung der gesammelten Informationen für qualitative Untersuchungen (z.B. Wirksamkeiten von Optimierungsmaßnahmen) und quantitative bzw. probabilistische Untersuchungen. Die Datenbankanwendung wird in Anhang 1 dargestellt.

5.1 Auswertung der Quellen zur Betriebserfahrung

Als Quelle für die Ereignisauswertung diente die Datenbank "Besondere Vorkommnisse" (BEVOR) der GRS, die bereits in Kapitel 2 beschrieben worden ist. Sie wurde aus dem Grunde gewählt, da hier eine große Anzahl von Ereignissen gesammelt wurde (insgesamt über 4000 Ereignisse), diese Ereignisse in standardisierter Form vorliegen und ein relativ einheitliches Detaillierungsniveau in der Ereignisdarstellung aufweisen. Innerhalb der BEVOR wurden alle Ereignisse von 1965 bis 1993 und nur Ereignisse in Siedewasserreaktoren (SWR) betrachtet; Ereignisse aus anderen Anlagen (z.B. Druckwasserreaktoren - DWR) wurden nicht betrachtet. Hierdurch ist eine relativ gute Vergleichbarkeit der Ereignisbeschreibungen gewährleistet. Innerhalb der BEVOR wurden die Ereignisse folgendermaßen untersucht:

1. Identifikation möglicher HF-Ereignisse
2. Untersuchung der gefundenen HF-Ereignisse
3. Auswertung der gesammelten HF-Ereignisse

5.1.1 Identifikation möglicher HF-Ereignisse

Für die Auswahl der Ereignisse wurden die besonderen Vorkommnisse mit einer Auswahl von Kriterien bzw. Schlüsselbegriffen, die auf menschliche Fehler hinweisen, durchsucht. Anhang 6 zeigt, welche Kriterien für die vorläufige Klassifikation der HF-Ereignisse genutzt worden sind. Insgesamt wurden so 229 Ereignisse in Siedewasserreaktoren identifiziert. Die spätere Analyse dieser 229 gefundenen Ereignisse mit dem in Kapitel 3 dargestellten Beschreibungsmodell zeigte, daß die genutzten Kriterien bei 39 Ereignissen zu falschen Alarmen führten und bei 25 Ereignissen nicht genügend Informationen in der Ereignisbeschreibung gegeben waren, um diese mit dem Beschreibungsmodell auszuwerten. Insgesamt kann die Genauigkeit dieser automatischen Vorhersage als recht gut eingestuft werden, da der Anteil falscher Alarme bei 23% und der Anteil der Ereignisse mit zuwenig Information bei 15% liegt. Die Aufteilung aller in der Datenbank vorliegenden Ereignisse auf HF-, HR- und technische Ereignisse ist in Bild 39 dargestellt.

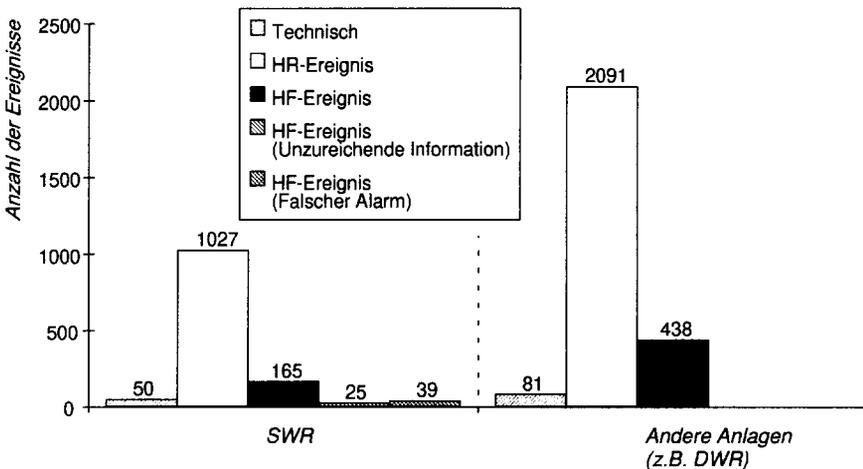


Bild 39 Verteilung der HF-Ereignisse gegenüber HF-relevanten (HR) Ereignissen und technischen Ereignissen.

Das Bild zeigt weiterhin, daß mit den 165 Ereignissen nur ein geringer Teil aller potentiellen HF-Ereignisse untersucht wurde, da zum einen ca. 438 HF-Ereignisse aus anderen Anlagentypen nicht untersucht wurden und zum anderen ein Großteil von HR-Ereignissen vorliegt. Gerade dieser überwiegende Anteil der HR-Ereignisse kann aus der Sicht der menschlichen Zuverlässigkeit von Bedeutung sein, wenn nicht allein die

fehlerhaften Eingriffe des Menschen, sondern auch die Leistungen des Menschen, fehlerlos in das technische System einzugreifen und eine Störung zu beheben, berücksichtigt werden sollen. Dieser nicht auf menschliche Fehler abhebende Aspekt ist auch für eine zufriedenstellende quantitative Schätzung erforderlich, wie im Verlauf des Kapitels noch diskutiert wird.

Um abzusichern, daß die ausgewählten Ereignisse eine repräsentative Stichprobe aus dem vorliegenden Datenmaterial sind, wurde eine Repräsentativitätsprüfung durchgeführt. Bild 40 zeigt die Verteilung der ausgewählten HF-Ereignisse im Vergleich zu allen nicht HF-Ereignissen aufgeteilt auf den Beobachtungszeitraum. Für den statistischen Vergleich wurden die Häufigkeiten standardisiert, um den Häufigkeitsunterschied auszugleichen. Es läßt sich kein signifikanter Unterschied der Stichproben (HF-Ereignisse gegen nicht HF-Ereignisse) feststellen. Die Korrelation liegt bei $r=0,86$. Es konnten auch keine signifikanten Unterschiede zwischen unterschiedlichen Anlagen oder unterschiedlichen Jahren (also unterschiedlichen technischen Lösungen) festgestellt werden.

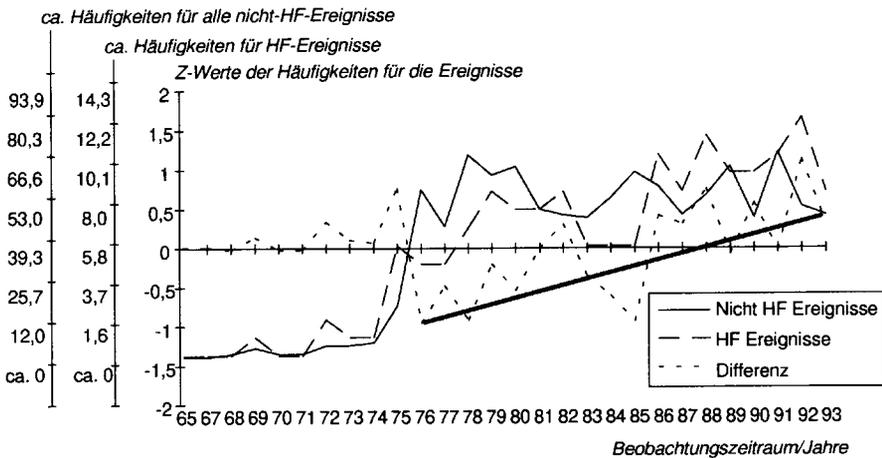


Bild 40 Prüfung der Repräsentativität der untersuchten HF-Ereignisse.

Die Abbildung zeigt auch, in welchen Jahrgängen menschliche Fehler eine höhere Bedeutung als technische Fehler hatten (Differenzkurve der standardisierten Häufigkeiten). Ein leichter, in der Summe stetiger Anstieg vom Jahrgang 1976 bis zum Jahrgang 1993 weist darauf hin, daß menschliche Eingriffe von zunehmender Bedeutung sind (im Bild mit einer grauen Linie gekennzeichnet). Der Anstieg repräsentiert damit die allgemeine Erkenntnis, daß mit zunehmender Ausgereiftheit der technischen Sy-

steme der relative Anteil menschlicher Fehlhandlungen zunimmt (u.a. Semmer, 1994). Dieser Anstieg ist jedoch nicht signifikant und auch nicht durch die Errichtung neuer Anlagen erklärbar. Das unterschiedliche Aussehen der Kurven vor und nach 1976 ist auf unterschiedliche Arten der Ereignismeldung zurückzuführen.

5.1.2 Untersuchung der HF-Ereignisse

Die verbleibenden 165 Ereignisse wurden mit der in Kapitel 3 beschriebenen Methode untersucht. Bei der Auswertung der Ereignisbeschreibungen wurde folgendermaßen vorgegangen:

1. Zunächst wurden im Beschreibungstext unterschiedliche MMS identifiziert. Hierzu wurden die in Kapitel 3 beschriebenen Merkmale Personen, Orte und Situationen genutzt. Insgesamt wurden in den 165 Ereignissen 255 verschiedene MMS identifiziert, d.h. im Durchschnitt bestand jedes Ereignis aus 1,54 einzelnen MMS.
2. Die Sätze oder Satzteile im Beschreibungstext, die sich auf jeweils ein MMS beziehen, wurden darauf durch eine Satzzerlegung auf die wesentlichen Informationsbestandteile oder Bedeutungseinheiten (Subjekt, Prädikat, Objekt) zergliedert und diese in das Schema der Ereignisbeschreibung (Objekt, Aktion, Angabe, Eigenschaft, Element) wörtlich übernommen.
3. Die benutzten Begriffe wurden darauf einander angeglichen. Hierzu wurden zwei Schritte vorgenommen: (1) Angleichung der Formen der Begriffe (Deklinationen, Konjugationen, wie z.B. öffnen - öffnete oder Leitung - Leitungen). (2) Angleichung der semantischen Bedeutung der Begriffe (z.B. wurde 'Notstromdiesel' und 'NSD' zum Begriff Diesel zusammengefaßt). Die hieraus resultierende Gesamt-Taxonomie ist mit ca. 1000 Begriffen sehr umfangreich. Diese Vielfalt ist jedoch notwendig, um die spezifische Information innerhalb des Ereignisses korrekt wiedergeben zu können. Aufgrund der Leistungsfähigkeit des Auswertungsmodells ist die Anzahl der Begriffe jedoch von untergeordneter Bedeutung. Die Anzahl bleibt ferner für die Ereignisbeschreibung überschaubar, da die Begriffe bezogen auf die Beschreibungsstrukturen geordnet sind (vgl. Kapitel 3) und durch Klassenbildung sowie durch das Kriterium der Nutzungshäufigkeit selektiert und reduziert werden (vgl. Kapitel 4 und Anhang 1).
4. In einem weiteren Schritt wurden Begriffe ergänzt und folgendermaßen gekennzeichnet: Durch ein "+", wenn Begriffe hinzugefügt wurden, für die eindeutige Hin-

weise an anderer Stelle in der Ereignisbeschreibung selbst oder in zusätzlichen Informationsquellen (z.B. Weiterleitungsnachrichten) vorlagen. Durch ein "?", wenn Begriffe hinzugefügt wurden, für die nur indirekte Hinweise in der Ereignisbeschreibung vorlagen (z.B. Expertenaussagen, Beobachtungen und Erfahrungen).

5. Wurden zu den Ereignissen getroffene Verbesserungsmaßnahmen genannt, wurde angenommen, daß die dort genannten Maßnahmen auch als Einflußfaktoren wirksam waren, auch wenn sie in der Ereignisbeschreibung selbst nicht explizit genannt wurden (z.B. deutet die Maßnahme "Verbesserung der Gestaltung von Anweisungen" darauf hin, daß die Person eine Anweisung zur Verfügung hatte und diese schlecht gestaltet war).
6. Abschließend wurde für jedes der 255 identifizierten MMS eine Klassifikation des MMS nach den systemergonomischen Einteilungen vorgenommen, um die kognitive Belastung zu beschreiben (vgl. Tabelle 17, Kapitel 3). Ferner wurde für jedes der 255 MMS der Handlungsbereich (Typ A, B, C in Kapitel 2) beschrieben.

5.1.3 Auswertung der HF-Ereignisse

Zur Auswertung der gesammelten Betriebserfahrung mit dem in Kapitel 3 und 4 dargestellten Verfahren ist anzumerken, daß das in der BEVOR vorliegende Material eine nur unbefriedigende Information liefert, um die Ereignisse vollständig zu untersuchen. Viele Fragen mußten unbeantwortet bleiben, was sich darin äußert, daß viele Tabellenfelder in der Beschreibungsstruktur leer bleiben mußten. Daß dennoch eine sinnvolle Auswertung vorgenommen werden konnte, ist dem Umstand zu verdanken, daß auch bei unvollständiger Information ein bestimmter Fehler immer ein Fehler bleibt. Beispielsweise ist eine Unterlassung unabhängig davon, ob eine Gruppe oder eine Person etwas unterlassen hat. Unzureichend ist jedoch der Detaillierungsgrad der Information, wenn Aussagen über die bei den Fehlern beobachteten kausalen und aktionalen Einflußfaktoren gemacht werden sollen (z.B., ob der Unterlassungsfehler durch fehlende Rückmeldung oder durch eine schlechte Prozedur begünstigt war). Diese, für die Suche nach Verbesserungsmaßnahmen wichtige Information konnte nur aus einigen Ereignissen gewonnen werden. Obwohl die vorliegende Datenquelle insgesamt also weniger Informationen liefert, als für eine detaillierte Analyse menschlicher Handlungen mit der oben dargestellten Methode wünschenswert wäre, konnten Fehler und Einflußfaktoren identifiziert werden, die im folgenden vorgestellt und diskutiert werden.

5.2 Auswertung der Daten im Hinblick auf qualitative Angaben

Für eine Bewertung menschlicher Zuverlässigkeit ist zunächst eine qualitative Beschreibung möglicher Fehlerarten und Einflußfaktoren von Interesse. Sie weisen darauf hin, wie hoch das Fehlerpotential einer Situation ist oder welche Verbesserungsmaßnahmen sich anbieten. Klassifikationen, die dazu eingesetzt werden, wurden bereits ausführlich in Kapitel 2 dargestellt: Dort wurden insbesondere verschiedene Handlungstypen, phänomenologische Fehlerarten und kausale Fehlerklassifikationen bzw. Einflußfaktoren sowie Klassifikationen zur kognitiven Beanspruchung genannt. Durch die Ereignisauswertung konnten zu diesen Aspekten folgende Erkenntnisse gewonnen werden.

5.2.1 Identifizierte Handlungstypen

In Kapitel 2 wurde die Klassifikation von Handlungstypen nach IAEA-50 (1992) vorgestellt und diskutiert. Dort wurde u.a. festgehalten, daß die bisher in der Literatur vorgenommene Einteilung des Handlungsbereiches C (Handlungen nach Störfallauslösung) unvollständig ist. Sie ließ u.a. keine situationsverschlechternden Handlungen bei der Verwendung von Prozeduren zu.

Um aus der Ereignisauswertung Angaben zu den Handlungsbereichen zu gewinnen, wurde jedem identifizierten MMS ein Handlungsbereich zugeordnet. Bei der Auswertung der 255 MMS wurde aber festgestellt, daß die Einteilung der Handlungen nach IAEA nicht alle beobachteten Handlungsbereiche abdeckend klassifizieren kann. Im wesentlichen muß die Klassifikation um weitere Handlungsbereiche ergänzt werden, und es sind Modifikationen des Handlungsbereiches C erforderlich. Tabelle 25 faßt diese Modifikationen der Handlungsbereiche und deren Beschreibung zusammen.

In der Tabelle wurden gegenüber der Einteilung aus Kapitel 2 zunächst die Handlungsbereiche T, A0 und Ba ergänzt. Ein MMS aus dem Bereich T enthält lediglich technische Zusatzinformation. Der Bereich A0 kennzeichnet ein MMS, in dem kein Fehler aufgetreten ist, allerdings ein Fehlerereignis durch Wechselwirkungen mit dem derzeitigen Systemzustand oder anderen MMS entstanden ist. Im Bereich Ba sind Handlungen zusammengefaßt, die auf das Auftreten eines latenten Fehlers folgten.

Handlungen aus dem Bereich C wurden in IAEA bezüglich der Nutzung von Prozeduren und keiner Nutzung von Prozeduren unterteilt. Da situationsverschlechternde Handlungen mit Prozeduren gefunden wurden, bildet die IAEA-Unterteilung nicht alle empirischen Zusammenhänge ab. Die gefundenen Zusammenhänge lassen darauf schließen, daß auch bei der Nutzung von Prozeduren zu einem gewissen Grad das Potential besteht, situationsverschlechternde Handlungen zu begehen. Im einfachsten Fall ist dies zu beobachten, wenn die Prozeduren unvollständig sind. Dies war bei beiden situationsverschlechternden Handlungen der Fall.

Tabelle 25 Klassifikation gefundener Handlungstypen in den untersuchten Ereignissen.

<i>Handlungsbereiche</i>	<i>Beschreibung</i>	<i>beobachtete Häufigkeit</i>
Bereich T	Fehler bei automatischen Aktionen des technischen Systems. Diese sind in den Ereignisbeschreibungen genannt worden und für den Ereignisablauf von Bedeutung, sie beinhalten aber keinerlei menschliche Einflüsse.	8
Bereich A0	Das Personal selbst macht keinen Fehler, allerdings entsteht ein Fehlerereignis durch Wechselwirkungen mit dem derzeitigen Systemzustand (z.B. Auftreten eines latenten technischen Defektes, überlappende Instandhaltungsaufgaben - zeitgleich oder raumgleich)	4
Bereich A	Fehler bei Instandhaltung und Wartung, die zu latenten Fehlern führen (identisch mit Typ A nach IAEA)	44
Bereich Ba/verbessernd	Situationsverbessernde Reaktion auf das Auftreten eines latenten Typ A oder Typ A0 Fehlers	40
Bereich Ba/verschlechternd	Situationsverschlechternde Reaktion auf das Auftreten eines latenten Typ A oder Typ A0 Fehlers	8
Bereich B	Personalhandlungen, die ein auslösendes Ereignis zur Folge haben (identisch mit Typ B nach IAEA)	116
Bereich C/verbessernd	Situationsverbessernde Maßnahmen ohne Prozedur bei einem fehlerhaften Systemzustand (Typ C3 und C5 nach IAEA)	12
	Situationsverbessernde Maßnahmen mit Prozedur bei einem fehlerhaften Systemzustand (Typ C3 nach IAEA)	1
Bereich C/verschlechternd	Situationsverschlechternde Maßnahmen ohne Prozedur bei einem fehlerhaften Systemzustand (Typ C4 nach IAEA)	20
	Situationsverschlechternde Maßnahmen mit Prozedur bei einem fehlerhaften Systemzustand (nicht in IAEA Klassifikation enthalten)	2

Analysiert man die Handlungsbereiche im einzelnen, sind die absoluten Häufigkeitsangaben nicht so entscheidend. Daß bei Ereignissen vornehmlich B-Handlungen, also auslösende Ereignisse, zu beobachten sind, ist beispielsweise allein dadurch zu erklä-

ren, daß Ereignisse unterhalb einer bestimmten sicherheitstechnischen Schwelle nicht gemeldet werden müssen. Vielmehr ist entscheidend, welche relativen Häufigkeiten beobachtet werden können. Vergleicht man die situationsverschlechternden Handlungen aus Bereich Ba mit denen aus Bereich C so zeigt sich folgendes: Es fällt leichter, in einer ansonsten störungsfreien Situation eine auftretende Störung zu beheben (Fehleranteil ca. $0,16 \approx 8/(40+8)$) als in einer Situation, in der bereits ein Fehler begangen wurde (Fehleranteil ca. $0,62 \approx (20+2)/(20+2+12+1)$).

Das Verhältnis von verbessernden zu verschlechternden Eingriffen zeigt also, daß Operateure in der überwiegenden Zahl der Ereignisse fähig sind, auf spontane Anlagenveränderungen richtig reagieren zu können (Unabhängigkeit zwischen Auslöser und Recovery-Möglichkeit bei Ba). In bereits fehlerhaften Zuständen haben sie dagegen Probleme (Abhängigkeit zwischen Auslöser und Recovery-Möglichkeit bei C). Da einer C-Handlung immer eine B-Handlung vorausgeht, einer Ba-Handlung hingegen entweder eine A- oder eine T-Handlung vorausgeht, weisen die Zusammenhänge der Handlungsbereiche auf unterschiedliche Recovery-Möglichkeiten hin. Solche Recovery-Möglichkeiten werden im THERP-Verfahren mit dem sogenannten Abhängigkeitsmodell bewertet, auf welches weiter unten nochmals eingegangen wird.

5.2.2 Identifizierte Fehlerarten

In Kapitel 1 und 3 wurden mögliche Arten menschlicher Fehler unterschieden (Tabelle 2 und 14). Durch die Ereignisanalyse konnte festgestellt werden, inwieweit diese ausreichend sind, eine vollständige Beschreibung aller Fehlerarten vorzunehmen. Tabelle 26 faßt die gefundenen Fehlerarten zusammen. Dabei zeigte sich in Abweichung zu Tabelle 2 und 14 eine an der Struktur des MMS orientierte Einteilung als geeigneter. Neben den in Kapitel 1 und 3 aus der Literatur zusammengestellten Fehlerarten ergeben sich aus den Ereignisbeschreibungen zusätzlich die folgenden:

- Der Ausdruck 'nicht möglich' bezeichnet einen Fehler, der aufgrund von äußeren Umständen zu einem Aufgabenfehler führte (z.B. machen Verriegelungen bei einem Systemzustand Eingriffe trotz manueller Betätigung unmöglich, äußerst schlechte Anordnungen von Bedienelementen machen den erforderlichen Eingriff in der notwendigen Zeit unmöglich, fehlende Kommunikationsmöglichkeiten führen dazu, daß Information nicht weitergegeben werden kann usw.). Die Fehlerart 'nicht möglich' ist also eine Form des Unterlassens, die jedoch durch das Bestreben des Menschen charakterisiert ist, diese Unterlassung nicht zu tun.

- Der Ausdruck 'fehlt' bezeichnet eine weitere Form des Unterlassens, bei der nicht allein aufgrund situativer Gegebenheiten (z.B. Verriegelungen) sondern prinzipiell eine Möglichkeit des Eingreifens fehlt, obgleich sie zu einer Situationsverbesserung geführt hätte (z.B. fehlende Signalisierung eines Systemzustandes).
- Der Ausdruck 'falsch' wird entsprechend Tabelle 2 als Ausführungsfehler definiert, bei dem das Objekt der Handlung ein falsches war (beispielsweise wurde ein Ventil A geöffnet, obwohl es nicht geöffnet werden durfte). Wird Handlung A unterlassen und Handlung B fälschlicherweise ausgeführt, handelt es sich um einen Verwechslungsfehler (vgl. Kapitel 3 und 4).
- Der Ausdruck 'fehlerhaft' bezeichnet Einstellungsfehler. Im Unterschied zu 'falsch' ist nicht die gesamte Handlung falsch, sondern nur die Handlungsausführung. Beispielsweise wurde Ventil A geschlossen statt geöffnet; in diesem Fall war es das richtige Ventil, aber eine fehlerhafte Aktion (vgl. Kapitel 3).
- Der Ausdruck 'zu ungenau' bezeichnet Fehler, bei denen aus der Ereignisbeschreibung nicht genauer hervorging, um welche Ausführungsfehler es sich handelt.

Die nähere Betrachtung der Tabelle zeigt, daß die dort aufgeführten quantitativen Ausführungsfehler mehr oder weniger denen der Tabelle 14 aus Kapitel 3 entsprechen (in der Tabelle mit "◆" gekennzeichnet). Die Ausdrücke 'zu schnell', 'zu lange', 'zu fest', 'zu schwach' und 'zu weit' sind lediglich genauere Beschreibungen der Zeit- und Einstellungsfehler (zu früh, zu spät; zu viel, zu wenig). Die Fehlerart 'zu ungenau' bedeutet lediglich, daß Information für eine weitere Spezifizierung fehlte. Ferner werden in der Tabelle 26 gegenüber Tabelle 14 die Fehlerarten 'fehlerhaft' für Aufgabenfehler und 'unterlassen' für Ausführungsfehler bei der Auftrags erledigung zugelassen (z.B., wenn die Auftrags erledigung nicht zurückgemeldet wurde). Auch diese Inkonsistenzen liegen in der mangelnden Detaillierungstiefe der Beschreibung, denn in diesen Fällen war der Bezug zwischen Aufgabe und Tätigkeit unklar. Eine echte Erweiterung sind also nur die Fehlerarten 'nicht möglich' und 'fehlt'. Beide Fehlerarten sind eine Untermenge des Unterlassungsfehlers, bei dem das technische System nicht die Möglichkeiten bietet, die der Operateur von ihm verlangt, obwohl sie zur Situationsverbesserung notwendig gewesen wären. Sie zeigen also, daß Unterlassungen wesentlich vielschichtiger gesehen werden müssen als bisher: Ist die Aufgabe 'nicht möglich', so weist dies auf mangelnde Gestaltung der Gesamtaufgabe bezüglich der gerade durchzuführenden Teilaufgabe hin; ist die Aufgabe 'fehlt', so deutet dies auf mangelnde Eingriffsmöglichkeiten des Menschen in das technische System hin.

Tabelle 26 In der Untersuchung beobachtete Fehlerarten und deren Häufigkeiten innerhalb der identifizierten MMS.

a) Aufgabenfehler

Aufgabenfehler	Aufgabe	Person	Rückmeldung	Auftragserteilung
◆ unterlassen	56	39	2	3
◆ fehlerhaft	22	2	14	27
nicht möglich	14	2	14	11
fehlt	1	0	22	0
◆ falsch	0	6	0	0

b) Ausführungsfehler

qualitative Ausführungsfehler		Tätigkeit	Auftragserledigung
◆	falsch	85	0
◆	fehlerhaft	29	1
◆	unterlassen	0	4
quantitative Ausführungsfehler		Tätigkeit	Auftragserledigung
Zeitfehler			
◆	zu früh	9	0
◆	zu spät	7	0
	zu schnell	6	0
	zu lange	1	0
Einstellungsfehler			
◆	zu viel	12	0
◆	zu wenig	17	0
	zu fest	1	0
	zu schwach	1	0
	zu weit	2	0
	zu ungenau	5	1

Vergleicht man die Häufigkeiten der Aufgabenfehler in der Tabelle, so stellt man fest, daß ein gegenläufiger Zusammenhang zwischen Häufigkeiten bezogen auf 'Aufgabe' und 'Person' auf der einen sowie 'Rückmeldung' auf der anderen Seite herrscht. Fehler in der Rückmeldung bestehen hauptsächlich aus fehlerhaften und fehlenden Informationen und weniger aus Unterlassungen der Personen, diese zu berücksichtigen. Demzufolge scheint Rückmeldung ein wesentlicher Faktor für die Zuverlässigkeit der handelnden Person zu sein. Detailliertere Zusammenhänge dieser Art können gefunden werden, wenn man die Wechselbeziehungen unterschiedlicher Fehlerarten untersucht.

5.2.3 Kausale Einflußfaktoren

Ein menschlicher Fehler kommt innerhalb des MMS nur dann zustande, falls der Informationsfluß im MMS an irgendeiner Stelle gestört ist (Kapitel 3). Er äußert sich als Störung am Systemausgang des MMS. Zusammenhänge zwischen Fehlern in den

verschiedenen Komponenten des MMS geben Aufschluß darüber, welche MMS-Komponenten zum Fehler beigetragen haben und der Verbesserung bedürfen, um menschliche Fehler zu vermeiden. Sie zeigen ferner, welche Schwachstellen in den MMS-Komponenten eher durch den Menschen kompensiert werden können.

Um innerhalb der 255 MMS solche Zusammenhänge zu ermitteln, wurde zunächst für jede MMS-Komponente die Häufigkeit einer Störung im Informationsfluß ermittelt (z.B. Anzahl der Ausführungsfehler). Zu jeder möglichen Kombination von MMS-Komponenten wurde in einem weiteren Schritt die Häufigkeit des Zusammenhangs der Fehler bestimmt (z.B. Anzahl der Ausführungsfehler aufgrund von Fehlern in der Auftragserteilung). Die Häufigkeiten sind dabei kleiner oder gleich den Häufigkeiten, die in Tabelle 26 bezogen auf die verschiedenen MMS-Komponenten ermittelt wurden, da pro MMS-Komponente mehrere Fehlerarten angegeben werden können (in einem Ereignis beispielsweise kann in einem MMS ein Ventil A zu spät und ein Ventil B zu früh geöffnet worden sein). Tabelle 27 zeigt die ermittelten Häufigkeiten, deren Verteilung auf die MMS-Komponenten sowie deren Wechselwirkungen. Da Korrelationen in diesem Zusammenhang kein sinnvolles Maß darstellen, soll der Zusammenhang zwischen zwei Bezugsgrößen durch den maximal möglichen relativen Anteil ausgedrückt werden. Er wird durch folgende Gleichung bestimmt:

$$h_{\text{maximal relativ}} = \frac{h_{\text{Gemeinsames Auftreten von Bezugsgröße1 und Bezugsgröße2}}}{\min(h_{\text{Bezugsgröße1}}; h_{\text{Bezugsgröße2}})} \quad (24)$$

Neben der trivialen Aussage, daß sich Fehler der Person zu 87% in Ausführungsfehlern äußern, können folgende Aussagen aus den in Tabelle 27 beobachteten Zusammenhängen gewonnen werden:

- Rückmeldung nimmt eine zentrale Rolle in der menschlichen Zuverlässigkeit ein. Ist ein Fehler in der Rückmeldung zu beobachten, kommen in 84% der Ereignisse Ausführungs- und in 55% der Ereignisse Aufgabenfehler vor.
- Auftragserteilung ist nach der Rückmeldung der zweit-wichtigste Faktor für Aufgaben- und Ausführungsfehler. Schwächen in der Auftragserteilung können gegenüber Fehlern in der Rückmeldung eher kompensiert werden.
- Der hohe Zusammenhang von Fehlern bei der Auftragserledigung mit Aufgabenfehlern weist auf die Bedeutung organisatorischer Aspekte hin.

Tabelle 27 Häufigkeiten kausaler PSF und Wirkungsbeziehungen des Informationsflusses innerhalb des MMS.

<i>Maximaler relativer Anteil</i>	Aufgabe	Person	Tätigkeit	Rückmeldung	Auftragserteilung	Auftragserledigung	Umgebung
Aufgabe							
Person	0,40						
Tätigkeit	0,61	0,87					
Rückmeldung	0,55	0,30	0,84				
Auftragserteilung	0,46	0,27	0,68	0,24			
Auftragserledigung	0,67	0,33	0,17	0,17	0,17		
Umgebung	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	
<i>Fehlerhäufigkeiten</i>	90	47	156	49	41	6	1

Um die Bedeutung der unterschiedlichen MMS-Komponenten zueinander darzustellen, bietet sich an, die Wechselwirkungen aus der Tabelle 27 durch eine Nicht-Metrische-Multidimensionale-Skalierung (NMDS) zu visualisieren. Eine NMDS berechnet den mittleren Zusammenhang zwischen mehreren voneinander abhängigen Elementen. Am einfachsten ist das Prinzip der NMDS zu verstehen, wenn man sich vorstellt, wie aus den einzelnen Informationen einer Entfernungstabelle in einem Autoatlas eine Landkarte rekonstruiert wird. Bei einer MDS (Metrischen Multidimensionalen Skalierung) stehen zur Rekonstruktion die intervallskalierten Entfernungskilometer zur Verfügung (z.B. München ist 580 km von Düsseldorf entfernt). Bei einer NMDS stehen für jede Städteverbindung nur relative Aussagen der Form zur Verfügung: "München ist von Hamburg weiter entfernt als von Düsseldorf". Diese Informationen reichen aus, die Lage der Städte zueinander vollständig zu rekonstruieren (näheres siehe z.B. Borg & Staufenbiel, 1989). Zur Berechnung der Punktekonstellation geht eine NMDS so vor, daß eine zufällig gewählte Punktekonstellation durch ein iteratives Verfahren den relativen Aussagen möglichst genau angepaßt wird. Maß für die Güte der Anpassung ist die Alienation, auch Streß genannt. Sie repräsentiert die verbleibende Unordnung innerhalb der berechneten Punktekonstellation im Vergleich zur idealen Punktekonstellation und reicht von 0 für optimale Übereinstimmung bis 1 für keinerlei Übereinstimmung.

Der Vorteil dieses Verfahrens besteht darin, daß die Lage der Punkte zueinander inhaltlich interpretiert werden kann und somit die einzelnen Beobachtungen in einem

übergreifenden Zusammenhang gesehen werden können (siehe auch Eye & Marx, 1984). Dafür kommen Faktorenanalysen, Clusteranalysen oder Gruppierungen nach inhaltlichen Gesichtspunkten in Frage. Damit kann über eine NMDS bestimmt werden, welche allgemeinen Faktoren bei den beobachteten Wirkungsbeziehungen wirksam sind. Da die NMDS ein robusteres Verfahren gegenüber dem Datenniveau der beobachteten Zusammenhänge ist, wird in diesem Fall eine NMDS anstelle einer MDS gewählt. Sie wurde mit einem Programm basierend auf einem von Gausepohl (1989) entwickelten Algorithmus durchgeführt. Bild 41 zeigt das Ergebnis einer NMDS der Tabelleneinträge aus Tabelle 27. Die Alienation beträgt ca. 0,23.

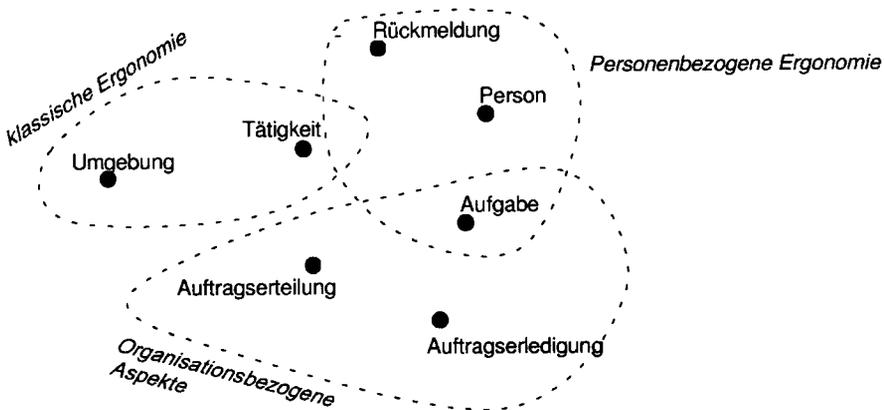


Bild 41 NMDS der Fehler im Informationsfluß des MMS.

Gruppiert man das Punktemuster nach inhaltlichen Gesichtspunkten, kann das Ergebnis der NMDS folgendermaßen interpretiert werden: Je weiter die übrigen Punkte beispielsweise vom Punkt der 'Person' entfernt sind, desto eher kann der Mensch Fehler der MMS-Komponente kompensieren, oder mit anderen Worten, je näher ein Punkt zum Punkt 'Person', desto unmittelbarer ist sein Einfluß auf den Menschen. Wie bereits oben angesprochen, hat insbesondere die Rückmeldung einen wesentlichen Einfluß auf die Zuverlässigkeit des handelnden Menschen. Die NMDS zeigt, daß (1) für die handelnde Person die unmittelbare Arbeitsumgebung bedeutsamer ist als organisatorische Maßnahmen und (2) organisatorische Maßnahmen wesentliche Beiträge für die Fehlerentstehung haben. Das Bild weist also auf einen integralen Gestaltungsansatz hin, der ergonomische, menschliche und organisatorische Faktoren berücksichtigt.

5.2.4 Identifizierte Fehlerbedingungen bzw. aktionale Einflußfaktoren

Innerhalb der untersuchten Ereignisse konnten insgesamt 30 Bedingungen identifiziert werden, unter denen menschliche Fehler vorgekommen sind. Sie werden in Tabelle 28 genauer beschrieben.

Da nicht alle Einflußfaktoren explizit genannt worden sind, sondern teilweise auf Annahmen basieren, die aus den Ereignisbeschreibungen geschlossen wurden, war es erforderlich, die Unsicherheiten der Faktoren anzugeben (Bild 42). Wie bereits weiter oben beschrieben, wurden in der Ereignisbeschreibung den Faktoren, die aufgrund von Hinweisen gewonnen wurden, ein "+" vorangestellt; Faktoren, die aufgrund von Vermutungen gewonnen wurden, wurde ein "?" vorangestellt (siehe auch Anhang 3). In der weiteren Analyse der Einflußfaktoren wird keine Unterscheidung zwischen sicheren und unsicheren Faktoren mehr getroffen.

Einflußfaktoren

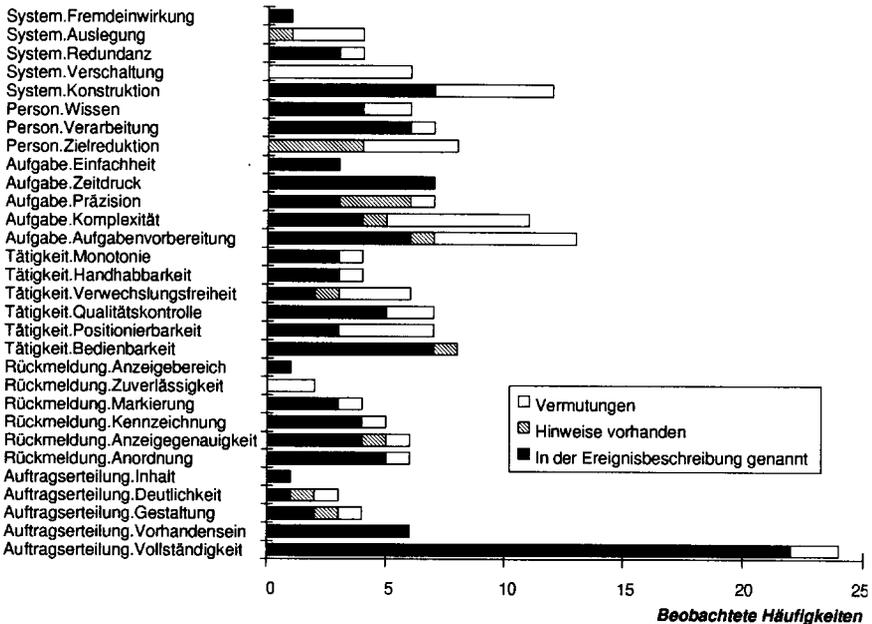


Bild 42 Identifizierte Einflußfaktoren mit ihren Unsicherheiten.

Tabelle 28 Zusammenfassung der identifizierten Bedingungen für einen menschlichen Fehler.

<i>Eigenschaft</i>	<i>Beschreibung</i>	<i>Anzahl</i>
Aufgabe		
Aufgabenvorbereitung	Die Aufgabe ist unzureichend geplant, organisiert oder vorbereitet.	13
Einfachheit	Die durchzuführende Aufgabe ist so geübt, das leichte Abweichungen aktuell durchzuführender Aufgaben nicht berücksichtigt worden sind.	3
Komplexität	Die Aufgabe ist durch die situativen Bedingungen zu komplex.	6
Präzision	Die Aufgabe ist ungenau gestellt worden.	7
Zeitdruck	Die Aufgabe mußte unter Zeitdruck durchgeführt werden.	6
Auftragserteilung		
Deutlichkeit	Die ad hoc ausgestellten Anweisungen sind nicht präzise genug.	3
Gestaltung	Die Anweisungen sind ergonomisch schlecht gestaltet.	4
Inhalt	Der Inhalt der Anweisungen ist falsch.	1
Vollständigkeit	Die Anweisungen sind nicht präzise genug.	24
Vorhandensein	Die Anweisungen fehlen.	7
Person		
Verarbeitung	Die Person handelt gewohnheitsmäßig.	7
Information	Die Information bzw. das Wissen wurde von der Person nicht genutzt oder reichte nicht aus, um die Aufgabe korrekt zu erledigen.	8
Zielreduktion	Die Person nimmt in einer Entscheidungssituation eine unzulässige Vereinfachung der Situation an.	11
Tätigkeit		
Bedienbarkeit	Die Bedienelemente einer Komponente sind schlecht zu bedienen.	12
Handhabbarkeit	Ein beweglicher Gegenstand ist schlecht handhabbar.	4
Monotonie	Die Tätigkeit ist monoton, so daß Vigilanzeffekte auftreten (z.B. Trägheit, Suche nach Abwechslung).	4
Positionierbarkeit	Ein Bedienelement ist schlecht in eine gewünschte Position zu bringen.	7
Qualitätskontrolle	Eine durchgeführte Arbeit wird abschließend unzureichend geprüft.	7
Verwechslungsfreiheit	Gegenstände sind nicht so konstruiert, daß sie verwechslungsfrei eingebaut bzw. eingesteckt werden konnten (z.B. verdrehte Stecker).	6
Rückmeldung		
Anordnung	Die Information ist bezüglich der Aufgabe ergonomisch ungünstig angeordnet.	6
Anzeigebereich	Die Information wird aufgrund des beschränkten Anzeigebereiches nicht richtig angezeigt (Bereichsüberschreitung).	1
Anzeigegegenauigkeit	Die Information wird aufgrund der Ungenauigkeit der Anzeige nicht richtig angezeigt.	4
Kennzeichnung	Die Anzeige ist unzureichend gekennzeichnet.	5
Markierung	Auf den Anzeigen fehlt eine Markierung der mit dem Wert der Prozeßgröße verbundenen Systemzustände.	6
Zuverlässigkeit	Die Anzeige ist nicht zuverlässig.	2
System		
Auslegung	Die Konstruktion ist nicht ausreichend auf Überlastungen hin ausgelegt.	4
Fremdeinwirkung	Ein von außerhalb des Systems einwirkendes Ereignis führt zum fehlerhaften Systemzustand.	1
Konstruktion	Gegenstände sind umständlich konstruiert (z.B. sperrige Konstruktion).	8
Redundanz	Zu einem System fehlt entweder Redundanz (z.B. durch Freischaltung) oder diese war mit ausgefallen (z.B. durch gemeinsame Ursache).	4
Verschaltung	Elektrische Komponenten sind schlecht konstruiert (z.B. Kopplung, Vermaschung).	6

Entsprechend der Aufteilung der MMS-Komponenten ergeben sich also Einflußfaktoren der ergonomischen Gestaltung von Bedien- und Arbeitsmitteln (wie z.B. fehlende Markierungen, ungeeignete Anordnungen von Bedienelementen), organisatorische Einflußfaktoren der Gestaltung schriftlicher Hilfsmittel (wie z.B. mangelnde Vollständigkeit von Anweisungen) oder der organisatorischen Einbindung (wie z.B. mangelnde Aufgabenvorbereitung oder Qualitätskontrolle). Einflußfaktoren zeigen also insgesamt immer eine Abweichung situativer Gegebenheiten von den Erwartungen des Menschen oder mit anderen Worten den Aufwand, welchen der Mensch in einer bestimmten Richtung aufwenden muß, um sich selbst der Situation oder die Situation seinen Bedürfnissen anzupassen. Sie weisen damit auf den Konflikt zwischen typisch menschlichen Verhaltensweisen und technischen bzw. organisatorischen Gegebenheiten hin.

Mit dieser Überlegung können prinzipiell zwei Gruppen unterschieden werden: belastende und beanspruchende Faktoren (vgl. Kapitel 3). Belastende Faktoren beschreiben Einflüsse, die auf Eigenschaften der Situation zurückzuführen sind, also auf alle MMS-Komponenten, die auf den Menschen einwirken. Beanspruchende Faktoren beschreiben Einflüsse, die auf Eigenschaften des Menschen zurückzuführen sind (alle Faktoren bezogen auf die Person). Typische belastende Faktoren sind: Zeitdruck bei der Aufgabenbearbeitung oder Schwierigkeit der Aufgabe. Typische beanspruchende Faktoren sind fehlerhafte Informationsverarbeitung oder Zielreduktion des Menschen. Besonders problematisch wird die Wirkungsweise von Einflußfaktoren, wenn der Mensch sich selbst durch seine Fähigkeiten und Bedürfnisse zusätzliche Belastungen schafft. Hinsichtlich dieses Aspektes sind folgende Faktoren von besonderer Bedeutung:

Einfachheit: Menschen besitzen ein natürliches Bestreben, die Komplexität ihrer Umgebung möglichst zu reduzieren. Dieses Bestreben nach Reduktion kann neben der positiven Wirkung, mit komplexen Situationen umgehen zu können, negative Folgen haben. Der Faktor Einfachheit beschreibt diese negative Wirkung von Geübtheit. Ist eine Situation durch Übung oder vielfache Ausführung hoch geübt (skill based) und bestens vertraut, bearbeitet ein Mensch diese Situation mit weniger Aufmerksamkeit und auf einem nicht- oder nur teilbewußten Niveau (subliminar). Auf kleinere Abweichungen der fehlerträchtigen von der geplanten Situation wird nicht mehr geachtet.

Allerdings erklärt eine subliminäre Informationsverarbeitung nur einen Teil der in der Ereignisauswertung beobachteten Fehler. Auch ohne geringfügige situative Abweichungen können Handlungen, die bisher immer fehlerfrei ausgeführt wurden, plötzlich

fehlerhaft ausgeführt werden; z.B. wenn ein Freigabeschalter gemeinsam mit einem Komponentenschalter betätigt wird, obwohl eigentlich der Komponentenschalter zu Prüfzwecken allein betätigt werden sollte. Der Grund für diese Art der Fehler ist schwer einsichtig. Rasmussen (1986) begründet diese Fehler damit, daß vormals explizit vorhandenes Wissen durch die Übung oder vielfache Ausführung automatisiert wird. Fehler in geübten Verhaltensweisen werden hier als Resultat des Vorganges der Automatisierung angesehen, der nach der ACT (Adaptive Control of Thought Theory) von Anderson (1983) als Compilierung bezeichnet wird.

In den Ereignissen ist jedoch zu beobachten, daß diese Art von Fehlern weniger zu Auslassungen oder Ausführungsfehlern sondern eher zu Verwechslungen führen. Damit können solche Fehler nicht allein durch den Prozeß der Compilierung erklärt werden, da dieser das Wissen selbst nicht substantiell verändert (Anderson, 1983) und damit keine Verwechslungen zu erwarten wären. Die beobachteten Fehler spiegeln also eher einen Effekt wider, der in der kognitiven Psychologie schon seit langem als Interferenz bekannt ist. Interferenz wird insbesondere bei hochgeübten Fähigkeiten des Menschen, wie Sprache oder motorischen Fertigkeiten beobachtet. Bekanntestes Beispiel ist der Freud'sche Versprecher (siehe auch Wehner, 1984). Interferenzbeobachtungen beim dichotischen Hören führten letztlich z.B. zu dem bekannten Filtermodell von Broadbent (1958). Allgemein tritt Interferenz auf, wenn unterschiedliche Situationsanforderungen gemeinsame Fähigkeiten des Menschen nutzen. Im obigen Beispiel ist dies die aus dem täglichen Betrieb hochgeübte Teilfertigkeit, einen Komponentenschalter immer gemeinsam mit einem Freigabeschalter zu betätigen, welche mit der weniger geübten Teilfertigkeit, den Komponentenschalter allein zu betätigen, interferiert. In sublimaren Informationsverarbeitungsvorgängen werden dann die "stärkeren", d.h. die geübteren Verhaltensweisen eingenommen. Eng verknüpft mit dem Faktor 'Einfachheit' ist also das Phänomen des Verwechslungsfehlers.

Für die praktische Anwendung kann gefolgert werden, daß Trainingsprogramme eher strategisch ausgelegt sein müssen und nicht allein zur Übung von Fertigkeiten in einer bestimmten Situation dienen dürfen. Die Strategien müssen insbesondere geeignet sein, sowohl bei geübten (Faktor Einfachheit) als auch ungeübten Situationen (Faktor Komplexität) angemessen reagieren zu können (vgl. Günzel, 1993).

Verwechslungsfreiheit: Der Faktor Verwechslungsfreiheit wurde in der Ereignisanalyse ausschließlich bei der Herstellung, Wartung und Instandhaltung technischer Komponenten beobachtet; er stellt in abgeschalteten Anlagenzuständen (Nicht-Vollast Zu-

ständen) aber einen Einflußfaktor von besonderer Bedeutung dar. Sind beim Anschluß zweier Leitungen z.B. Druck- und Saugleitung in der gleichen Form kodiert, so ist mit einer weitaus höheren Wahrscheinlichkeit mit einer Verwechslung der beiden Leitungen zu rechnen, als wenn diese unterschiedliche Formen hätten. Verwechslungsfreiheit bezieht sich aber nicht nur auf die Verbindung von Leitungen, sondern auch auf das Verdrehen beim Einbau von Steckern oder Anschließen elektrischer Verbindungen. Daß dieser PSF eine hohe Bedeutung für den Bereich Herstellung/Wartung hat, wird z.B. auch in der Fertigung von elektronischen Komponenten beobachtet. Albers (1995) stuft ihn beispielsweise als wesentlichen Faktor für eine Null-Fehler Produktion bei Fließbandarbeiten ein. Nach Bubb (1992) kann er als ein Unteraspekt der Kompatibilität angesehen werden.

Der Faktor Verwechslungsfreiheit und mit ihm Verwechslungsfehler allgemein drücken darüber hinaus eine der schwierigsten ergonomischen Fragestellungen aus: Wie groß soll die Handlungsfreiheit des Menschen in einem technischen System sein? Das Phänomen der Verwechslung hat damit auch gewisse Relevanz für Tätigkeiten außerhalb der Herstellung/Wartung, also in der Produktion und Überwachung.

Dies bestätigt auch eine Analyse von insgesamt 19 weiteren Verwechslungsfehlern, die in den Ereignissen beobachtet worden sind. Die Verwechslungen selbst sind dabei unabhängig von den verwechselten Dingen. Verschiedene technische Systeme werden genauso verwechselt wie elektrische oder mechanische Komponenten oder Räumlichkeiten. Für die Analyse von Verwechslungsfehlern sind also weniger die technischen Gegebenheiten sondern ist der Informationsfluß im MMS zu betrachten: In drei Ereignissen ist der bereits diskutierte Faktor Einfachheit und unzureichende Informationsverarbeitung der Personen beobachtet worden. Äußere Faktoren für Verwechslungsfehler sind bezogen auf die Eingabeseite des MMS Präzision, Zeitdruck und Aufgabenvorbereitung sowie - bezogen auf Anweisungen - Inhalt, Deutlichkeit und Vollständigkeit und schließlich - bezogen auf die Rückmeldung - Kennzeichnung, Markierung und Anordnung. Begleitet werden diese durch die Faktoren 'Redundanz' und 'Verschaltung' sowie durch den Faktor 'Qualitätskontrolle'.

Da die äußeren Einflußfaktoren auf unvollständige Informationen auf der Eingabeseite des Menschen hinweisen, stellen sich Verwechslungsfehler als Interferenzeffekt zwischen den sich durch Lernen und Anpassen ändernden inneren Vorstellungen des Menschen (seinen mentalen Modellen) und den variierenden Gegebenheiten seiner situativen Umgebung dar (vgl. auch Norman, 1983). Eine zentrale Rolle bei der Entste-

hung von Verwechslungsfehlern ist somit die fehlerhafte Übertragung gelernter Wahrnehmungseinheiten, kognitiver Strategien oder Teilfertigkeiten auf Situationen, für die sie nicht gelten. Für die Vermeidung von Verwechslungsfehlern ist die Kompatibilität zwischen innerem Modell und situativer Umgebung ausschlaggebend (vgl. Spanner, 1993; Bubb, 1992).

Die Hauptschwierigkeit einer effektiven Vermeidung von Verwechslungsfehlern besteht dabei darin, daß sich die inneren mentalen Modelle ändern können und schwer zugänglich sind (u.a. Gentner & Stevens, 1983). Aufgrund der beobachteten äußeren Faktoren kann aber gefolgert werden, daß der überwiegende Teil von Verwechslungsfehlern durch genauere Aufgabenstellungen vermieden werden kann. Qualitätskontrolle ist eine weitere Möglichkeit, Verwechslungen festzustellen und möglichen Konsequenzen vorzubeugen. Sie bietet sich prinzipiell jedoch nur dann an, wenn der Durchführende selbst keine Kontrollmöglichkeit über seine Aufgabendurchführung erhalten kann (open loop action). Zur aktiven Vermeidung von Verwechslungsfehlern sind Maßnahmen vorzuziehen, die eine Kontrollmöglichkeit für die Aufgabendurchführung (closed loop action) schaffen. Faktoren einer solchen Kontrolle durch Rückmeldung sind Markierung und Kennzeichnung sowie Anordnung. Berücksichtigt man diese Überlegungen zur Bedeutung der Rückmeldung, stellt eine "weiche Führung" des Menschen durch (1) Darstellung von Sicherheitsgrenzen und (2) Beschränkung menschlicher Handlungsfreiheit auf Aktionen innerhalb eines Sicherheitsbandes eine Möglichkeit dar, Verwechslungsfehler zu vermeiden.

Gestaltung, Deutlichkeit und Präzision: In gewisser Weise ähnliche Wirkungsbeziehungen wie beim Faktor Einfachheit finden sich bei den Faktoren Gestaltung, Deutlichkeit und Präzision. Die Gemeinsamkeit dieser Faktoren ist, daß sie auf die Detaillierungstiefe der Information eingehen, die zur Auftragserteilung in schriftlicher oder mündlicher Form übermittelt wird. Auch hier sind Menschen bestrebt, eine möglichst effektive Informationsübermittlung zu erreichen bzw. einen möglichst geringen Aufwand zur Formulierung eines Auftrages zu erreichen.

Grundlage jeglicher effektiven Informationsübermittlung ist das Weglassen redundanter Information (vgl. Attneave, 1974). Kann der Auftragserteiler davon ausgehen, daß der Empfänger auch mit weniger Information den erteilten Auftrag fehlerfrei durchführt, so wird Information, die für die Bearbeitung in der aktuellen Situation bedeutend sein kann, weggelassen. Auf der anderen Seite ist auch der Informationsempfänger bestrebt, nicht zu viel redundante Information aufzunehmen, d.h., er will wissen, ob er

den gewünschten Zustand mit seinem vorhandenen Wissen erreichen kann oder nicht. Ist dies nicht der Fall, benötigt er detailliertere Informationen; ist dies der Fall, ist zusätzliche Information redundant und wird als überflüssig oder gar störend empfunden.

Mit diesen Überlegungen ist die Wirksamkeit administrativer Maßnahmen zur Vermeidung menschlicher Fehler als begrenzt einzustufen. Eine effektive Informationsübertragung kann nicht dadurch erreicht werden, daß Prozeduren oder mündliche wie schriftliche Anweisungen ausnahmslos und jederzeit sehr detaillierte Anweisungen enthalten. Vielmehr sollte sie wesentliche Abweichungen vom vorhandenen Wissen nennen. Da Menschen fähig sind zu lernen, bedingt dies, daß die Informationstiefe schriftlicher Anweisungen variabel sein sollte (z.B. über computerunterstützte Prozeduren oder zusätzliche Informationsblätter, die bei Bedarf zusätzliche Informationen liefern).

Markierung und Kennzeichnung: Im Vergleich zu anderen Einflußfaktoren der Rückmeldung sind Markierung und Kennzeichnung Faktoren, die auf die mangelnde semantische Bedeutung der rückgemeldeten Information hinweisen. Beide Faktoren machen deutlich, daß dem Operateur oft die Bedeutung der Komponenten nicht unmittelbar vermittelt wird. Es wird vielmehr davon ausgegangen, daß ihm diese durch seine Ausbildung bekannt ist (daß z.B. Pumpe Z bei einem Füllstand X zuschaltet). Damit kann auch bei diesen Faktoren eine typische menschliche Eigenschaft beobachtet werden, die darauf beruht, daß der Mensch in der Lage ist, zu lernen und Verhaltensweisen zu automatisieren: Wissen wird nicht immer explizit, d.h. bewußt, eingesetzt. Bei bekannten und hochgeübten Verhaltensweisen wird es nur implizit, d.h. als Kontext-Information, genutzt. Es wird erst dann bewußt zu Rate gezogen, wenn Abweichungen von bekannten Situationen vorliegen (vgl. Mandl & Spada, 1988).

Für die Gestaltung von technischen Komponenten ist es aufgrund dieser Überlegungen erforderlich, dem Operateur die Bedeutung der Komponenten und der aktuell angezeigten Werte rückzumelden. Dies kann im einfachsten Fall geschehen, indem der aktuelle Wert mit einer qualitativen Farbkodierung in rote (= fehlerhafte) und grüne (= fehlerfreie) Bereiche auf einer analogen Anzeige unterlegt wird. Da die Bedeutung in unterschiedlichen Situationen unterschiedlich sein kann, ist es erforderlich, die Sicherheitsgrenzen (safety margins) angepaßt an die gegebenen Situationen darzustellen. Da diese zusätzlich über Zeit und Anlagenzustand verändert sein können, bieten sich auch hierfür computergestützte Systeme zur Prozeßvisualisierung an, wie sie z.B. zum Anfahren kerntechnischer Anlagen verwendet werden (z.B. in Löhrl et al., 1992).

Anordnung: Ein weiterer bedeutsamer Faktor ist der Faktor Anordnung. In einigen Ereignissen hat sich gezeigt, daß die Anordnung der Bedienelemente für die Aufgaben, die innerhalb des Ereignisses zu bewältigen waren, nicht optimal ist. Eine Analyse weiterer situativer Bedingungen, die bei diesen Ereignissen wirksam waren, zeigt, daß nicht allein bisher überhaupt nicht ergonomisch gestaltete Bedienelemente unzureichend angeordnet sind, sondern auch Bedienelemente in der Warte oder in örtlichen Leitständen, von denen zumindest zu einem gewissen Grad ausgegangen werden kann, daß sie aufgabenbezogen und ergonomisch ausgelegt sind. Die ergonomische Qualität der Warte ist also bezogen auf den Faktor Anordnung keine feste Größe, sondern sie ist immer abhängig von den gerade durchzuführenden Aktionen. Damit zeigt dieser Faktor ein prinzipielles ergonomisches Problem sogenannter festverdrahteter (hard wired) Warten; in diesen kann die Information und Bedienung nicht immer aufgabenbezogen angeordnet werden.

Innerhalb der Ereignisse wurde der Faktor Anordnung gemeinsam mit den Faktoren Fremdeinwirkung und Verschaltung beobachtet. Dies weist darauf hin, daß die ergonomische Gestaltung von besonderer Wichtigkeit ist, wenn das Ereignis unbekannt ist und nicht mit gewohnten Eingriffen bewältigt werden kann. In solchen unerwarteten Ereignissen bewirkt die latente Schwäche der unzureichenden Anordnung fehlerhafte Eingriffe. Diese Überlegungen sprechen insgesamt für eine situationsbezogene Aufbereitung von Information, die durch moderne Bildschirmsysteme möglich ist. Als wesentliche Randbedingung der situationsbezogenen Aufbereitung von Information muß dabei die Kompatibilität zwischen den verschiedenen möglichen Bildschirmhalten gewahrt bleiben. Wie eine solche Informationsaufbereitung systematisch geschehen kann, wird in Sträter (1995) zusammengestellt.

5.2.5 Wirkungszusammenhänge von Fehlerbedingungen

Die Diskussion der verschiedenen Fehlerbedingungen legt nahe, daß diese in vielfältiger Form zusammenhängen. Diese Wechselwirkungen verschiedener Einflußfaktoren können näher untersucht werden, indem man das gemeinsame Auftreten verschiedener Faktoren betrachtet. Da das Beschreibungs- und Auswertungsmodell zuläßt, mehrere PSF anzugeben und auszuwerten, können Wechselwirkungen verschiedener Bedingungen herausgearbeitet werden, indem deren gemeinsames Auftreten in einzelnen Ereignissen (und dort in den einzelnen MMS) ausgewertet wird. Tabelle 29 faßt die beobachteten Wirkungszusammenhänge von Einflußfaktoren zusammen.

Tabelle 29 Beobachtete Zusammenhänge von Einflußfaktoren.

Absolute Häufigkeit	2	11	6	7	24	6	6	7	4	7	7	7	4	6	6	5	1	8	4	4	1	3	3	12	4	13	4	1	6
Zuverlässigkeit																													
Zielreduktion																													
Zeitdruck																													
Vorhandensein																													
Vollständigkeit																													
Verwechslungsfreiheit																													
Verschaltung																													
Verarbeitung																													
Redundanz																													
Qualitätskontrolle																													
Präzision																													
Positionierbarkeit																													
Monotonie																													
Markierung																													
Konstruktion																													
Komplexität																													
Kennzeichnung																													
Inhalt																													
Information																													
Handhabbarkeit																													
Gestaltung																													
Fremdeinwirkung																													
Einfachheit																													
Deutlichkeit																													
Bedienbarkeit																													
Auslegung																													
Aufgabenvorbereitung																													
Anzeigegegenauigkeit																													
Anzeigebereich																													
Anordnung																													
Maximale relative Häufigkeit von gemeinsam genannten PSF																													

Als Tabelleneinträge sind die maximalen Anteile der verschiedenen Faktoren zueinander nach Gleichung 24 berechnet worden. Die beobachteten Wirkungszusammenhänge von Einflußfaktoren können in drei Gruppen unterteilt werden, zu denen einige herausragende Effekte diskutiert werden.

- **Einflußfaktoren, die auf gemeinsame Grundursachen schließen lassen**

Konstruktion-Handhabbarkeit: Der Zusammenhang von 50% zwischen unzureichender Konstruktion eines technischen Systems und schlechter Handhabbarkeit legt nahe, daß bei dieser Konstellation der Einflußfaktoren das betroffene technische System nicht systematisch auf mögliche menschliche Eingriffe hin optimiert ist. Dies wird auch durch den Einfluß der Rückmeldung deutlich, deren wichtige Rolle bei der Fehlerentstehung und Vermeidung bereits des öfteren angesprochen wurde (25% Zusammenhang zwischen Konstruktion und Anzeigegenauigkeit und 50% Zusammenhang von Anzeigegenauigkeit mit der Zuverlässigkeit von Anzeigen). Verfolgt man den Zusammenhang zwischen Konstruktion und Handhabbarkeit weiter, so stellt man zwei weitere Wechselwirkungen fest: Präzision und Deutlichkeit sowie Konstruktion und Monotonie.

Präzision-Deutlichkeit: Ausgehend vom Faktor Präzision besteht ein Zusammenhang zum Faktor Deutlichkeit (33%), welcher wiederum zu 33% mit dem Faktor 'Information' zusammenhängt. Diese Verbindung zeigt, daß in vielen Ereignissen eine ungenaue Aufgabenspezifizierung durch das Wissen der Personen kompensiert wird. Gelingt diese Kompensation nicht (beispielsweise durch eine unerwartet komplexe Situation, wie der Zusammenhang zum Faktor Komplexität nahelegt) führt diese Konstellation von Einflußfaktoren zum Fehler.

Konstruktion-Monotonie: Ferner besteht auch ein Zusammenhang zwischen Konstruktion und Monotonie. Dies läßt vermuten, daß Arbeitsumgebungen mit mangelnder ergonomischer Auslegung zu typischen Erscheinungen monotoner Arbeiten führen (50% Zusammenhang zum Faktor Monotonie). Dies sind beispielsweise Suche nach Abwechslung bzw. Vereinfachung der Situation (Faktor Zielreduktion) und Fremdattribution der Ursache am Fehler (Faktor Vorhandensein von Prozeduren und Faktor Deutlichkeit). Daß die Faktoren Deutlichkeit und Vorhandensein in diesem Zusammenhang beobachtet wurden, läßt auch darauf schließen, daß in derartigen Arbeits-

umgebungen verstärkt eine unzureichende ergonomische Gestaltung der schriftlichen Hilfsmitteln zu beobachten ist.

Bedienbarkeit-Verschaltung: Eine weitere Faktorenkonstellation, die auf eine gemeinsame Grundursache schließen läßt, ist Bedienbarkeit-Verschaltung (33%). Dieser Zusammenhang ist immer dann gegeben, wenn eine technische Komponente schlecht konstruiert und schlecht zu bedienen ist. Auch bei dieser Faktorenkonstellation sind die oben diskutierten Zusammenhänge zu Monotonie (50%), Vollständigkeit von Prozeduren (17%) und Komplexität (17%) festzustellen und ähnlich zu interpretieren: Die Arbeitsumgebung ist insgesamt nicht so gestaltet, wie es für eine zufriedenstellende Aufgabenbewältigung erforderlich ist. Schwierigkeiten einer erfolgreichen Aufgabenbewältigung bestehen in diesem Fall insbesondere dann, wenn technische Einflüsse der Vermaschung (Faktor Verschaltung) und Wechselwirkungen zwischen redundanten Systemen hinzukommen (Faktor Redundanz). Derartige Einflüsse sind für die handelnde Person verdeckt, also nicht unmittelbar erkennbar. Folgerichtig führen derartige Faktoren insbesondere dann zu Fehlern, wenn zusätzlich ergonomische Faktoren suboptimal gestaltet sind (Zusammenhänge zu Markierung, Anordnung und Positionierbarkeit).

Zusammenfassend kann bezüglich der Wechselwirkungen mit gemeinsamen Grundursachen folgendes festgestellt werden: In dieser Gruppe ergibt sich ein allgemeiner Wirkungszusammenhang zwischen **Arbeitszufriedenheit bzw. Arbeitskomfort** (operational comfort) und ergonomischer Gestaltung bzw. ergonomischer Qualität der Arbeitsumgebung. Die Rolle der Faktoren Aufgabenvorbereitung, Redundanz und Verschaltung weisen in diesem Zusammenhang zusätzlich darauf hin, daß Lösungen zur Fehlervermeidung nicht ausschließlich bezogen auf die handelnde Person zu suchen sind, da die handelnde Person derartige Einflüsse nicht erkennen kann. Bei solchen Zusammenhängen sind Managementmaßnahmen gefordert, derartige verdeckte Einflüsse für die handelnde Person erkennbar zu machen und zu minimieren.

- **Einflußfaktoren, die im Wirkungszusammenhang stehen**

Einfachheit-Verarbeitung: Zwischen Einfachheit einer Aufgabe und Fehlern bei der Informationsverarbeitung einer Person wurde mit 67% ein deutlicher Zusammenhang festgestellt. Dieser Zusammenhang wurde bereits weiter oben bei der Diskussion des Faktors Einfachheit angedeutet: Bei einfachen Aufgaben reduziert der Mensch die be-

wußte Fokussierung auf diese Aufgaben und begeht so Fehler durch die Anwendung von gewohnheitsmäßigem Verhalten. Verfolgt man weitere Wechselwirkungen zu anderen Faktoren, so stellt man fest, daß dieser Effekt durch mangelnde Kennzeichnung von Bedienelementen (33%) oder schlechte Gestaltung von Prozeduren (25%) unterstützt wird. Zusätzlich wirkt sich fehlerbegünstigend aus, daß für einfache Aufgaben keine ausreichende Aufgabenvorbereitung getroffen wird (33% Zusammenhang). Auch dieser Zusammenhang wurde oben bereits mit der Effektivität der Informationsübermittlung angesprochen. Insgesamt gesehen kann gewohnheitsmäßiges Verhalten aufgrund dieser Beobachtungen zu einem gewissen Teil durch ergonomische Gestaltung in fehlerfreie Bahnen gelenkt werden. Als eine weitere Möglichkeit kann im Hinblick auf den Faktor Aufgabenvorbereitung vorgeschlagen werden, immer wiederkehrende Aufgaben und Handlungen von unterschiedlichen Personen durchführen zu lassen, um so gezwungen zu sein, eine gleichbleibende Aufgabenvorbereitung durchzuführen und die sich durch Gewohnheit einschleichenden Effekte zu vermeiden. Diese Möglichkeit der Erhöhung menschlicher Zuverlässigkeit wird in Produktionsbetrieben mit Fließbandarbeiten unter dem Namen 'Job-Rotation' genutzt, um menschliche Fehler zu vermeiden, die sich dort in qualitativ minderwertigen Produkten äußern. Damit weist dieser Zusammenhang darauf hin, daß organisationspsychologische Aspekte und kognitive Fehler in Beziehung stehen.

Zeitdruck-Aufgabenvorbereitung: Diese Konstellation zeigt, daß man in einigen zeitkritischen Situationen gerade durch mangelnde Aufgabenvorbereitung versucht, das Zeitfenster zu erhöhen. Hierauf weist auch der Zusammenhang dieser Konstellation zum Faktor Qualitätskontrolle hin (17%). Aus dem Zusammenhang zum Faktor Einfachheit ist zu ersehen, daß diese Konstellation vornehmlich bei einfachen Aufgaben zu Problemen führt. Die Verbindung von 17% zum Faktor Zielreduktion und 14% zum Faktor Verarbeitung läßt ferner darauf schließen, daß man in derartigen Situationen den Fähigkeiten des Menschen vertraut. Wird er überbeansprucht (z.B. durch ungünstige ergonomische Faktoren wie Anordnung, Kennzeichnung, Markierung oder Anzeigebereich), führt diese Konstellation zu Fehlern. Als weitere auslösende Bedingungen, die bei einer Überbeanspruchung zu einem Fehler führen, wurden die verdeckten Faktoren Vermaschung, Fremdeinwirkung und Redundanz beobachtet.

Einflußfaktoren, die im Wirkungszusammenhang stehen, verdeutlichen damit, daß gerade in Situationen, in denen ungünstige situative Bedingungen herrschen (z.B. verdeckte Einflußfaktoren oder weniger Aufgabenvorbereitung), durch eine **ergonomische Gestaltung** der Arbeitsumgebung und Aufgabenstellung eine sinnvolle Vorkehr-

rung gegen Fehler getroffen werden kann, auch wenn die ergonomische Gestaltung für den normalen Betrieb als weniger wirkungsvoll oder als übertrieben eingestuft wird.

- **Einflußfaktoren, die gemeinsam zum Fehler geführt haben**

Vollständigkeit-Kennzeichnung: Die Kombinationen des Einflußfaktors Vollständigkeit zeigen ambivalente Wirkungsbeziehungen: Zum einen sind Prozeduren unentbehrliches Hilfsmittel bezüglich der Faktoren Verschaltung, Redundanz und Aufgabenvorbereitung. Bei diesen verdeckten Einflußfaktoren sind schriftliche Prozeduren also ein wesentliches Hilfsmittel zur Erkennung möglicher Einflüsse und damit zur Fehlervermeidung. Dies zeigt sich auch darin, daß falsche Inhalte in Prozeduren einen unmittelbaren Zusammenhang zum Faktor Vollständigkeit haben. Sind Prozeduren unvollständig, so kann dies im wesentlichen nur durch das Wissen der Personen kompensiert werden (38% Zusammenhang zum Faktor 'Information'). Einen höheren Zusammenhang zum Faktor Vollständigkeit weisen jedoch die ergonomischen Faktoren Anordnung, Markierung, Verwechslungsfreiheit und Bedienbarkeit auf. Damit scheint die Vollständigkeit von Prozeduren in gewisser Weise auch ein Mittel zu sein, andere Schwachstellen in der Arbeitsumgebung zu kompensieren, nicht aber die unmittelbare Fehlerursache zu sein. Der Kompensationseffekt von schriftlichen Hilfsmitteln ist auch für den Zusammenhang von Zielreduktion und Vorhandensein von Prozeduren zu beobachten, denn diese Konstellation hat wesentliche Zusammenhänge mit Monotonie, Wissen und Kennzeichnung.

Zusammenfassend kann man also zu dieser Gruppe von Wechselwirkungen festhalten, daß Fehlerursachen komplex und multikausal sind. Effektives **Fehlermanagement** kann somit nicht bedeuten, eine einzige Ursache in Betracht zu ziehen. Mit anderen Worten können Fehler in vielen Fällen nicht einfach dadurch vermieden werden, daß eine einzige Ursache gesucht wird (z.B. ein schriftliches Dokument oder die handelnde Person). Um dies zu gewährleisten, darf auch die Frage einer persönlichen Schuld kein Gegenstand der Fehleranalyse sein, da diese eine Suche nach tatsächlichen Ursachen behindert. Auch zeigt sich, daß eine Gestaltung von Prozeduren und deren Detaillierungsgrad immer in Kooperation mit denjenigen geschehen muß, welche diese Prozeduren anwenden müssen.

- **Übersicht der Wechselwirkungen**

Betrachtet man die Diskussion der Wechselwirkungen zwischen den Einflußfaktoren im Ganzen, so legt dies nahe, daß auch die Wechselwirkungen bezüglich typischer menschlicher Eigenschaften und ergonomischen Gegebenheiten eine Systematik aufweisen, die in Kapitel 3 als indirekte Wirkung von Einflußfaktoren bezeichnet wurde. Wie bei den Fehlerarten bietet sich hier an, eine Nicht-Metrische-Multidimensionale-Skalierung der Wirkungszusammenhänge vorzunehmen, um diese indirekte Wirkung der Faktoren zu visualisieren. Bild 43 zeigt das Ergebnis einer NMDS mit dem oben bereits angesprochenen Verfahren. Die Alienation liegt bei ca. 0,35.

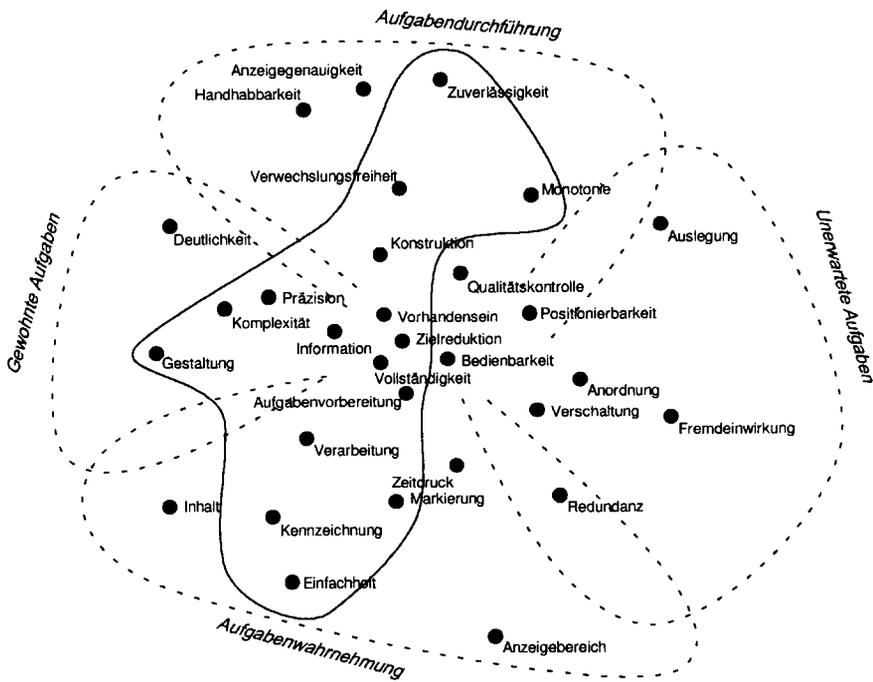


Bild 43 Nicht Metrische Multidimensionale Skalierung der Wechselwirkungen zwischen den Einflußfaktoren.

Gruppierungen wurden auch hier wieder nach inhaltlichen Gesichtspunkten vorgenommen. Innerhalb des Bildes können vier indirekte Faktoren unterschieden werden (gestrichelte Linien): Aufgabendurchführung und Aufgabenwahrnehmung (personelle/organisatorische Achse) sowie Gewohnheit und Unerwartetheit (situative Achse). Aufgabendurchführung und Aufgabenwahrnehmung können durch Inkomp-

tibilitäten zwischen Aufgabe und Tätigkeit bzw. Aufgabe und Rückmeldung charakterisiert werden, die organisatorischer oder personeller Natur sein können und auch für eine Arbeitszufriedenheit wichtig sind. Gewohnheit ist dadurch gekennzeichnet, daß die Diskrepanz zwischen subjektiv erwarteter und erforderlicher Aufgabenstellung nicht bewußt erkannt wurde (keine Dissonanz), und Unerwartetheit dadurch, daß die Diskrepanz zwischen erforderlicher Aufgabenstellung und subjektiv erwarteter Lösung zu hoch ist (große Dissonanz).

Wie bereits daraus zu erkennen, daß der Begriff der Dissonanz zur Einordnung der Einflußfaktoren in der NMDS genutzt werden kann, sind die übergeordneten Faktoren von besonderer Wichtigkeit für die Diskussion kognitiver Fehler. Im Bild sind bereits die Einflußfaktoren auf die kognitive Leistungsfähigkeit des Menschen vorweggenommen; sie sind mit einer durchgezogenen Linie umschlossen und werden im kommenden Abschnitt zusammen mit der Systemergonomie diskutiert.

5.2.6 Systemergonomie, kognitive Fehler und Verwechslungsfehler

Die Diskussion der Einflußfaktoren machte deutlich, daß die Beziehung zwischen situativen Gegebenheiten und der Informationsverarbeitung des Menschen eine entscheidende Rolle bei der Entstehung menschlicher Fehler, insbesondere von Verwechslungsfehlern, spielt. Problematisch ist es, aus den Beobachtungen Vorhersagen über das Verhältnis dieser inneren Abläufe zu den oben besprochenen Wirkungszusammenhängen zu gewinnen. In Kapitel 1 wurde zur Lösung dieses Problems vorgeschlagen, die kognitive Belastung und kognitive Beanspruchung innerhalb der Ereignisse zu beschreiben.

Zur Beschreibung der **kognitiven Belastung** wurde die systemergonomische Klassifikation herangezogen (siehe Tabelle 17, Kapitel 3) und zu allen 255 MMS, die in den 165 beobachteten Ereignissen identifiziert wurden, eine systemergonomische Klassifikation der einzelnen MMS vorgenommen. Insgesamt konnten so 76 MMS mit kognitiv belastenden systemergonomischen Ausprägungen identifiziert werden.

Zur Beschreibung der **kognitiven Beanspruchung** wurde die in Kapitel 1 diskutierte Einteilung genutzt: Information, Verarbeitung und Zielreduktion. Alle drei Faktoren sind der MMS-Komponente Person zugeordnet und wurden folgendermaßen aus den Ereignisbeschreibungen gewonnen: In den Ereignisbeschreibungen wurden zur Beschreibung von kognitiven Fehlern Begriffe wie 'irrtümlich', 'versehentlich' oder 'unbe-

absichtlich' verwendet. Diese Begriffe weisen auf Fehler in der menschlichen Informationsverarbeitung hin. Wurden diese Begriffe zur Beschreibung von Entscheidungssituationen verwendet, so handelt es sich nach der oben erwähnten Klassifikation um eine 'Zielreduktion'; wurden sie zur Beschreibung von einfachen Schalthandlungen verwendet, so handelt es sich um eine fehlerhafte 'Verarbeitung'. Der Faktor 'Information' wurde vergeben, wenn aus den Ereignisbeschreibungen hervorging, daß die handelnde Person eine mental oder in Form von Hinweisreizen (z.B. Hinweisschilder, Anzeigen) zur Verfügung stehende Information nicht genutzt hat (vgl. auch Hacker, 1986). Insgesamt wurden so 24 MMS beobachtet, bei denen entsprechende Angaben zur kognitiven Beanspruchung gemacht worden sind. Welche Fehlerarten und Einflußfaktoren durch dieses Vorgehen gefunden werden können, zeigen die Profile in Bild 44 und Bild 45.

Mittlere Bedeutung für kognitive Prozesse

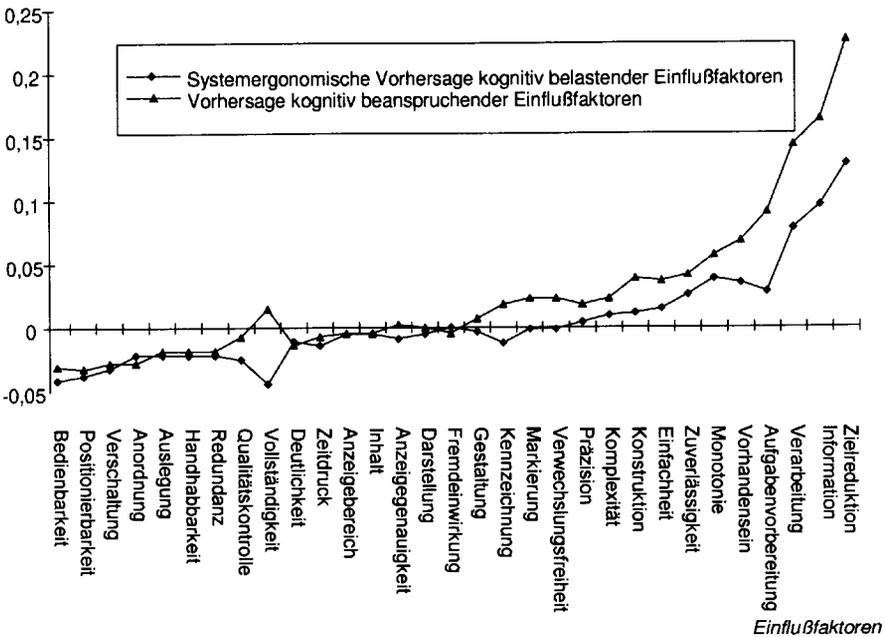


Bild 44 Bedeutungsprofil der Einflußfaktoren bezogen auf die kognitive Belastung und Beanspruchung.

In den Bildern ist die mittlere Bedeutung der Einflußfaktoren und Fehlerarten bei kognitiven Prozessen aufgetragen. Die mittlere Bedeutung wurde jeweils getrennt für

Ereignisse mit und ohne kognitive Belastung über die Anzahl der Einflußfaktoren/Fehlerarten bezogen auf die Anzahl der Ereignisse bestimmt, in denen sie aufgetreten sind. Positive Werte geben relative Häufigkeiten für kognitive Prozesse, negative für nicht-kognitive Prozesse an. In den Bildern wird ferner zwischen den Vorhersagen der Systemergonomie (kognitiver Belastung) und der kognitiven Einflußfaktoren (kognitive Beanspruchung), die in den Ereignissen genannt wurden, unterschieden.

Ordnet man die gefundenen kognitiven Einflußfaktoren aus Bild 44 in das oben dargestellte Bild 43 der NMDS aller Einflußfaktoren ein, so treten kognitive Fehler nur dann auf, wenn die Situation weder völlig gewohnt noch völlig ungewohnt ist (Faktoren, die mit der durchgezogenen Linie in Bild 43 umfaßt werden). In diesem Bereich herrscht geringe bis mittlere Dissonanz. In den Extrembereichen, in denen sehr hohe Dissonanz herrscht, sind keine kognitiven Einflußfaktoren zu finden. Daraus kann gefolgert werden, daß kognitive Fehler nur dann auftreten, wenn die gegebene Situation nicht ganz eindeutig ist (lacking situation awareness -vgl. auch Meister & Hogg, 1995). In diesen Situationen ist also weder klar, ob die gewohnten Abläufe greifen, noch, ob es sich bei der gegebenen Situation um eine völlig neue Situation mit entsprechendem Handlungsbedarf handelt. Kognitive Fehler treten also eher in unbestimmten Situationen und beim Übergang von klaren situativen Anforderungen auf gewohntes Verhalten auf. Ähnliche Beobachtungen wurden auch bei der Befragung von Simulatortrainern gemacht: Ullwer (1996) konnte beispielsweise zeigen, daß Fehler von Operateuren gerade dann auftreten, wenn die Störung schon fast beherrscht war und nur noch gewohnte Eingriffe erforderlich waren, um die Störung abschließend zu beheben.

Analysiert man die Bedeutung der verschiedenen Fehlerarten in Bild 45 hinsichtlich kognitiver Prozesse, so kann man folgende Beobachtungen machen: Unmittelbar nach den eher kognitive Fehler beschreibenden Fehlerarten (Unterlassungen der Personen bzw. falsche Ausführungen) folgen Zeitfehler, fehlerhafte Aufgaben und Rückmeldung. Andere quantitative Fehler (wie 'zu viel' oder 'zu wenig') sind weniger bedeutsam. Interessanterweise haben auch Unterlassungen von Aufgaben oder Auftragserledigungen eine untergeordnete Bedeutung als kognitive Fehlerart. Daraus kann man folgern, daß sich kognitiv bedingte Fehler darin äußern, daß der Operateur in irgendeiner Form aktiv in das Geschehen eingreifen will (coping of disturbance), um die aufgetretene Störung zu vermeiden (vgl. Mosneron-Dupin, 1993).

Gerade die gleichartigen Kurvenverläufe der kognitiven Einflußfaktoren in Bild 44 weisen darauf hin, daß kognitive Belastung und kognitive Beanspruchung zusammenhän-

gen. Um diesen Zusammenhang genauer zu untersuchen, wurden die absoluten Häufigkeiten von Einflußfaktoren und Fehlerarten bei kognitiver Belastung und Beanspruchung korrelativ miteinander verglichen. Insgesamt ergibt sich der in Tabelle 30 dargestellte Zusammenhang. Die Korrelation von $r=1$ zwischen kognitiver Belastung und Beanspruchung weist z.B. darauf hin, daß die Rangfolge der gefundenen Einflußfaktoren vollständig übereinstimmt.

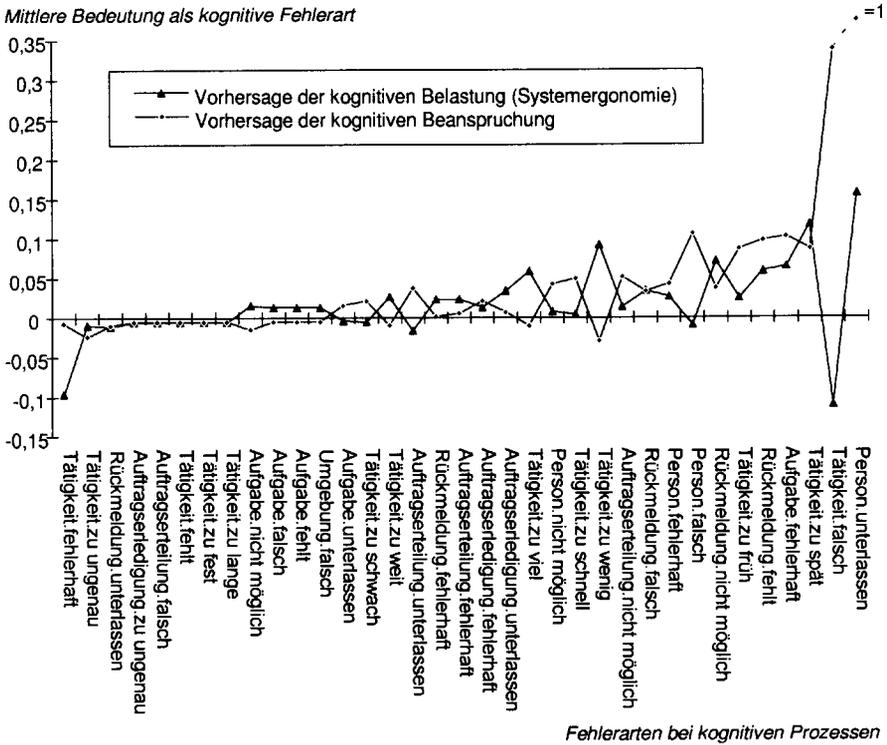


Bild 45 Bedeutungsprofil der Fehlerarten bei kognitiven Prozessen.

Betrachtet man die Einflußfaktoren im Einzelvergleich, ist der Beanspruchungsfaktor 'Zielreduktion' vornehmlich bei simultanen mehrdimensionalen Aufgaben und quantitativen Fehlern zu beobachten. Der Beanspruchungsfaktor 'Information' hängt mit motivativen und dynamischen Aufgaben zusammen und führt teils zu qualitativen und teils zu quantitativen Fehlern. Beim Beanspruchungsfaktor 'Verarbeitung' treten dagegen fast ausschließlich qualitative Fehler auf und dies beim systemergonomischen Faktor der inneren Kompatibilität. Auch leisten hier Fehler in der Rückmeldung einen größeren Beitrag zur Fehlerentstehung als bei den beiden anderen kognitiv beanspruchenden

Faktoren. Bereits weiter oben wurde auch der Einflußfaktor 'Verwechslungsfreiheit' als Verarbeitungsfehler identifiziert und die Rolle der Kompatibilität und Rückmeldung für die Entstehung dieser Fehler diskutiert. Damit stehen qualitative Fehler, Verarbeitung und Kompatibilität eindeutig in Zusammenhang.

Tabelle 30 Zusammenhang von Systemergonomie und kognitiven Fehlern.

a) Korrelation der Rangfolge der Fehlerarten bei kognitiv belastenden und beanspruchenden MMS

	Kognitive Belastung	Kognitive Beanspruchung	Keine kognitive Belastung	Keine kognitive Beanspruchung
Kognitive Belastung	1			
Kognitive Beanspruchung	0,846955	1		
Keine kognitive Belastung	-0,77492	-0,70749	1	
Keine kognitive Beanspruchung	-0,71486	-0,48032	0,942643	1

b) Korrelation der Rangfolge kognitiv belastender und beanspruchender Einflußfaktoren

	Kognitive Belastung	Kognitive Beanspruchung	Keine kognitive Belastung	Keine kognitive Beanspruchung
Kognitive Belastung	1			
Kognitive Beanspruchung	1	1		
Keine kognitive Belastung	-0,08551	-0,08551	1	
Keine kognitive Beanspruchung	0,074177	0,074177	0,963328	1

Berücksichtigt man, daß die drei kognitiv beanspruchenden Faktoren in Kapitel 1 ausgehend von der Abweichung (mismatch) von gegebener und erwarteter Wahrnehmung und über das Ausmaß an bewußter Kontrolle definiert worden sind, so kann gefolgert werden, daß qualitative Fehler vornehmlich durch unbewußte Prozesse (fehlende Dissonanz) zustande kommen und quantitative eher durch Fehler in der bewußten Kontrolle. Diese Prozesse sind elementar, also beispielsweise nicht an die Verhaltensebenen nach Rasmussen (1986) oder an die Einteilung in intentionale und nicht-intentionale Fehler (Reason, 1990) gebunden. Dieses Ergebnis bestätigt indirekt auch die Diskussion zu Tabelle 6 in Kapitel 1. Insgesamt kann daraus gefolgert werden, daß die Art eines kognitiven Fehlers durch die folgenden beiden Prozesse erklärt werden kann:

Fehlende Dissonanz bei Abweichung der gegebenen von der erwarteten Wahrnehmung: Bereits zum Einflußfaktor Einfachheit wurde herausgestellt, daß Menschen versuchen, den Aufwand einer bewußten Informationsverarbeitung durch subliminare

Prozesse zu reduzieren. Subliminare Prozesse laufen solange fehlerfrei ab, bis sie auf Situationen angewendet werden, in denen kleinere Abweichungen vom gelernten Verhaltensmuster auftreten. Ferner können subliminar ablaufende Prozesse interferieren, was bei der Diskussion der Einflußfaktoren bereits als wesentlicher Auslöser für Verwechslungsfehler identifiziert worden ist. Diese Effekte bei unbewußten Vorgängen sind neurologisch durch die Synapsenmodifikationsregel nach Hebb (1949) erklärbar, da geübte Fertigkeiten stärkere Zellverbindungen darstellen und ohne bewußte Kontrolle die Aktivität den "leichteren Weg" über die stärkeren Verbindungen geht. Diese unbewußte Wahl der einfacheren Wege spielt bei den unterschiedlichsten Verhaltensweisen des Menschen eine Rolle; so bei Entscheidungsvorgängen (z.B. Verfügbarkeitsheuristiken) oder bei den Auswirkungen von Streß oder Zeitdruck (z.B. Regression auf geübtes Verhalten). Sie ist also nicht an den Inhalt der Verarbeitung oder an die Verarbeitungsstufen nach Rasmussen (1986) gebunden.

Fehlerhafte bewußte Kontrolle: Wie aus der Zuordnung der Einflußfaktoren in Bild 43 zu entnehmen ist, wird ein gewisses Ausmaß an Dissonanz benötigt, damit eine unbewußte Handlung einer bewußten Kontrolle zugänglich wird. Erlangt eine Abweichung des wahrgenommenen Zustandes vom gelernten Verhalten bewußte Kontrolle, so wird diese solange auf das entstandene Problem angewendet, bis wieder ein Zustand erreicht wird, bei dem das Wahrnehmungsmuster ohne bewußte Kontrolle bearbeitet werden kann. Aus diesem Grunde finden sich hier eher Zeitfehler (wie zu früh oder zu spät) und kaum Einstellungsfehler (wie zu viel oder zu wenig), da diese weniger auf kognitiven sondern auf motorischen Fertigkeiten beruhen. Die Rolle der Rückmeldung für diese Konsonanzbestrebungen wurde bereits des öfteren angesprochen. Sie ist ein wesentlicher Faktor für die Fehlerentstehung und -vermeidung, da eine Rückmeldung erst eine zeitliche Koordination und Kontrolle ermöglicht. Der gesamte Prozeß von der Abweichung der gegebenen zur erwarteten Wahrnehmung über die bewußte Kontrolle bis hin zu einem erneuten Zustand ohne bewußte Kontrolle nimmt damit einen hystereseförmigen Verlauf an (Bild 43).

5.2.7 Wirksamkeit von Optimierungsmaßnahmen

Die diskutierten Einflußfaktoren und deren Wirkungsmechanismen weisen auch darauf hin, welche Verbesserungsmaßnahmen bei einem aufgetretenen Fehler am wirksamsten sind. Um die Wirksamkeit bisheriger Optimierungsmaßnahmen einzuschätzen, können die gefundenen Einflußfaktoren mit den getroffenen Maßnahmen verglichen werden.

Die verschiedenen Komponenten innerhalb des MMS können dazu in insgesamt vier Bereiche eingeteilt werden: Person (MMS-Komponente Mensch), Technik (MMS-Komponente System und Systemausgang), Ergonomie (MMS-Komponenten Aufgabe, Tätigkeit, Rückmeldung und Umgebung) sowie Organisation (MMS-Komponenten Auftragserteilung und -erledigung). Neben den identifizierten Einflußfaktoren wurden in den Ereignisbeschreibungen teilweise auch getroffene Vorkehrungen genannt. Die Übereinstimmung zwischen den identifizierten Einflußfaktoren innerhalb der MMS-Komponenten und den tatsächlich getroffenen Maßnahmen zeigt, inwieweit sich Verbesserungsmaßnahmen auf die gefundenen Schwachstellen beziehen. Die Ergebnisse dazu werden in Bild 46 gezeigt.

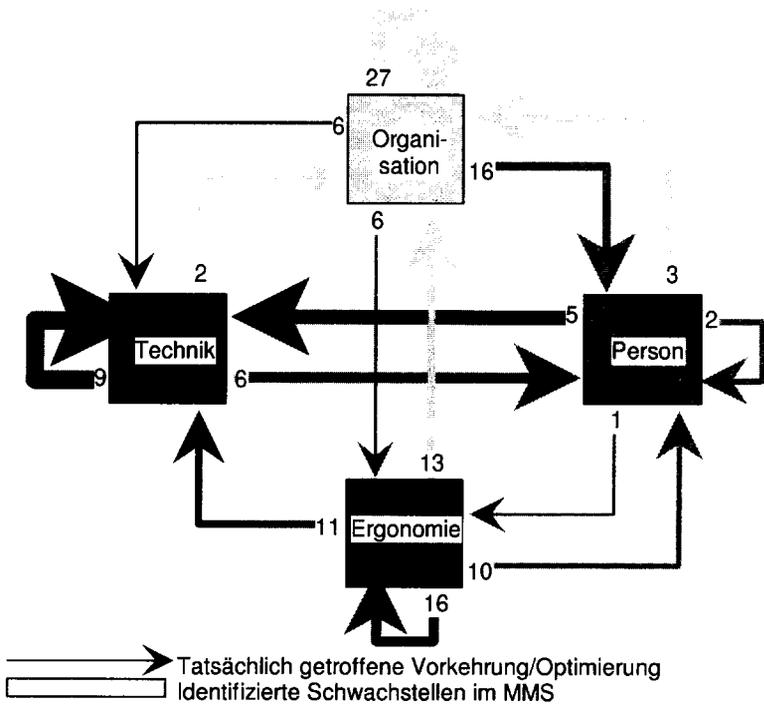


Bild 46 Identifizierte Schwachstellen und getroffene Vorkehrungen.

Das Bild ist ähnlich wie ein Wähler-Wanderungs-Diagramm zu lesen, welches aus der Wahlberichterstattung bekannt ist: Die Kästen repräsentieren die tatsächlich gefundenen Einflußfaktoren; die Pfeile zeigen auf die Bereiche, denen die getroffenen Maßnahmen zuzuordnen sind. Die Zahlen geben die absolute Häufigkeit der gefundenen

Maßnahmen an (z.B. wurde in 16 Ereignissen eine Schwachstelle im Bereich 'Organisation' gefunden und eine Vorkehrungsmaßnahme aus dem Bereich 'Person' getroffen). Die Dicke der Pfeile repräsentiert den relativen Anteil der Maßnahmen (z.B. die 16 Ereignisse bezogen auf alle 55 Schwachstellen im Bereich 'Organisation'). Innerhalb des Bildes repräsentieren die Pfeile auf 'Organisation' meist Maßnahmen bezüglich der Änderung bzw. Ergänzung von Anweisungen. Die Pfeile auf den Kasten 'Technik' repräsentieren überwiegend Verriegelungen oder Ertüchtigungen technischer Komponenten. Bezüglich der Person wurden Schulungen als Verbesserungsmaßnahme genannt, wobei selten spezifiziert wurde, was geschult wird. Wenn die Schulungsmaßnahme spezifiziert wurde, dann behandelte sie überwiegend den aufgetretenen Fehler. Die Pfeile auf 'Ergonomie' repräsentieren gestalterische Maßnahmen bezüglich Signalisierung und Anordnung bzw. Kennzeichnung von Bedienelementen.

Zwei Aspekte aus dem Bild sollen herausgehoben werden: Erstens ist aus dem Bild zu entnehmen, daß ein hoher Anteil der Maßnahmen auf den Kasten 'Person' gerichtet ist. Hieraus kann gefolgert werden, daß Schulungsmaßnahmen oft durchgeführt werden, obwohl die handelnde Person nicht die unmittelbare Bedingung war. Dementsprechend scheinen die in den beobachteten Ereignissen eingeleiteten Vorkehrungsmaßnahmen (Personalschulungen) nicht immer die optimal wirksamsten zu sein. Zweitens zeigt ein geringer Anteil von Maßnahmen auf den Kasten 'Ergonomie'; es gehen jedoch viele Anteile von ihm ab. Hieraus ergeben sich Hinweise, daß ergonomische Maßnahmen in den betrachteten Ereignissen nicht konsequent durchgeführt wurden, obwohl die Ergonomie (wie oben dargestellt) für die handelnde Person der bedeutendste Faktor zur Fehlervermeidung ist. Der Grund hierfür liegt sicherlich darin, daß die Wahl der besten Optimierungsmaßnahme immer ein Kompromiß zwischen dem Risikopotential des aufgetretenen Fehlers (seiner sicherheitstechnischen Bedeutung) sowie den Kosten und der Wirksamkeit der Verbesserungsmaßnahme ist.

Darum ist es für ein effizientes Fehlermanagement besonders bedeutsam, die wirksamsten Maßnahmen zu treffen. Insbesondere der Pfeil von der Person zur Technik weist bei den analysierten Ereignissen darauf hin, daß Fehlermanagement bisher gleichbedeutend damit ist, Einzelfehler zu vermeiden. Ist beispielsweise eine Vorkehrung gegen das versehentliche Offenlassen eines Ventils eine Verriegelung des Ventils mit Kette und Schloß, so wird genau dieser Fehler ausgeschlossen. Tritt ein - aus ergonomischer Sicht - ähnlich gelagerter Fehler auf, wie z.B. das Offenlassen eines elektrischen Schalters, wird wiederum genau der Fehler für die Zukunft ausgeschlossen. Derartiges Fehlermanagement sieht den menschlichen Fehler als Einzelfehler an.

Gerade aus ergonomischer Sicht sind aber das Offenlassen eines Ventils oder das Offenlassen eines elektrischen Schalters durchaus vergleichbar, da menschliche Fehlermechanismen unabhängig vom technischen System sind. Dies wurde bei der Diskussion der Fehlerarten und Einflußfaktoren deutlich. Ein menschlicher Fehler kann also aus ergonomischer Sicht nur in seltenen Fällen als echter Einzelfehler betrachtet werden. Aus diesem Grund ist ein übergreifendes, strategisches Fehlermanagement (total quality management) bezüglich ergonomischer Faktoren notwendig (vgl. SVA, 1992).

Da jeder Kasten im Bild auch die in den MMS-Komponenten gefundenen Einflußfaktoren repräsentiert, zeigt es ferner, daß das Fehlermanagement weiter verbessert werden kann, wenn die gefundenen Einflüsse zur Planung der Verbesserungsmaßnahme genutzt werden. Beispielsweise sind Schulungen nur dann angebracht, wenn tatsächlich unzureichendes Wissen (Einflußfaktor Information) gefunden wurde. Wie in der Diskussion der Wechselwirkungen der Einflußfaktoren bereits genannt, sind sie bei Gewohnheitsfehlern (Einflußfaktor Verarbeitung) weniger angebracht. Hier bieten sich eher ergonomische Maßnahmen an.

5.3 Häufigkeitsanalytische Vorhersagen aus der Betriebserfahrung

Neben den qualitativen Angaben zu Fehlermöglichkeiten und Einflußfaktoren auf die menschliche Zuverlässigkeit ist ein weiteres Ziel der Ereignisauswertung, quantitative Angaben zur menschlichen Zuverlässigkeit aus den untersuchten Ereignissen zu gewinnen. In Kapitel 2 wurde dazu u.a. dargestellt, welche Punkte innerhalb der HRA-Verfahren offen sind. Dies waren im wesentlichen die Validierung der Verteilungsannahmen sowie die Gültigkeit menschlicher Zuverlässigkeitskenngrößen, die in HRA-Verfahren zur Bewertung genutzt werden.

5.3.1 Verteilungsannahmen

Zwei zentrale Verteilungsannahmen werden in der menschlichen Zuverlässigkeit gemacht. Dies sind die logarithmische Normalverteilung (oder kurz Log-Normalverteilung) menschlicher Fehler im Verfahren THERP (siehe Swain & Guttmann, 1983) und der logarithmisch-lineare Zusammenhang von Zeit und Diagnoseerfolg in Verfahren mit Zeit-Zuverlässigkeits-Korrelation (siehe Hannaman & Spurgin, 1984a; Mosneron-Dupin et al., 1990). Zu beiden Verteilungsannahmen soll im folgenden geprüft werden, ob sie

mit der Betriebserfahrung verifiziert werden können. Abschließend wird eine aus beiden kombinierte Verteilungsannahme diskutiert.

- **Logarithmische Normalverteilung**

Die Annahme der logarithmischen Normalverteilung wird insbesondere im THERP Verfahren gemacht. Sie besagt, daß sich Fehlerwahrscheinlichkeiten nach der folgenden Dichtefunktion verteilen (vgl. Reer, 1988):

$$f(p) = \frac{e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln(p)-\mu}{\sigma}\right)^2}}{p\sigma\sqrt{2\pi}} = \frac{e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln(p)-\mu}{1,645}\right)^2}}{p\frac{\ln(EF)}{1,645}\sqrt{2\pi}} \quad (25)$$

mit:

p	Wahrscheinlichkeit
μ	Mittelwert der logarithmierten Wahrscheinlichkeit
σ	Streuung der logarithmierten Wahrscheinlichkeit
EF	Fehlerfaktor (error factor)

Inhaltlich besagt diese Formel, daß der Mensch in geübten Arbeitsumgebungen zum überwiegenden Teil einfache Aufgaben und Handlungen ausführt, da er aufgrund von Gewöhnungs- und Übungseffekten sowie Lernvorgängen die subjektiv empfundene Aufgabenkomplexität reduziert. Dementsprechend ist bei den einfachen Aufgaben und Handlungen eine entsprechend höhere Anzahl von Aufgaben und Handlungen und damit auch von Fehlern zu erwarten (vgl. Swain & Guttman, 1983; Kapitel 7). Dadurch sind auch die Fehlerwahrscheinlichkeiten gegenüber einer symmetrischen Verteilung nach links verschoben.

Ein Maß aus der Ereignisbeschreibung, welches dem Verteilungsparameter 'Geübtheit' bzw. subjektiv empfundener 'Aufgabenkomplexität' entspricht, ist die Anzahl der genutzten Sätze im Beschreibungsschema bezüglich der MMS-Komponenten Aufgabe, Tätigkeit, Rückmeldung, Auftragserteilung und Auftrags erledigung. Grund für diese Annahme ist, daß man davon ausgehen kann, daß der Beschreibungsaufwand in diesen Komponenten um so größer ist, je eher die Aufgabe in dem geschilderten Ereignis für die Operateure ungeübt ist. Diese Operationalisierung scheint plausibel, da die Ereignisbeschreibungen von Personen aus den Anlagen gemacht werden. Die Verfasser

der Ereignisbeschreibung sind also sowohl mit den Arbeitsabläufen und örtlichen Gegebenheiten vertraut als auch damit, ob sich die Ereignissituation für den Operateur als eine neuartige Arbeitssituation darstellt oder nicht. Hinweise auf solche Zusammenhänge zwischen Beschreibungsaufwand und mentalen Repräsentationen finden sich u.a. in Sträter (1994). Der Umfang des in den Ereignistexten enthaltenen Beschreibungsaufwandes spiegelt somit zu einem gewissen Grad auch die vom Verfasser der Ereignisbeschreibung subjektiv wahrgenommene Geübtheit der Situation und damit auch die subjektiv vom Operateur wahrgenommene Aufgabenkomplexität wider. Da die Ereignisbeschreibungen ferner unverändert übernommen und nur in mehrere einfache Sätze umgewandelt wurden, ist die vom Verfasser wahrgenommene Arbeitssituation durch die Ereignisanalyse nicht verändert worden.

Modelliert man unter dieser Hypothese die Annahme der logarithmischen Normalverteilung darüber, wieviele Sätze für die Ereignisbeschreibung bezogen auf die MMS-Komponenten Aufgabe, Tätigkeit, Rückmeldung, Auftragserteilung und -erledigung genutzt wurden, und zählt die Anzahl der Fehlerereignisse mit bestimmter Satzlänge aus, so erhält man eine Verteilung der Ereignisse bezogen auf die Anzahl der Sätze gemäß Bild 47. Dabei wurden Sätze, die Informationen zu schriftlichen Hilfsmitteln enthalten, nicht berücksichtigt, da schriftliche Hilfsmittel einen festgelegten Beschreibungsaufwand haben und nicht die subjektiv empfundene Komplexität des Ereignisses repräsentieren.

Innerhalb der Abbildung ist zusätzlich die erwartete Anzahl aller Sätze aufgetragen, welche die logarithmische Normalverteilung nach Gleichung 25 für 165 Ereignisse vorhersagen würde. Die Parameter der Verteilung wurden gemäß Reer (1988) bestimmt: Der Mittelwert beträgt $\mu = 2,35$, die Streuung $s = 0,50$. Sie entspricht damit in etwa derjenigen, die gemäß Swain und Guttman (1983) für Unsicherheiten von HEP-Werten festgelegt wurde ($s_{THERP} = 0,42$). Die Korrelation der theoretischen Verteilung mit der empirisch gefundenen beträgt $r = 0,87$.

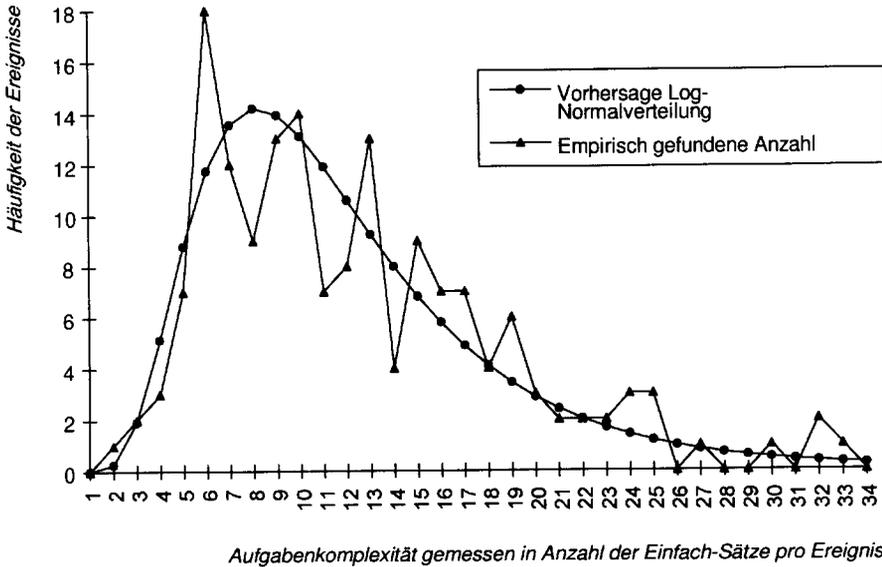


Bild 47 Logarithmische Normalverteilung durch Beschreibungsaufwand operationalisiert.

- **Zeit-Zuverlässigkeitsverteilung**

Verfahren, welche eine Zeit-Zuverlässigkeitsverteilung zur Bewertung der menschlichen Zuverlässigkeit nutzen, gehen davon aus, daß bei zunehmender zur Verfügung stehender Zeit die Wahrscheinlichkeit für einen menschlichen Fehler abnimmt. Ist dies der Fall, so müßte sich diese zentrale Annahme in den Häufigkeiten der beobachteten Ereignisse, bei denen eine Zeitangabe gemacht wurde, zeigen lassen.

Um diese Verteilungsannahme nachzuweisen, wurden im ersten Schritt alle Ereignisse bestimmt, bei welchen eine Zeitangabe als Diagnosezeit interpretiert werden konnte. Aus diesen wurden die Ereignisse bestimmt, bei denen nach der angegebenen Zeit ein menschlicher Fehler (Aufgaben- oder Ausführungsfehler) aufgetreten ist. Für die so gefundenen Ereignisse wurde eine Clusteranalyse der Zeitangaben durchgeführt und die Häufigkeiten der Fehler pro Cluster ausgezählt. Bild 48 zeigt das Ergebnis.

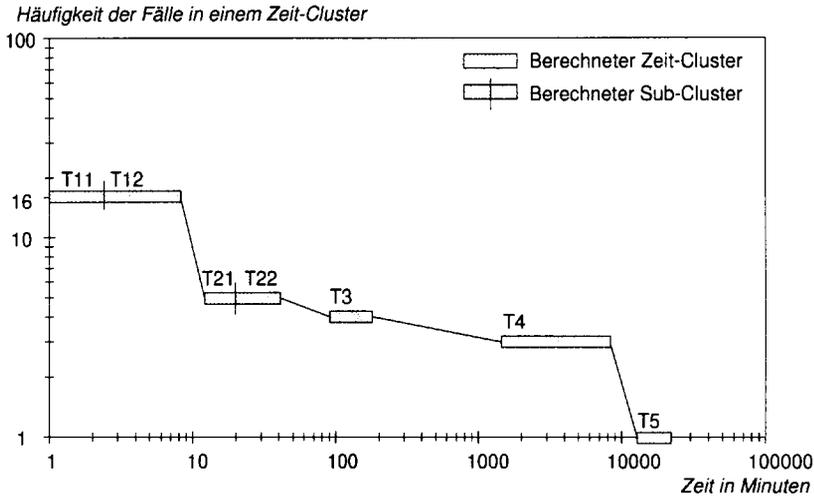


Bild 48 Logarithmisch-Linearer Zusammenhang zwischen Zeit und Zuverlässigkeit.

Die dazugehörigen Abfragen an die Datenbank sind in Anhang 6 dargestellt. Der monoton absteigende Kurvenverlauf in einem logarithmisch skalierten Koordinatensystem stimmt mit dem Kurvenverlauf des THERP- und des PHRA-Verfahrens überein (vgl. Kapitel 2 und Anhang 5). Damit kann davon ausgegangen werden, daß auch diese Verteilungsannahme innerhalb der beobachteten Ereignisse gilt.

- **Gemeinsame Betrachtung beider Verteilungen**

Zusammenfassend konnten durch die vorliegenden Daten aus der Betriebserfahrung beide Verteilungsannahmen bestätigt werden. Zusätzlich kann man mit dem vorliegenden Datensatz im weiteren auch bestimmen, inwieweit Angaben zur Aufgabenkomplexität und Zeitangaben zusammenhängen. Dazu wurden alle Ereignisse betrachtet, die in die Zeit-Zuverlässigkeitsverteilung eingegangen sind. Deren Aufgabenkomplexität wurde wiederum über die Anzahl der zur Beschreibung benötigten Sätze bestimmt. Bild 49 zeigt die Ergebnisse. Um einen vergleichbaren Maßstab zu erhalten, sind im Bild die relativen Anteile der Fehler, der Aufgabenkomplexität (gemessen in Anzahl der Sätze) und der Fehler bei gegebener Aufgabenkomplexität angegeben. Aus dem Bild ist eine weitestgehende Übereinstimmung des Verlaufs der Anzahl der gemachten Fehler und der beobachteten subjektiven Aufgabenkomplexität zu entnehmen. Demgegenüber wächst mit der Zeit die Anzahl der gemachten Fehler pro Satz. Hieraus kann folgendes gefolgert werden:

- Aus der Übereinstimmung des Verlaufs der Anzahl der gemachten Fehler und der beobachteten subjektiven Aufgabenkomplexität kann gefolgert werden, daß das Potential für einen Fehler eher durch die Komplexität der Aufgabe als durch die Zeit bestimmt zu sein scheint. Da in den meisten Ereignissen Zeit und Aufgabenkomplexität konfundiert sind (d.h., in Zeiträumen kurz nach einer Störung herrscht hohe Aufgabenkomplexität), sind Verfahren mit einem Zeitzuverlässigkeits-Ansatz (wie HCR oder PHRA) ausreichend, um eine einfache Bewertung einer Situation durchzuführen. Der gleichförmige, fast parallele Verlauf der Verteilung der Fehler und der Aufgabenkomplexität läßt jedoch zusätzlich den Schluß zu, daß die Aufgabenkomplexität die eigentlich bestimmende Größe für die menschliche Zuverlässigkeit ist und nicht die Zeit. Insgesamt gesehen kann daraus geschlossen werden, daß eine rein zeitbezogene Bewertung menschlicher Handlungen, wie sie im HCR-Verfahren durchgeführt wird, nicht ausreicht. Der hier gefundene Zusammenhang legt dagegen nahe, daß der Mensch fähig ist, nur eine bestimmte Anzahl von Aufgaben bei gegebener Aufgabenkomplexität zu bearbeiten.
- Die Anzahl der Fehler bei gegebener Aufgabenkomplexität (gemessen in Sätzen) steigt mit der verstrichenen Zeit. Dies legt den Schluß nahe, daß (1) nach langer Zeit eine beruhigte Situation vorliegt und (2) Fehler hier eher aus dem Grunde passieren, da die Störung unerwartet ist (wohingegen nach kurzer Zeit Fehler aufgrund hoher Aufgabenkomplexität passieren). Der Übergang zwischen beiden Zuständen scheint bei dem Schnittpunkt der beiden gegenläufigen Wirkungen (bei ca. 90 Minuten) zu liegen. Damit zeigt sich auch in dieser Verteilung, was bereits bei den kognitiven Fehlern diskutiert wurde: Diagnose ist durch zwei Faktoren gekennzeichnet, die bereits als kognitive Faktoren diskutiert wurden: Kontrolle über die Komplexität der Situation und Dissonanz bezüglich des Handlungsbedarfs. Untersucht man die Art der Fehler, die bei den beiden Faktoren zu beobachten sind, so bestätigt sich auch hier die bei der Untersuchung der kognitiven Fehler aufgestellte Hypothese: Fehler nach langer Zeit (also bei fehlender Dissonanz) sind eher qualitativer Art und nach kurzer Zeit (also bewußter Kontrolle) eher zeitlicher Art.

Indirekt wird durch den gleichförmigen Verlauf von Fehlern mit der Aufgabenkomplexität auch das in der Ergonomie übliche Belastungs-/ Beanspruchungsmodell bestätigt, welches eine weitestgehende Abhängigkeit zwischen menschlicher Beanspruchung (hier gemessen über die Fehler) und der Belastung (hier gemessen über die Aufgabenkomplexität) annimmt. Diese Hypothese muß sicherlich durch weitere, detailliertere Auswertungen von Ereignissen, Simulatorexperimenten und Grundlagenexperimenten

untersucht werden. Ansätze für ihre Bedeutung in der Bewertung der menschlichen Zuverlässigkeit finden sich aber z.B. auch in den Experimenten des Halden Reactor Project (Kaarstad et al., 1995; Kirwan, 1994; Thelwell, 1994).

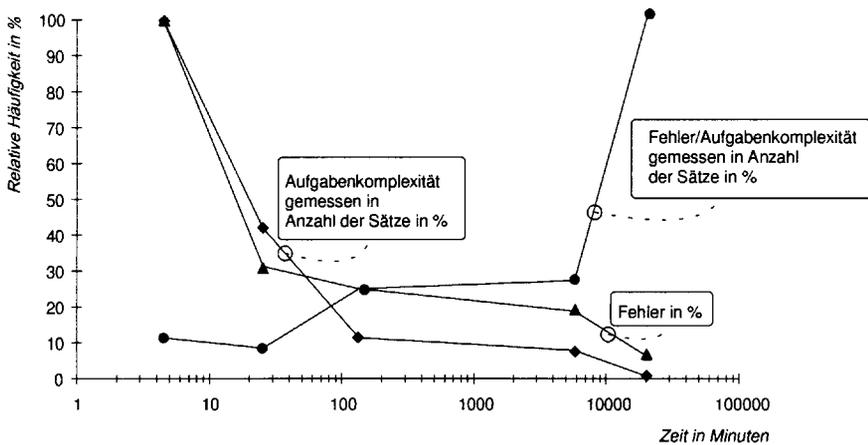


Bild 49 Zusammenhang zwischen Fehlern und Aufgabenkomplexität.

Eine an der Aufgabenkomplexität orientierte Bewertung menschlicher Zuverlässigkeit ist auch aus dem Grunde diskussionswürdig, da sie Vorteile gegenüber einer zeitabhängigen Verteilungsannahme besitzt. Denn ein Nachteil zeitabhängiger Modelle ist, daß der Diagnoseerfolg vorwiegend auf die zur Verfügung stehende Zeit reduziert wird. Kognitive Prozesse des Menschen während der Diagnosezeit oder die Komplexität der Situation werden nicht oder nur unzureichend abgebildet (im HCR-Verfahren z.B. nur über die Verhaltensebenen und Zeitstreckung). Diese reduzierte Annahme ist in der Psychologie und der Forschung zur menschlichen Zuverlässigkeit stark umstritten. Hier könnte eine an der Aufgabenkomplexität orientierte Verteilungsannahme eine Alternative für die Bewertung der menschlichen Zuverlässigkeit, insbesondere bei kognitiven Prozessen, sein. Dabei ist jedoch zu beachten, daß der Parameter Aufgabenkomplexität nicht über einfache objektive Maße (z.B. Anzahl der Handlungen) gewonnen werden kann. Aufgabenkomplexität ist vielmehr eine subjektiv empfundene Größe der kognitiven Beanspruchung des Menschen, hinter der sich vielfältige Erfahrungen und Gewohnheiten verbergen. Welche objektiven Faktoren diese kognitiven Beanspruchung beeinflussen, wurde bereits im Zusammenhang mit der Systemergonomie diskutiert (Abschnitt 5.2.6). Die Systemergonomie stellt also einen Ausgangspunkt für eine an der Aufgabenkomplexität orientierte Bewertung menschlicher Zuverlässigkeit dar.

5.3.2 Quantitative Vorhersagen aus der Betriebserfahrung

Der vorhergehende Abschnitt zeigte, daß mit dem Auswertungsmodell zentrale Verteilungsannahmen bestätigt werden konnten. Daran schließt sich die Frage an, ob auch quantitative Angaben aus den Ereignissen gewonnen werden können, die geeignet sind, die Zuverlässigkeitskenngößen zu überprüfen, die in verschiedenen HRA-Verfahren zur menschlichen Zuverlässigkeit verwendet werden. Dazu sollen die Angaben aus der Betriebserfahrung mit folgenden Angaben verglichen werden: Mit den Angaben aus dem Katalog von Swain und Guttman (1983), die im folgenden als THERP-Angaben bezeichnet werden, und mit den Angaben des PHRA-Verfahrens, welche auf den französischen Simulatorstudien basieren (Mosneron-Dupin, 1993).

Bevor dieser Vergleich durchgeführt wird, muß jedoch geklärt werden, warum beobachtete Häufigkeiten aus der Betriebserfahrung überhaupt mit Wahrscheinlichkeiten verglichen werden dürfen, denn die HEP (Human Error Probabilities) der HRA-Verfahren erheben den Anspruch, echte Wahrscheinlichkeiten gemäß der Definition in Gleichung 2 (Kapitel 2) zu sein.

Versucht man dagegen Zuverlässigkeitskenngößen aus der Betriebserfahrung zu ermitteln, so muß man feststellen, daß ein Verfahren, welches auf der Auswertung von Betriebserfahrung beruht, grundsätzlich und auf keinem Fall die erforderlichen Angaben zur Berechnung der Fehlerwahrscheinlichkeiten im Sinne der HEP-Definition (Gleichung 2) bereitstellen kann, da in der Betriebserfahrung hauptsächlich nur Fehlhandlungen erfaßt werden. Fehlerfreie Handlungen oder fehlerhafte Handlungen unterhalb einer gewissen Erkenntnisschwelle (z.B. Meldeschwelle an die Behörde oder die Verwaltung des Kraftwerkes bzw. fehlerhafte Handlungen, die von der Person selbst entdeckt und wieder rückgängig gemacht worden sind und somit keinerlei Auswirkungen auf die Anlage hatten) können zwar zufälligerweise in der Betriebserfahrung enthalten sein bzw. gemeldet werden, sie werden aber auf keinen Fall vollständig erfaßt. Dieser Umstand führt zu einem allgemeinen Problem, HEPs aus der Betriebserfahrung zu ermitteln, denn aus der Betriebserfahrung können nur bedingte Häufigkeiten der Form

$$h(\text{Fehlhandlung vom Typ } i | \text{ Ereignis oberhalb einer bestimmten Meldeschwelle}) \quad (26)$$

bestimmt werden. Dies ist ein prinzipieller Nachteil aller Methoden zur Erfassung von Betriebserfahrung und unabhängig davon, durch wen oder wie die Ereignisse erfaßt werden. Gemäß der bereits in Kapitel 2 vorgestellten Definition der HEP muß die

Grundgesamtheit, also die tatsächliche Anzahl der Handlungen vom Typ i , bekannt sein. Aus der Betriebserfahrung kann jedoch nur die Anzahl der Fehler bei Handlungen vom Typ i bestimmt werden und dies auch nur oberhalb einer bestimmten Meldeschwelle. Damit ist ein Vergleich von Angaben aus der Betriebserfahrung mit HEP-Werten nur dann zulässig, wenn gezeigt werden kann, daß (1) die Anzahl der Anforderungen in den gesammelten Ereignissen denjenigen der HEP-Werte entspricht, oder (2) gezeigt werden kann, daß die Angaben aus Swain und Guttman (1983) oder aus den französischen Simulatorstudien ebenfalls keine 'echten' Wahrscheinlichkeiten im Sinne von HEP nach Gleichung 2 sind sondern im Prinzip dieselbe statistische Information beinhalten, die auch aus der Betriebserfahrung gewonnen werden kann. Bezüglich dieser Bedingungen sprechen die folgenden Gründe dafür, daß ein Vergleich der Häufigkeiten der Ereignisse mit den Wahrscheinlichkeiten des THERP-Verfahrens möglich ist:

ad 1: Swain und Guttman (1983, p2-11) geben nur Werte für regelbasiertes Verhalten an. Dies wird insbesondere durch die Annahme der logarithmischen Normalverteilung deutlich: Da innerhalb eines technischen System durch Ausbildung und Training davon ausgegangen werden kann, daß sich die Operateure gut mit ihren Aufgaben auskennen, geht das THERP-Verfahren davon aus, daß die Zuverlässigkeitskenngößen logarithmisch-normalverteilt sind. Durch diese Verteilungsannahme ist die zu erwartende Verhaltensebene, die eine Person im statistischen Mittel einnimmt, vorweggenommen: THERP bezieht sich hauptsächlich auf regelbasiertes Verhalten (der Median der HEP-Werte liegt im Bereich regelbasiertes Verhalten).

Da sich das THERP-Verfahren auf regelbasierte Handlungen beschränkt, beziehen sich die HEP-Werte in irgendeiner Form auf das routinemäßige Verhalten des Personals. Demzufolge kann angenommen werden, daß sich für alle Handlungen etwa gleiche Grundgesamtheiten für die Anzahl der Anforderungen ergeben müßten, da (wie bereits in Kapitel 1 diskutiert) regelbasiertes Verhalten nicht damit verbunden ist, daß der Operateur eine Vorschrift in Form einer geregelten Prozedur zur Verfügung hat, sondern damit, wie sehr er mit der Situation vertraut ist, wie oft er also eine Handlung vom Typ i durchführt (frequency of use).

Da weiterhin die Annahme der logarithmischen Normalverteilung auch in der Betriebserfahrung mit nahezu gleicher Streuung gefunden wurde, wie sie im THERP-Verfahren zugrunde gelegt wurde, kann man darauf schließen, daß in den analysierten Ereignissen ähnliche Grundgesamtheiten gefunden werden

können. Auftrittsorientierte Häufigkeiten können mit den HEP-Werten aus THERP verglichen werden. Die Grundgesamtheiten der HEP-Werte und Beobachtungshäufigkeiten müssen sich entsprechen, weil sich die Fertigniveaus entsprechen. Damit ist eine Vergleichbarkeit der Anzahl der Anforderungen gegeben, wenn auch die absolute Anzahl der Grundgesamtheit unbekannt ist.

ad 2: HEP-Werte für Fehler in der Diagnose werden nicht über die Anzahl der Fehler bezogen auf Anforderungen von Diagnosen bestimmt, sondern es wird dort eine relative Häufigkeit der Teams ermittelt, die eine erfolgreiche Diagnose durchgeführt haben. Dies gilt für die experimentell gewonnenen Angaben im französischen PHRA-Verfahren. Demzufolge stellt die Betriebserfahrung im Prinzip z.B. gegenüber den Daten des PHRA-Verfahrens vergleichbare statistische Information bereit: Anzahl der Beobachtungen mit erfolglosen Diagnosen zu Anzahl der Beobachtungen mit Diagnosen.

Die HEP-Werte von Swain und Guttman (1983) sind zum Teil auch über Schätzprozesse gewonnen worden, die auf Beobachtungen (und damit Häufigkeiten) zurückgehen. Auch sie sind also ohne genaue Kenntnis über die Anzahl der Anforderungen gewonnen worden. Dies räumt Swain (1992) selbst ein. Damit sind die Schätzgrundlagen des THERP-Verfahrens mit den Angaben, die aus der Betriebserfahrung gewonnen werden können, vergleichbar.

Damit kann insgesamt aus den Überlegungen gefolgert werden, daß es gerechtfertigt ist, die in der Betriebserfahrung beobachteten Häufigkeiten mit den HEP-Werten aus der Literatur zu vergleichen.

- **Vergleich der Angaben zur menschlichen Zuverlässigkeit**

Als Referenzquellen können eine Reihe von Datenquellen genutzt werden. Der Vergleich wird hier mit den aus der Literatur bekannten Angaben zu HEP's durchgeführt, die in den Verfahren THERP und PHRA genutzt werden. Die einzelnen HEP-Werte des THERP-Verfahrens sind in Anhang 5 zusammengefaßt. Die Angaben des PHRA-Verfahrens wurden bereits in Kapitel 2 dargestellt. Weitere Quellen (z.B. die Datenbank NUCLARR) wurden nicht betrachtet, da diese Angaben sehr heterogen sind und somit die oben aufgestellten Bedingungen für die Vergleichbarkeit mit den Häufigkeiten aus der Betriebserfahrung nicht gegeben sind. Auch aus der Literatur zugängliche Expertenschätzungen wurden ausgespart, da diese meist nur für einen spezifischen si-

tuativen Kontext gültig sind und (wie bereits in Kapitel 2 diskutiert) zu einem nicht bekannten Ausmaß mit Unsicherheiten behaftet sind.

Mit Hilfe des Auswertungsmodells wurden dann Häufigkeiten für diese Anfragen bestimmt. Das allgemeine Prozedere bei der Umsetzung der THERP-Items in eine situationsbezogene Anfrage ist in Swain und Guttman (1983) vorgegeben. Im wesentlichen wird dort zwischen Angaben für Aufgabenfehler (omission) und Ausführungsfehler (commission) sowie für systemergonomische (Wahrnehmung, Bedienung, Rückmeldung) oder administrative (organisatorische) Fehlermöglichkeiten unterschiedenen, die zusätzlich mit unterschiedlichen PSF gewichtet werden können (Anhang 5). Damit entsprechen die einzelnen Tabellen des THERP-Katalogs weitestgehend den Komponenten des MMS. Eine Umsetzung der Items des THERP-Katalogs kann also dadurch geschehen, daß Fehlerhäufigkeiten bezogen auf die entsprechenden MMS-Komponenten bestimmt werden. Zu jedem Item des THERP Verfahrens wurden entsprechende Situationen definiert und als Anfrage an die Datenbank formuliert.

- **Bestimmung absoluter Häufigkeiten**

Insgesamt wurden für 79 Items des THERP-Verfahrens Fehlerhäufigkeiten bestimmt. Anhang 6 stellt die Anfragen an die Datenbank zusammen. Bei der Erstellung der Anfragen wurden diese so formuliert, daß sie den Situationen entsprechen, die dem THERP-Katalog zugrunde liegen. Dies gelingt bei einigen Items gut, bei anderen weniger. Einige Beispiele der Umsetzung und eine Begründung, warum die situative Anfrage den Items des THERP-Katalogs entspricht, sind in Tabelle 31 dargestellt.

Wesentliche Schwierigkeiten liegen darin, die recht abstrakten Aussagen innerhalb des THERP-Katalogs in situationsspezifische Aussagen umzuwandeln. Beispielsweise ist die THERP-Tabelle 20-02 'Fehler bei einem kritischen Schritt innerhalb einer regelbasierten Handlung von Wartenpersonal nach Diagnose' mit mehreren unsicheren Begriffen behaftet, bei denen zum Teil erheblicher Interpretationsspielraum herrscht (u.a. 'kritisch' oder 'regelbasiert'). In solchen Fällen wurden die situativen Anfragen aufgrund von Einschätzungen umgesetzt. Besonders problematisch war die Umsetzung bei Items, in denen weder die Fehlerart noch die Bedingungen bzw. Einflußfaktoren, unter denen die HEP-Werte gemacht wurden, genau spezifiziert sind bzw. nicht eindeutig mit den in der Betriebserfahrung gefundenen übereinstimmen. Eine weitere Schwierigkeit lag darin, für einige Items situative Anfragen zu finden, für die in den Ereignisbe-

schreibungen nur unzureichende Informationen vorliegen. Zu solchen unklaren Tabellen gehören insbesondere die THERP-Tabellen 20-9, 20-10, 20-12 und 20-13.

Tabelle 31 Beispiele für die Modellierung der THERP-Items als situative Anfragemuster an die Datenbank.

<i>THERP-Item</i>	<i>Situative Anfrage</i>	<i>Beschreibung</i>
Item 20-02 (3): Fehler bei einer regelbasierten Handlung ohne Anweisung	UND Aufgabe.Angabe=[Fehler] ODER Person.Angabe=[Fehler] ODER Tätigkeit.Angabe=[Fehler] UND NICHT Auftragserteilung.Objekt=Anweisung	THERP beschreibt Fehler bezüglich der Durchführung von Aufgabenschritten, darum werden keine Kommunikationsfehler betrachtet. Der Fakt 'Regelbasierte Handlung' wurde nicht berücksichtigt, da durch die Verifikation der logarithmischen Normalverteilung bereits bestätigt wurde, daß in den Ereignissen hauptsächlich regelbasiertes Verhalten zu beobachten ist.
Item 20-5 (1): Unterlassen eines Prozedurschrittes	UND Aufgabe.Angabe=unterlassen UND NICHT Tätigkeit.Angabe=falsch UND Auftragserteilung.Objekt=Anweisung	Der Begriff Anweisung wird in der Ereignisbeschreibung als Synonym für Prozedur verwendet. Durch den Zusatz "UND NICHT ..." werden bei dieser Anfrage Verwechslungsfehler nicht berücksichtigt.
Item 20-3 (2): Falsche Diagnose innerhalb der ersten 10 Minuten	UND Aufgabe.Angabe=unterlassen ODER Person.Angabe=[Fehler] ODER Tätigkeit.Angabe=[Fehler] UND Situation.Zeitangabe=[alle Zeiten <10 Minuten]	Gesucht werden alle Fehler, bei denen eine Zeitangabe gemacht wurde. Eine falsche Diagnose ist innerhalb der Ereignisbeschreibungen nur durch Aufgabenfehler und Ausführungsfehler zu beobachten. Die Diagnose beinhaltet damit bei einigen Ereignissen zu einem unbekanntem Anteil auch die Zeit der Handlungsausführung.

Bild 50 zeigt die beobachteten absoluten Häufigkeiten in Bezug zu den HEP-Werten des THERP-Katalogs. Die Korrelation liegt mit $r=33\%$ nicht hoch, so daß nicht auf einen direkten Zusammenhang von beobachteten absoluten Häufigkeiten und den Angaben aus dem THERP-Katalog geschlossen werden kann.

Da bekannt ist, daß absolute Häufigkeiten (also eine konstante Grundgesamtheit für alle Items) den schlechtesten Schätzwert für eine Wahrscheinlichkeit liefern, war dieses Ergebnis zu erwarten. Ein besserer Schätzwert kann über relative Häufigkeiten gewonnen werden. Sie liefern bei genügend großem Beobachtungsumfang einen echten Schätzwert für eine Wahrscheinlichkeit. Im darauffolgenden Abschnitt werden demzufolge relative Häufigkeiten gebildet und mit den Angaben des Auswertungsmodells verglichen.

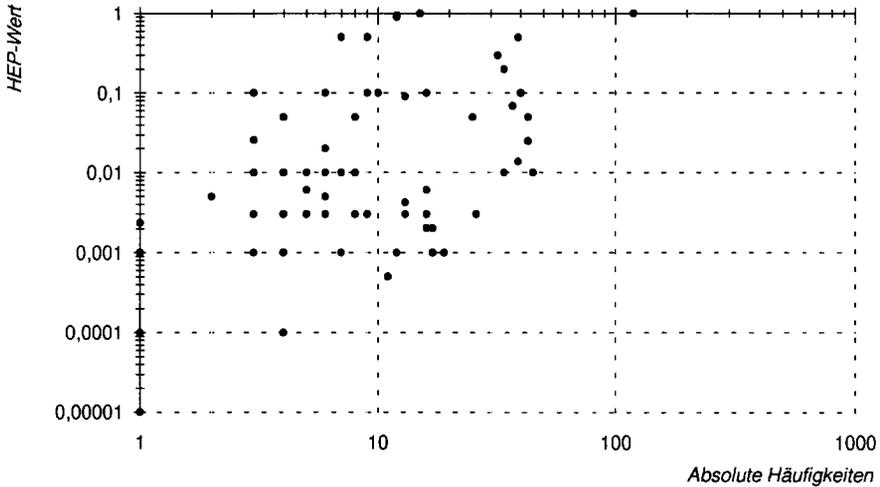


Bild 50 Verteilung der absoluten Beobachtungshäufigkeiten im Vergleich zu den HEP-Werten aus dem THERP-Katalog.

- **Bestimmung relativer Häufigkeiten**

Zur Bildung relativer Häufigkeiten wurden entsprechende Bezugsgrößen für die gefundenen Fehlerhäufigkeiten definiert. Im Anhang 6 sind diese in einer Kommentar-Spalte zu den Items des THERP-Katalogs vermerkt und die entsprechenden Anfragen an die Datenbank dargestellt. Unmittelbar einsichtig wird das Vorgehen mit den Bezugsgrößen, wenn man sich die Bestimmung von relativen Häufigkeiten für Zeit-Zuverlässigkeitsangaben verdeutlicht:

Insgesamt wurden $n=32$ Ereignisse beobachtet, bei denen überhaupt eine Zeitangabe in Form einer zeitlich abhängigen Zuverlässigkeit interpretiert werden konnte. Damit muß die relative Häufigkeit für einen Fehler in der Zeit t unter der Bedingung, daß eine Zeitangabe bei einem Ereignis gemacht wurde, auf diese Zahl bezogen werden und nicht auf die gesamte Anzahl aller Ereignisse. Um aus der relativen Häufigkeit ein Maß zu erhalten, welches sich auf $m=165$ Ereignisse bezieht, kann die erwartete Häufigkeit für einen Fehler vom Typ i in $m=165$ Ereignissen vom Typ i durch den Faktor $k=m/n=165/32$ hochgerechnet werden. Allgemein kann eine beobachtete Häufigkeit n_i für einen Fehler vom Typ i auf eine erwartete Häufigkeit n'_i in $m=165$ Ereignissen vom Typ i nach folgender Formel bestimmt werden:

$$n'_i = k_i * n_i = \frac{m}{m_i} * n_i \quad (27)$$

mit:

n'_i Hochgerechnete erwartete Häufigkeit für Mißerfolge bei Bedingung i in m Ereignissen

k_i Multiplikationsfaktor bei Bedingung i

n_i Absolute Anzahl der beobachteten Mißerfolge bei Bedingung i in den Ereignissen

m Anzahl aller Ereignisse

m_i Anzahl aller Ereignisse mit Bedingung i

In Anhang 6 sind die beobachteten absoluten Fehlerhäufigkeiten bei Bedingung i und die Multiplikationsfaktoren k_i zu jedem Item angegeben. Zu den 79 Angaben aus dem THERP-Katalog wurden so die in Bild 51 gezeigten Ergebnisse erzielt.

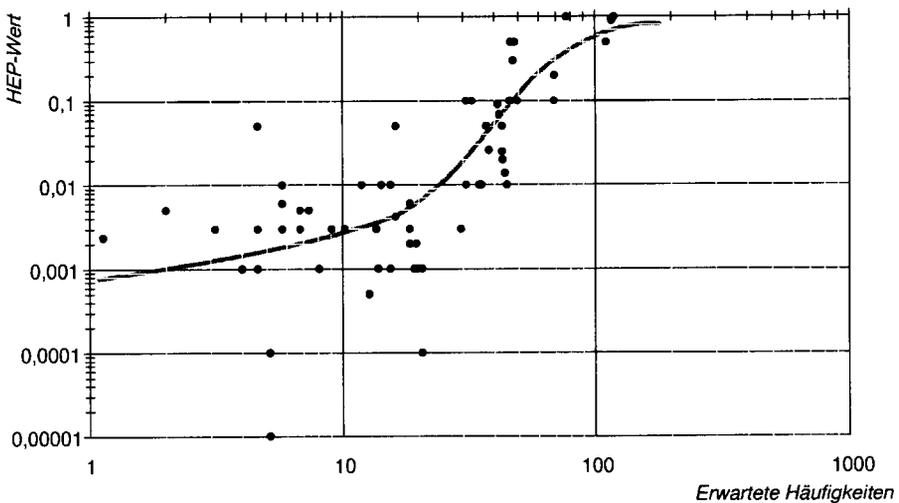


Bild 51 Erwartete Häufigkeiten gegenüber HEP-Werten von THERP.

Die Korrelation der relativen bzw. erwarteten Häufigkeiten zu den HEP-Werten des THERP-Katalogs liegt bei $r=0,83$ und ist deutlich höher als die der absoluten Häufigkeiten zu den THERP-Angaben. Damit kann gefolgert werden, daß die Daten des THERP-Katalogs in der Betriebserfahrung wiedergefunden werden können.

Beabsichtigt man darüber hinaus eine numerische Angleichung der beobachteten relativen Häufigkeiten an die THERP-Daten, kommen folgende Möglichkeiten in Frage:

1. Bestimmen einer Ausfallrate aufgrund des bekannten Beobachtungszeitraumes
2. Abschätzen des Wertes für die Grundgesamtheit Ω
3. Kalibrierung der relativen Häufigkeiten

Eine Abschätzung auf der Basis einer Ausfallrate λ (Bezugsgröße wäre hier die Zeit) kommt nicht in Frage, da eine Ausfallrate nicht mit den HEP-Werten des THERP-Katalogs vergleichbar wäre und ein Verteilungsmodell zur Berechnung der Wahrscheinlichkeit angenommen werden müßte. Auch ein Abschätzen des Wertes für Ω erscheint nicht sinnvoll, da hierdurch Unsicherheiten über den Schätzprozeß eingetragen werden, durch welche die Unsicherheit in den Beobachtungen weiter verstärkt wird. Somit erscheint der im folgenden gewählte Weg, eine Kalibrierung der relativen Häufigkeiten vorzunehmen, der geeignetste, um eine Vergleichbarkeit herzustellen und den Eintrag zusätzlicher Unsicherheiten zu vermeiden.

Zur Kalibrierung kommen verschiedene funktionale Zusammenhänge in Frage. Die einfachsten sind lineare, exponentielle oder quadratische Anpassungen. Ferner kommt eine probabilistische Funktion in Frage, wie die Verteilung der Punkte in Bild 51 nahelegt. Zur Verdeutlichung dieser Annahme ist im Bild zusätzlich ein mit einer grauen Linie unterlegter ogivenförmiger Kurvenverlauf zu erkennen. Er ist durch eine Sättigung in den oberen und unteren Bereichen der x-Achse charakterisiert und weist auf einen probabilistischen Zusammenhang hin.

Im Vorgriff auf den nächsten Abschnitt soll erwähnt werden, daß das im folgenden beschriebene probabilistische Modell gegenüber linearen, exponentiellen oder quadratischen Anpassungen nicht allein der inhaltlich am schlüssigsten begründete Ansatz für eine Kalibrierung ist; er erzielt auch die beste numerische Übereinstimmung der Angaben aus der Betriebserfahrung mit den THERP-Angaben. Tabelle 32 stellt die verschiedenen Ansätze gegenüber; Bedingung für die Bestimmung der Parameter in den Formeln war, daß der Wertebereich der möglichen Fehleranzahl ($0 \leq n_i \leq 165$) auf den Wertebereich von Wahrscheinlichkeiten ($0 \leq p_i \leq 1$) abgebildet wird.

Tabelle 32 Verschiedene Ansätze zur Kalibrierung.

Ansatz	Formel	Treffer in % = Numerische Übereinstimmung innerhalb der Unsicherheitsbänder von THERP
Linear	$p_i = \frac{1}{165} * n'_i$	34%
Exponentiell	$p_i = e^{\frac{\ln(2)}{165} * n'_i} - 1$	39%
Quadratisch	$p_i = \frac{1}{165^2} * n'_i{}^2$	56%
Probabilistisches Modell nach Rasch	(im folgenden Abschnitt beschrieben)	75%

Diese Gegenüberstellung legt nahe, den gefundenen Zusammenhang mit Hilfe eines probabilistischen Modells weiter zu untersuchen und zu kalibrieren, um dadurch neben dem korrelativen Zusammenhang auch eine optimale numerische Übereinstimmung zu erzielen. Wie probabilistische Modelle vorgehen und wie diese genutzt werden können, um Schätzwerte für Zuverlässigkeitskenngrößen zu ermitteln, wird im folgenden Abschnitt behandelt.

5.4 Schätzwerte für Zuverlässigkeitskenngrößen aus der Betriebserfahrung mit Hilfe eines probabilistischen Modells

Um die relativen Häufigkeiten zu kalibrieren, bietet sich das aus der psychologischen Testtheorie bekannte Modell von Rasch (1960) an. Anwendungen des Modells von Rasch finden sich u.a. bei Wakenhut (1974) bezüglich der Messung gesellschaftspolitischer Einstellungen oder bei Köller et al. (1994) bezüglich der Auswertung von Intelligenztests bekannt. Beschreibungen finden sich u.a. in Fischer (1974), Rost und Spada (1978) oder Wright und Stone (1979). Das Modell wird zunächst vorgestellt und darauf für einen detaillierten Vergleich der Betriebserfahrung mit den Angaben des THERP-Katalogs genutzt. Abschließend wird die grundsätzliche Bedeutung dieser Vorgehensweise diskutiert (vgl. hierzu auch Diskussionen zur psychologischen Skalierung in Reer, 1993; p128 ff und Reer et al., 1996; p58 ff).

5.4.1 Das Modell von Rasch

Ausgangspunkt des Modells ist die **psychologische Testtheorie**. Allgemein versuchen Verfahren der psychologischen Testtheorie, auch als Skalierungsverfahren bezeichnet, das Antwortverhalten unterschiedlicher Personen auf einer gemeinsamen Dimension abzubilden. Anwendung finden diese Verfahren hauptsächlich in der Intelligenzforschung oder der psychologischen Einstellungsforschung (Zusammenfassungen u.a. in van der Ven, 1980). Das Hauptmerkmal der Testtheorie ist die Darstellung der Beziehung zwischen den wahren Werten oder auch Personeneigenschaften (latent traits, wörtlich: verborgenen Eigenschaften) und den konkret beobachtbaren, manifesten Verhaltensweisen, wie z.B. der Anzahl gelöster Aufgaben in einem Intelligenztest. Dabei wird die mathematische Relation zwischen Parametern und Variablen als syntaktischer Bereich und die Beziehung zwischen der mathematischen Größe (dem Testwert) und dem psychologischen Konstrukt als semantischer Bereich bezeichnet.

Bezüglich des Zusammenhangs beider Bereiche setzt die **klassische Testtheorie** die Definition und Existenz der zu messenden Eigenschaft einfach voraus, d.h. es fehlt gerade die Theorie, die den Zusammenhang der zu messenden Eigenschaft mit den beobachteten Variablen definiert. Daraus folgt der in der klassischen Testtheorie übliche Ansatz, daß die beobachtete Testleistung X gleich dem wahren Wert der Personeneigenschaft T und einem Fehler E ist: $X=T+E$. Dies setzt voraus, daß eine Personeneigenschaft aus einem Test statistisch relativ eindeutig geschätzt werden kann. Wegen dieses deterministischen Charakters können in der klassischen Testtheorie Unsicherheiten in den Aussagen vor allem nur durch hinreichende Stichprobenumfänge sowie Reliabilitäts- und Validitätsbetrachtungen eingeschätzt werden. Die klassische Testtheorie macht keine Aussagen über die Unsicherheiten, die in der Messung selbst liegen.

Das Modell von Rasch und die daraus begründete **probabilistische Testtheorie** versucht die bereits in den Messungen liegenden statistischen Unsicherheiten zu berücksichtigen. Dazu geht das Modell von Rasch von der Annahme aus, daß eine latente Eigenschaft (z.B. Intelligenz) mit einem manifesten Verhalten (z.B. Testwerte) in einem wahrscheinlichkeitsfunktionalen Zusammenhang steht, d.h. der gemessene Wert wird lediglich als Indikator einer latenten Eigenschaft bzw. Dimension betrachtet: $X=f(T)$. Die latente Eigenschaft als Ganze kann nicht direkt gemessen werden, sondern immer nur Verhaltensausschnitte (Indikatoren) derselben. Die Konsequenz dieser Annahme ist, daß in der probabilistischen Testtheorie Aussagen über die Auftretenswahrschein-

lichkeiten von latenten Eigenschaften getroffen werden und nicht über die latenten Eigenschaften an sich.

- **Anwendung des Rasch-Modells**

Ausgehend von der probabilistischen Idee macht das Rasch-Modell die in Tabelle 33 zusammengefaßten Annahmen.

Tabelle 33 Annahmen des Rasch-Modells.

I) Wechselseitige Unabhängigkeit <ul style="list-style-type: none">• Dichotome Ereignisse• Lokale stochastische Unabhängigkeit der Personenparameter (Fähigkeit)• Spezifische Objektivität der Itemparameter (Schwierigkeit)
II) Die probabilistische Testtheorie <ul style="list-style-type: none">• Trennung der latenten Dimension und der beobachtbaren Variablen (Indikatoren)• Eindimensionalität (eine latente Dimension liegt allen Items zugrunde)• Erschöpfende Statistik
III) Die Item Characteristic Curve <ul style="list-style-type: none">• Monotonie• Asymptotische Annäherung• Homogenität• Intervallskalierung

Diese Annahmen bzw. Anwendungsvoraussetzungen für das Modell von Rasch können auch zur Begründung herangezogen werden, warum das Modell für die Bestimmung von Wahrscheinlichkeiten aus der Betriebserfahrung besser geeignet ist als eine an der klassischen Testtheorie orientierte Wahrscheinlichkeitsschätzung, wie z.B. die anderen in Tabelle 32 genannten Lösungen. Demzufolge sollen sie zunächst beschrieben werden.

- **Wechselseitige Unabhängigkeit**

Als Grundannahme I postuliert Rasch, daß die Chance für die Lösung einer Aufgabe durch zwei Faktoren bestimmt ist. Dies ist einmal die Schwierigkeit der Aufgabe und zum anderen die Fähigkeit der Person. Beide Faktoren führen mit einer Chance C_{Erfolg} dazu, die Aufgabe zu lösen, und mit der Chance $C_{Mißerfolg}$ dazu, die Aufgabe nicht zu lösen. Die Wahrscheinlichkeit P für ein Ereignis kann aus der Chance für dieses Ereignis hergeleitet werden; sie stehen in einer einfachen Beziehung. In der klassischen Testtheorie gilt für deren Beziehung Gleichung 28.

$$C_{\text{Erfolg}} = \frac{P}{Q} = \frac{P}{1-P} = \frac{X}{D} = \frac{1}{C_{\text{Mißerfolg}}} \quad (28)$$

$$\Rightarrow C_{\text{Mißerfolg}} = \frac{Q}{P} = \frac{D}{X}$$

mit:

<i>C</i>	<i>Chance für den Erfolg oder Mißerfolg</i>
<i>P</i>	<i>Wahrscheinlichkeit für die Beobachtung von Erfolgen</i>
<i>Q</i>	<i>Wahrscheinlichkeit für die Beobachtung von Fehlern</i>
<i>X</i>	<i>Fähigkeit der Person</i>
<i>D</i>	<i>Schwierigkeit der Aufgabe</i>

Das Modell von Rasch kann also nur auf dichotome Ereignisse angewendet werden, wie anhand der dichotomen Aufteilung zwischen Erfolg oder Mißerfolg zu sehen ist. Da es sich bei den betrachteten Fehlerereignissen in der Betriebserfahrung auch um dichotome Ereignisse (Fehler oder kein Fehler) handelt, ist diese Voraussetzung für eine Anwendung des Rasch-Modells gegeben. Daß die betrachteten HF-Ereignisse die Schwierigkeit *D* einer Situation wiedergeben, wurde bereits in der Diskussion zu Tabelle 15 (Kapitel 3) angesprochen. HR-Ereignisse repräsentieren folglich die Fähigkeiten des Menschen (*X*).

Aus dieser Grundannahme folgt die Annahme der **lokalen stochastischen Unabhängigkeit**, d.h.: Die Fähigkeit einer Person ist unabhängig von den Schwierigkeiten der ihm vorgelegten und vormals von ihm gelösten Aufgaben. Der Begriff der **spezifischen Objektivität** besagt, daß die Schwierigkeit eines Items nicht beeinflussbar also unabhängig von der Person ist, welche das Item lösen muß. Die wechselseitige Unabhängigkeit und spezifische Objektivität sind wesentliche Grundvoraussetzungen des Rasch-Modells. Bezogen auf die Ereignisauswertung erwarten sie, daß die Häufigkeit, mit der ein Fehler auftritt, unabhängig davon ist, welche Person den Fehler begeht. Diese Annahme wird auch in der menschlichen Zuverlässigkeit gemacht und kann somit bezogen auf ein einzelnes Ereignis als erfüllt angesehen werden. Innerhalb eines Ereignisses können jedoch Abhängigkeiten bestehen. Beispielsweise wurde festgestellt, daß Handlungen aus dem Bereich C eher situationsverschlechternd sind als Handlungen aus dem Bereich Ba. Bezogen auf die Auswertung der Ereignisse bedeutet dies, daß sichergestellt sein muß, daß die Häufigkeit für einen beobachteten Fehler vom Typ *i* unabhängig von zuvor beobachtbaren Fehlern vom Typ *i* ist. Dies ist sichergestellt, wenn eine Schätzung auf Grundlage der Anzahl der Ereignisse ($m=165$) ge-

schieht und nicht auf Grundlage der in den Ereignissen beobachteten MMS ($l=255$), da diese nicht unabhängig voneinander sind.

- **Die probabilistische Testtheorie**

Die Grundannahme II besagt formal, daß die Testwerte die ihnen zugrundeliegenden Parameter nicht direkt schätzen können, wie dies in der klassischen Testtheorie üblicherweise der Fall ist (z.B. über Bildung relativer Häufigkeiten). Nach Gleichung 28 werden in der klassischen Testtheorie die Wahrscheinlichkeit P und die Chance C aus der Häufigkeit n der Beobachtung des Ereignisses i bezogen auf alle m Ereignisse folgendermaßen geschätzt:

$$P \approx \hat{P} = \frac{n}{m} \Rightarrow C \approx \hat{C} = \frac{n}{m-n} \quad (29)$$

mit:

\hat{P}	Schätzung für P
\hat{C}	Schätzung für C
P	Wahrscheinlichkeit für ein Ereignis vom Typ i
C	Chance für ein Ereignis vom Typ i
n	Anzahl aller Ereignisse vom Typ i
m	Anzahl aller Ereignisse

Rasch nimmt dagegen an, daß die statistische Unsicherheit in den Messungen selbst liegt. Nicht die relativen Häufigkeiten schätzen den zugrundeliegenden Parameter optimal, sondern ein transformierter Wert (die sogenannten Logits), welcher die statistische Unsicherheit der Daten miteinbezieht. Nach Rasch wird die Chance \hat{C} also nicht direkt aus der Wahrscheinlichkeit P gewonnen, sondern, indem die statistische Unsicherheit der Schätzwerte für P mit der Formel

$$C_{Erfolg} = \ln\left(\frac{\hat{P}}{\hat{Q}}\right) = \ln\left(\frac{\hat{P}}{1-\hat{P}}\right) = \ln\left(\frac{\hat{X}}{\hat{D}}\right) = \ln(\hat{X}) - \ln(\hat{D}) = X - D \quad (30)$$

berücksichtigt wird. Diese Formel wird auch als logistische Transformation bezeichnet. $\ln(\hat{X})$ und $\ln(\hat{D})$ werden demzufolge Logits genannt. Hierdurch geschieht eine **Trennung der latenten Dimension und der beobachtbaren Variablen (Indikatoren)**. Zur Wahl des Logarithmus ist folgendes anzumerken:

- Rasch selbst begründet den Logarithmus zur Berechnung der Logits inhaltlich damit, daß dies eine in der Mathematik oft gemachte Annahme ist, um Unsicherheiten in den Daten zu berücksichtigen, ohne daß eine explizite, mathematisch schlüssige Begründung dafür vorhanden wäre (Rasch, 1980).
- Da es sich, wie bereits gezeigt, bei HEP-Werten im THERP-Verfahren um logarithmisch normalverteilte Größen handelt, wäre eine weitere Interpretationsmöglichkeit, daß das Logit $\ln(\hat{P})$ den Erwartungswert des logarithmierten HEP-Wertes P angibt (siehe dazu Gleichung 25 und Reer, 1988).

Auf beide Begründungen soll an dieser Stelle nicht weiter eingegangen werden, da das Rasch-Modell in dieser Arbeit zur Kalibrierung der relativen Häufigkeiten aus der Betriebserfahrung an die HEP-Werte des THERP-Katalogs dienen soll. Ferner würde eine Diskussion dieser Annahme den Rahmen dieser Arbeit sprengen.

Als Voraussetzung für die Trennung der latenten Dimension und der beobachtbaren Variablen wird **Eindimensionalität** gefordert; d.h., alle Items können auf einer Dimension (also durch ein psychologisches Konstrukt) interpretiert werden. Die Anforderung, die an die Daten aus dieser Forderung gestellt wird, heißt **erschöpfende Statistik**; d.h., alle Items müssen sich auf denselben sachlichen Inhalt beziehen, der durch das psychologische Konstrukt gegeben ist. Die Annahmen Eindimensionalität und erschöpfende Statistik sind dadurch gegeben, daß sich alle Auswertungen auf das psychologische Konstrukt des menschlichen Fehlers beziehen.

- **Die Item Characteristic Curve**

Die Grundannahme III besagt schließlich, daß beobachteter Testwert und wahrer Wert einer Eigenschaft über eine sogenannte Item Characteristic Curve (ICC) in Beziehung stehen. Die ICC wird durch Auflösung von Gleichung 30 nach P entsprechend der folgenden Formel bestimmt:

$$\hat{P}_{Erfolg} = \frac{e^{C_{Erfolg}}}{1 + e^{C_{Erfolg}}} = \frac{e^{X-D}}{1 + e^{X-D}}$$

und (31)

$$\hat{P}_{Mi\u00dferfolg} = \frac{e^{C_{Mi\u00dferfolg}}}{1 + e^{C_{Mi\u00dferfolg}}} = \frac{e^{D-X}}{1 + e^{D-X}}$$

Typische Merkmale der Item Characteristic Curve sind monotone Steigung und asymptotische Ann\u00e4herung an die Grenzen $\hat{P}=1$ bzw. $\hat{P}=0$. Damit ist diese probabilistische Funktion in der Lage, Angaben aus der Betriebserfahrung in Werte zu transformieren, die im Wertebereich von Wahrscheinlichkeiten liegen. Dies ist ein Grund daf\u00fcr, da\u00df sich dieser probabilistische Ansatz besonders gut f\u00fcr den Vergleich mit HEP-Werten eignet, da Ziel der Kalibrierung ist, eine numerische \u00dcbereinstimmung mit den HEP-Werten des THERP-Katalogs zu erreichen.

Ein weiterer Grund, welcher der Gleichung 30 und 31 zu entnehmen ist, ist, da\u00df $\hat{P}=1$ und $\hat{P}=0$ nicht definiert sind. Ereignisse, die zu $\hat{P}=1$ und $\hat{P}=0$ f\u00fchren, weisen auf keinerlei statistische Unsicherheit hin und m\u00fcssen aus dem Sch\u00e4tzproze\u00df herausgenommen werden. Dies gilt sowohl f\u00fcr den Fall, da\u00df alle Personen ohne Fehler sind (zu f\u00e4hig), als auch daf\u00fcr, da\u00df alle Aufgaben fehlerfrei sind (zu leicht). Diese Eigenschaft ist ideal auf die Betriebserfahrung anwendbar, da (wie bereits weiter oben angesprochen) positive Ereignisse, in denen keine Fehler aufgetreten sind, nicht gemeldet werden und Betriebserfahrung dadurch immer unvollst\u00e4ndig gegen\u00fcber nicht aufgetretenen Fehlern ist. Da diese in probabilistischen Ans\u00e4tzen ohnehin herausgenommen werden m\u00fcssen, sind probabilistische Modelle gut geeignet, die in der Betriebserfahrung zwangsl\u00e4ufig unvollst\u00e4ndig vorhandene Information auszuwerten.

Bevor die Anwendung dieser Formel auf die Ereignisse dargestellt wird, sollen die verbleibenden Annahmen Homogenit\u00e4t, Monotonie und Intervallskalierung kurz angesprochen werden. Die ICC setzt voraus, da\u00df **Homogenit\u00e4t** zwischen den Items besteht d.h., alle Items erfassen dasselbe Merkmal und bei den betrachteten Personen handelt es sich um eine homogene Stichprobe. Diese Annahme wird dadurch erf\u00fcllt, da\u00df sich alle Ereignisse (Items) auf das Merkmal 'menschlicher Fehler' beziehen. Die Stichprobenhomogenit\u00e4t wurde bereits bei der \u00dcberpr\u00fcfung der logarithmischen Normalverteilung untersucht; sie ist nach Swain und Guttman (1983) durch Schulung und Ausbildung gew\u00e4hrleistet. Ferner besagt die Forderung nach **Monotonie**, da\u00df der beobachtete Wert und die Wahrscheinlichkeit \u00fcber eine streng monoton steigende Funk-

tion in Beziehung stehen. Mathematisch ist dies durch Gleichung 31 erfüllt. Daß die beobachteten Werte mit dem Wahrscheinlichkeiten von THERP auch empirisch zusammenhängen, wurde bereits durch die hohe Korrelation der relativen Häufigkeiten mit den THERP-Angaben gezeigt. Das Rasch-Modell nimmt ferner an, daß Fähigkeits- und Schwierigkeitsparameter intervallskaliert sind. **Intervallskalierung** ist dadurch gewährleistet, daß die aus der Betriebserfahrung gewonnenen Größen Häufigkeiten sind.

5.4.2 Parameterschätzung

In der Testtheorie werden in der Regel aus den beobachteten Lösungswahrscheinlichkeiten Schätzwerte für die Schwierigkeit der Aufgaben oder die Fähigkeit einer Person gewonnen. Dort ist die Richtung des Schätzprozesses also:

$$\hat{P} \longrightarrow \{X, D\} \quad (32)$$

Die in der Ereignisauswertung gefundenen Häufigkeiten sind jedoch Schätzungen für den Schwierigkeits- und Fähigkeitsparameter, von dem auf Wahrscheinlichkeiten geschlossen werden soll. Dies ist u.a. aus dem ogivenförmigen Verlauf der Punkte in Bild 51 zu entnehmen (der Verlauf entspricht dem der ICC). Damit ist hier die Richtung des Schätzprozesses:

$$\{\hat{X}, \hat{D}\} \longrightarrow P \quad (33)$$

Entsprechend müssen die Schätzgrößen und die geschätzten Parameter in Gleichung 31 getauscht werden. Geschätzt werden also \hat{X} und \hat{D} . Die Fähigkeit der Personen \hat{X} kann aus den untersuchten Ereignissen nicht bestimmt werden, da hierzu auch die HR-Ereignisse ausgewertet werden müßten. Den geringsten Fehler macht man, wenn man im folgenden Schätzprozeß keinen Beitrag von der Fähigkeit erwartet. Dies entspricht einer Schätzung von $\hat{X}=0$. Ferner kann die Fähigkeit innerhalb des betrachteten technischen Systems (Kernkraftwerke) durch Ausbildung als relativ konstant angesehen werden. \hat{D} , der Parameter für die Schwierigkeit einer Aufgabe, wird aus den Beobachtungen folgendermaßen geschätzt:

$$\hat{C}_{\text{Mißerfolg einer Aufgabe vom Typ } i} = \hat{D}_i - \hat{X}$$

und

$$\hat{X} = 0 \tag{34}$$

$$\hat{D}_i = \frac{n'_i - \mu}{s_n}$$

mit:

- \hat{D}_i *Schätzung für die Schwierigkeit der Aufgabe i*
- \hat{X} *Schätzung für die Fähigkeit der Personen*
- n'_i *Erwartete Häufigkeit für einen Fehler vom Typ i nach Gleichung 27*
- μ *Mittelwert*
- s_n *Erwartete Streuung*

Eine mögliche Rasch-Verteilung wird also dadurch gewonnen, daß die Schwierigkeit einer Aufgabe vom Typ *i* geschätzt wird, indem die in den Ereignissen beobachteten Fehlerhäufigkeiten auf alle beobachteten Ereignisse normiert werden. Diese Verteilung wird normierte Rasch-Verteilung genannt. Als Standardisierungsparameter, welcher eine optimale Übereinstimmung der relativen Häufigkeiten aus den Ereignissen und den Angaben des THERP-Verfahren liefern, wurden die folgenden Faktoren ermittelt:

$$\mu = m / 2$$

und

$$s_n \approx 12,5 \tag{35}$$

mit:

- m *Anzahl der Beobachtungen (alle Ereignisse mit menschlichem Fehler)*

Der Mittelwert μ ergibt sich aus der Annahme des Rasch-Modells, daß eine mittlere Mißerfolgs-Chance bei einer mittleren Personenfähigkeit zu einer Mißerfolgs-Wahrscheinlichkeit von $P=0,5$ führt. Die Streuung s_n wurde empirisch ermittelt (Maximierungsbedingung war eine möglichst hohe Übereinstimmung mit den THERP-Angaben). Für das Rasch-Modell ergibt sich damit folgender Zusammenhang der Chance $\hat{C}_{\text{Mißerfolg}}$ als Schätzung für die Wahrscheinlichkeit $P_{\text{Mißerfolg}}$:

$$P_{\text{Mißerfolg vom Typ } i} = \frac{e^{\hat{C}_{\text{Mißerfolg vom Typ } i}}}{1 + e^{\hat{C}_{\text{Mißerfolg vom Typ } i}}} = \frac{e^{\hat{D}_i}}{1 + e^{\hat{D}_i}} = \frac{e^{\left(\frac{n'_i - \mu}{s_n}\right)}}{1 + e^{\left(\frac{n'_i - \mu}{s_n}\right)}} \quad (36)$$

Die Formel gibt die Wahrscheinlichkeit an, mit der ein n-mal beobachteter Fehler vom Typ i auftritt. Hiermit wird es möglich, aus den relativen Häufigkeiten eine Wahrscheinlichkeit des Auftretens zu berechnen. Wendet man diese Formel auf die $m=165$ beobachteten Ereignisse an, so ergibt sich eine Verteilung gemäß Bild 52.

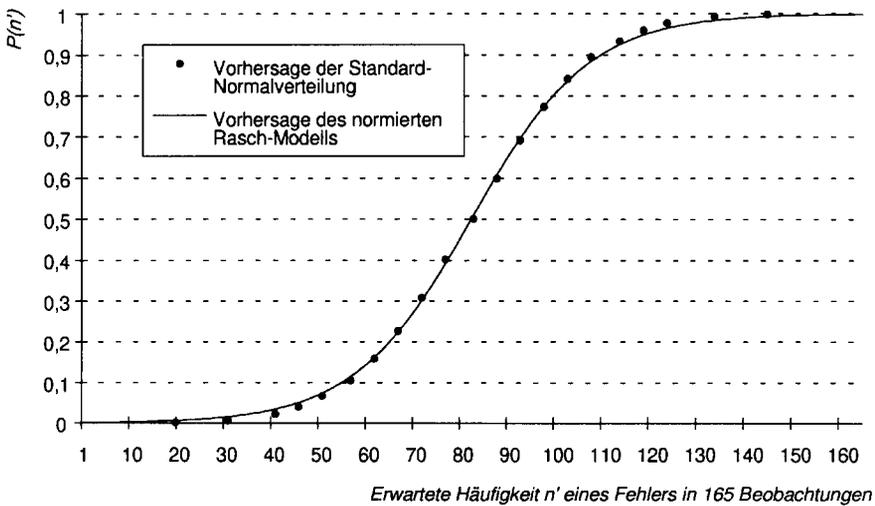


Bild 52 Probabilistisches Modell zur Vorhersage von Auftretens-Wahrscheinlichkeiten aus Häufigkeiten in der Beobachtung.

Aus Gleichung 36 ist zu ersehen, daß das Rasch-Modell nur dann anwendbar ist, wenn nicht alle beobachteten Fehler vom einem einzigen Typ i sind. Es ergeben sich also Schätzprobleme, wenn zu wenig Variation in den Fehlertypen ist. Sind beispielsweise in allen Ereignissen nur 2 unterschiedliche Fehlertypen und diese gleich häufig beobachtet worden, so würde das Modell für beide Fehlertypen eine Wahrscheinlichkeit von $P=0,5$ bestimmen. Mit den 165 ausgewerteten Ereignissen wurden jedoch ausreichend viele unterschiedliche Fehlertypen beobachtet. Beispielsweise liefert ein Fehlertyp, der nur in einem Ereignis beobachtet wurde, den Wert $P=f(\hat{D}) \approx 0,0014$ mit $\hat{D}=1/165$. Damit können Wahrscheinlichkeiten auf einen Auflösungsgrad von

$\Delta P \approx 0,0014$ voneinander unterschieden werden. Die Stichprobe besitzt also hinreichende Variation, um mit den HEP-Werten aus dem THERP-Verfahren verglichen zu werden.

Durch die probabilistische Funktion wird vom Schwierigkeitsparameter auf Wahrscheinlichkeiten geschlossen. Hier wird also aus einem eher qualitativ orientierten Parameter (Schwierigkeit, operationalisiert durch Anzahl der in den Ereignissen beobachteten Fehler vom Typ i) eine Wahrscheinlichkeit geschätzt. Durch diese Überlegung kann man zwischen der hier nach dem Modell von Rasch aufgestellten ICC und der bereits in Kapitel 4 angesprochenen Fuzzy-Set Theorie einen gewissen Bezug herstellen, denn die ICC entspricht einer Membershipfunktion.

Sofern gezeigt werden könnte, daß (1) Gleichung 35 den Schwierigkeitsparameter optimal schätzt und (2) die ICC bzw. Membershipfunktion den Zusammenhang zwischen Schwierigkeits-Werten und HEP-Werten des THERP-Verfahren richtig abbildet, könnte man bezogen auf die Frage, welcher Art die hier berechneten Wahrscheinlichkeiten sind, sogar darauf schließen, daß sie eine Schätzung für 'echte' Wahrscheinlichkeiten gemäß der HEP-Definition (Gleichung 2) sind. Dies bleibt aber eine Spekulation, da der Ursprung der HEP-Werte im THERP-Verfahren unbekannt ist. Dementsprechend soll dieser Schluß hier nicht gezogen werden. Aus der Bildung des Schwierigkeitsparameters bietet sich vielmehr eine einfachere statistische Deutung an.

- **Statistische Deutung**

Im Bild 52 ist zusätzlich zur ICC auch der durch eine Standard-Normalverteilung geschätzte Verlauf der Wahrscheinlichkeit für einige Punkte angegeben. Die normierte Rasch Kurve stimmt nahezu identisch mit der Vorhersage der Normalverteilung überein. Im Sinne der Statistik kann die normierte Rasch-Verteilung damit folgendermaßen interpretiert werden: Wenn man unterstellt, daß sich ein dichotomes Ereignis (Handlung oder Fehler vom Typ i) zufällig verteilt, dann ist es binomial verteilt. Die Binomialverteilung geht laut Bortz (1989) bei $n \rightarrow \infty$ selbst bei ungleich wahrscheinlichen Alternativen annähernd in eine Normalverteilung über. Um zu bestimmen, wie hoch die Wahrscheinlichkeit ist, unter einer gegebenen Anzahl von m Ereignissen vom Typ i mindestens einen Fehler vom Typ i herauszuziehen, muß demnach die Fläche unter der Normalverteilung bis zu dem z-Wert bestimmt werden, welcher der Anzahl n'_i der beobachteten Fehler vom Typ i entspricht.

Aus der Übereinstimmung des normierten Rasch-Modells mit dem Integral der Normalverteilung kann demzufolge angenommen werden, daß Gleichung 36 die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten einer Beobachtung vom Typ i schätzt. Bild 53 veranschaulicht diesen Zusammenhang aus der Perspektive der Dichtefunktion. Im Bild ist die Dichtefunktion der normierten Rasch-Verteilung idealisiert dargestellt. Die schraffierte Fläche ist dann die Wahrscheinlichkeit dafür, mindestens einen Fehler vom Typ i innerhalb aller beobachteten Ereignisse vom Typ i zu beobachten.

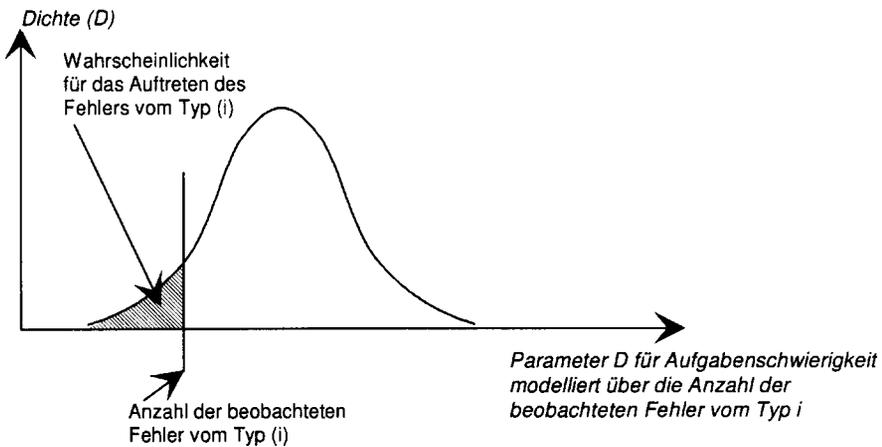


Bild 53 Dichtefunktion für das Auftreten eines Ereignisses vom Typ i in Abhängigkeit von der Aufgabenschwierigkeit (D).

An dieser Stelle stellt sich unweigerlich die Frage, warum nicht die logarithmische Normalverteilung als Dichtefunktion angenommen wird, welche bereits weiter oben verifiziert wurde. Die logarithmische Normalverteilung ist jedoch eine Verteilung der Personen-Fähigkeiten und damit im Sinne des Rasch-Modells eine Verteilung des Fähigkeitsparameters. Dieser wurde jedoch nicht berücksichtigt, da nur Fehlerereignisse in der Ereignisauswertung vorliegen. Der Fähigkeitsparameter erfordert, daß Ereignisse mit Fehlern und Leistungen (= keine Fehler) vorhanden sind. Um den Fähigkeitsparameter zu schätzen, müßten also auch die vorliegenden HR-Ereignisse ausgewertet werden.

Das normierte Rasch-Modell erlaubt also Aussagen der Form: Wenn ein Ereignis vom Typ i auftritt, so ist dies mit einer Wahrscheinlichkeit von P_i ein Fehler vom Typ i . Damit sind die mit diesem Modell berechneten Wahrscheinlichkeiten keine HEP, da laut Gleichung 2 für eine HEP die Anzahl der Anforderungen (bzw. die Grundgesamtheit)

bekannt sein muß. Weiter oben wurde aber bereits diskutiert, daß dieser Ansatz zur Schätzung der HEP-Werte herangezogen werden kann, da das THERP-Verfahren auf regelbasiertes Verhalten bezogen ist, wie aus der Annahme der logarithmischen Normalverteilung hervorgeht.

5.5 Probabilistische Vorhersagen aus der Betriebserfahrung

Für den folgenden probabilistischen Vergleich werden für die bereits weiter oben bestimmten erwarteten Häufigkeiten Wahrscheinlichkeiten mit dem normierten Rasch-Modell bestimmt. Diese Werte werden darauf mit den HEP-Angaben aus dem THERP-Katalog und dem PHRA-Verfahren verglichen. Neben einem Gesamtvergleich werden auch einzelne Modellvorstellungen von THERP untersucht: das Diagnosemodell, das Abhängigkeitsmodell und das Streßmodell. Abschließend wird der durchgeführte Vergleich diskutiert.

5.5.1 Probabilistischer Vergleich der Betriebserfahrung mit den Daten des THERP-Verfahrens

Die mit Hilfe des Rasch-Modells aus den relativen Häufigkeiten berechneten Auftretenswahrscheinlichkeiten wurden 79 Items aus den Tabellen des THERP-Verfahrens gegenübergestellt. In Anlehnung an die entwickelte Datenbank CAHR (Connectionism Assessment of Human Reliability) werden auch diese zur Vereinfachung als CAHR-Werte bezeichnet. Bild 54 zeigt die Korrelation zwischen THERP-Werten und den CAHR-Werten aus der Betriebserfahrung. Die Korrelation liegt bei $r=0,83$ für die HEP-Werte sowie bei $r=0,79$ für den Logarithmus der HEP-Werte. Die Steigung der logarithmierten Werte beträgt $B_{xy} \approx 1,054$. Dies entspricht relativ genau einer Ursprungsgeraden.

Berücksichtigt man die Unsicherheiten (Fehlerfaktoren), die zu den Daten von THERP angegeben werden, so weisen ca. 73% aller beobachteten CAHR-Werte Überschneidungen mit den HEP-Werten von THERP auf. Wenn zusätzlich die Unsicherheiten in den CAHR-Werten gemäß Gleichung 21 und 22 (Kapitel 4) berücksichtigt werden, stimmen ca. 94% aller Items überein. Eine detaillierte Aufstellung der HEP-Werte und Unsicherheiten sowie Über- und Unterschätzungen in den Einzelbeobachtungen sind in Bild 55 und Anhang 6 dargestellt. Insgesamt findet man eine gute numerische

Übereinstimmung der Angaben aus der Betriebserfahrung und den Angaben des THERP-Katalogs.

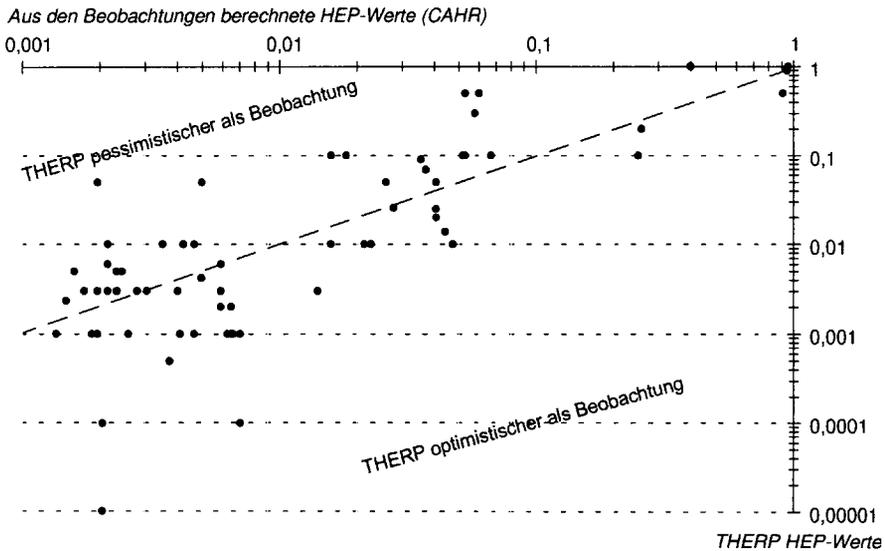


Bild 54 Korrelationsgerade zwischen HEP-Werten von THERP gegenüber den mit CAHR aus den Beobachtungen berechneten Werten.

Einige Abweichungen liegen jedoch außerhalb der von THERP angegebenen Unsicherheitsbänder. Diese werden in Tabelle 34 diskutiert. In der Tabelle sind diejenigen Items, die sowohl außerhalb des Unsicherheitsbandes der THERP-Daten als auch außerhalb der Unsicherheiten der CAHR-Angaben liegen mit * gekennzeichnet. Ob stärkere Abweichungen durch eine tatsächliche Über- bzw. Unterschätzung der beobachteten Verhältnisse durch die THERP-Daten zustande kommen oder allein auf Unsicherheiten in der Datenquelle zurückzuführen sind, kann beurteilt werden, indem die beobachteten Abweichungen bezüglich der folgenden möglichen Unsicherheitsquellen eingeteilt werden:

1. Spezifische Abweichungen: Spezifische Abweichungen können dadurch zustande kommen, daß eine unzureichende Übereinstimmung zwischen den Angaben aus der Betriebserfahrung und denen des THERP-Katalogs herrscht. Dies kann auf zwei Arten geschehen: Einmal dadurch, daß die Angaben aus der Betriebserfahrung nicht in der Form vorliegen, wie es für eine Modellierung der THERP-Items erforderlich wäre, oder zum anderen dadurch, daß die Angaben der THERP-Items unklar sind. Zu derartigen Abweichungen können keine weiteren Aussagen getrof-

fen werden. Sie sind in der Tabelle mit (d) für Datenungenauigkeiten und (i) für Ungenauigkeiten in den Items des THERP-Katalogs gekennzeichnet.

2. Unspezifische Abweichungen. Zu dieser Art der Abweichungen zählen die unbekannte Anzahl der Anforderungen (Grundgesamtheiten) und der unbekannte Personenparameter. Beide Abweichungsrichtungen können also sowohl zu einer Über- als auch zu einer Unterschätzung führen. Aus diesem Grunde müßten Items aus einem Aufgabenbereich bzw. mit gleichen Aufgabenbeschreibungen in etwa gleiche Abweichungsrichtungen haben, da innerhalb dieses abgegrenzten Bereiches die Grundgesamtheiten vergleichbar sein müssen. Ist dennoch eine Abweichung in zwei unterschiedliche Richtungen zu beobachten, kann die Abweichung nicht über diese Unsicherheitsquellen erklärt werden. In diesem Fall sind diese Unsicherheiten mit (p) gekennzeichnet und haben gewisse Bedeutung hinsichtlich der im THERP-Katalog angegebenen HEP-Werte.
3. Innerhalb der Tabelle ist ein weiterer Grund für eine Abweichungen vermerkt: (m) für methodische Gründe. Er bedeutet, daß in diesen Fällen keine Übereinstimmung erzielt wurde, da das THERP-Verfahren keine Unsicherheiten für $HEP=1$ angibt.

Aus der Untersuchung der Abweichungen in Tabelle 34 können damit bezogen auf die Bewertung menschlicher Zuverlässigkeit folgende Ergebnisse diskutiert werden:

- Aus den Ergebnissen bezüglich der Diagnosekurve kann vorgeschlagen werden, für einfache Diagnosen niedrigere Werte anzusetzen, als diejenigen, die in THERP angegeben sind. Bei langen Zeiten ist ferner eine gewisse Sättigung bei $p=0,001$ zu beobachten. Dies scheint die untere Grenze möglicher Diagnosefehler zu sein, was auch die Ergebnisse des PHRA-Verfahrens nahelegen.
- Aus den Ergebnissen zur THERP-Tabelle 20-06 kann gefolgert werden, daß es Unterschiede bei der Handhabung von Prozeduren gibt. Diese Unterschiede können aufgefangen werden, indem für Item 20-06 (3) ein Fehlerfaktor von $EF=6$ und für Item 20-06 (7) eher die untere Grenze des HEP-Wertes genutzt wird.
- Die Unterschiede in den Ergebnissen zur THERP-Tabelle 20-11 sind durch Hochsetzen der Fehlerfaktoren auf $EF=6$ für Item 20-11 (2) und $EF=4$ für Item 20-11 (5) kompensierbar.

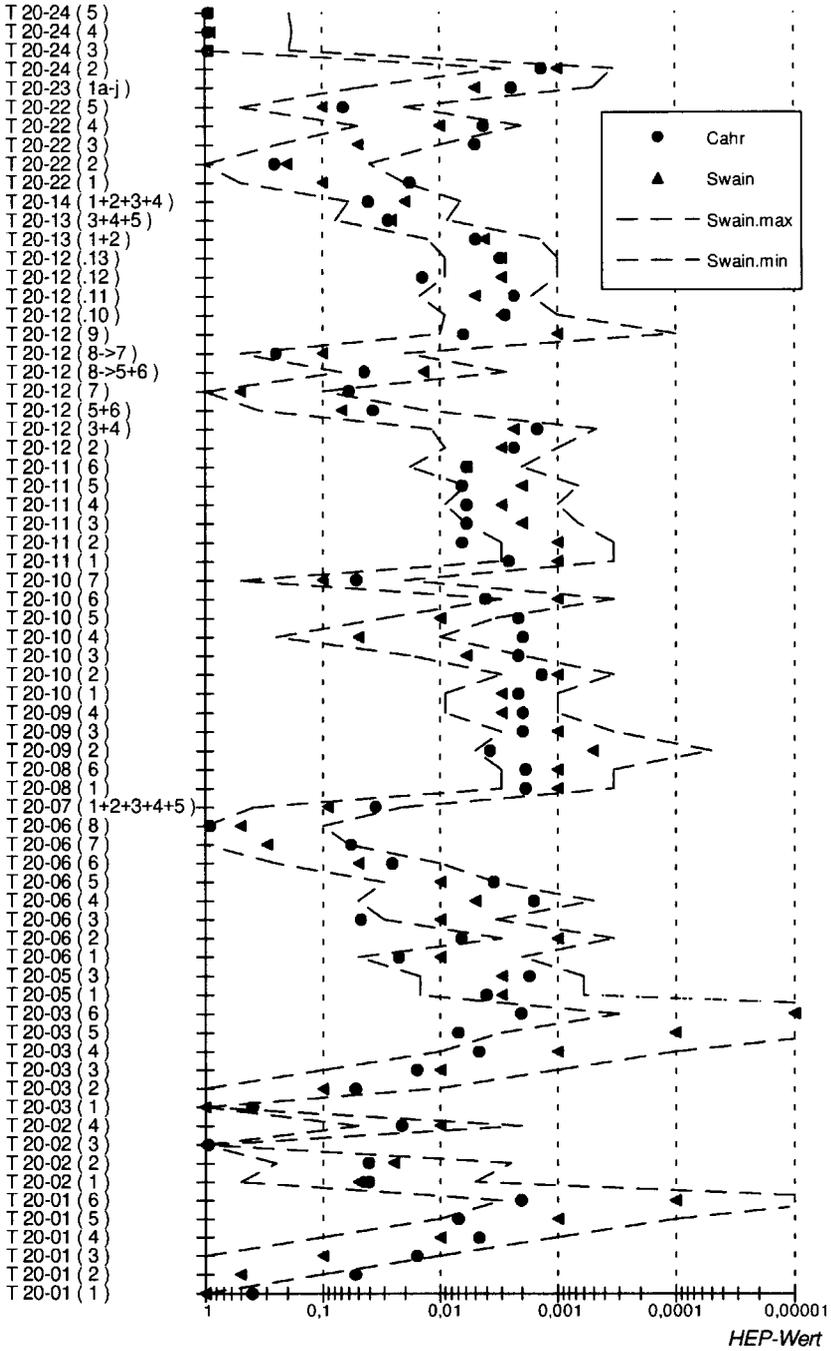


Bild 55 Darstellung der Über- und Unterschätzungen in den Einzelbeobachtungen.

Tabelle 34 THERP-Items, Abweichungsrichtung und mögliche Gründe.

<i>THERP-Item</i>	<i>Abweichungsrichtung</i>	<i>Möglicher Grund</i>	<i>Indikation</i>
Diagnosemodell (screening und nominal)			
20-01 (1)* 20-01 (2) 20-03 (1)*	THERP pessimistischer	Die Betriebserfahrung liefert nur Daten für relativ einfache Diagnosen. Schwierige Diagnosen, die in einem komplexen Störfall vorkommen, liegen nicht vor.	p
20-03 (5) 20-03 (6)	THERP optimistischer	Für eine Diagnose scheint $p=0,001$ eine untere Grenze zu sein. Dies zeigen auch die Angaben des PHRA-Verfahrens (Kapitel 2).	p
Screening-Modell			
20-02 (3)	THERP pessimistischer	HEP für dieses Item nach THERP ist $P=1$. Für diese HEP-Werte gibt THERP keine Unsicherheitsbandbreiten an. Da der beobachtete Wert nicht punktgenau auf $P=1$ liegt, kann er nicht dem von THERP entsprechen. Würde man auch für HEP-Werte von $P=1$ Unsicherheiten angeben, so würde ein Fehlerfaktor von $EF=1,06$ ausreichen, damit die Beobachtung innerhalb der Unsicherheiten des THERP-Items liegt.	m
Administrative Kontrolle			
20-06 (2)	THERP optimistischer	Die vorliegenden Ereignisbeschreibungen sind nicht so detailliert, daß eine schichtabhängige Prüfung im einzelnen beschrieben wird. Demzufolge ist die Modellierung dieses THERP-Items möglicherweise nicht passend.	d
20-06 (3)*	THERP optimistischer	Da das Item 20-06 (4) innerhalb der Unsicherheiten liegt und von der Aussage selbst kaum abweicht (Fehler bei der Benutzung von Prozeduren), kann darauf geschlossen werden, daß diese Aussage gewisse Relevanz für probabilistische Untersuchungen hat. Verstärkt wird diese Hypothese dadurch, daß Item 20-06 (4) von THERP pessimistischer eingeschätzt wird: Das läßt den plausiblen Gesamtschluß zu, daß Prozeduren unter normalen Bedingungen anders gehandhabt werden als in gestörten Anlagezuständen.	p
20-06 (7)	THERP pessimistischer	Mit Bezug auf Item 20-06 (3) kann geschlossen werden, daß auch diese Abweichung gewisse Relevanz für probabilistische Untersuchungen hat.	p
Ausführungsfehler beim quantitativen Ablesen von Anzeigen			
20-10 (4)* 20-10 (5)	THERP pessimistischer	Die vorliegenden Ereignisbeschreibungen gehen nicht so detailliert auf die Arten der Anzeigen ein, so daß die Modellierung dieser THERP-Items möglicherweise nicht passend ist.	d
20-10 (6)	THERP optimistischer	Die vorliegenden Ereignisbeschreibungen sind nicht detailliert genug.	d
Ausführungsfehler bei Signalanzeigen			
20-11 (2) 20-11 (5)	THERP optimistischer	Einflußfaktoren auf die Anzeigengestaltung wurden in den Ereignisbeschreibungen gefunden. Da die übrigen Items durch die Betriebserfahrung sowohl über- als auch unterschätzt werden, besteht hier gewisse Relevanz für probabilistische Untersuchungen.	p
Ausführungsfehler bei manuellen Bedienelementen			
20-12 (7)	THERP pessimistischer	Die vorliegenden Ereignisbeschreibungen sind nicht detailliert genug.	d
20-12 (12)	THERP optimistischer	Das Item ist so beschrieben ("PSF are more favorable"), daß unklar ist, welche Einflußfaktoren betrachtet werden sollen.	i
Entdecken von Fehlern anderer durch Aufsicht			
20-22 (1) 20-22 (3)	THERP pessimistischer	Die vorliegenden Ereignisbeschreibungen sind nicht detailliert genug.	d

5.5.2 Vergleich mit einzelnen Modellen des THERP-Verfahrens

THERP nimmt für einige Bewertungsprobleme bestimmte Modelle an. Dies sind das Diagnosemodell, das Streßmodell, das Abhängigkeitsmodell und das Alarm-Reaktionsmodell. Modelle unterscheiden sich von den bisher besprochenen Punktwerten des THERP-Katalogs dadurch, daß sie einen funktionalen Zusammenhang zwischen Parametern und Zuverlässigkeitskenngrößen annehmen. Bis auf das Alarm-Reaktionsmodell, für das die Daten nicht ausreichend detailliert waren, konnte ein Vergleich mit diesen Modellen durchgeführt werden.

- **Vergleich mit dem Diagnose-Modell aus THERP und PHRA**

Das Diagnosemodell von THERP stellt eine grundlegende Annahme der menschlichen Zuverlässigkeit dar. Es besagt, daß die Wahrscheinlichkeit einen Fehler zu begehen, mit der zur Verfügung stehenden Zeit abnimmt. Da der Gradient und Kurvenverlauf der Abnahme dabei von der Schwierigkeit der Diagnosesituation abhängig ist, wurden von EDF (Electricite de France) eigene Experimente durchgeführt, um für unterschiedliche Situationen spezifischere Angaben zu erhalten, als es das generische Diagnosemodell von THERP erlaubt (vgl. Kapitel 2).

Zur Validierung des Diagnosemodells konnten 32 Ereignisse aus der Betriebserfahrung herangezogen werden, da für diese entsprechende Zeitangaben vorhanden waren. Bedingungen für die Nutzbarkeit eines Ereignisses zur Validierung des Diagnosemodells war, daß die angegebene Zeit als Diagnosezeit interpretierbar ist (z.B. nach 10 Minuten bemerkte der Operateur den Fehler). Ausgezählt wurden diejenigen MMS, bei denen ein menschlicher Fehler (Aufgabenfehler oder Ausführungsfehler) zu finden war. Zu diesen Angaben wurden entsprechend dem modifizierten Rasch-Modell Auftrittswahrscheinlichkeiten berechnet. Insgesamt ergibt sich eine Verteilung der Angaben zum Diagnosemodell gemäß Bild 56.

Im Bild stellen THERP.HEP das Diagnosemodell von THERP (nach THERP-Tabelle 20-01) und CAHR.HEP die Vorhersagen aus der Betriebserfahrung dar (die HEP-Werte für 7 Minuten wurden auf der Basis der Werte für $t=10$ Minuten für THERP und CAHR geschätzt). Das PHRA-Verfahren gibt den Kurvenverlauf $P(1)$ für einfache Diagnoseaufgaben typischer Störungen an (siehe Mosneron-Dupin et al., 1990). Der Verlauf der aus der Betriebserfahrung berechneten Kurve ist dabei der Kurve $P(1)$ am ähnlichsten; die Korrelation ist hier am höchsten (die Korrelation der logarithmierten

Werte liegt bei $r=0,97$). Dieses Ergebnis ist allein aus dem Grund plausibel, da in der Betriebserfahrung bisher keine schwerwiegenden Störungen, wie sie in der Diagnosekurve von THERP angenommen werden, beobachtet worden sind.

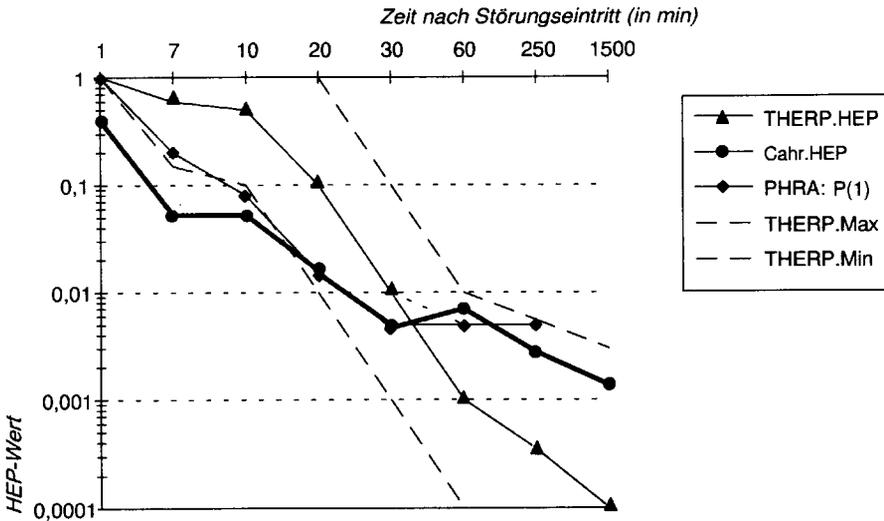


Bild 56 Vergleich der Diagnosekurven von THERP und PHRA mit den Vorhersagen von CAHR.

Vergleicht man den Kurvenverlauf mit dem von Bild 48, so stellt man zunächst fest, daß hier kein monotoner Abstieg zu erkennen ist. Dies liegt daran, daß hier nicht die berechneten Zeitcluster aus Bild 48 als Grundlage genommen wurden, sondern die von THERP vorgegebenen Zeiteinteilungen (bis 10, 20, 30, 60, über 60 Minuten). Dementsprechend wurden für die Bildung der Diagnosekurve die Zeitangaben gepoolt, die den Angaben des THERP-Items am nächsten kamen. Dadurch entsteht bei 60 Minuten ein unerwarteter Anstieg der Kurve, welcher der allgemeinen Annahme der Zeit-Zuverlässigkeits-Verfahren (der monotonen Abnahme der Fehlerwahrscheinlichkeit mit der Zeit) widerspricht. Dieser Anstieg beruht auf der gewählten Vorgehensweise, die Zeitangaben zu poolen, und damit letztendlich darauf, daß zu wenig Angaben beobachtet worden sind.

Aus den Ergebnissen kann aber gefolgert werden, daß die Übereinstimmung der Betriebserfahrung mit der Kurve P1 aus dem PHRA-Verfahren als Hinweis für die Über-

tragbarkeit und Gültigkeit der anderen Angaben des PHRA-Verfahrens (die Kurvenverläufe P1', P2, P3 - vgl. Kapitel 2) gelten kann.

- **Vergleich mit dem Stress-Modell aus THERP**

Im Stress-Modell gibt THERP Multiplikationsfaktoren an, mit denen eine vorhandene Fehlerwahrscheinlichkeit zu multiplizieren ist, falls ein bestimmter Streßlevel vorliegt (siehe THERP-Tabelle 20-16 in Anhang 5).

Da aus der Betriebserfahrung diese Multiplikationsfaktoren nicht direkt bestimmbar sind, wurde zum Vergleich der Betriebserfahrung mit dem Stress-Modell angenommen, daß eine Wahrscheinlichkeit von $P=0,0014$ für den optimalen Zustand (optimal static, optimal dynamic) unter unterschiedlichen Streßstufen modifiziert werden soll ($P=0,0014$ ist der kleinste Wert, der mit dem normierten Rasch-Modell erzielt werden kann). Für die Modellierung der verschiedenen Streß-Stufen wurden die in Anhang 6 aufgeführten Abfragen genutzt. Für die verschiedenen Abfragen wurden wiederum die erwarteten Häufigkeiten und aus diesen mit dem normierten Rasch-Modell Wahrscheinlichkeiten berechnet. Bild 57 zeigt die Ergebnisse.

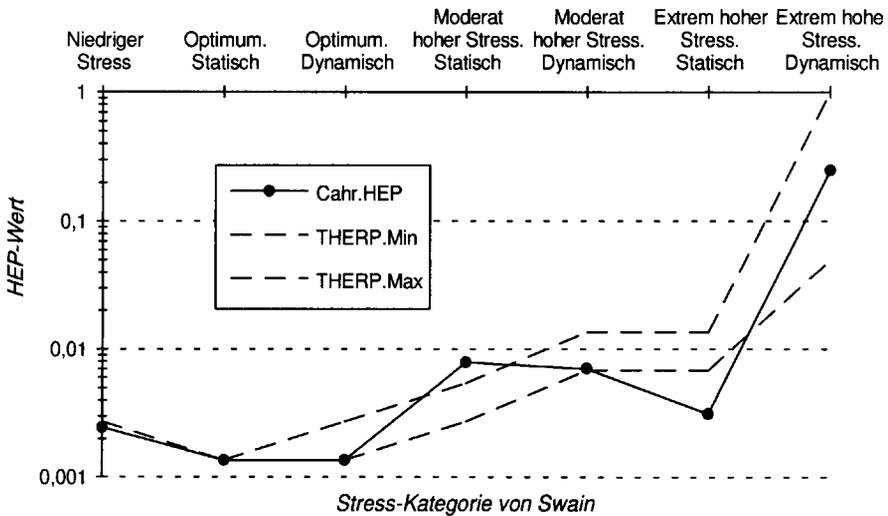


Bild 57 Vergleich der Betriebserfahrung mit den Vorhersagen von THERP bezüglich verschiedener Streßgrade

Wie aus dem Bild ersichtlich, stimmt die getroffene Modellierung mit den Vorhersagen im THERP-Modell recht gut überein (die Korrelation der logarithmierten Werte liegt bei $r=0,92$). Da dynamische Aufgaben unter moderatem Streß einen höheren Wert haben als statische unter extremen Streß, scheint das psychologische Konstrukt Streß komplexer zu sein, als es durch die fünf verschiedenen Stufen nach THERP modelliert werden kann (z.B. Hockey, 1984). Wesentliche Faktoren, welche bestimmen, ob der Streß zu menschlichen Fehlern führt (negativer Streß) oder ob der Streß Leistungsreserven freisetzt (positiver Streß), werden von THERP beispielsweise nicht berücksichtigt.

Auch hier scheint die Systemergonomie eine gute Hilfe zu sein, die Bedeutung von Streß für die menschliche Zuverlässigkeit zu modellieren. Hierfür sprechen zwei Gründe: (1) Die hier vorgenommene Modellierung des Streß-Modells durch das Zeitfenster und die systemergonomischen Einteilung der Führungsart (in statisch und dynamisch) stimmt relativ gut mit den Vorhersagen des Streß Modells von THERP überein. (2) Ein wesentlicher Faktor dafür, ob die Auswirkungen von Streß positiv oder negativ sind, ist die Kontrolle über die Situation bzw. die Rückmeldung. Rückmeldung wurde bereits bei der Analyse der Fehlerarten als wichtiger Faktor für Fehlerfreiheit identifiziert. Die Systemergonomie untersucht somit die wesentlichen Faktoren, welche die Wirkung von Streß ausmachen.

- **Vergleich mit dem Abhängigkeits-Modell aus THERP**

In der Untersuchung zu den verschiedenen Handlungstypen in Tabelle 25 wurden bereits erste Schätzungen über Abhängigkeiten vorgenommen. Für eine Ba-Handlung wurde dort in 16% aller Fälle eine Situationsverschlechterung beobachtet. Rechnet man mit dem normierten Rasch-Modell, entspräche das einer Auftretenswahrscheinlichkeit für eine Situationsverschlechterung bei Ba-Handlungen von $p=0,012$.

Für eine weitergehende Betrachtung der Abhängigkeiten wurde bereits in Kapitel 3 eine Einteilung über sich entsprechende Personen, Orte und Situationen vorgenommen (Tabelle 19): Danach herrscht vollständige Abhängigkeit, wenn alle drei Parameter gleich sind, hohe Abhängigkeit, wenn Situation und Person gleich sind sowie mittlere Abhängigkeit, wenn Person und Ort oder Ort und Situation gleich sind. Niedrige Abhängigkeit ist gegeben, wenn nur ein Parameter gleich ist und Unabhängigkeit, wenn kein Parameter übereinstimmt. Um diese Einteilung zu verifizieren, wurden diejenigen Ereignisse bestimmt, bei denen mehr als ein MMS genannt wurde. Dies war insgesamt

in 75 Ereignissen der Fall. Bei den 75 Ereignissen folgte auf ein fehlererzeugendes MMS in insgesamt 25 Ereignissen ein situationsverschlechterndes MMS. Für diese Ereignisse wurde ausgezählt, wie oft hierbei ein gleicher Ort, eine gleiche Person oder eine gleiche Situation beobachtet werden konnte. Aus diesen Häufigkeiten wurden Auftretenswahrscheinlichkeiten für die verschiedenen Konstellationen aus Tabelle 19 berechnet.

Aus den Beobachtungen werden Abhängigkeiten zwischen Aufgaben direkt aus den relativen Häufigkeiten der Ereignisse bestimmt. Da das THERP-Verfahren diese Möglichkeit nicht besitzt, sondern Korrekturformeln für Abhängigkeiten zwischen Aufgaben angibt, war es für einen Vergleich erforderlich, die von THERP erwartete Gesamtwahrscheinlichkeit für eine Situation mit zwei voneinander abhängigen Aufgaben zu berechnen. Um eine Vergleichbarkeit mit den Beobachtungen zu ermöglichen, wurden die Wahrscheinlichkeiten für die beiden abhängigen Aufgaben (P_1 und P_2) so gewählt, daß sie denen entsprechen, welche den Beobachtungen zugrunde liegen: P_1 wurde bestimmt, indem die insgesamt 75 beobachteten Ereignisse mit mehr als einem MMS auf alle 165 Ereignisse bezogen wurden. P_2 ergibt sich aus dem Verhältnis der 25 gefundenen situationsverschlechternden MMS zu allen 165 Ereignissen. Mit dem normierten Rasch-Modell ergibt sich dann $P_1=0,35$ für die erste Aufgabe und $P_2=0,009$ für die zweite Aufgabe. Die gesamte Fehlerwahrscheinlichkeit wurde dann gemäß THERP-Tabelle 20-17 berechnet. Ferner wurde ein $EF=5$ gemäß THERP-Tabelle 20-20 angenommen (Anhang 5). Es ergibt sich insgesamt eine Verteilung gemäß Bild 58 für die CAHR-Angaben und die des THERP-Verfahrens (THERP-Tabelle 20-18). THERP-Tabelle 20-19 konnte aufgrund von zu wenigen Daten nicht geprüft werden.

Mit der hier vorgenommenen Modellierung findet man eine gute Übereinstimmung des Abhängigkeitsmodells mit den Beobachtungen. Die in Kapitel 3 vorgenommene Modellierung der Abhängigkeiten scheint also eine realistische Umsetzung der in THERP vorgenommenen Einteilung zu sein. Sie bietet darüber hinaus die Möglichkeit, Abhängigkeiten orientiert an definierten äußeren Bedingungen zu modellieren, so daß Unsicherheiten des THERP-Modells vermieden werden können, wenn es um die Wahl der Abhängigkeiten in einer zu bewertenden Situation geht.

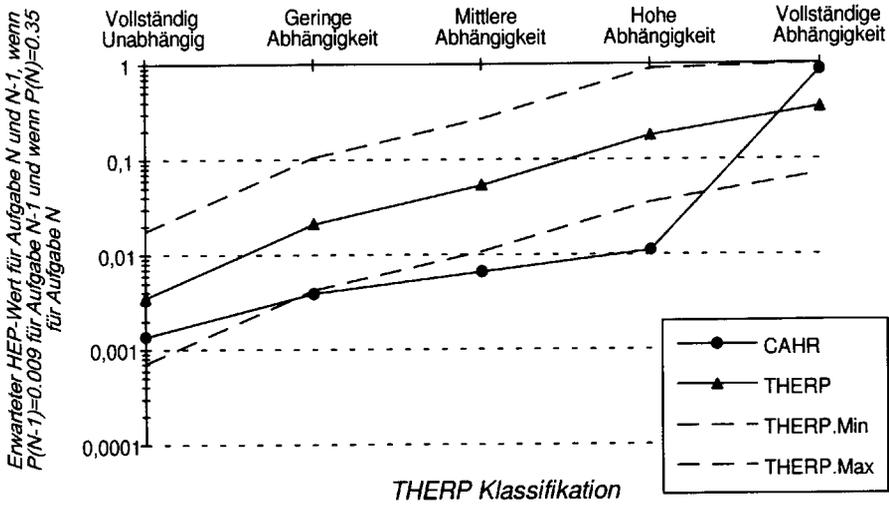


Bild 58 Vergleich der Betriebserfahrung mit den Vorhersagen von THERP bezüglich verschiedener Abhängigkeitsgrade

Da die absoluten HEP-Werte numerisch nur näherungsweise dieser Einteilung entsprechen, scheint es noch weitere Faktoren für Abhängigkeiten zu geben. Insbesondere der steile Anstieg zwischen hoher und vollständiger Abhängigkeit weist darauf hin, daß in der hier vorgenommenen Modellierung feinere Unterteilungen der Abhängigkeiten fehlen. Dies ist darauf zurückzuführen, daß aus den Ereignisbeschreibungen Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Aufgaben nur selten hervorgingen, was u.a. aus der Anzahl der gefundenen Ereignisse mit mehreren MMS zu entnehmen ist: Die Anzahl von 75 Ereignissen scheint kein hinreichend realistisches Bild der tatsächlichen Arbeitsabläufe zu geben, denn üblicherweise sollten in jedem Ereignis zumindest 2 MMS beobachtbar sein: ein fehlererzeugendes und ein fehlerentdeckendes MMS.

Inhaltlich kann aus der Übereinstimmung gefolgert werden, daß das prinzipielle Vorgehen, personelle Redundanz durch einen zweiten Mann zu realisieren, der dem ersten nebenangestellt wird, aufgrund dieser Erkenntnisse die am wenigsten wirksame Möglichkeit zu sein scheint. Bei einer wirksamen personellen Redundanz muß in irgendeiner Form die Unabhängigkeit der Personen und Situationen gewährleistet sein. Beispielsweise würden zwei Personen am selben Ort nur in mittlerer Abhängigkeit stehen, wenn sie mit unterschiedlichen Aufgaben betraut würden. Bei geschickter Auswahl der Aufgaben wäre eine bessere personelle Redundanz gegeben, als es durch eine bloße Anwesenheit einer zweiten Person der Fall ist.

5.6 Diskussion

Im ersten Teil dieses Kapitels konnte gezeigt werden, daß qualitative Analysen der gesammelten Informationen dazu genutzt werden können, Wirkungszusammenhänge von Fehlerbedingungen zu analysieren und dadurch Verbesserungsmaßnahmen zu optimieren bzw. deren Wirksamkeit abzuschätzen. Weiterhin konnten mit dem hier vorgestellten Vorgehen trotz der unzureichenden Datengrundlagen zentrale Annahmen und Angaben über die menschliche Zuverlässigkeit (Verteilungsannahmen, Human Error Probabilities) aus dem THERP-Katalog für den Bereich deutscher Kernkraftwerke bestätigt werden. Die im THERP-Verfahren angegebenen Unsicherheitsbänder decken die beobachteten Abweichungen der Angaben aus der Betriebserfahrung weitestgehend ab. Durch eine detailliertere Analyse und breitere Anwendung des hier vorgestellten Analyseverfahrens wäre damit zu rechnen, daß die Unsicherheiten in den Daten von THERP noch besser eingeschätzt werden können. Auch konnten bisher nicht alle Items des THERP-Katalogs validiert werden. Für das Alarm-Reaktionsmodell lagen z.B. nicht genügend detaillierte Informationen vor.

Aus der gefundenen Übereinstimmung bei der Quantifizierung ergeben sich abschließend zwei wesentliche Diskussionspunkte: (1) Die Bedeutung von HEP in der menschlichen Zuverlässigkeit und (2) qualitative wie quantitative Aussagen zu Anwendungsfeldern der HRA, zu denen bisher keine gesicherten Angaben gemacht werden können.

5.6.1 Bedeutung von HEP in der menschlichen Zuverlässigkeit

Die gute Übereinstimmung der Angaben des normierten Rasch-Modells mit den THERP-Werten legt den Schluß nahe, das hier vorgestellte Verfahren zur Schätzung von HEP-Werten zu benutzen, obwohl in das Schätzverfahren keine Grundgesamtheiten eingehen, wie es durch Gleichung 2 für HEPs gefordert ist. Demgegenüber liefert das hier vorgestellte Schätzverfahren nur Schätzwerte für Auftretenswahrscheinlichkeiten und nicht für Anforderungswahrscheinlichkeiten. Dieses Vorgehen war notwendig, da aus den Ereignisbeschreibungen nie die Anzahl der durchgeführten Handlungen (der Grundgesamtheiten) bestimmt werden kann und selbst bei Kenntnis aller Fehlhandlungen und Beinahe-Fehlhandlungen keine HEP bestimmt werden können, da immer ein Rest nicht-beobachteter Fälle fehlt. Damit fordert die gute Übereinstimmung auch generelle Überlegungen dazu heraus, ob die 'klassische' HEP-Definition, welche den Menschen wie eine immer gleich funktionierende technische Komponente behan-

delt, überhaupt der Natur menschlicher Verarbeitung und menschlicher Fehlermechanismen entspricht (vgl. hierzu auch Diskussionen in Adams, 1982; sowie Heslinga und Arnold, 1993).

Ein wesentliches Problem der 'klassischen', komponentenbezogenen Sichtweise bezüglich der menschlichen Handlung ist, daß die Komplexität menschlicher Leistungen und Lernfähigkeit dazu führt, daß diese Definition prinzipiell zu beliebigen numerischen Resultaten führen kann, je nach dem, auf welchem Abstraktionsniveau die Aufgaben vom Typ *i* definiert werden bzw. vom Menschen wahrgenommen oder verarbeitet werden. Warum dies so ist, veranschaulichen die folgenden Überlegungen, welche sich auf die menschlichen Leistungen in der Informationsverarbeitung, Wahrnehmung und Handlung beziehen.

- **Problem der Bestimmung eines HEP-Wertes für den Bereich Diagnose**

Gerade bei der Quantifizierung menschlicher Diagnosefähigkeiten über das Diagnosemodell wird deutlich, daß die Angabe von 'echten' HEP grundsätzlich problematisch ist. Dies zeigt folgende Betrachtung: Menschen besitzen die Fähigkeit gleichförmige Reiz-Reaktionsmuster zu lernen und zu automatisieren (vgl. Schneider & Shiffrin, 1977). Auch komplexe Problemlöseprozesse können automatisiert werden (Rasmussen, 1986), so daß bei gleichförmigen Informationsreizen keine Diagnose der Information mehr stattfindet, sondern eine automatische Reaktion auf das Informationsmuster erfolgt. Damit ist die menschliche Informationsverarbeitung ein eher kontinuierlich ablaufender Prozeß (siehe Wickens, 1984). Für eine Quantifizierung folgt daraus, daß die Anzahl der Anforderungen, die für echte HEP erforderlich ist, weder theoretisch noch empirisch bestimmt werden kann. Hauptgründe dafür sind: (1) Die Informationsverarbeitungs-Prozesse für eine eng umrissene Diagnoseaufgabe vom Typ *i* werden mental unterschiedlich verarbeitet und können somit aus der Sicht des Operateurs nicht als eine immer gleich abrufbare mentale Repräsentation vom Typ *i* angesehen werden, wie es die Definition der HEP erfordert. (2) Die Anzahl der mentalen Anforderungen von Diagnosen vom Typ *i* kann nicht bestimmt werden, da eine Diagnose selbst ein eher kontinuierlich ablaufender Verarbeitungsprozeß ist. HEP-Werte bei einer Diagnose vom Typ *i*, die auf der Anzahl der Anforderungen der Diagnose beruhen, sind also allenfalls von theoretischem Wert; sie entsprechen aber nicht den Eigenschaften des Menschen bei der Informationsverarbeitung.

- **Problem der Bestimmung eines HEP-Wertes für den Bereich Wahrnehmung**

Dasselbe Problem ist auch im Bereich Wahrnehmung zu beobachten. Zur Veranschaulichung soll ein Berechnungsbeispiel angenommen werden, bei dem 10 Fehler beim Abarbeiten von Prozeduren beobachtet worden sind und insgesamt 1000 Prozeduren im selben Zeitraum abzuarbeiten waren. Ferner soll idealisiert angenommen werden, daß alle 10 Fehler dadurch zustande gekommen sind, daß ein Buchstabe innerhalb eines Prozedurschrittes falsch gelesen worden ist (z.B. TH 999 einschalten statt TK 999 einschalten) und alle Prozeduren identisch sind. Damit könnte man meinen, daß alle gemäß Gleichung 2 erforderlichen Angaben zur Bestimmung eines HEP-Wertes für Fehler beim Abarbeiten einer Prozedur HEP vorhanden sind und ein HEP-Wert bestimmt werden kann. Der Mensch ist aber in der Lage, nicht Buchstabe für Buchstabe zu lesen, sondern ganze Worte, Sätze oder gar Abschnitte in einem Verarbeitungsschritt zu erfassen, wie Gedächtnis- und Leseversuche gezeigt haben (z.B. in Wickens, 1984). Versucht man einen HEP-Wert zu bestimmen, so stellt man fest, daß dieser abhängig von der Definition der Aufgabe ist, die man als Bezugsgröße angibt. Nimmt man nun an, daß jede Prozedur 10 Prozedurschritte, jeder Prozedurschritt 10 Einzelanweisungen und jede Einzelanweisung 10 Buchstaben enthält, so erhält man für ein und dieselbe Beobachtung die folgenden HEP-Berechnungen:

$$HEP_1 = \frac{\text{Fehler beim Abarbeiten der Prozeduren}}{\text{Anzahl der abzuarbeitenden Prozeduren}} = \frac{10}{1000} = 1,0 * 10^{-2}$$

$$HEP_2 = \frac{\text{Fehler beim Abarbeiten der Prozeduren}}{\text{Anzahl der abzuarbeitenden Prozedurschritte}} = \frac{10}{10000} = 1,0 * 10^{-3}$$

$$HEP_3 = \frac{\text{Fehler beim Abarbeiten der Prozeduren}}{\text{Anzahl der abzuarbeitenden Worte}} = \frac{10}{100000} = 1,0 * 10^{-4}$$

$$HEP_4 = \frac{\text{Fehler beim Abarbeiten der Prozeduren}}{\text{Anzahl der abzuarbeitenden Buchstaben}} = \frac{10}{1000000} = 1,0 * 10^{-5}$$

Somit kann festgehalten werden, daß ein HEP-Wert keine eindeutige Quantifizierung eines menschlichen Wahrnehmungsfehlers darstellt. Dies gilt selbst bei Kenntnis aller notwendigen Angaben, die von der Definition der HEP gefordert wird. Die Ebene dessen, was als Handlung vom Typ *i* angenommen wird, ist durch den Analysierenden durch Einschätzung zu ermitteln.

- **Beispiel der Bestimmung eines HEP-Wertes für den Bereich Handlungen**

Daß auch für die Handlungsausführung streng genommen keine einheitlichen HEP-Werte bestimmt werden können, soll folgendes Gedankenexperiment verdeutlichen: Angenommen, man hat die eng umrissene Aufgabe vom Typ $i =$ "tippen eines Textes". Kennt man die Anzahl der falsch getippten Buchstaben und die Anzahl aller getippten Buchstaben würde sich gemäß der HEP-Definition für diese Aufgabe der folgende HEP-Wert ergeben.

$$HEP = \frac{\text{Anzahl der falsch getippten Buchstaben}}{\text{Anzahl der getippten Buchstaben}}$$

Es zeigte sich jedoch in Versuchen (u.a. von Rummelhart & Norman, 1982), daß Tippfehler (Verdreher, Wortergänzungen und Reduktionen) bezogen auf Sätze, Worte oder Teile des Wortes gemacht werden. Hierdurch ist das zentrale Theorem der Wahrscheinlichkeitsrechnung verletzt, denn dieses setzt voraus, daß die möglichen Zustände (getippte Buchstaben) unabhängig voneinander sein müssen. Streng genommen gäbe es beliebig viele HEP-Werte für diese einfache Handlung (z.B. ergäben sich zwei HEP-Werte für einen Tippfehler, entweder Fehler pro getippte Buchstaben oder Fehler pro getippte Silben). Die Anzahl der Anforderungen ist dabei immer davon abhängig, was als Einheit der Handlung angesehen wird. Man kann festhalten, daß auch für Handlungen keine eindeutigen HEPs angegeben werden können, auch wenn alle Parameter gemäß der HEP-Definition vorhanden sind.

- **Folgerung**

Zusammenfassend kann gefolgert werden, daß die Definition der HEP's vom arbeitswissenschaftlichen bzw. psychologischen Standpunkt her gesehen sehr problematisch ist. Zur Quantifizierung jeglicher menschlichen Leistung (z.B. Wahrnehmung, Kognition, Gedächtnis, Handeln) muß der situative Kontext berücksichtigt werden, um der menschlichen Variabilität, Flexibilität und Kreativität Rechnung zu tragen. Damit wird hier deutlich, was bereits bei der Diskussion der Fehlerdefinitionen in Kapitel 1 und 2 angesprochen wurde: Der Mensch kann nicht als einfache Systemkomponente und somit menschliche Fehler streng genommen nicht mit der klassischen HEP-Definition beschrieben werden. Es ist problematisch, Ausfallwahrscheinlichkeiten für jegliche menschliche Leistung anzugeben und dies selbst dann, wenn alle Angaben gemäß der

HEP-Definition zur Verfügung stehen. Das Hauptproblem liegt in der Bestimmung der Handlungseinheit und der Anzahl der Anforderungen dieser Handlungseinheit. Dieses Problem ist unabhängig vom gewählten HRA-Verfahren. Daraus kann geschlossen werden, daß HEP-Werte gemäß Gleichung 2 in letzter Konsequenz kein sinnvolles Maß zur Quantifizierung menschlicher Fehler darstellen.

Umgekehrt kann hieraus gefolgert werden, daß die mit dem normierten Rasch-Modell gewonnenen HEP-Werte bei einer Frage nach ihrer Anwendbarkeit keiner größeren Kritik ausgesetzt sein können als Werte, die der 'klassischen' HEP-Definition entsprechen. Da zur Integration menschlicher Handlungen in PSA-Studien aber Wahrscheinlichkeiten für menschliche Fehlhandlungen angegeben werden müssen, scheint der in dieser Arbeit vorgestellte Ansatz, aus der Betriebserfahrung Schätzwerte für menschliche Fehlhandlungen zu gewinnen, eine mögliche Lösung dieses prinzipiellen Problems der HEP-Werte zu sein. Durch das hier vorgestellte Verfahren werden Wahrscheinlichkeitsaussagen unabhängig von der Anzahl der mentalen Anforderungen berechnet. Sie sind damit unabhängig von den Mechanismen der Informationsverarbeitung, welche die Anwendungsprobleme der klassischen HEP-Definition hervorrufen.

5.6.2 Vorhersagen zur menschlichen Zuverlässigkeit mit Hilfe eines situativen Bewertungsansatzes

Versucht man ein Resümee aus allen in diesem Kapitel angesprochenen Fehlerarten, Einflußfaktoren und Fehlermechanismen sowie aus den Möglichkeiten der Quantifizierung zu ziehen, so kristallisiert sich insgesamt heraus, daß das hier gewählte Vorgehen zur Validierung umgekehrt auch als ein situativer Bewertungsansatz zur Bewertung der menschlichen Zuverlässigkeit genutzt werden kann. Folgende Gründe sprechen dafür:

- Das MMS ist als grundlegender Ansatz in der Lage, Fehler und Einflußfaktoren sowohl für eine qualitative als auch für eine quantitative Bewertung systematisch zu beschreiben. Dabei wird das Problem der Bewertung der menschlichen Zuverlässigkeit nicht auf eine einfache Beziehung zwischen Fehler und Einflußfaktor reduziert, sondern Wechselwirkungen und situative Gegebenheiten berücksichtigt. Es stellt also einen kontextbezogenen Ansatz dar, der ergonomische, organisatorische und kognitive Faktoren berücksichtigt.

- Der mit dem Ansatz des MMS verbundene systemergonomische Ansatz kann zur Vorhersage bei kognitiven Fehlern, bei zentralen Verteilungsannahmen sowie bei Modellierungsansätzen des THERP-Verfahrens (z.B. Streß-Modell) genutzt werden.
- Durch die Quantifizierung mit dem normierten Rasch-Modell können für den kontextbezogenen Ansatz Auftrittswahrscheinlichkeiten berechnet werden.

Durch die hier vorgestellte kontextbezogene Bewertung menschlicher Handlungen könnten z.B. HEP-Werte für Situationen bestimmt werden, für die bisher keine Bewertungsangaben vorhanden sind. Hierzu zählen u.a. Angaben zur Bewertung von Nicht-Vollastzuständen, Notfallmaßnahmen oder die Bewertung kognitiver Fehler. Da Verwechslungsfehler als wesentliche kognitive Fehlerart identifiziert wurden, seien beispielhaft einige Werte u.a. für Verwechslungsfehler genannt:

- | | |
|---|--------------------|
| • Verwechslungsfehler allgemein | $p(25/165)=0,0099$ |
| • Verwechslungsfehler bei Instandhaltungsaufgaben | $p(10/54)=0,0154$ |
| • Verwechslungsfehler bei Wirksamkeit von Kennzeichnung | $p(2/7)=0,0558$ |
| • Verwechslungsfehler bei Wirksamkeit von Deutlichkeit | $p(1/3)=0,0997$ |
| • Verwechslungsfehler bei Wirksamkeit von Anordnung | $p(1/6)=0,0121$ |
| • Verwechslungsfehler bei Wirksamkeit von Zeitdruck | $p(1/7)=0,0088$ |
| • Fehlerhafte Reaktion auf das Auftreten eines latenten Fehlers | $p(8/48)=0,0121$ |
| • Fehlerhafte Qualitätskontrolle bei Instandhaltungstätigkeiten | $p(4/54)=0,0036$ |
| • Redundanzübergreifende Tätigkeiten als Fehlerauslöser | $p(5/116)=0,0023$ |

6 Abschließende Diskussion der Arbeitsergebnisse

In dieser Arbeit wurde ein Verfahren zur Auswertung von Ereignissen im Hinblick auf Aspekte der menschlichen Zuverlässigkeit entwickelt und angewandt. Eine solche Entwicklung war erforderlich, da bisherige Methoden zur Ereignisauswertung nur einfache Analysen und Bewertungen zulassen, aber auf der anderen Seite die Daten von Bewertungsverfahren, sogenannte HRA (Human Reliability Analysis)- Verfahren, unzureichend bzw. kaum validiert sind. Folgende Ergebnisse konnten dabei in dieser Arbeit erzielt werden, deren Bedeutung abschließend diskutiert werden soll:

1. Eine Methode zur systematischen Beschreibung und Analyse von Ereignissen im Hinblick auf die menschliche Zuverlässigkeit (Beschreibungsmodell).
2. Eine Methode zur Auswertung der Informationen aus Ereignissen im Hinblick auf qualitative und quantitative Aspekte der menschlichen Zuverlässigkeit (Auswertungsmodell).
3. Die Anwendung des Verfahrens auf 165 Ereignisse aus deutschen Kraftwerken, wodurch Erkenntnisse über einige menschliche Fehlermechanismen (z.B. für kognitive Fehler) und Einflußfaktoren gewonnen wurden. Ferner konnten quantitative Angaben zur menschlichen Zuverlässigkeit (wie die des THERP-Verfahrens) verifiziert werden.

• Diskussion des Beschreibungsmodells

Im Gegensatz zu bisherigen Verfahren der Ereignisauswertung handelt es sich bei dem in dieser Arbeit entwickelten Verfahren um ein analytisches und nicht um ein klassifizierendes Verfahren. In dem Verfahren wird ein Ereignis für eine qualitative Fehler- und Ursachenbestimmung systematisch zergliedert, analysiert und beschrieben. Das Analyseverfahren arbeitet sich von allgemeinen Fragen zu gegenständlichen Informationen, die beim Ereignis beobachtbar waren, über Aktionen vor zu Fehlerangaben und Einflußfaktoren. Dieses objektorientierte Vorgehen erleichtert die Analyse insbesondere dann, wenn zunächst nur wenige Informationen über das Ereignis vorhanden sind. Obwohl das hier entwickelte Verfahren auch bekannte Taxonomien aus der Literatur zur Unterstützung bei der Analyse nutzt, ist es nicht an feste, vorgegebene Deskriptoren gebunden; es ist also ein offenes Verfahren. Der Ansatz ermöglicht so auch, daß die originäre Information der Ereignisse erhalten bleibt, und macht die Analyse eines Ereignisses insgesamt nachvollziehbarer. Zudem entfällt der Zwang, ein

Ereignis in ein bestimmtes Klassifikationsschema einordnen zu müssen, welches möglicherweise die tatsächlich beobachteten Aspekte nicht richtig wiedergibt und somit zu Fehlinterpretationen führen kann.

Ein weiterer Grund für die Wahl eines offenen und analytischen Verfahrens war die enorme Komplexität, mit welcher ein menschlicher Fehler in unterschiedlichen Fragestellungen (wie z.B. Bewertung in einer HRA, Ereignisanalyse, organisatorische Aspekte, kognitive Aspekte, sicherheitstechnische Aspekte etc.) behandelt wird. Darüber hinaus sind Fragestellungen wie Einflußfaktoren einem Wandel unterzogen. Offenheit und Flexibilität sind also notwendig, um all diese sowie zukünftige Aspekte gleichermaßen abbilden zu können. Festgelegt wird in diesem Ansatz nur das generische Element für die Analyse menschlicher Fehler bzw. die Fragestruktur: das MMS (Mensch-Maschine System).

Insgesamt ist das Beschreibungsmodell also eine allgemeine Vorschrift zur Auswertung und Analyse von Ereignissen, da es alle relevanten Fragen für die Bewertung menschlicher Zuverlässigkeit stellt und auf der Basis eines wissensbasierten Systems, welches aufgrund neuer Erkenntnisse ständig erweiterbar ist, mögliche Antworten zur Auswahl anbietet (Anhang 1). Das Verfahren ist damit auch ein allgemeingültiges Verfahren zur Analyse von Ereignissen und auf andere technische Bereiche übertragbar (u.a. Verkehrswesen, Prozeßindustrie/chemische Industrie, Medizintechnik).

- **Ergebnisse bezüglich des Auswertungsmodells**

Durch eine derart offene Beschreibung wird die Klassifikationsarbeit aber auch von der Dateneingabe auf die Datenauswertung verlagert. Zur Auswertung der Ereignisse wurde aus diesem Grund ein Auswertungsmodell entwickelt, welches die Informationen, die über das Beschreibungsmodell erfaßt werden, qualitativ und quantitativ auswerten kann. Das Verfahren ermöglicht, innerhalb der gesammelten Ereignisse Häufigkeiten von beliebigen Begriffs-Kombinationen sowie Zusammenhänge (Relationen) zwischen verschiedenen Begriffen zu bestimmen. Hierzu wurde ein konnektionistischer Algorithmus entwickelt, der in Bezug zu SQL (Structured Query Language) basierten Ansätzen eine Reihe von Vorteilen besitzt (vgl. Kapitel 4). Die Methode ist durch ihre Netzstruktur z.B. in der Lage, unscharfe Beziehungen zwischen den Informationen herzustellen und Ähnlichkeiten zwischen verschiedenen Ereignissen abzubilden. Dies kann zum einen dazu genutzt werden, quantitative Angaben für eine Bewertung

menschlicher Zuverlässigkeit abzufragen oder Zusammenhänge verschiedener Informationen (Einflußfaktoren oder Fehlerarten) abzubilden.

Innerhalb der Forschung zur künstlichen Intelligenz stellt dieser Ansatz eine Verbindung zwischen symbolverarbeitenden und assoziativen Systemen her. Damit ist er für eine Vielzahl ähnlich gelagerter Auswertungsprobleme einsetzbar (z.B. Expertensysteme für medizinische Diagnostik, Beratungssysteme für technische Ereignisse bzw. Störungen, Finanzwesen). Der Ansatz ist aber auch in der Lage, typische Eigenschaften menschlicher Informationsverarbeitung nachzuahmen (parallele und serielle Verarbeitung sowie explizite bzw. bewußte gegenüber impliziter bzw. unbewußter Schlußfolgerung) und bietet sich somit auch als eine Möglichkeit der Modellierung menschlicher Kognition innerhalb der kognitiven Psychologie an.

- **Diskussion der Ergebnisse zur menschlichen Zuverlässigkeit**

Durch die Anwendung des Analyseverfahrens auf 165 Ereignisse mit menschlichen Fehlern konnten verschiedene Einflußfaktoren und Mechanismen menschlicher Fehlhandlungen identifiziert sowie einige Möglichkeiten zur Fehlervermeidung abgeleitet werden. Ferner konnten Optimierungsmaßnahmen hinsichtlich ihrer Wirksamkeit untersucht sowie wesentliche Aussagen der probabilistischen Bewertung menschlicher Handlungen für den Bereich deutscher Kernkraftwerke bestätigt werden. Hierzu gehören zentrale Verteilungsannahmen (logarithmische Normalverteilung, Zeit-Zuverlässigkeitsverteilung), Angaben aus dem THERP-Katalog von Swain und Guttmann (1983) und Angaben aus den französischen Simulatorstudien (Mosneron-Dupin, 1993).

Auf Seiten der **qualitativen Analyse** der Ereignisse konnten Verwechslungsfehler auf einen Interferenzeffekt kognitiver Teilfertigkeiten zurückgeführt werden. Ferner wurde im systemergonomischen Ansatz nach Bubb (1992) eine Möglichkeit gefunden, kognitive Fehler innerhalb eines kognitiven Belastungs- und Beanspruchungsmodells zu modellieren. Die bisher nicht bewertbaren kognitiven Fehler sind dabei für moderne Technologien (z.B. Bildschirmwarten) von Bedeutung, da dort der Anteil kognitiv belastender Tätigkeiten für die Operateure und damit auch der Anteil kognitiver Fehlhandlungen zunimmt (Sträter et al., 1995). Neben dem Interferenzeffekt wurden zwei elementare kognitive Verarbeitungsmodi identifiziert: Handlungen ohne Dissonanz führen vornehmlich zu qualitativen Fehlern, Handlungen mit bewußter Kontrolle führen vornehmlich zu Fehlern in der zeitlichen Abfolge. Durch die Ereignisanalyse konnten aus

der Betriebserfahrung auch 30 Einflußfaktoren auf die menschliche Zuverlässigkeit identifiziert werden. Sie stellen eine Erweiterung der in der Literatur genannten Faktoren hinsichtlich der Aspekte dar, die innerhalb des technischen Systems 'Kernkraftwerk' von Bedeutung für die menschliche Zuverlässigkeit sind.

Im Hinblick auf die **probabilistische Auswertung** der Betriebserfahrung wurde ein Modell entwickelt, welches eine Abschätzung von HEP aus der Betriebserfahrung ermöglicht. Mit diesem Modell wurden Auftretenswahrscheinlichkeiten aus der Betriebserfahrung für 79 Items des THERP-Kataloges berechnet und mit diesem verglichen. Insgesamt zeigt sich eine gute Übereinstimmung der Vorhersagen aus der Betriebserfahrung mit den Angaben von THERP. Durch eine detailliertere Analyse und breitere Anwendung des hier vorgestellten Analyseverfahrens wäre damit zu rechnen, daß die Unsicherheiten in den Daten des THERP-Verfahrens noch besser eingeschätzt werden können. Auch konnten bisher nicht alle Items des THERP-Kataloges validiert werden.

Die gute Übereinstimmung der Daten aus der Betriebserfahrung mit dem THERP-Verfahren von Swain und Guttman (1983) läßt ferner den Umkehrschluß zu, daß durch das hier vorgestellte Verfahren genauere bzw. realistischere Schätzwerte für menschliche Fehlerwahrscheinlichkeiten aus der Betriebserfahrung abgeleitet werden können oder Angaben zur menschlichen Zuverlässigkeit gewonnen werden können, zu denen Swain und Guttman keine Angaben machen. Hierzu zählen u.a. Angaben zur Bewertung von Nicht-Volllastzuständen, zu Notfallmaßnahmen, zur Sicherheitsrelevanz menschlicher Fehler oder zur Bewertung kognitiver und organisatorischer Fehler. Der hier vorgeschlagene Schätzprozeß könnte weiter verbessert werden, wenn auch die Ereignisse, in denen der Mensch fehlerfrei in das System eingegriffen hat (in dieser Arbeit als Human Factor relevante Ereignisse bezeichnet), systematisch ausgewertet und zur Schätzung quantitativer Angaben herangezogen werden würden.

- **Abschließende Betrachtungen**

Insgesamt zeigt sich in dieser Arbeit, daß ein einziges Konzept zur Fehlervermeidung und Erhöhung der Zuverlässigkeit des Menschen nicht ausreicht. Erhöhung der menschlichen Zuverlässigkeit kann nur eine integrale Aufgabe sein. Der menschliche Fehler muß dabei so analysiert werden, daß ein Erkenntnisfortschritt über Fehlermechanismen unabhängig von der Schuldfrage und juristischen Konsequenzen möglich wird, denn diese Frage beendet eine systematische Ursachenanalyse, indem die

(vermeintlich) schuldige Person gefunden wird. Aufgrund des multikausalen Charakters eines menschlichen Fehlers ist solch ein einfaches Vorgehen für eine effektive Fehlervermeidung nicht angebracht, und es verhindert nicht das Auftreten schwerwiegender Konsequenzen. Wesentliche Aspekte einer integralen Fehleranalyse, die in dieser Arbeit identifiziert wurden, sind:

- Ergonomische Aspekte bezüglich 'klassischer' Faktoren der Arbeitsumgebung und systemergonomischer Aspekte.
- Berücksichtigung der Eigenschaften der menschlichen Informationsverarbeitung bei der Gestaltung technischer Systeme.
- Berücksichtigung organisatorischer Aspekte, die auf die handelnde Person wirken.

Das hier entwickelte Verfahren liefert für alle Aspekte sinnvolle Informationen, da es (1) nicht einseitig auf einen dieser Aspekte ausgerichtet ist und es (2) erlaubt, komplexe Zusammenhänge abzubilden und auszuwerten. Abschließend betrachtet stellt sich der in dieser Arbeit verfolgte Weg des systemergonomischen Ansatzes als ein geeignetes Verfahren heraus, um menschliche Fehler möglichst vollständig und ohne die Frage nach einer schuldigen Person zu analysieren und zu bewerten.

Literaturverzeichnis

- Abel, D. (1991)** Fuzzy Control - eine Einführung ins Unschärfe. Automatisierungstechnik. Vol. 39-12. R. Oldenbourg. München.
- ACSNI (1991)** Advisory Committee on the Safety of Nuclear Installations. Study Group on Human Factors. Second Report. Human Reliability Assessment- a critical overview. HMSO. London.
- Adams, J. A. (1982)** Issues in Human Reliability. Human factors. 24. p. 1-10.
- Albers, St. (1995)** Zuverlässigkeit des Faktors Mensch und Null-Fehler-Qualität: Ein Widerspruch? Tagung 'Technische Zuverlässigkeit'. Fulda 26./27.09.1995. In: VDI-Berichte 1239: Erfolg durch zuverlässige Technik. VDI-Verlag. Düsseldorf.
- Altrock, C. (1991)** Über den Daumen gepeilt. Fuzzy Logic: Scharfe Theorie der unscharfen Mengen. In: CT - Zeitschrift für Computer Technik. Vol.3. Hans Heise. Hannover.
- Ameling, W. (1990)** Digitalrechner - Grundlagen und Anwendungen. Vieweg. Braunschweig.
- Anderson, J. R. (1983)** The Architecture of Cognition. Harvard University Press. Cambridge, Mass.
- Attneave, F. (1974)** Informationstheorie in der Psychologie. Grundbegriffe, Techniken, Ergebnisse. Hans Huber. Bern, Stuttgart.
- Bainbridge, L. (1987)** The Ironies of Automation. In Rasmussen, J., Duncan, K. & Leplat, J. (Eds.) New Technology and Human Error. Wiley. London.
- Barriere, M., Luckas, W., Whitehead, D. & Ramey-Smith, A. (1994)** An Analysis of Operational Experience During Low Power and Shutdown and a Plan for Addressing Human Reliability Assessment Issues. NUREG/CR-6093. NRC. Washington DC.
- Bartels, K., Hoffmann, H. & Rossinelli, L. (1990)** PAAG Verfahren (HAZOP). Risikobegrenzung in der Chemie. Internationale Sektion der IVSS. Heidelberg
- Becker, G., Hoffmann, S., Wilpert, B., Miller, R., Fahlbruch, B., Fank, M., Freitag, M. Giesa, H. G. & Schleifer, L. (1995)** Analyse der Ursachen von "menschlichem Fehlverhalten" beim Betrieb von Kernkraftwerken. BMU-1996-454. BMU. Bonn (D).
- Berg, H. P. & Schott, H (1992)** Stand von Wissenschaft und Technik auf dem Gebiet der Quantifizierung der menschlichen Zuverlässigkeit. KT- 2/92. BfS. Salzgitter.
- Billows, M. (1993)** Systemergonomische Analyse moderner Prozeßvisualisierung und Gestaltungsverbesserung. Diplomarbeit. Universität Eichstätt. Eichstätt.
- Bley, D., Kaplan, S. & Johnson, D. (1992)** The strength and limitations of PSA: Where we stand. Reliability Engineering and System Safety. Vol.38. Elsevier. p. 3.
- Bollnow, O. F. (1970)** Philosophie der Erkenntnis. 2. Aufl. Kohlhammer. Stuttgart.
- Bonato, M. (1990)** Wissensstrukturierung mittels Strukturlegetechniken: Eine graphentheoretische Analyse von Wissensnetzen. Peter Lang. Frankfurt.
- Borg, I. & Staufenbiel, Th. (1989)** Theorien und Methoden der Skalierung - Eine Einführung. Hans Huber. Bern.
- Bortz, J. (1989)** Statistik für Sozialwissenschaftler. Springer Verlag. Berlin, Heidelberg, New York.

- Broadbent, D. (1958)** Perception and Communications. Pergamon Press. New York.
- Bubb, H. (1992)** Menschliche Zuverlässigkeit. EcoMed. Landsberg.
- Bubb, H. (1993)** Systemergonomie. In: Schmidtke, H. (Hrsg.) Ergonomie. Hanser. München.
- Bubb, H. (1994)** Human Reliability in System Design. in IEC/TC 56/WG11 (1994) Application Guide to Human Reliability - Part 1. IEC/TC 56/WG11 Committee.
- Cacciabue, P. (1992)** Cognitive Modeling: A fundamental issue for human reliability assessment methodology. Reliability Engineering and System Safety. Vol.38. Elsevier. p. 91.
- Chomsky, N. (1965)** Aspects of the theory of syntax. MIT Press. Cambridge, MA.
- Comer, M. K., Seaver, D. A., Stillwell, W. G. & Gaddy, C. D. (1984)** Generating Human Reliability Estimates Using Expert Judgement. Vol 1. NUREG/CR-3688. NRC. Washington DC.
- Crutchfield, J., Farmer, J., Packard, N. & Shaw, R. (1989)** Chaos. In: Chaos und Fraktale. Spektrum der Wissenschaft. Heidelberg.
- Deutschmann, H. (1994)** Internationaler Erfahrungsaustausch und Unterstützung bei der Störfallauswertung im Rahmen der IAEA und OECD NEA. SVA-Ausbildungsseminar 'Ursachenanalyse von Störfällen in Kernkraftwerken. 3.3.1994. Brugg-Windisch, CH.
- DIN 31051.** Instandhaltung - Begriffe und Maßnahmen. Beuth. Berlin.
- DIN 32541.** Betreiben von Maschinen und vergleichbaren technischen Arbeitsmitteln. Beuth. Berlin.
- DIN 4003 (1985)** Allgemeine Forderungen an ein Sicherungsprogramm, Klasse A; Ergonomische Aspekte. Beuth. Berlin.
- DIN 55350.** Begriffe der Qualitätssicherung und Statistik. Beuth. Berlin.
- Dörner, D. (1976)** Problemlösen als Informationsverarbeitung. Kohlhammer. Stuttgart.
- Dorsch, F., Häcker, H. Stapf, K. H. (1994) (Hrsg.)** Dorsch - Psychologisches Wörterbuch. Hans Huber. Bern.
- Dougherty, E. M. & Fragola, J. R. (1988)** Human Reliability Analysis: A Systems Engineering Approach with Nuclear Power Plant Applications. Wiley. New York.
- Dougherty, E. (1992)** Context and Human Reliability Analysis. Reliability Engineering and System Safety. Vol.41. Elsevier. p. 25.
- DRS-B (1990)** Deutsche Risikostudie Phase B. Im Auftrag des BMFT (Hrsg.). TÜV Rheinland Verlag. Köln.
- Eberhard, K. (1987)** Einführung in die Erkenntnis- und Wissenschaftstheorie. Kohlhammer. Stuttgart.
- Ebert, H. (1993)** Scharfer Datenmix. In: CT - Zeitschrift für Computer Technik. Vol.9. Hans Heise. Hannover.
- Edwards, W. (1977)** How to use Multi-Attribute Utility Measurement for Social Decision making. IEEE Transactions on System, Man and Cybernetics. Vol. SMC 7-5. New York.
- Eggerdinger, Chr., Peters, H., Findeisen, W. & Tully, A. (1986)** Ergonomische Prinzipien moderner Informationsdarbietung auf Sichtgeräten und Folgerungen für den Einsatz in Kernkraftwerkswarten. BMJ. Bonn.

- Embrey, D. (1983)** The Use of Performance Shaping Factors and Quantified Expert Judgement in the Evaluation of Human Reliability. NUREG/CR-2986. NRC. Washington DC.
- Embrey, D. (1992)** Incorporating management and organizational factors into probabilistic safety assessment. Reliability Engineering and System Safety. Vol.38. Elsevier. p. 199.
- Embrey, D., Humphreys, P. Rosa, E. A., Kirwan, B. & Rea, K. (1984)** SLIM-MAUD- An Approach to Assessing Human Error Probabilities Using Structured Expert Judgement. NUREG/CR-3518. NRC. Washington DC.
- Emmanji, D., Furuta, K. & Kondo, S. (1992)** A deterministic Model of Plant Operators using Associative Network and Loose Truth Maintenance System. ANP'92. Tokyo.
- Eye, A. von & Marx, W. (1984)** Semantische Dimensionen - Verhaltenstheoretische Konzepte einer psychologischen Semantik. Hogrefe. Göttingen.
- Festinger, L. (1957)** A theory of cognitive dissonance. Stanford University Press. Stanford.
- Fischer, G. H., (1974)** Einführung in die Theorie psychologischer Tests. Verlag Hans Huber. Bern, Stuttgart, Wien.
- Fitts, P. M. (1954)** The Information Capacity of the Human System in Controlling the Amplitude of Movement. Journal of Experimental Psychology. 47. p. 381-391.
- Frieling, E. & Hoyos, Graf C. (1978)** Fragebogen zur Arbeitsanalyse (FAA). Huber. Bern.
- Fu, L. M. (1993)** Knowledge Based Connectionism for Revising Domain Theories. IEEE Transactions on System. Man, and Cybernetics. 23-1.
- Fujita, Y. (1992)** Human Reliability Analysis - A Human Point of View. Reliability Engineering and System Safety. Vol.38. Elsevier.
- Gausepohl, D. (1989)** Programm zur Nicht Metrischen Multidimensionalen Skalierung. Referat zur Vorlesung 'Skalierungsverfahren', Sommersemester 1989. Psychologisches Institut der RWTH Aachen. Aachen.
- Gentner, D. & Stevens, A. (1983) (Eds.)** Mental models. Hillsdale, N. J.:
- Gerdes V. G. J. (1993)** HRA Techniques; A Selection Matrix. KEMA, Risk and Reliability Analysis group, the Netherlands. Accepted for the proceedings of the SRE symposium in Arnhem, The Netherlands, October 1993. p. 12.
- Gerike, R. (1991)** Crash Kurs in C++. Teil 3 Vererbungslehre. In: CT - Zeitschrift für Computer Technik. Vol.12. Hans Heise. Hannover.
- Gerster, H. D. (1972)** Aussagenlogik - Mengen - Relationen. Herder. Freiburg.
- Gertman, D. I., Blackman, H. S., Haney, L. N., Deidler, K. S. & Hahn, H. A. (1992)** INTENT - A Method for Estimating Human Error Probabilities for Decision-based Errors. Reliability Engineering and System Safety. Vol.35. Elsevier. p. 127-136.
- GosAtomNadzor (1992)** The final Report on the mission of GosAtomNadzor of Russia and the Finnish Centre for Nuclear and Radiation Safety on the Leningrad Nuclear Power Plant Safety Assessment. Ministry of the Nuclear Engineering (MinAtom) of Russia.
- Günzel, U. (1993)** Menschen und ihre Rechner am Beispiel AIRBUS. Tagung 'Technische Zuverlässigkeit'. Fulda 26./27.09.1995. In: VDI-Berichte 1239: Erfolg durch zuverlässige Technik. VDI-Verlag. Düsseldorf.

- Guski, R. (1989)** Wahrnehmung: Eine Einführung in die Psychologie der menschlichen Informationsaufnahme. In: Selg, H. & Ulich, D.(Hrsg.) Grundriß der Psychologie (Band VII). Stuttgart. Kohlhammer.
- Hacker, W. (1986)** Fehlhandlungen und Handlungsfehler. In: Hacker, W. (1986) Arbeitspsychologie, Psychische Regulation von Arbeitstätigkeiten. Huber. Bern. p. 417-456.
- Hacker, W., Iwanowa, A. & Richter, P. (1983)** Tätigkeitsbewertungssystem (TBS). Psychodiagnostisches Zentrum der Humboldt Universität. Berlin.
- Handelsby, F. Ness, E. & Teigen, J. (1992)** COPMA-II On-Line-Functional Specification. HWR-319. OECD Halden Reactor Project. Halden, Norway.
- Hannaman, G. W. & Spurgin, A. J. (1984a)** Human Cognitive Reliability Model for PRA Analysis. NUS-4531. NUS-Corp. San Diego.
- Hannaman, G. W. & Spurgin, A. J. (1984b)** Systematic Human action Reliability Procedure (SHARP). EPRI NP-3583. EPRI. Palo Alto. California.
- Harbour J. L. & Hill, S. G. (1991)** HSYS - A Methodology For Analyzing Human Performance in Operating Settings. EG&G. Idaho.
- Harmon, P. & King, D., (1986)** Expertensysteme in der Praxis. Oldenbourg Verlag. München, Wien. p. 182 ff.
- Hauptmanns, U. Hertrich, M. & Werner, W. (1987)** Technische Risiken - Ermittlung und Beurteilung. Springer-Verlag. Berlin.
- Head, H. (1926)** Aphasia and kindred disorders of speech. Cambridge University Press. Cambridge.
- Hebb, D. O. (1949)** The Organization of Behaviour. Wiley. New York.
- Heslinga, G. & Arnold, H. (1993)** Human Reliability: To what extend can we consider Humans as System Components. ENS TOPNEX 1993. Hague, 25-28 April 1993, Netherlands
- Heuer, A. (1992)** Objektorientierte Datenbanken: Konzepte, Modelle, Systeme. Addison Wesley. Bonn, München.
- Hirschberg, S. (1990)** Dependencies, Human Interactions and Uncertainties in Probabilistic Safety Assessment. Final Report of the NKA Project 470. ABB Atom. Sweden.
- Hockey, R. (1984)** Stress and Fatigue. John Wiley & Sons. New York.
- Hollnagel, E. (1992)** The Reliability of Man-Machine Interaction. Reliability Engineering and System Safety. Vol.38. Elsevier. p. 81 ff.
- IAEA-499 (1987)** TECDOC 499. Models and Data Requirements for Human Reliability Analysis. IAEA. Vienna.
- IAEA-50 (1992)** Procedures for Conducting Probabilistic Safety Assessments of Nuclear Power Plants (Level 1). Safety Series No. 50 P. IAEA. Vienna. p. 51 ff.
- IAEA-538 (1990)** TECDOC 538. Human Error Classification and Data Collection. IAEA. Vienna.
- IAEA-632 (1991)** ASSET Guidelines. Revised 1991 Edition. IAEA - International Atomic Energy Agency. Vienna.
- Jastrzebska-Fraczek, I. & Schmidtke, H. (1992)** EDS- Ein ergonomisches Datenbanksystem mit rechnergestütztem Prüfverfahren. In: Zeitschrift für Arbeitswissenschaften. Vol.1/92.

- Johnson, W. (1980)** MORT Safety Assurance Systems. Occupational Safety and Health. Vol. 4. Marcel Dekker. New York.
- Kaarstad M., Follesö K., Collier S., Hauland G., Kirwan B., (1995)** Human Error - The second pilot study. HWR-421. OECD Halden Reactor Project. Halden, Norway.
- Keller, A. (1990)** Allgemeine Erkenntnistheorie. Kohlhammer. Stuttgart.
- Kempke, C. (1988)** Der neuere Konnektionismus: Ein Überblick. Informatik Spektrum, Vol.11. p. 143-162.
- Kieras, D. E. & Polson, R. G. (1985)** An Approach to the formal Analysis of User Complexity. Int. Journal of Man-Machine Studies 4. p. 365-394.
- Kirwan, B., (1994)**, Halden human error analysis experimental programme. HWR-378. OECD Halden Reactor Project. Halden, Norway.
- Kohonen, T. (1988)** Self- Organization and associative Memory. Springer. Berlin.
- Köller, O. Rost, J. & Köller, M. (1994)** Individuelle Unterschiede beim Lösen von Raumvorstellungsaufgaben aus dem IST- bzw. IST-70 Untertest 'Würfelaufgaben'. Zeitschrift für Psychologie. 202. p. 65-85.
- Kotthoff, K. & Voswinkel, A. (1981)** Ein Datenbanksystem zur Handhabung von Meldungen besonderer Vorkommnisse. GRS Jahresbericht 1981. GRS. Köln. p. 55.
- KTA 3501 (1985)** Reaktorschutzsysteme und Überwachungseinrichtungen des Sicherheitssystems. Heymanns Verlag. Köln.
- Lipschutz, S. (1976)** Wahrscheinlichkeitsrechnung - Theorie und Anwendung. Schaum's outline Series. McGraw-Hill. New York.
- Löhr, K. P., Sturm, J. & Welker, W. (1992)** Erleichterte Prozeßführung durch den Einsatz des Prozeß-Informationssystems PRISCA in den Konvoi-Anlagen. In VGB Kraftwerkstechnik 72. VGB - Technischer Verein der Großkraftwerksbetreiber. Essen.
- Lorenz, K. (1978)** Vergleichende Verhaltensforschung. Grundlagen der Ethologie. Berlin. Springer.
- Mandl, H. & Spada, H. (1988)** Wissenspsychologie. Psychologie Verlagsunion. München, Weinheim.
- McClelland, J. & Rummelhart, D. (1981)** An interactive Activation Model of Context Effects in -Letter Perception. Psychological Review, Vol.88, No. 4. p. 375-405.
- Mehl, R. (1995)** Zuverlässigkeit von komplexen Systemen. Arbeitspapier der Arbeitsgruppe Software-Zuverlässigkeit. Mai 1995. DGQ/ITG/VDI.
- Meister, D. (1977)** Human Error in Man-Machine Systems. In: Brown, N. T. (Ed.) Human Aspects of Man-Machine Systems. Open University Press. Milton, England.
- Meister, D. (1985)** Behavioural Analysis and Measurement Methods. Wiley & Sons. New York.
- Meister, D., Hogg, D. N. (1995)** Development of a task descriptive model of the operator's fault diagnosis. A framework for interpreting empirical data within the Human Error Project. HWR 379. OECD Halden Reactor Project. Halden, Norway.
- Miller, G. A. (1956)** The magical number seven plus or minus two: Some limits on our capacity for processing information. Psychological Review, 63. p. 81-97.

- Modarres, M., Mosleh, A. & Wreathall, J. (1992)** A framework for assessing influence of organization on plant safety. *Reliability Engineering and System Safety*. Vol.38. Elsevier. p. 157.
- Moieni, P., Spurgin, A. J. & Singh, A. (1994)** Advances in Human Reliability Analysis Methodology. Part I: Frameworks, Models and Data. *Reliability Engineering and System Safety*. Vol.44. Elsevier. p. 27.
- Mosey, D. (1990)** Reactor Accidents. Nuclear Safety and the role of institutional Failure. Nuclear Engineering International Special Publications. Surrey-UK.
- Mosneron-Dupin, F. (1993)** Systematic Evaluation of the EDF PHRA methodology. EDF. Paris.
- Mosneron-Dupin, F. (1994)** Is Probabilistic Human Reliability Assessment Possible? International Seminar of EDF. November 21-23 1994. EDF. Paris-Clamart/France.
- Mosneron-Dupin, F., Villemeur, A. & Moroni, J. (1990)** Paluel Nuclear Power Plant PSA: Methodology for assessing human reliability. 7th International Conference on Reliability and Maintainability. Brest, France.
- Mosneron-Dupin, F., Reer, B., Heslinga, G., Sträter, O., Gerdes, V., Saliou, G. & Ullwer, W. (submitted)** For more Human-Centered Models in Human Reliability Analysis: Some Trends Based on Case Studies. Submitted 1.1997 for publication in *Reliability Engineering and System Safety*. Elsevier.
- Nauck, D., Klawonn, F. & Kruse, R. (1994)** Neuronale Netze und Fuzzy-Systeme. Grundlagen des Konnektionismus, Neuronaler Fuzzy-Systeme und der Kopplung mit wissensbasierten Methoden. Vieweg. Braunschweig.
- Neumann, O. (1992)** Zum gegenwärtigen theoretischen Umbruch in der Kognitionspsychologie. *Merkur - Zeitschrift für europäisches Denken*. 1. p 48-60.
- NEXPERT (1990)** Nexpert Object Reference Manual. Neuron Data. Palo Alto, California.
- Norman, D. A. (1981)** Categorizing of action slips. *Psychological Review*, Vol.88. p. 1-14.
- Norman, D. A. (1983)** Position Paper on Human Error. Responses to Queries from the Program Committee for the NATO Conference on Human Error. September 1983. Bellagio, Italy.
- O'Hara, J. M. (1994)** Advanced Human-System Interface Design Review Guideline. NUREG/CR 5908. NRC. Washington DC.
- Pearl, J. (1988)** Probabilistic Reasoning in intelligent Systems - Networks of Plausible Inference. Morgan Kaufmann Publishers. San Mateo, California.
- Pedrycz, W. (1989)** Fuzzy Control and Fuzzy Systems. John Wiley & Sons inc. New York
- Preuß, H. P. (1992)** Fuzzy Control - heuristische Regelung mittels unscharfer Logik. Automatisierungstechnische Praxis. Vol. 34-4. R. Oldenbourg. München.
- Rasch, G. (1960)** Probabilistic Models for some Intelligence and Attainment Tests. Nielson & Lydiche. Kopenhagen.
- Rasch, G. (1980)** Probabilistic Models for some Intelligence and Attainment Test. University of Chicago Press. Chicago
- Rasmussen, J. (1986)** Information processing and human-machine interaction. North-Holland. New-York.

- Reason, J. (1976)** Absent minds. New Society. Vol. 4. p. 244-245.
- Reason, J. (1990)** Human Error. Cambridge University Press. Cambridge.
- Reece, W. J., Gibert, B. G. & Richards, R. E. (1994)** Nuclear Computerized Library for Assessing Reactor Reliability (NUCLARR). Data Manual - Part 2: Human Error Probability (HEP) Data. NUREG/CR-4639. NRC. Washington DC.
- Reer, B. & Mertens, J. (1993)** Zukünftige Forschungsthemen zur systematischen Erweiterung der Methodik probabilistischer Mensch-Maschine Systemanalysen. Interner Bericht, KFA-ISR-IB- 9/93. Institut für Sicherheitsforschung und Reaktortechnik [ISR], Forschungszentrum Jülich. Jülich.
- Reer, B. (1988)** Deutsche Übersetzungen und Erläuterungen zu den Daten aus dem Swain-Handbuch über menschlicher Zuverlässigkeit in Kernkraftwerken. KFA-ISR-IB 6/88. KFA-Jülich. Jülich.
- Reer, B. (1993)** Entscheidungsfehler des Betriebspersonals von Kernkraftwerken als Objekt probabilistischer Risikoanalysen. Berichte des Forschungszentrums Jülich; 2811. ISSN 0944-2952. KFA-Jülich. Jülich.
- Reer, B. (1995)** Analyse menschlicher Zuverlässigkeit in technischen Systemen. KFA-ISR-IB 1/95. KFA-Jülich. Jülich.
- Reer, B., Sträter, O. & Mertens, J. (1996)** Evaluation of Human Reliability Methods Addressing Cognitive Error Modeling and Quantification. Jülich; 3222. ISSN 0944-2952. KFA-Jülich. Jülich.
- Reichart, G. (1985)** In: Frey, W., Hörtnner, H., von Linden, J., Rappl, G. & Reichart, G. (1985). Deutsche Precursor Studie - Auswertung anlagenspezifischer Betriebserfahrung im Hinblick auf Vorläufer zu möglichen schweren Kernschäden. Bericht GRS-A- 1149. GRS. Köln.
- Reichart, G. (1992)** In: Bubbs, H. (Hrsg.) Menschliche Zuverlässigkeit. EcoMed. Landsberg. p. 106 ff.
- Rigby, L. (1970)** The Nature of Human Error. In: Annual technical Conference Transactions of the ASQC. Milwaukee.
- Rohmert, W. & Landau, K. (1978)** Arbeitswissenschaftliches Erhebungsinstrumentarium für Tätigkeiten. Huber. Bern.
- Rost, J & Spada, H. (1978)** Probabilistische Testtheorie, in Klauer, K. J. (Hrsg.), Handbuch der pädagogischen Diagnostik, Band 1, Pädagogischer Verlag Schwann. Düsseldorf. p. 59-97.
- Rouse, W. & Rouse, S. (1983)** Analysis and classification of human error. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics. 4. p. 539-549.
- Rummelhart, D. & McClelland, J. (1986) (Eds.)** Parallel Distributed Processing. MIT Press. Cambridge.
- Rummelhart, D. E. & Norman, D. A. (1982)** Simulating a Skilled Typist: A Study of Skilled Cognitive-Motor Performance. Cognitive Science. Vol. 6. p. 1-36.
- Sanders A. F. (1975)** Some remarks on short-term memory. In Rabbitt, P. M. A. & Dornic, S. (Eds.) Attention and Performance V.
- Schandry, R. (1981)** Psychophysiologie. Körperliche Indikatoren menschlichen Verhaltens. Urban & Schwarzenberg. München.
- Schank, R. C. (1975)** Conceptual information processing. Elsevier-North-Holland. Amsterdam.

- Scheffé, P. (1987)** Künstliche Intelligenz- Überblick und Grundlagen. Bibliographisches Institut. Zürich
- Schmidt, R. A. (1975)** A schema theory of discrete motor skill learning. *Psychological Review*, 82. p. 255-260.
- Schneider, W. & Shiffrin, R. W. (1977)** Controlled and automatic human information processing: Decision, search, and attention. *Psychological Review*, 84. p. 1-66.
- Schocken, S. & Hummel, R. A. (1993)** On the use of the Dempster Shafer Model in Information indexing and Retrieval Applications. *International Journal of Man-Machine Studies*. 39. p. 843-879.
- Schuler, H. (1995) (Hrsg.)** Lehrbuch Organisationspsychologie. Hans Huber. Bern, Göttingen, Toronto, Seattle.
- Schult, T. J. (1992)** Orientierung am Konkreten. In: *CT - Zeitschrift für Computer Technik*. Vol.4. Hans Heise. Hannover.
- Seifert, R. & Brauser, K. (1987)**. Taxonomie von Aufgaben des Menschen bei Bedienung und Wartung von Mensch-Maschine Systemen. In: Bernotat, R., Gärtner, K., Widdel, H. (Hrsg.) *Spektrum der Anthropotechnik - Beiträge zur Anpassung technischer Systeme an menschliche Leistungsbereiche*. Forschungsinstitut für Anthropotechnik. Wachtberg-Werthhoven.
- Seifert, R. (1992)** Klassifikation und Prävention menschlicher Arbeitsfehler. In: Gärtner, K. (Hrsg.) *Menschliche Zuverlässigkeit*. DGLR-Bericht 92-04. DGLR. Bonn.
- Semmer, N. (1994)** Der menschliche Faktor in der Arbeitssicherheit: Mechanismen, Verhütung und Korrektur von menschlichen Fehlhandlungen. SVA-Ausbildungsseminar 'Ursachenanalyse von Störfällen in Kernkraftwerken'. 3.3.1994. Brugg-Windisch, CH.
- Shastri, L. (1988)** A Connectionist Approach to Knowledge Representation and Limited Inference. *Cognitive Science*. Vol. 12. p. 331-392.
- Shortliffe, E. H. (1976)** Computer based medical consultations: MYCIN. Elsevier. New York.
- Spanner, B. (1993)** Einfluß der Kompatibilität von Stellteilen auf die menschliche Zuverlässigkeit. VDI Reihe Biotechnik. Nr. 89. VDI Verlag. Düsseldorf.
- Spiegelhalter, D. J., Dawid, A. P., Lauritzen, S. L. & Cowell, R. G. (1993)** Bayesian Analysis in Expert Systems. *Statistical Science*. Vol 8, No. 3. p. 219-283.
- SR2055 (1995)** Untersuchungen der Sicherheitsreserven von Kernkraftwerken bei auslegungsüberschreitenden Ereignissen (Accident Management) Abschlußbericht zum Vorhaben SR2055. GRS. Köln.
- Sternberg, S. (1969)** On the Discovery of Processing Stages, some Extensions of Donders' Method. *Acta Psychologica*. 35. p. 276-315.
- Stoffer, Th. (1989)** Perspektiven konnektionistischer Modelle: Das neuronale Netzwerk als Metapher im Rahmen der kognitionspsychologischen Modellbildung. In Meinecke, C. & Kehrer, L. *Bielefelder kognitionspsychologische Beiträge*. Hogrefe. Göttingen.
- Störig, H. J. (1988)** Kleine Weltgeschichte der Philosophie. 14. Aufl. Kohlhammer. Stuttgart.
- Sträter, O. (1991)** Ein computerunterstütztes Strukturlegeverfahren zur objektorientierten Erfassung von Diagnosestrategien. Diplomarbeit. Institut für Psychologie. RWTH Aachen.

- Sträter, O. (1994)** An Expert Knowledge Oriented Approach For The Evaluation Of The Man- Machine Interface. In: Ruokonen, T. (Ed.) Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes. SAFEPROCESS '94. Finnish Society of Automation. Helsinki, Finland.
- Sträter, O. (1995)** Ergonomic Principles for Accident Management Support. Final Report for the EU Project AMS Refueling. Final Technical Report No. ISTec-A-152. ISTec. Garching.
- Sträter, O., Gerdas, V., Heslinga, G., Reer, B. & Mosneron-Dupin, F. (1995)** PROACTIVE - Procedure to Assess Cognitive Tendencies Inspecting Veritable Errors. Proposal of the EARTH-Working Group for a EU-Research Project on Cognitive Errors. GRS. Köln.
- Strube, G. (1990)** Neokonnektionismus: Eine neue Basis für die Theorie und Modellierung menschlicher Kognition? Psychologische Rundschau, Nr. 41. p. 129-143.
- SVA (1992)** Qualitätsmanagement im Kernkraftwerk. SVA Vertiefungskurs. Höhere Technische Lehranstalt (HTL). Brugg-Windisch, CH. 22.-23.4.1992.
- Swain, A. D. & Guttman, H. E. (1983)** Handbook of Human Reliability Analysis with emphasis on nuclear power plant applications. Sandia National Laboratories, NUREG/CR-1278. Washington DC.
- Swain, A. D. (1987)** Accident Sequence Evaluation Program on Human Reliability Analysis Procedure. NUREG/CR-4772. NRC. Washington DC.
- Swain, A. D. (1989)** Comparative Evaluation of Methods for Human Reliability Analysis. GRS-71. GRS. Köln.
- Swain, A. D. (1992)** Quantitative Assessment of Human Errors. Protokoll des Vortrages bei der GRS im Juni 1992. GRS. Köln.
- Thelwell, P. (1994)** What defines complexity ? In: Robertson, S. A..(Ed.) Contemporary Ergonomics. Taylor and Francis. London. p. 89-94.
- Thurstone, L. L. (1927)** A Law of comparative Judgement. Psychological Review. Vol. 34. p. 273-286.
- Ullwer, W. (1996)** Simulatorinformation als Instrument zur realitätsnahen Modellierung von Personalhandlungen in PSA. Arbeitstitel der Promotion. KFA. Jülich. (in Vorbereitung)
- Van der Ven, A. (1980)** Einführung in die Skalierung. Hans Huber. Bern.
- VDI Nachrichten (1992)** Mit Instrumentenflug in den Tod. VDI-Nachrichten. Nr. 28. VDI. Düsseldorf.
- Wakenhut, R. (1974)** Messung gesellschaftlich-politischer Einstellungen mit Hilfe der Rasch-Skalierung. Hans Huber. Bern.
- Wehner, T. (1984)** Im Schatten des Fehlers - Einige bedeutsame Arbeiten zur Fehlerforschung. Bremer Beiträge zur Psychologie, 34. Universität Bremen.
- Weimer, H. (1931)** Fehler oder Irrtum. Zeitschrift für Pädagogische Psychologie. Vol.32. p. 48-53
- Werner, W., Hirano, M., Kondo, S., Johannson, G., Lanore, J., Murphy, J. (1992)** Results of Recent Risk Studies in France, Germany, Japan, Sweden and the United States. GRS Bericht. GRS. Köln.
- Whittaker, J. (1993)** In: Spiegelhalter, D. J., Dawid, A. P., Lauritzen, S. L. & Cowell, R. G. (1993) Bayesian Analysis in Expert Systems. Statistical Science. Vol 8, No. 3. p. 273 ff.

- Wickens, C. D. (1984)** Engineering Psychology and Human Performance. C. E. Merrill Publishing Company, A Bell & Howell Company. Columbus, Toronto.
- Wiederhold, G. (1981)** Datenbanken. Analyse-Design-Erfahrungen. Oldenbourg. München
- Williams, J. C. (1986)** HEART - A proposed method for assessing and reducing human error. In: 9th Advances in Reliability Technology Symposium. University of Bradford.
- Wilpert, B., Fank, M., Becker, G., Fahbruch, B., Freitag, M., Giesa, H. & Miller, R. (1994)** Weiterentwicklung der Erfassung und Auswertung von meldepflichtigen Vorkommnissen und sonstigen registrierten Ereignissen beim Betrieb von Kernkraftwerken hinsichtlich menschlichen Fehlverhaltens. SR 2039/1. Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Bonn.
- Worledge, D. H., Joksimovich, V., Spurgin, A. J., Villemeur, A., Meslin, T. Mosneron, F. (1988)** EDF/EPRI Collaborative Program on Operator Reliability Experiments. ANS/ENS. Avignon 1988.
- Wright, B. D. & Stone, M. H. (1979)**. Best Test Design, Rasch Measurement. Mesa Press. Chicago.
- Wurst, H. (1993)** Berücksichtigung von Nicht-Vollastzuständen in probabilistischen Sicherheitsanalysen für Kernkraftwerke. GRS Abschlußbericht A-2011. GRS. Köln.
- Zapf, D., Brodbeck, F. C. & Prümper, J. (1989)** Handlungsorientierte Fehlertaxonomie in der Mensch-Computer Interaktion. Zeitschrift für Arbeits- und Organisationspsychologie, Vol.33, P.178-187.
- Zimmermann, H. J. (1990)** Fuzzy Set's Theory - and its Applications. Second Ed. Kluwer. Boston.
- Zimolong, B. & Rohrmann, B. (1988)** Entscheidungshilfe-Technologien. In: Frey, D., Hoyos, C. G. Stahlberg, D. (Hrsg.) Angewandte Psychologie. Psychologie-Verlagsunion. Weinheim, München. p. 624-646.
- Zimolong, B. (1988)** Zuverlässigkeit und Fehler in Arbeitssystemen: Eine psychologische Bestandsaufnahme von Theorien und Methoden. Bochumer Berichte zur Psychologie, Vol. 5. Universität Bochum.
- Zimolong, B. (1990)** Fehler und Zuverlässigkeit. In: Hoyos, C. & Zimolong, B. (Hrsg.) Ingenieurspsychologie. Enzyklopädie der Psychologie. Band III. Hogrefe. Göttingen.
- Zimolong, B. (1992)** Empirical Evaluation of THERP, SLIM and Ranking to Estimate HEPs. Reliability Engineering and System Safety. Vol.35-1. Elsevier. p. 1.

Anhänge

Anhang 1: Darstellung des Datenbanksystems CAHR

Anhang 2: Taxonomien zur Beschreibung menschlicher Handlungen und Fehler

Anhang 3: Beispiel einer Ereignisbeschreibung mit dem Beschreibungsmodell

Anhang 4: Ansätze für das Auswertungsverfahren aus der KI

Anhang 5: Extrakt des Kapitels 20 des THERP-Handbuches

**Anhang 6: Kriterien zur Auswahl der HF Fälle, Abfrageergebnisse zu den THERP-
Tabellen**

Anhang 1: Darstellung des Datenbanksystems CAHR

Das Datenbanksystem CAHR (Connectionism Assessment of Human Reliability, Konnektionistische Beurteilung der menschlichen Zuverlässigkeit) ist ein Werkzeug zur Analyse von Betriebsstörungen, die durch Personalhandlungen oder organisatorische Faktoren zustande kommen. Es wurde unter MICROSOFT ACCESS implementiert. Zur Analyse steht eine generische Wissensbasis zur Verfügung, die sich durch eingegebene Ereignisse selbständig erweitert. Die Wissensbasis enthält Angaben für die Beschreibung des Systemzustandes, der Aufgaben sowie der Fehlermöglichkeiten und Einflußfaktoren. Bild 1-1 zeigt die Grobstruktur der Datenbank.

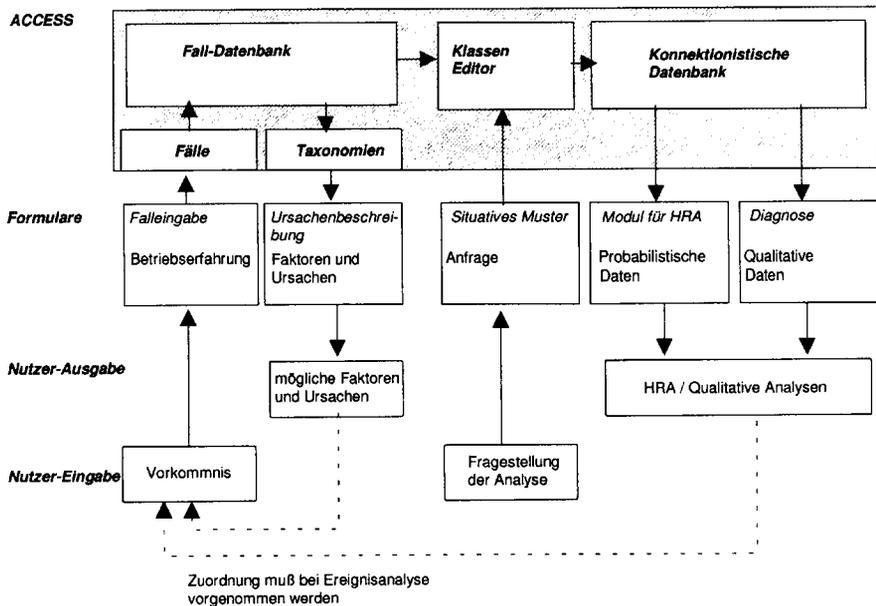


Bild 1-1 Aufbau des Systems.

• Ereigniseingabe

Hier werden alle relevanten Informationen des Ereignisses bezüglich allgemeiner Kennzeichen der Anlage und des Systemzustands eingegeben (Bild 1-2). Durch einfaches Anklicken der Pfeile können schnell alle notwendigen Kennzeichen des Vorganges eingetragen werden. Die Inhalte der Kennzeicheneingabe können auch erweitert werden.



Bild 1-2 Eingabe der Kennzeichen in die Datenbank.

- **Eingabe von Ereignisbeschreibungen**

Die Ereignisbeschreibungen sind in einem Textfeld und einem Kommentarfeld abgelegt (Bild 1-3). Die Felder können mittels Volltextsuche nach bestimmten Begriffen durchsucht werden.

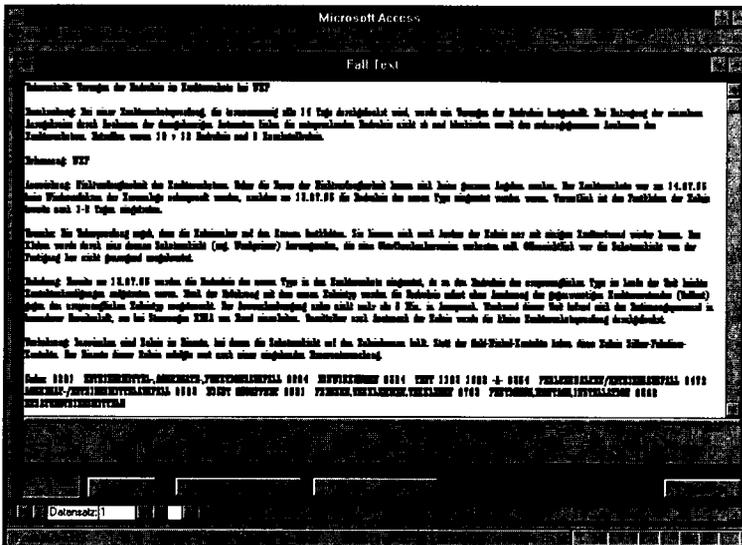


Bild 1-3 Ereignisbeschreibungen in der Datenbank.

- **Eingabe der relevanten Informationen des Ereignisses**

Alle relevanten Informationen zu menschlichen Handlungen werden interaktiv eingegeben. In Bild 1-4 wird beispielhaft die Eingabe in die Datenbank für die Unter-Taxonomie Objekt-Person gezeigt. In der Ereignisanalyse wird die Eingabe von allgemeinen Fragen zu Informationen, die beim Ereignis beobachtbar waren (Objekt, Aktion), zu Fehlerangaben und Einflußfaktoren aufgebaut. Dies geschieht implikativ, d.h. es darf z.B. nur dann ein Fehler in der Spalte 'Angabe' eingetragen werden, wenn bereits ein Objekt und eine Aktion angegeben wurden. Entsprechendes gilt für die Einflußfaktoren in der Spalte 'Eigenschaft'. Hierdurch ist gewährleistet, daß der Wirkungszusammenhang zwischen Aktionen, Fehlern und Einflußfaktoren dargestellt wird und somit festgelegt ist, worauf der Einflußfaktor gewirkt hat.

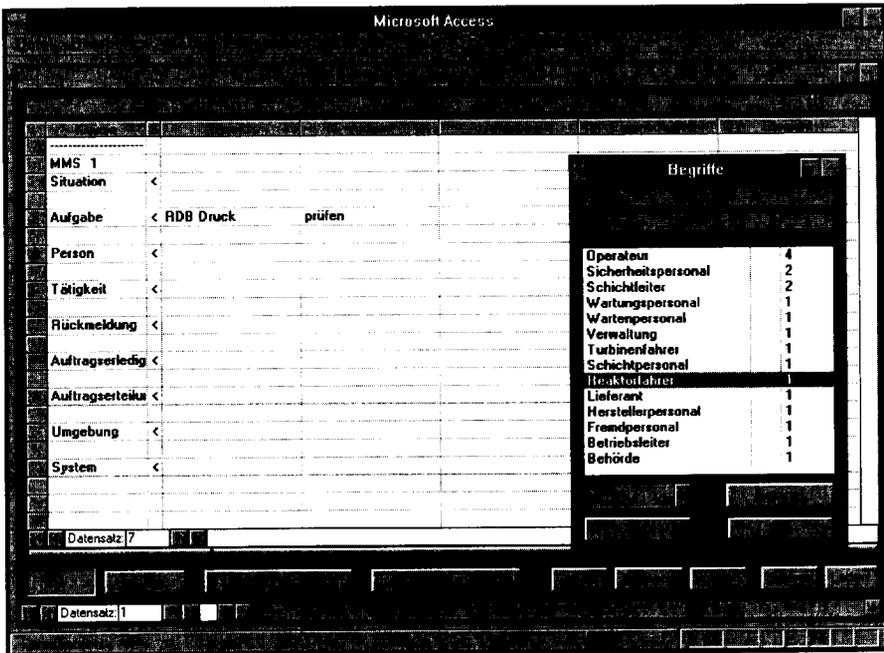


Bild 1-4 Eingabe der HF-Informationen in die Datenbank.

Dieses objektorientierte Vorgehen erleichtert die Analyse von Ereignissen, da von am technischen System beobachtbaren Informationen ausgegangen wird. Es vermeidet zusätzlich eine Schuldzuweisung, da das Ereignis ausgehend von der Fehlersituation und nicht ausgehend von den beteiligten Personen analysiert wird. Um demjenigen,

der mit dem Verfahren ein Ereignis beschreiben will, Entscheidungshilfen bei der Begriffswahl zu bieten, werden die Begriffe nach Nutzungshäufigkeit sortiert.

- **Analyse der Ereignisse**

Der konnektionistische Ansatz läßt qualitative und quantitative Analysen der Daten in einem einheitlichen Modell zu. Hierdurch wird es möglich, sowohl Informationen für die Bewertung der menschlichen Zuverlässigkeit als auch für die Optimierung des technischen Systems in einer einheitlichen Datenbasis zur Verfügung zu stellen. Zunächst können Häufigkeiten von Zusammenhängen beliebiger Begriffe innerhalb der Datenstruktur erfragt werden (z.B. Beziehungen von Fehlern und Einflußfaktoren). Zulässige logische Verknüpfungen zwischen Begriffen sind dabei UND, ODER, UND NICHT bezogen auf die verschiedenen Klassen des MMS und die verschiedenen Beschreibungsstufen (Objekt, Aktion, Angabe, Eigenschaft). Durch den konnektionistischen Ansatz können alle diese Analysemöglichkeiten auf einem beliebigen Detaillierungsgrad der Ereignisbeschreibung (für einzelne Begriffe oder allgemeine Klassen) durchgeführt werden.

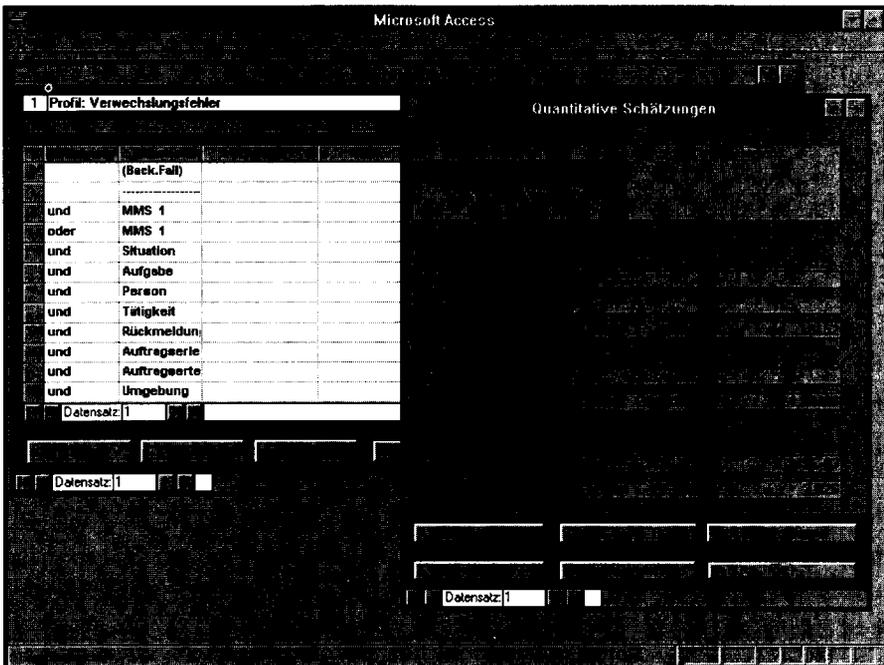


Bild 1-5 Darstellung einer quantitativen Abfrage in dem Datenbanksystem.

Für jeden Zusammenhang, der mit einer Häufigkeit größer als null beobachtet wurde, können dann aufgrund aller bisher beobachteten Fällen vorhandenen Informationen qualitativen Zusammenhänge bestimmt werden. Eine typische Anfrage an die gesammelten Daten wäre z.B.: "Wieviele Verwechslungsfehler wurden beobachtet, welche Einflußfaktoren wurden beobachtet und welche Vorkehrungen gegen eine Wiederholung wurden eingeleitet?" Bild 1-6 und Bild 1-7 zeigen diese Abfrage innerhalb der Datenbank. Sie wird vom Datenbanksystem mit verschiedenen Listen beantwortet, wobei die gewonnenen Informationen bis hin zu den einzelnen Fällen zurückverfolgt werden können.

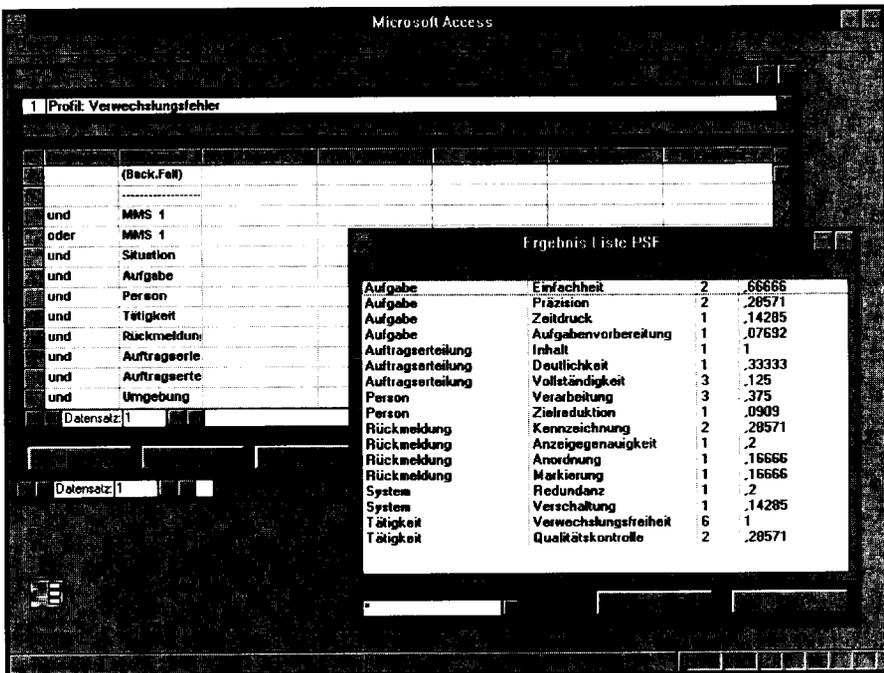


Bild 1-6 Darstellung einer qualitativen Abfrage in dem Datenbanksystem.

- **Klasseneditor**

Durch einen Klasseneditor können auch neue Ober-/ Unterbegriffsbeziehungen beliebiger Begriffe hergestellt werden und in der Ereignisanalyse so benutzt werden, als wenn sie selbst genannt wurden (Bild 1-7).

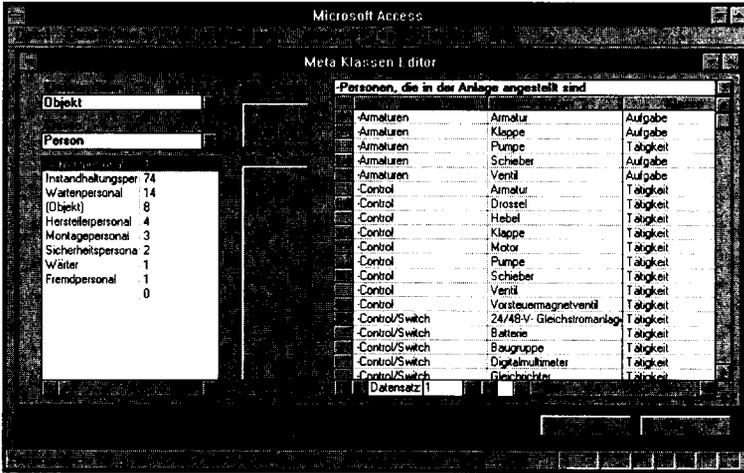


Bild 1-1 Darstellung der Klassenbildung.

- **Tabellen oder Diagrammerstellung**

Eine weitere Aufbereitung der Daten kann durch Abfragen und Kreuztabellen geschehen, um einfache Zusammenhänge oder Wechselbeziehungen in Form von Tabellen oder Diagrammen darzustellen. Abfragen werden interaktiv gestaltet und werden abgespeichert. Die Daten können auf verschiedene Weise graphisch aufbereitet werden. Zur Variation der graphischen Aufbereitung stehen sämtliche Möglichkeiten von üblichen WINDOWS Produkten zur Verfügung (z.B. kopieren der Graphiken und Tabellen in Textverarbeitung oder Tabellenkalkulationen).

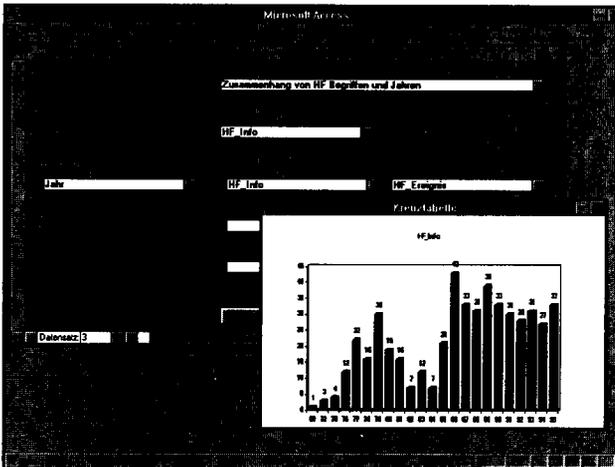


Bild 1-2 Auswertung der Kennzeichen in dem Datenbanksystem.

Anhang 2: Taxonomien zur Beschreibung menschlicher Handlungen und Fehler

Im folgenden werden verschiedene Taxonomien zur Beschreibung von HF-Ereignissen aus der Literatur zusammengestellt. Sie wurden in dem in Anhang 1 dargestellten Datenbanksystem zur Analyseunterstützung genutzt und sind dementsprechend auf die verschiedenen Komponenten des MMS aufgeteilt worden. Folgende Quellen für die Aufstellung Gesamt-Taxonomie zur Beschreibung menschlicher Fehler wurden genutzt:

- BuS Seifert und Brauser (1987)
- HRP Taxonomie des Halden Reactor Project zur Gestaltung automatischer Prozeduren (siehe Handelsby et al., 1992)
- Fujita Fujita (1992)
- GLaw Gestaltgesetze (z.B. in Guski, 1989)
- HSYS Harbour und Hill (1991)
- S Seifert (1992)
- TAG / GOMS Task Action Grammar, wie sie z.B. im GOMS-Modell nach Kieras und Polson (1985) Verwendung findet

Eine Reihe weiterer Deskriptor-Listen werden von unterschiedlichen Betreibern und Behörden genutzt (z.B. EDF - Electricite de France, NRC - US-Nuclear Regulatory Commission, RWE - Rheinisch-Westfälische Elektrizitätswerke). Diese sind hier nicht explizit aufgeführt, können aber ohne Probleme in die vorgegebene Struktur des MMS eingeordnet und im Datenbankprogramm verwendet werden. Zu diesen Deskriptor-Listen siehe auch Wilpert et al. (1994).

Klasse	Objekt	Aktion	Eigenschaft	Angabe	Element	Quelle
Aufgabe			Anzahl der Reize	zu viel	Reize pro Kanal	HSYS
Aufgabe			Aufgabenanforderung	zu hoch		HSYS
Aufgabe			Aufgabenorganisation		Aufgaben-gruppierung	HSYS
Aufgabe			Aufgabenorganisation		Aufgabenpla-zierung	HSYS
Aufgabe			Aufgabenorganisation		Aufgabense-quenz	HSYS
Aufgabe			Aufgabenstel-lung		Information	HSYS
Aufgabe			Aufgabenstel-lung		Präzision	HSYS
Aufgabe			Ereignistyp	überraschend		BuS
Aufgabe			Ereignistyp	überlappend		HSYS
Aufgabe			Ereignistyp	vorhersehbar		BuS
Rückmeldung			Gruppierung		Funktion	HSYS
Rückmeldung			Gruppierung		Häufigkeit	HSYS
Rückmeldung			Gruppierung		Sequenz	HSYS
Rückmeldung			Gruppierung		Wichtigkeit	HSYS
Rückmeldung			Gruppierung		Wichtigkeit	HSYS
Aufgabe			Häufigkeit	gewohnt		BuS
Aufgabe			Korrigierbarkeit	möglich		BuS
Aufgabe			Korrigierbarkeit	nicht bedacht		HSYS
Aufgabe			Korrigierbarkeit	nicht genutzt		HSYS
Aufgabe			Korrigierbarkeit	nicht gut gelöst		HSYS
Aufgabe			Korrigierbarkeit	nicht vorgese-hen		HSYS
Aufgabe			Korrigierbarkeit	sicher möglich		BuS
Aufgabe			Korrigierbarkeit	unmöglich		BuS
Aufgabe			Risikofaktor	mäßig		BuS
Aufgabe			Risikofaktor	ohne Risiko		BuS
Aufgabe			Risikofaktor	schlecht		BuS
Aufgabe		auswählen				BuS /TAG
Aufgabe		entscheiden				BuS
Aufgabe		erinnern				BuS
Aufgabe		erkennen				BuS
Aufgabe		identifizieren				BuS
Aufgabe		merken				BuS
Aufgabe		rechnen				BuS
Aufgabe		schätzen				BuS
Aufgabe		suchen				HSYS
Aufgabe		transformieren				BuS
Aufgabe		vergleichen				BuS
Aufgabe		wählen				BuS
Aufgabe		zum Ziel bewegen				TAG
Aufgabe	Beschleuni-gung					BuS
Aufgabe	Größe/Wert					BuS
Aufgabe	Kraft/Druck					BuS
Aufgabe	Menü					TAG
Aufgabe	Position					BuS
Aufgabe	Rate/Fre-quenz					BuS
Auftragserteil.	Instruktion				Warte	HRP
Auftragserteil.			Belohnungs-struktur		Qualität	HSYS
Auftragserteil.			Belohnungs-struktur		Quantität	HSYS
Auftragserteil.			Führungsfä-higkeiten			Fujita
Auftragserteil.			Hierarchieebe-nen		Vorgesetzter/ Untergebenen Verhältnis	Fujita
Auftragserteil.			Instruktionen	nicht wie nötig		BuS

Klasse	Objekt	Aktion	Eigenschaft	Angabe	Element	Quelle
Auftragsteil.			Instruktionen	unzureichend		BuS
Auftragsteil.			Instruktionen	vorhanden		BuS
Auftragsteil.			Kommunikation			HSYS
Auftragsteil.			Koordination	mangelhaft		HSYS
Auftragsteil.			Management Politik			HSYS
Auftragsteil.			Personal		Beziehungs-konflikt	Fujita
Auftragsteil.			Personal		Koordination	HSYS
Auftragsteil.			Personal		Peer Gruppen	HSYS
Auftragsteil.			Personal		Peer Normen	HSYS
Auftragsteil.			Personal		Überstunden	HSYS
Auftragsteil.			Personal		Zusammen-setzung	Fujita
Auftragsteil.			Personal		Zusammenar-beit	HSYS
Auftragsteil.			Personal		Zusammen-gehörigkeit	HSYS
Auftragsteil.			Personalaus-wahl		Auswahlkriterien	HSYS
Auftragsteil.			Personalaus-wahl		Detaillierungs-grad	HSYS
Auftragsteil.			Personalaus-wahl		Genauigkeit	HSYS
Auftragsteil.			Personalaus-wahl		Information	HSYS
Auftragsteil.			Personalaus-wahl		Menge der qualifizierte Bewerber	HSYS
Auftragsteil.			Personalaus-wahl		Persönliche Fähigkeiten	HSYS
Auftragsteil.			Personalaus-wahl		Personalcha-rakter	HSYS
Auftragsteil.			Personalaus-wahl		Plazierung	HSYS
Auftragsteil.			Personalaus-wahl		Prozedur	HSYS
Auftragsteil.			Personalaus-wahl		Qualität	HSYS
Auftragsteil.			Personalaus-wahl		Vollständigkeit	HSYS
Auftragsteil.			Training			Fujita
Auftragsteil.			Training		Bedeutung der Überweisung zum Training	HSYS
Auftragsteil.			Training		Bestehens-kriterien	HSYS
Auftragsteil.			Training		Formate	HSYS
Auftragsteil.			Training		Inhalte	HSYS
Auftragsteil.			Training		Instruktionen	HSYS
Auftragsteil.			Training		Kriterien	HSYS
Auftragsteil.			Training		Möglichkeit zum Training	HSYS
Auftragsteil.			Training		Motivation	HSYS
Auftragsteil.			Training		Simulatorer-fahrung/ Praxis	HSYS
Auftragsteil.			Training		Prozedur	HSYS
Auftragsteil.			Training		Prozedur	HSYS
Auftragsteil.			Training		Quantität	HSYS
Auftragsteil.			Training		Rechtliche An-forderungen	HSYS
Auftragsteil.			Training		Schalhand-lungen	HSYS
Auftragsteil.			Training		Testprozeduren	HSYS
Auftragsteil.			Training		Tests	HSYS
Auftragsteil.			Training		Trainingsplan	HSYS
Auftragsteil.			Überstunden	zu viel		HSYS
Auftragsteil.	Schichtplan					HSYS
Auftragsteil.	Vorschriften		Verletzung			HSYS
Auftragsteil.	Instruktion				Beenden	HRP

Klasse	Objekt	Aktion	Eigenschaft	Angabe	Element	Quelle
Auftragserteil.	Instruktion				Beginnen	HRP
Auftragserteil.	Instruktion				Check	HRP
Auftragserteil.	Instruktion				Gosub	HRP
Auftragserteil.	Instruktion				Goto	HRP
Auftragserteil.	Instruktion				manuelle Handlung	HRP
Auftragserteil.	Instruktion				manueller Check	HRP
Auftragserteil.	Instruktion				Monitor	HRP
Auftragserteil.	Instruktion				Nachricht	HRP
Auftragserteil.	Instruktion				Return	HRP
Auftragserteil.	Prozedur				Achtung- Texte	HSYS
Auftragserteil.	Prozedur				Arbeitsanweisung	S
Auftragserteil.	Prozedur				Beschreibung	HRP
Auftragserteil.	Prozedur				Bedienungsanleitung	S
Auftragserteil.	Prozedur				Bedingungen	HSYS
Auftragserteil.	Prozedur				Begrenzungen	HSYS
Auftragserteil.	Prozedur				Betriebshandbuch	S
Auftragserteil.	Prozedur				Betriebsunterlage	S
Auftragserteil.	Prozedur				Betriebsvorschriften	S
Auftragserteil.	Prozedur				Checkliste	S
Auftragserteil.	Prozedur				Dokumentationshilfen	S
Auftragserteil.	Prozedur				Entscheidungslogik	HSYS
Auftragserteil.	Prozedur				Flußdiagramm	HSYS
Auftragserteil.	Prozedur				Freischaltkatalog	S
Auftragserteil.	Prozedur				Graphiken	HSYS
Auftragserteil.	Prozedur				Handlungsschritt -Referenz	HSYS
Auftragserteil.	Prozedur				Heraushebungstechniken	HSYS
Auftragserteil.	Prozedur				Hinweise	HSYS
Auftragserteil.	Prozedur				Instruktion	S/HRP
Auftragserteil.	Prozedur				Interpunktion	HSYS
Auftragserteil.	Prozedur				Montageanleitung	S
Auftragserteil.	Prozedur				Notfallhandbuch	S
Auftragserteil.	Prozedur				OHB	S
Auftragserteil.	Prozedur				Planungsunterlagen	S
Auftragserteil.	Prozedur				Prüfanweisung	S
Auftragserteil.	Prozedur				Prüfvorschrift	S
Auftragserteil.	Prozedur				Ränder	HSYS
Auftragserteil.	Prozedur				Ränder	HSYS
Auftragserteil.	Prozedur				Schritt	HRP
Auftragserteil.	Prozedur				SIM-Schein FR	S
Auftragserteil.	Prozedur				Spacing	HSYS
Auftragserteil.	Prozedur				Symptomorientiert	HSYS
Auftragserteil.	Prozedur				Tabellen	HSYS
Auftragserteil.	Prozedur				Typographie	HSYS
Auftragserteil.	Prozedur				Überblick	HSYS
Auftragserteil.	Prozedur				Vokabular	HSYS
Auftragserteil.	Prozedur				Warnungen	HSYS
Auftragserteil.	Prozedur				Wartungsbuch	S
Auftragserteil.	Prozedur		Abbruchkriterien	unzureichend	Erkennen des Prozedurabbruchs	HSYS
Auftragserteil.	Prozedur		Abbruchkriterien	unzureichend	Instruktionen für die nächste Aktion	HSYS

Klasse	Objekt	Aktion	Eigenschaft	Angabe	Element	Quelle
Auftragserteil.	Prozedur		Abbruchkriterien	unzureichend	Voraussetzung nicht erfüllt	HSYS
Auftragserteil.	Prozedur		Auffindbarkeit	fehlt		HSYS
Auftragserteil.	Prozedur		Berechnungen		Übereinstimmung quantitativer Grenzen	HSYS
Auftragserteil.	Prozedur		Berechnungen		Informationseingabe	HSYS
Auftragserteil.	Prozedur		Berechnungen		Spacing/Layout der Hilfsmittel	HSYS
Auftragserteil.	Prozedur		Berechnungen		Technische Richtlinien	HSYS
Auftragserteil.	Prozedur		Berechnungen		Validierung und Verifizierung	HSYS
Auftragserteil.	Prozedur		Identifizierbarkeit			HSYS
Auftragserteil.	Prozedur		Praxisbezug			HSYS
Auftragserteil.	Prozedur		Verifizieren automatischer Aktionen			HSYS
Auftragserteil.	Prozedur		Verifizieren der Bedingungen			HSYS
Auftragserteil.	Prozedur		Verifizieren unmittelbarer Aktion			HSYS
Person				schlecht		HSYS
Person				unzureichend		HSYS
Person			Aktionsoptionen	unbekannt		HSYS
Person			Aufmerksamkeit			HSYS
Person			Aufmerksamkeit		Geschwindigkeit	HSYS
Person			Aufmerksamkeit	mittel		BuS
Person			Aufmerksamkeit	sehr gering		BuS
Person			Aufmerksamkeit	sehr hoch		BuS
Person			Aufmerksamkeit	überfordert		HSYS
Person			Erfahrung	mittel		BuS
Person			Erfahrung	sehr gering		BuS
Person			Erfahrung	sehr hoch		BuS
Person			Ermüdung			HSYS
Person			Fähigkeit		Prozedur	HSYS
Person			Verarbeitung		Figurale Ähnlichkeit	GLaw
Person			Verarbeitung		Hilflosigkeit	Fujita
Person			Verarbeitung		Informationsfokussierung / Tunneleffekt	Fujita
Person			Verarbeitung		Intellekt	Fujita
Person			Verarbeitung		Tendenz zur guten Gestalt	GLaw
Person			Verarbeitung		Verstehen	HSYS
Person			Verarbeitung		Wahrnehmungsgeschwindigkeit	HSYS
Person			Verarbeitung		Zeitliches Zusammentreffen	GLaw
Person			Verarbeitung		Zielkonflikte	HSYS
Person			Kompatibilität		Aufgabe zu Tätigkeit	HSYS
Person			Leistungsvoraussetzung		Alter	Fujita
Person			Leistungsvoraussetzung		Erfahrung	Fujita
Person			Leistungsvoraussetzung		Ermüdung	HSYS
Person			Leistungsvoraussetzung		Fähigkeit	HSYS
Person			Leistungsvoraussetzung		Individuelle Kapazität	HSYS
Person			Leistungsvoraussetzung		Langeweile	HSYS

Klasse	Objekt	Aktion	Eigenschaft	Angabe	Element	Quelle
Person			Leistungsvoraussetzung		Leistungsorientiertheit	Fujita
Person			Leistungsvoraussetzung		Verfügbarkeit der Ressourcen	HSYS
Person			Leistungsvoraussetzung		Wissen	HSYS
Person			Motivation			HSYS
Person			Motivation	ablehnend		BuS
Person			Motivation	hoch		BuS
Person			Motivation	mäßig		BuS
Person			Persönlichkeit		Alkohol/Drogen	HSYS
Person			Persönlichkeit		Angste	Fujita
Person			Persönlichkeit		Depression	Fujita
Person			Persönlichkeit		Ehrgeiz	Fujita
Person			Persönlichkeit		Krankheit	HSYS
Person			Persönlichkeit		Opportunismus	Fujita
Person			Persönlichkeit		personeller Hintergrund	Fujita
Person			Persönlichkeit		physische Eigenschaften	Fujita
Person			Streß			Fujita
Person			Streß		Arbeitsbezogen	HSYS
Person			Streß		Arbeitsumgebung	HSYS
Person			Streß		Aufgabenbezug	HSYS
Person			Streß		Aufgabenüberforderung	HSYS
Person			Streß		empfundener	Fujita
Person			Streß		Personenbezogen	HSYS
Person			Verstehen		Person unzureichend	HSYS
Person			Verstehen		Prozedur schlecht	HSYS
Person			Verstehen		Schritte unbekannt	HSYS
Person			Verstehen		Verständnis über Abläufe	HSYS
Person			Wissen		Erforderliches Wissen	HSYS
Person			Wissen		Individuelle Kapazität	HSYS
Person			Wissen		Personal Auswahl	HSYS
Person			Wissen		Personal Training	HSYS
Person			Wissen		um Aktionskonsequenzen	HSYS
Person			Wissen		um Aktionsoptionen	HSYS
Person			Wissen		um Richtigkeit der Prozedur	HSYS
Person			Wissen	unzureichend	über Inputsignal/Cue	HSYS
Person			Wissen	unzureichend	über Suchbereich	HSYS
Person			Wissen	unzureichend	über Suchbereich	HSYS
Person			Wissen	unzureichend	um alternative Erklärungen	HSYS
Person			Wissen	unzureichend	um Kriterien	HSYS
Person			Wissen	unzureichend	um Prioritäten	HSYS
Person			Zielkonflikte			HSYS
Rückmeldung ; Tätigkeit;			Lage	ungünstig		HSYS
Rückmeldung ; Tätigkeit;			Nutzerfreundlichkeit		Design	HSYS
Rückmeldung ; Tätigkeit;			Quantität	zu viel		HSYS

Klasse	Objekt	Aktion	Eigenschaft	Angabe	Element	Quelle
Rückmeldung ; Tätigkeit;			Quantität	zu wenig		HSYS
Rückmeldung ; Tätigkeit;			Verfügbarkeit		Arbeitsmittelstatus	HSYS
Rückmeldung ; Tätigkeit;			Verfügbarkeit		Informationsstatus	HSYS
Rückmeldung ; Tätigkeit;			Verfügbarkeit		Kapitalstatus	HSYS
Rückmeldung ; Tätigkeit;			Verfügbarkeit		Personalstatus	HSYS
Rückmeldung ; Tätigkeit;			Verfügbarkeit		Zeit Zustand	HSYS
Rückmeldung ; Tätigkeit;			Wartbarkeit			HSYS
Rückmeldung					Zahlenfolge	BuS
Rückmeldung					Ziffer	BuS
Rückmeldung				fehlt		HSYS
Rückmeldung			Angemessenheit			HSYS
Rückmeldung			Display/Control Integration		C/R Ratio	HSYS
Rückmeldung			Display/Control Integration		Gestaltung der Konsole	HSYS
Rückmeldung			Display/Control Integration		Gruppierung	HSYS
Rückmeldung			Display/Control Integration		Kompatibilität/ Konsistenz	HSYS
Rückmeldung			Eindeutigkeit		Auflösung des Display schlecht	HSYS
Rückmeldung			Eindeutigkeit		Display schlecht	HSYS
Rückmeldung			Eindeutigkeit		Signalstärke zu gering	HSYS
Rückmeldung			Erkennbarkeit	nicht möglich		HSYS
Rückmeldung			Erkennbarkeit	schlecht	Bedeutung des Inputs	HSYS
Rückmeldung			Erkennbarkeit	schlecht	Wissen um alternative Erklärungen	HSYS
Rückmeldung			Erkennbarkeit	zu niedrig		HSYS
Rückmeldung			Farbgebung			BuS
Rückmeldung			Fehlfunktion			HSYS
Rückmeldung			Gestaltung		Abgrenzungen	HSYS
Rückmeldung			Gestaltung		Benutzerdefinition	HSYS
Rückmeldung			Gestaltung		Farbgebung/ Schattierungen	HSYS
Rückmeldung			Gestaltung		Label/Codierung	HSYS
Rückmeldung			Gestaltung		Menschliche physische Grenzen	HSYS
Rückmeldung			Gestaltung		Populationsstereotypen	HSYS
Rückmeldung			Gestaltung		Pult Inhalte	HSYS
Rückmeldung			Gestaltung		Spacing	HSYS
Rückmeldung			Gestaltung		Wartungsgestaltung	HSYS
Rückmeldung			Hinweisreize		auditiv	HSYS
Rückmeldung			Hinweisreize		kinästhetisch	HSYS
Rückmeldung			Hinweisreize		taktil	HSYS
Rückmeldung			Hinweisreize		visuell	HSYS
Rückmeldung			Identifizierbarkeit			HSYS
Rückmeldung			Darbietung	nicht ausreichend		BuS
Rückmeldung			Darbietung	sehr wenig		BuS
Rückmeldung			Darbietung	störend		BuS
Rückmeldung			Darbietung	unzureichend		HSYS
Rückmeldung			Input Output Frequenz	zu niedrig		HSYS

Klasse	Objekt	Aktion	Eigenschaft	Angabe	Element	Quelle
Rückmeldung			Kennzeichnung		Qualität des Aufdrucks	HSYS
Rückmeldung			Kennzeichnung		Lesbarkeit	HSYS
Rückmeldung			Kennzeichnung		Skalierung	HSYS
Rückmeldung			Konsequenzen	nicht akzeptabel		HSYS
Rückmeldung			Reizanzahl	zu hoch		HSYS
Rückmeldung			Sensor/Display Cue	fehlt		HSYS
Rückmeldung			Unterscheidbarkeit			HSYS
Rückmeldung			Verfahrenstechnisches Verhalten			HSYS
Rückmeldung			Vorhersehbarkeit	unzureichend		HSYS
Rückmeldung			Zeitverhalten		Input/ Output Frequenz zu niedrig	HSYS
Rückmeldung			Zeitverhalten		Zugriffsgeschwindigkeit	HSYS
Rückmeldung			Zugriffsgeschwindigkeit	zu langsam		HSYS
Rückmeldung			Zuverlässigkeit			HSYS /Fujita
Rückmeldung		hören				BuS
Rückmeldung		lesen				BuS
Rückmeldung		vernehmen				BuS
Rückmeldung	Anzeige				Balkenanzeige	S
Rückmeldung	Anzeige				Digitalanzeige	S
Rückmeldung	Anzeige				Kreisbogenanzeige	S
Rückmeldung	Anzeige				Lampe	S
Rückmeldung	Anzeige				Lampenfeld	S
Rückmeldung	Anzeige				Lautsprecher	BuS
Rückmeldung	Anzeige				LCD-Feld	S
Rückmeldung	Anzeige				LED-Feld	S
Rückmeldung	Anzeige				Signalfahne	BuS
Rückmeldung	Anzeige				Zeigerinstrument	BuS
Rückmeldung	Bildschirm				Menü	BuS
Rückmeldung	Bildschirm				multifunktional	BuS
Rückmeldung	Bildschirm				optisch	BuS
Rückmeldung	Display/ Control		Trennbarkeit			HSYS
Rückmeldung	Melder				Geräusch	BuS
Rückmeldung	Melder				Kopfhörer	BuS
Rückmeldung	Melder				Lautsprecher	BuS
Rückmeldung	Melder				Ton	BuS
Rückmeldung	Melder				Tonfolge/Melodie	BuS
Rückmeldung	Pult				Schalterfeld	BuS
Rückmeldung	Pult				Schalterstellung	BuS
Rückmeldung	Pult		Begrenzungslinien			HSYS
Rückmeldung	Pult		Displayaufteilung			HSYS
Rückmeldung	Pult		Erkennbarkeit	schlecht		HSYS
Rückmeldung	Pult		Farbgebung			HSYS
Rückmeldung	Pult		Identifizierbarkeit			HSYS
Rückmeldung	Pult		Spacing			HSYS
Rückmeldung	Pult		Trennbarkeit			HSYS
Situation			Zeitbudget	gerade ausreichend		BuS
Situation			Zeitbudget	mit Reserve		BuS
Situation			Zeitbudget	zu gering		HSYS
Situation			Zeitbudget	zu kurz		BuS
Situation	Zeitangabe				Aktionsauswahl	HSYS

Klasse	Objekt	Aktion	Eigenschaft	Angabe	Element	Quelle
Situation	Zeitangabe				Aktionsplanung	HSYS
Situation	Zeitangabe				Erkennung	HSYS
Situation	Zeitangabe				Verstehen	HSYS
Situation	Zeitangabe				mehr als 6h	BuS
Situation	Zeitangabe				um 4h	BuS
Situation	Zeitangabe				weniger als 2h	BuS
System			Zuverlässigkeit	gering		BuS
System			Zuverlässigkeit	hoch		BuS
Tätigkeit				nicht ange- messen		HSYS
Tätigkeit			Funktion			HSYS
Tätigkeit			Qualität			HSYS
Tätigkeit			Unterstützungen			HSYS
Tätigkeit			Vorhandensein	fehlt		HSYS
Tätigkeit			Vorhandensein	nicht auffind- bar		HSYS
Tätigkeit			Vorhandensein	nicht einge- kauft		HSYS
Tätigkeit			Zugriff			HSYS
Tätigkeit		betätigen				BuS
Tätigkeit		eintippen				BuS
Tätigkeit		fühlen				BuS
Tätigkeit		hingehen				BuS
Tätigkeit		hinsehen				BuS
Tätigkeit		kopieren				TAG
Tätigkeit		löschen				TAG
Tätigkeit		regeln				BuS
Tätigkeit		schreiben				BuS
Tätigkeit		sehen				BuS
Tätigkeit		sprechen				BuS
Tätigkeit		spüren				BuS
Tätigkeit		steuern				BuS
Tätigkeit		suchen				BuS
Tätigkeit		tippen				TAG
Tätigkeit		umbenennen				TAG
Tätigkeit		zeichnen				BuS
Tätigkeit		zeigen				TAG
Tätigkeit	Betrachtungs- einheit	bewegen				TAG
Tätigkeit	Button	klicken				TAG
Tätigkeit	Datei					TAG
Tätigkeit	Desktop					TAG
Tätigkeit	Drehschalter					BuS
Tätigkeit	Hebel					BuS
Tätigkeit	Hebelschalter					BuS
Tätigkeit	Joystick					BuS
Tätigkeit	Knopf					BuS
Tätigkeit	Kurbel					BuS
Tätigkeit	Lichtgriffel					BuS
Tätigkeit	Maus					BuS
Tätigkeit	Mikrofon					BuS
Tätigkeit	Ordner					TAG
Tätigkeit	Ordner					TAG
Tätigkeit	Papierkorb					TAG
Tätigkeit	Pedal					BuS
Tätigkeit	Poti				Drehpoti	BuS
Tätigkeit	Poti				Linear	BuS
Tätigkeit	Rad					BuS
Tätigkeit	Schreibstift					BuS
Tätigkeit	Tastenfeld				einfach	BuS
Tätigkeit	Tastenfeld				multifunktional	BuS
Umgebung					Korridore	HSYS
Umgebung					Treppen	HSYS
Umgebung			Anthropometri- sches Design			HSYS
Umgebung			Arbeitsmittel	schlecht		HSYS
Umgebung			Arbeitsplatz- gestaltung	unzureichend		HSYS

Klasse	Objekt	Aktion	Eigenschaft	Angabe	Element	Quelle
Umgebung			Arbeitsplatzgestaltung	unzureichend		HSYS
Umgebung			Arbeitsumgebung			HSYS
Umgebung			Ausstattung	fehlt		HSYS
Umgebung			Ausstattung	funktioniert nicht		HSYS
Umgebung			Ausstattung	nicht auffindbar		HSYS
Umgebung			Ausstattung	nicht verfügbar		HSYS
Umgebung			Ausstattungs- menge	nicht ausrei- chend		HSYS
Umgebung			Beleuchtung		Bildschirm	HSYS
Umgebung			Beleuchtung	nicht ange- messen		BuS
Umgebung			Beleuchtung	normal		BuS
Umgebung			Beleuchtung	sehr schlecht		BuS
Umgebung			Beschleuni- gungen	gerade tole- rierbar		BuS
Umgebung			Beschleuni- gungen	mäßig		BuS
Umgebung			Beschleuni- gungen	nicht tolerier- bar		BuS
Umgebung			Beschleuni- gungen	niedrig		BuS
Umgebung			Beweglichkeit			HSYS
Umgebung			Biomechani- sches Design			HSYS
Umgebung			Designstrenge schlecht			HSYS
Umgebung			Distraktoren		Andere Perso- nen	HSYS
Umgebung			Distraktoren		Arbeitsumge- bung	HSYS
Umgebung			Distraktoren		Ausmaß	Fujita
Umgebung			Distraktoren		Design	HSYS
Umgebung			Distraktoren		visuell	HSYS
Umgebung			Distraktoren		auditiv	HSYS
Umgebung			Erreichbarkeit	nicht möglich		HSYS
Umgebung			Externe Bedro- hung	gering		BuS
Umgebung			Externe Bedro- hung	nein		BuS
Umgebung			Externe Bedro- hung	sehr stark		BuS
Umgebung			Externe Bedro- hung	stark		BuS
Umgebung			Gefahrenex- position	gefährlich		HSYS
Umgebung			Klimafaktoren	nicht ange- messen		BuS
Umgebung			Klimafaktoren	normal		BuS
Umgebung			Klimafaktoren	sehr schlecht		BuS
Umgebung			Kontamination	erträglich		BuS
Umgebung			Kontamination	keine		BuS
Umgebung			Kontamination	merkbar		BuS
Umgebung			Kontamination	nicht tolerier- bar		BuS
Umgebung			Lärm			HSYS
Umgebung			Lärm	erträglich		BuS
Umgebung			Lärm	gefährlich		BuS
Umgebung			Lärm	merkbar		BuS
Umgebung			Leistungsun- terstützung			HSYS
Umgebung			Luftfeuchte			HSYS
Umgebung			Luftstrom/ Ventilation			HSYS
Umgebung			Physikalische Einflüsse		Beleuchtung	HSYS

Klasse	Objekt	Aktion	Eigenschaft	Angabe	Element	Quelle
Umgebung			Physikalische Einflüsse		Gefahrenbedingungen	HSYS
Umgebung			Physikalische Einflüsse		Lärm	HSYS
Umgebung			Physikalische Einflüsse		Temperatur/Luftfeuchte	HSYS
Umgebung			Schutzvorrichtungen			HSYS
Umgebung			Schwingungen	merkbar		BuS
Umgebung			Schwingungen	nicht merkbar		BuS
Umgebung			Schwingungen	stark gefährlich		BuS
Umgebung			Schwingungen	störend		BuS
Umgebung			Sicherheit/Unfallgefahr	gefährlich		BuS
Umgebung			Sicherheit/Unfallgefahr	groß		BuS
Umgebung			Sicherheit/Unfallgefahr	mäßig		BuS
Umgebung			Sicherheit/Unfallgefahr	nicht ausreichend		BuS
Umgebung			Sicherheitssysteme			HSYS
Umgebung			Unterstützungen	schlecht		HSYS
Umgebung			Zugänglichkeit		Eintritt	HSYS
Umgebung			Zugänglichkeit		Erreichbarkeit	HSYS
Umgebung			Zugänglichkeit		Gruppierung	HSYS
Umgebung	Operateurraum					HSYS

Anhang 3: Beispiel einer Ereignisbeschreibung mit dem Beschreibungsmodell

Als Beispiel soll ein typisches Ereignis aus einem technischen Betrieb dienen, bei dem eine Reihe von ergonomischen, kognitiven und organisatorischen Mängeln identifiziert wurden. In dem Beispiel wurde ein Ablaßventil unbeabsichtigt offen gelassen und der darauf folgende Ereignisablauf basiert letztendlich darauf, daß dieses offene Ablaßventil nicht erkannt wurde und dadurch das Gemisch zweier Chemikalien (A und B) kritisch wurde. Um nicht die gesamte Anlage abzubilden, ist in Bild 3-1 zur Verdeutlichung des Ereignisses nur ein Prinzipschaltbild der technischen Systeme wiedergegeben. Das Ablaßventil ist wesentlich komplizierter und verdeckter im Gesamtprozeß verschaltet.

In dem technischen System sollen in einem Behälter die zwei Chemikalien A und B miteinander reagieren. Medium A ist heiß, Medium B ist kalt. Je höher die Temperatur oder je stärker die Konzentration des Mediums B, desto stärker die chemische Reaktion im Behälter. Ist das Verhältnis von Medium B zu A größer als 2 (doppelte Konzentration von B gegenüber A), so wird ein Bindemedium C eingespeist, um eine Überreaktion zu verhindern. Dadurch ist jedoch auch das Produkt im Behälter unbrauchbar.

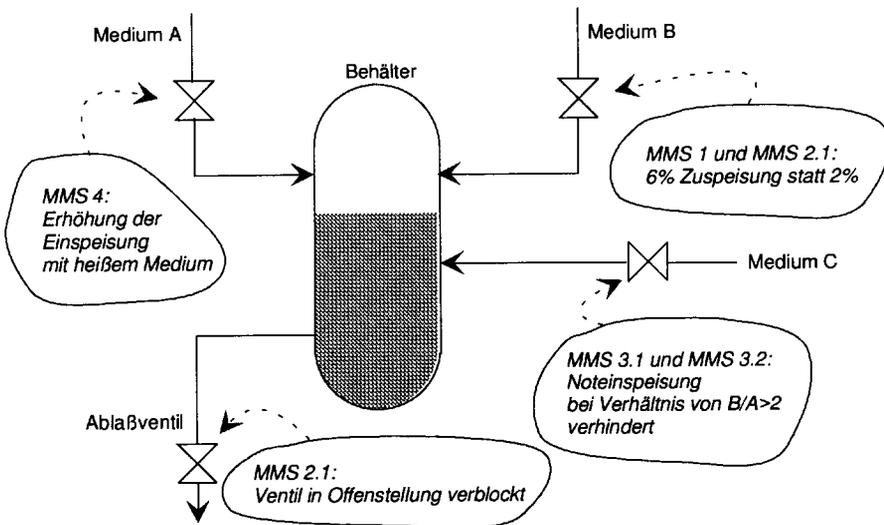


Bild 3-1 Prinzipschaltbild der technischen Systeme, die beim Ereignis von Bedeutung waren.

Im Bild 3-1 sind die technischen wie menschlichen Fehler durch kursive Schrift eingezeichnet: In dem Ereignis wurde zunächst vor Durchführung eines Tests A übersehen, daß Medium B mit 6% statt mit 2% in den Reaktionsbehälter eingespeist wurde. Bei der Durchführung des Tests wurde unbeabsichtigt das Ablaufventil offengelassen. Als Reaktion auf den gestörten Zustand wurde eine automatische Noteinspeisung des Mediums C zur Bindung der Chemikalien verhindert und statt dessen heißes Medium A zugegeben, wodurch unbeabsichtigter Weise beinahe eine Überreaktion ausgelöst wurde (durch die Temperaturzunahme). Damit ergibt sich ein Ereignisablauf wie in Bild 3-2 dargestellt.

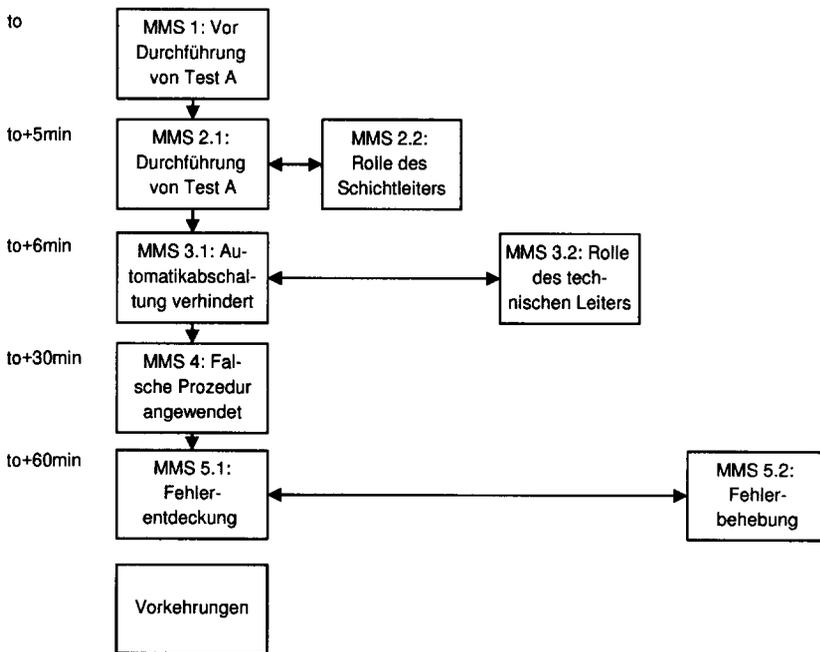


Bild 3-2 Ereignisablauf.

Zu jedem Schritt des Ereignisablaufes werden im folgenden die MMS und abschließend die getroffenen Vorkehrungen für das gesamte Ereignis beschrieben. Die Tabellen sind im Prinzip wie ein geschriebener Text zu lesen. Jedes MMS repräsentiert einen Abschnitt. Jede Zeile, die mit dem Zeichen "<" beginnt, ist ein neuer Satz, welcher das Ereignis bezogen auf die links bzw. links-oben von dem Zeichen genannte MMS-Komponente beschreibt.

Klasse	Satz	Objekt	Verb	Angabe	Eigenschaft	Element
Vor Durchführung des Tests A						
MMS 1		Typ A0				
		Aufgabe	Monitiv			
		Bedienung	Sequentiell			
		Darstellung	Folge			
		Dimension	Eine			
		Kompatibilität	Innere			
		Führung	Statisch			
Situation	<	Zeitangabe				t0
	<	Zeitangabe				kurz vor Schichtwechsel
	<	Anlage	abgeschaltet			seit mehreren Monaten
	<	Management	ordnet an			Testdurchführung an einem Ventil
	<	Prozeßgröße				auf 6%
						Test verlangt 2%
Aufgabe	<	Test				Vortest
						Ergebnisse
		Ergebnisse	abwarten			
				unterlassen	Zeitdruck	
	<	Test	durchführen			Nachtest
			prüfen			Vorbedingungen
				fehlerhaft	Zeitdruck	
Person	<	Kontrollraum-personal				Novize
			bedenken	unterlassen		Bedeutung des Vortest
					Information	Wissen um die Bedeutung des Vortests
					Zielreduktion	Test soll vor Schichtwechsel beendet sein
Tätigkeit	<	Nachtest	begonnen	zu früh		
Rückmeldung	<	Prozeßgröße				ist auf 6%
						nicht auf 2%
			erkennen	unterlassen		
					+Markierung	+2% und 6% nicht unterschieden
					?Zuverlässigkeit	?Anzeige unzuverlässig
			?überprüfen	?nicht möglich		?durch anderen Anzeigen mit dieser Prozeßgröße
Auftrags-erledigung	<					
Auftrags-erteilung	<	Anweisung	befolgen	fehlerhaft		
					Vollständigkeit	unvollständige Darstellung der Vorbedingungen / Gültigkeitskriterien
					Gestaltung	keine Abhakpositionen
Umgebung	<	Kontrollraum				
System	<	Prozeß-medium				B
						Konzentration
		Konzentration	ist	zu hoch		Möglichkeit einer unbeabsichtigten Reaktion

Klasse	Satz	Objekt	Verb	Angabe	Eigenschaft	Element
Durchführung von Test A						
MMS 2.1		Typ A				
		Aufgabe	Aktiv			
		Bedienung	Sequentiell			
		Darstellung	Folge			
		Dimension	Eine			
		Kompatibilität	Außere			
		Führung	Statisch			
Situation	<	Zeitangabe				t0+5min
Aufgabe	<	Ventil				Ablaßventil
			öffnen			
	<	Pumpe				Förderpumpe
			testen			Funktionsüchtigkeit
	<	Ventil				Ablaßventil
			schließen	fehlerhaft		
					Zeitdruck	
Person	<	Testpersonal	bedenken			daß Ventil blockieren kann
				unterlassen		
					Verarbeitung	Erwartung, daß Ventil geschlossen
Tätigkeit	<	Ventil				Ablaßventil
			geschlossen	zu wenig		
					Positionierbarkeit	unzureichend
Rückmeldung	<	Ventil				Signal
		Signal				im Kontrollraum
			erkennen			daß nur 50% geschlossen
				nicht möglich		
					Anzeigege- nauigkeit	Positionsanzeige
					Anzeigege- nauigkeit	stellt nur offenen oder geschlossenen Zustand dar
					Anzeigege- nauigkeit	kein Signal bedeutet offen
					Zuverlässig- keit	wurde vor kurzem repariert
					Zuverlässig- keit	hat schon öfter Probleme verursacht
Auftrags- erledigung	<	Kontrollraum- personal	informieren			über Abschluß der Arbei- ten
Auftrags- erteilung	<	Anweisung	befolgen			
Umgebung	<	vor Ort				
System	<	Ventil				Ablaßventil
			blockiert	falsch		in 50% Offenstellung
			geöffnet	falsch		
	<	Prozeß- medium				A und B
						Temperatur
			ausgetreten	falsch		
		Temperatur	gestiegen	falsch		

Klasse	Satz	Objekt	Verb	Angabe	Eigenschaft	Element
Rolle des Schichtleiters						
MMS 2.2		Typ C				verschlechternd
		Aufgabe	Monitiv			
		Bedienung	Sequentiell			
		Darstellung	Folge			
		Dimension	Eine			
		Kompatibilität	Innere			
		Führung	Statisch			
Situation	<	Zeitangabe				t0+5min
Aufgabe	<					
Person	<	Schichtleiter	bemerken			daß Prozeßgröße B zu hoch
	<	Prozeßgröße	erkannt			daß Prozeßgröße B auf 6% statt auf 2% ist
				zu spät		bereits überkritische Konzentration
Tätigkeit						
Rückmeldung	<					
Auftrags-erledigung	<	Operateur	informieren	zu spät		Prozeßgröße B zu reduzieren
Auftrags-erteilung	<					
Umgebung	<	Kontrollraum				
System	<	Prozeß-medium				A und B
						Temperatur
			ausgetreten	falsch		
		Temperatur	gestiegen	falsch		

Klasse	Satz	Objekt	Verb	Angabe	Eigenschaft	Element
Automatik-Abschaltung verhindert						
MMS 3.1		Typ C				verschlechternd
		Aufgabe	Monitiv			
		Bedienung	Sequentiell			
		Darstellung	Folge			
		Dimension	Mehrere			
		Kompatibilität	Innere			
		Führung	Dynamisch			
Situation	<	Zeitangabe				to+6min
Aufgabe	<	Abschaltung				Automatische Abschaltung würde Produkt unbrauchbar machen
			abwarten	unterlassen		
					Aufgaben-vorbereitung	Primäres Ziel ist Produktion und nicht sicherheitsgerichtete Abschaltung
					Zeitdruck	hoch
Person	<	Schicht-personal	dachte	falsch		die Situation unter Kontrolle zu haben, da ein Grund für fehlerhaftes Ablaufen des Tests gefunden wurde (Prozeßgröße 6% statt 2%)
					Zielreduktion	chemisches Produkt retten
					Verarbeitung	Vertrauen in eigene Diagnose (Temperaturanstieg durch zu hohe Prozeßgröße B)
					Information	gefundener Grund stimmt mit gelernten Maßnahmen überein
Tätigkeit	<	Abschaltung				Automatische Abschaltung
			verhindert	falsch		
Rückmeldung	<					
Auftrags-erledigung	<	Technischer Leiter	informieren			über das Problem
						telephonisch
Auftrags-erteilung						
Umgebung	<	Kontrollraum				
System	<	Prozeß-medium				A und B
			ausgetreten	falsch		Temperatur
		Temperatur	gestiegen	falsch		

Klasse	Satz	Objekt	Verb	Angabe	Eigenschaft	Element
Rolle des technischen Leiters						
MMS 3.2		Typ C				verschlechternd
		Aufgabe	Aktiv			
		Bedienung	Simultan			
		Darstellung	Kompensation			
		Dimension	Mehrere			
		Kompatibilität	Innere			
		Führung	Statisch			
Situation	<	Zeitangabe				to+6min
Aufgabe	<	Kontrollraum	gehen	unterlassen		
					Komplexität	war mit anderen Aufgaben beschäftigt
					Aufgaben-vorbereitung	war in andere Abteilung versetzt und nicht mehr zuständig
Person	<	Technischer Leiter				
			dachte	falsch		daß das Schichtpersonal alleine zurecht kommt
					Zielreduktion	auf subjektiv wichtigere Aufgaben
Tätigkeit	<					
Rückmeldung	<					
Auftrags-erledigung	<	Schicht-personal	vorgeschlagen			den Grund für den Temperaturanstieg zu suchen
			angeboten	falsch		daß er in den Kontrollraum kommt
			informierte	unterlassen		daß er andere Dinge zu tun hat
					?Verantwort-lichkeit	?nicht definiert
					?Verantwort-lichkeit	?Stellvertreter nicht vorge-sehen
Auftrags-erteilung	<					
Umgebung	<	In seinem Büro				
System	<	Prozeß-medium				A und B
			ausgetreten	falsch		Temperatur
		Temperatur	gestiegen	falsch		

Klasse	Satz	Objekt	Verb	Angabe	Eigenschaft	Element
Falsche Prozedur angewendet						
MMS 4		Typ C				verschlechternd
		Aufgabe	Monitiv			
		Bedienung	Sequentiell			
		Darstellung	Folge			
		Dimension	Mehrere			
		Kompatibilität	Innere			
		Führung	Dynamisch			
Situation	<	Zeitangabe				t0+30min
Aufgabe	<	Technischer Leiter				Eintreffen
		Eintreffen	abwarten	unterlassen		
					Zeitdruck	
Person	<	Schichtleiter	bedenken	unterlassen		daß Prozeßgröße auf 6%
					?Zielreduktion	?mangelnde Verfügbarkeit einer besseren Lösung
					?Information	?über Bedeutung der Abweichung (6% statt 2%) fehlt
Tätigkeit	<	Ventil				weiteres Zuspeseiventil
			geöffnet	falsch		
Rückmeldung	<					
Auftrags erledigung	<					
Auftragserteilung	<	Anweisung				ereignisorientierte Diagnoseanweisung
			befolgen	unterlassen		
					?Verfügbarkeit	?zu zeitaufwendig
					?Gestaltung	?zu kompliziert zu benutzen
					?Vollständigkeit	?Anwendungskriterien nicht definiert
	<	Anweisung				Abschaltprozedur für normale Bedingungen
			befolgt	falsch		
Umgebung	<	Kontrollraum				
System	<	Prozeßmedium				A
						heißes Medium
			zugespeist	falsch		
	<	Prozeßmedium				A und B
						Temperatur
		Temperatur	gestiegen	falsch		noch stärker als vorher

Klasse	Satz	Objekt	Verb	Angabe	Eigenschaft	Element
Fehlerentdeckung						
MMS 5.1		Typ C				verbessernd
		Aufgabe	Aktiv			
		Bedienung	Sequentiell			
		Darstellung	Folge			
		Dimension	Mehrere			
		Kompatibilität	Innere			
		Führung	Statisch			
Situation	<	Zeitangabe				t0+60min.
Aufgabe	<					
Person	<	Schichtleiter	suchen			nach anderen Möglichkeiten für den Fehler, da immer noch keine Verbesserung des Systemzustandes
			findet			Lösung durch Ungleichgewicht von Zusp eisung und Ablauf
			ignoriert	falsch		Alarm
					?Zielreduktion	?da er die Lösung gefunden hatte
Tätigkeit	<					
Rückmeldung	<	Ungleichgewicht				zwischen Zusp eisung und Ablauf
			erkannt			
	<	Alarm	erkannt			
Auftrags erledigung	<	Technischer Leiter	informieren	unterlassen		
	<	Operateur	angewiesen			die Stellung des Ablaufventils zu prüfen und gegebenenfalls zu schließen
Auftragserteilung						
Umgebung	<	Kontrollraum				
System	<	Prozeßgröße				A und B
		Temperatur	gestiegen	falsch		Temperatur

Klasse	Satz	Objekt	Verb	Angabe	Eigenschaft	Element
Fehlerbehebung						
MMS 5.2		Typ C				verbessernd
		Aufgabe	Aktiv			
		Bedienung	Sequentiell			
		Darstellung	Folge			
		Dimension	Eine			
		Kompatibilität	Außere			
		Führung	Statisch			
Situation	<	Zeitangabe				t0+60min
Aufgabe	<	Ventil				Stellung
		Stellung	prüfen			
Person	<	Operateur				
Tätigkeit	<	Ventil				Ablaßventil
			schließen			
Rückmeldung	<					
Auftrags-erledigung	<	Schichtleiter	informieren			daß Ventil offen war und geschlossen wurde
						telephonisch
Auftrags-erteilung	<					
Umgebung	<	vor Ort				
System	<	Prozeßgröße	normalisiert			

Klasse	Satz	Objekt	Verb	Angabe	Eigenschaft	Element
Vorkehrungen						
Vorkehrung	<	Personal	schulen			Noteinspeisungen nicht zu verhindern
	<	Personal	schulen			komplexe Situationen zu bewältigen
	<	Kontrollraum	verbessern			Alarmgebung
	<	Anweisung	verbessern			Prüfung der Vorbedingungen für einen Test

Anhang 4: Ansätze für das Auswertungsmodell aus der KI

Zur Lösung der Probleme bei der Entwicklung eines Modells für die Auswertung der Ereignisbeschreibung, insbesondere des Kodierungs- und Retrievalproblems, werden in der Literatur zur Künstlichen Intelligenz (KI) folgende Methoden diskutiert:

- Expertensysteme
- Fuzzy-Sets
- Probabilistische Netze
- Neuronale und konnektionistische Netze

Diese Methoden, die alle bezüglich der Kodierung und Wiedergewinnung der Information unterschiedliche Leistungsmerkmale haben, sollen im folgenden auf Ansatzpunkte hin untersucht werden, die für eine Methode zur Auswertung der Informationen aus dem Beschreibungsmodell genutzt werden können.

A.4.1 Expertensysteme

- **Einführung**

Expertensysteme setzen sich zum Ziel, das verfügbare Wissen über einen Sachverhalt, Domäne genannt, in einer Form zusammenzufassen und aufzubereiten, daß diese von potentiellen Anwendern für eine Problemlösung genutzt werden kann (vgl. Zimolong & Rohrmann, 1988). Damit bietet sich diese Technologie an, um das Wissen, welches in den Ereignissen enthalten ist, für eine Beurteilung der menschlichen Zuverlässigkeit verfügbar zu machen. Die Struktur eines Expertensystems ist in Bild 4-1 dargestellt.

Expertensysteme unterscheidet man häufig danach, ob die Wissensbasis aufgrund von beobachteten Fällen oder aufgrund von allgemein gültigem Wissen konstruiert wird. Erstere werden als fallbasierte Systeme bezeichnet, letztere werden als regelbasierte Systeme (im Sinne 'feststehender Regeln') bezeichnet.

Regelbasierte und fallbasierte Expertensysteme kann man im wesentlichen hinsichtlich der Methode zur Formulierung der Wissensbasis und der Formulierung des Inferenzmechanismus unterscheiden. Beim **regelbasierten Design** werden sowohl die Wis-

sensbasis als auch der Inferenzmechanismus durch Regeln formuliert. Beim **objekt-orientierten Design** werden Wissensbasis und Inferenzmechanismus über Ober-/Unterbegriffsstrukturen formuliert (z.B. Heuer, 1992).

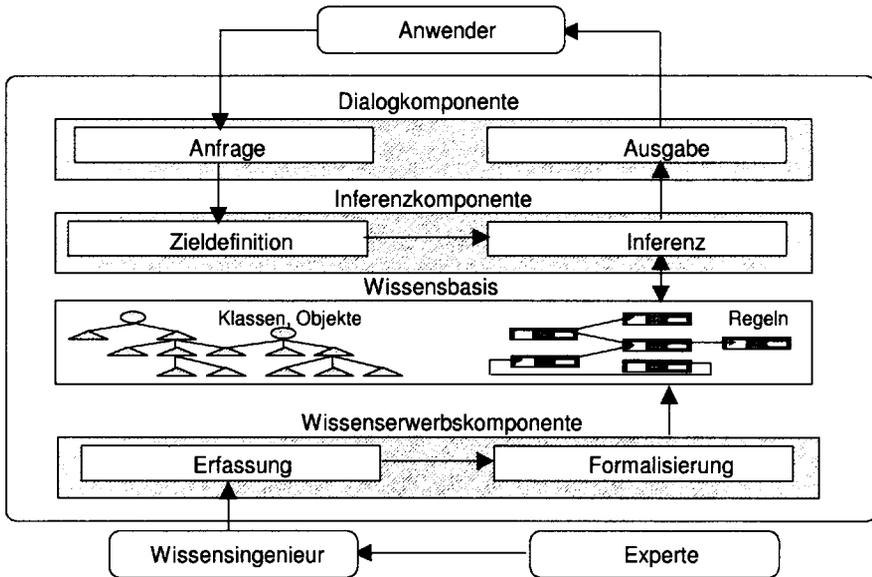


Bild 4-1 Prinzipieller Aufbau eines Expertensystems.

- **Regelbasiertes Design**

Im regelbasierten Design ist das Wissen in mehr oder weniger abstrakt formulierten Regeln organisiert. Die Wissensbasis ist als Netz von Regeln repräsentiert und die Schlußfolgerungen der Inferenzkomponente werden mittels der vorhandenen Regeln gezogen. Somit läßt eine Regel im Verbund des Regelnetzes der Wissensbasis beispielsweise folgende Schlußfolgerung zu:

WENN [Objekt]= 'Ford Taunus'
DANN [Objekt]= 'Ford Taunus' gehört zur [Klasse]= 'Auto'
DANN [Objekt]= 'Ford Taunus' hat [Eigenschaft]= 'vier Räder'

Allgemein bestehen Regeln aus einem linksseitigen Bedingungsteil, auch Left Hand Side (Conditio) genannt, einer rechtsseitigen Hypothese und einem rechtsseitigen Aktionsteil oder auch Right Hand Side (Conclusio) genannt (Bild 4-2). Im Bedingungsteil

können mehrere Bedingungen aufgeführt sein und logisch verknüpft werden (übliche Operatoren sind UND, ODER, UND NICHT). Inferenzkategorien geben an, mit welcher Priorität die Regel zu bearbeiten ist. Den Inferenzkategorien kann ein fester Wert zugewiesen werden, sie können aber auch dynamisch belegt werden. Der Hypothese wird immer dann die Wertzuweisung 'ist wahr' bzw. 'ist nicht wahr' gegeben, wenn die Bedingungen erfüllt bzw. nicht erfüllt sind. Eine weitere Möglichkeit, das Zutreffen von Hypothesen anzugeben, besteht darin, ihnen Wahrscheinlichkeitswerte zuzuordnen, falls die Bedingungen erfüllt sind (z.B. in MYCIN, Shortliffe, 1976). Ist die Hypothese wahr (oder innerhalb eines bestimmten Vertrauensintervalls), können im Aktionsteil Objekten oder Eigenschaften von Objekten Werte zugewiesen werden.

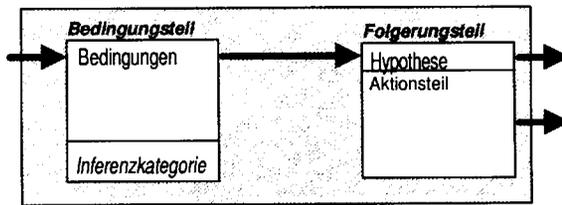


Bild 4-2 Allgemeiner Aufbau einer Regel in Expertensystemen.

Werden im Bedingungsteil einer Regel Hypothesen von vorgelagerten Regeln angegeben, so entsteht ein Regelnetzwerk. Ein solches Regelnetzwerk zeigt Bild 4-3. Einfache Verkettungen sind dabei Verbindungen von nur zwei Regeln. Im Bild ist dies durch den Pfeil a) dargestellt. Multiple Verkettungen sind mehrere Regeln, die zu einer Hypothese führen. Im Bild ist dies durch den Pfeil b) und c) dargestellt; sie bilden ein ODER-Gatter. Die Inferenzkategorien legen in diesem Fall die Reihenfolge fest, in denen die Regeln, die das ODER-Gatter bilden, abzuarbeiten sind. Ist Kategorie b numerisch größer als Kategorie c, dann wird zuerst Regel 4) und dann Regel 5) bearbeitet.

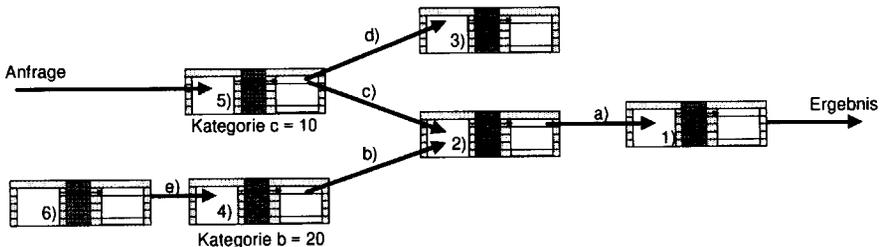


Bild 4-3 Mögliche Verbindungen von Regeln in Expertensystemen.

Bei der Abarbeitung eines Regelnetzwerkes bedeutet **erschöpfende Inferenz**, daß alle Regeln eines ODER-Gatters abgearbeitet werden, wohingegen bei nicht erschöpfender Suche bereits beim Zutreffen einer Hypothese die Abarbeitung der ODER-Gatter abgebrochen wird. Die restlichen Hypothesen werden nicht mehr bearbeitet (NEXPERT, 1990).

Weiterhin wird unterschieden, ob Regeln zuerst in die Tiefe (depth first) oder zuerst in die Breite (breadth first) bearbeitet werden. Im Bild bedeutet Tiefensuche, daß z.B. bei Bearbeitung von Regel 2) zunächst Regel 4) und Regel 6) und danach erst Regel 5) abgearbeitet wird. Bei einer Breitensuche würde zunächst Regel 4) und dann Regel 5) abgearbeitet, da beide ein ODER-Gatter bilden.

- **Objektorientiertes Design**

Beim objektorientierten Design wird das Wissen repräsentiert, indem Begriffe bzw. Objekte in Kategorien bzw. Klassen eingebettet werden. Klassen und Objekte können wiederum Merkmale besitzen, die ihnen als Eigenschaften (auch Attribute genannt) zugeschrieben werden. Klassen dienen der Zusammenfassung von verschiedenen Objekten mit gemeinsamen Merkmalen. Eine Klassenbildung ist mit anderen Worten immer dann sinnvoll, falls mehrere Objekte gleiche Eigenschaften aufweisen. Klassen, Objekte und Merkmale bzw. Eigenschaften werden dabei als Konzepte bzw. Entitäten bezeichnet (vgl. auch Mandl & Spada, 1988; Harmon & King, 1986).

Um Schlußfolgerungen (Inferenzen) zu ziehen, benötigt man im objektorientierten Design bestimmte Konventionen, nach denen die Eigenschaften verschiedenen Objekten zugeschrieben werden. Dies sind: Vererbung, Polymorphie und Kapselung (vgl. u.a. Gerike, 1991; Heuer, 1992). Vererbung bedeutet, daß eine Klasse oder auch ein Objekt die zu ihm gehörenden Eigenschaften an untergeordnete Klassen oder Objekte weitergeben kann. Polymorphie bezeichnet die Möglichkeit, ein Objekt mehreren Klassen zuzuordnen. Kapselung bedeutet, daß eine an ein Objekt vererbte Eigenschaft eine spezifische Ausprägung annehmen kann, welche nur für dieses Objekt gilt. Kapselung ist also erforderlich, falls eine Klasse eine Eigenschaft an ein Objekt vererbt hat und dieses Objekt die geerbte Eigenschaft mit einem nur für sich gültigen Wert belegt. Der Prozeß der Wertbelegung wird Instantiierung genannt.

Ein typisches Netzwerk, welches in der Lage ist, eine Schlußfolgerung durch Vererbung zu ziehen zeigt beispielhaft Bild 4-4.

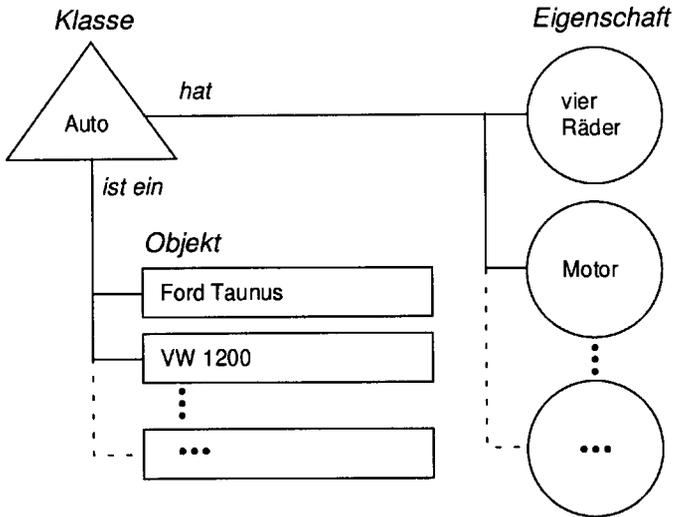


Bild 4-4 Ein einfaches Objekt-Netzwerk.

Die im Bild dargestellten Eigenschaften sind einer Klasse 'Auto' zugewiesen. Die Klasse kann diese an untergeordnete Objekte weitergeben bzw. vererben. Somit läßt das Beispiel aus dem Bild folgende Schlußfolgerungen zu:

$$\begin{aligned}
 [Klasse] &= 'Auto' \text{ hat } [Eigenschaft] = 'vier Räder' \\
 [Objekt] &= 'Ford Taunus' \text{ gehört zur } [Klasse] = 'Auto' \\
 \Rightarrow [Objekt] &= 'Ford Taunus' \text{ hat } [Eigenschaft] = 'vier Räder'
 \end{aligned}$$

Polymorphie bedeutet in diesem Beispiel, daß der Begriff 'Motor' sowohl dem Objekt 'Ford Taunus' als auch dem Objekt 'VW 1200' zugeordnet werden kann. Gültige Zuordnungen sind also:

$$\begin{aligned}
 [Objekt]_1.Motor &= 'Ford Taunus'.Motor \\
 [Objekt]_2.Motor &= 'VW 1200'.Motor
 \end{aligned}$$

Kapselung ist in diesem Fall erforderlich, wenn beide Objekte eine Eigenschaft mit unterschiedlichen Werten belegen. So gilt z.B.:

$$\begin{aligned}
 [Objekt]_1.Motor &= 'Ford Taunus'.Motor = 'Reihenmotor' \\
 [Objekt]_2.Motor &= 'VW 1200'.Motor = 'Boxermotor'
 \end{aligned}$$

Bei komplexen Hierarchien unterscheidet man im objektorientierten Design (wie beim regelbasierten Design) Tiefen- und Breitensuche. Bei der Tiefensuche werden Eigenschaften in der Begriffshierarchie Astweise bis zur untersten Stufe vererbt; bei der Breitensuche werden Eigenschaften zunächst an alle Objekte einer Hierarchiestufe vererbt, bevor auf einer weiter unten liegenden Hierarchiestufe fortgefahren wird. Erschöpfende Suche bezeichnet auch hier, daß alle Objekte der Hierarchie bearbeitet werden. Auch im objektorientierten Design können Prioritäten zur Abarbeitung dadurch angegeben werden, daß die Objekte Prioritätsgewichte erhalten.

- **Diskussion mit Bezug zum Auswertungsmodell**

Im graphentheoretischen Sinne versuchen Expertensysteme unabhängig davon, ob sie regelbasiert oder objektorientiert vorgehen, den Suchraum durch gerichtete Graphen zu reduzieren (siehe dazu u.a. Scheffe, 1987). In beiden Fällen besteht der Suchraum aus Knoten (Entitäten bzw. Bedingungs- und Folgerungsteil) und Relationen (Verbindungen zwischen Entitäten bzw. Regeln). Damit sind beide Designansätze vom formalen Gehalt her gesehen identisch, denn eine Regel kann genauso gut als Relation zwischen Entitäten formuliert werden, wie eine Relation zwischen Entitäten als Regel formuliert werden kann. Die Wissensbasis und der Inferenzmechanismus eines Expertensystems kann also in gleicher Weise regelbasiert (z.B. mit Petrinetzen) oder objektorientiert (z.B. mit semantischen Netzen) aufgebaut werden (siehe auch Bonato, 1990). Beispielsweise können die Relationen (Kanten) zwischen den Objekten einer Objekthierarchie immer als einfache Regeln der folgenden Form aufgefaßt werden:

$[Klasse] = 'Auto' \text{---}g \rightarrow [Eigenschaft] = 'vier Räder'$

entspricht

WENN $[Klasse] = 'Auto'$ *DANN* $[Eigenschaft] = 'vier Räder'$

$[Klasse] = 'Auto' \text{---}g \rightarrow [Objekt] = 'Ford Taunus'$

entspricht

WENN $[Klasse] = 'Auto'$ *DANN* $[Objekt] = 'Ford Taunus'$

Der Unterschied zwischen beiden Vorgehensweisen liegt darin, daß objektorientiertes Design zuläßt, eine Relation zwischen zwei Objekten herzustellen, obwohl diese Relation nicht explizit vorhanden ist, sondern durch den Vererbungsprozeß erst gebildet wird. Da diese Relation nur zur Laufzeit des Inferenzprozesses bestimmt werden kann,

wird dieses Verhalten als dynamische Bindung bezeichnet. Für das obige Beispiel lautet diese Relation beispielsweise:

[Objekt] = 'Ford Taunus' —g→ [Eigenschaft] = 'vier Räder'

Dies ist im regelbasierten Design nicht in der Form möglich. Dort muß jede Relation explizit angegeben werden. Jede Zuordnung eines Objektes ist hier durch Abarbeiten einer Regel vorzunehmen:

WENN 'Ford Taunus' DANN 'vier Räder'

WENN 'VW 1200' DANN 'vier Räder'

etc.

Innerhalb des regelbasierten Design ist das Wissen implizit in Regeln abgebildet. Ändert sich eine Eigenschaft, so müssen alle Regeln daraufhin untersucht werden, inwieweit diese Eigenschaft in der Regel enthalten ist. Würden beispielsweise alle Autos plötzlich drei Räder bekommen, so müßte jede Regel für jedes Auto überarbeitet werden.

Objektorientiertes Design steht der graphentheoretischen Darstellung näher und stellt eine gegenüber regelbasierten Formulierungen konzentriertere und übersichtlichere Repräsentationsform dar. Diese Übersichtlichkeit hat den Vorteil, daß Erweiterungen der Wissensbasis im objektorientierten Design durch eine Erweiterung der Objekthierarchie möglich ist. Das Wissen ist hier also explizit zugänglich repräsentiert.

Die aus den obigen Beispielen entnommene Klasse 'Auto' kann beispielsweise durch die Beobachtung zweier Fälle und der Bestimmung der Gemeinsamkeiten der dort beobachteten Entitäten gebildet werden und muß nicht a priori festgelegt sein, also vor Beobachtung der Fälle vorgegeben werden:

Fall 1: [Objekt] = 'Ford Taunus' hat [Eigenschaft] = 'vier Räder'

Fall 2: [Objekt] = 'VW 1200' hat [Eigenschaft] = 'vier Räder'

=> [Objekt] ist gleich bezüglich [Eigenschaft] = 'vier Räder'

=> [Objekt] wird bezeichnet als [Klasse] = 'Auto'

Daneben ist es auch möglich einen beobachteten Fall 1 direkt einer bereits vorhandenen Klasse zuzuordnen:

[Klasse]= 'Auto' hat [Eigenschaft]= 'vier Räder'

Fall 1: *[Objekt]= 'VW 1200' hat [Eigenschaft]= 'vier Räder'*

=> *[Objekt]= 'VW 1200' entspricht [Klasse]= 'Auto'
bezüglich [Eigenschaft]= 'vier Räder'*

=> *[Objekt]= 'VW 1200' gehört zur [Klasse]= 'Auto'*

Somit ergibt sich aus dem Umstand, daß beim objektorientierten Design Schlußfolgerungen (Inferenzen) durch Zuordnung von Eigenschaften zu Klassen ermöglicht werden, eine bessere Kodierung des Wissens und eine leichtere Erweiterbarkeit der Wissensbasis, da hier lediglich eine Eigenschaft einer Klasse verändert werden muß, statt alle Regeln danach zu untersuchen, ob sie um diese neue Eigenschaft erweitert werden müssen.

Weiterhin wird durch eine erschöpfende Suche innerhalb einer Objekthierarchie ein Mustervergleich von verschiedenen Objekten möglich, indem man ein Objekt A mit einer Eigenschaft X angibt und die zugehörige Klasse sucht, für welche diese Objekt/Eigenschaft-Konstellation gilt. Ist die Klasse gefunden und gehört ein weiteres Objekt B der gleichen Klasse an, so sind beide Objekte (A und B) bezüglich dieser Eigenschaft X ähnlich. Derartige Inferenzen können im regelbasierten Design nicht durchgeführt werden. Zusammenfassend ergeben sich damit folgende Schlußfolgerungen:

1. Regelbasiertes Design ist nur dann geeignet, wenn das vorhandene Datenmaterial stark standardisiert ist und in wenige feststehende Regeln gefaßt werden kann. Ist dies nicht der Fall (wie in den meisten praktischen Anwendungen), so ergibt sich eine kombinatorische Explosion der Regeln, die in der Wissensbasis enthalten sein müssen. Diese kombinatorische Explosion wird auch als Relationenproblem bezeichnet. Im schlimmsten Fall müßte jede Kombination von Relationen als eine Regel formuliert werden und somit wären

$$\binom{n}{k \atop l}$$

(4-1)

mit

n Anzahl der Einzel-Fakten, die zusammengefaßt werden sollen

k Anzahl der Bedingungen, die aus den Einzel-Fakten gebildet werden sollen

l Anzahl der Bedingungen, die in einer Regel verwendet werden

Regeln erforderlich. Regelbasiertes Design besitzt eine Reihe weiterer Unzulänglichkeiten, welche dieses Design für die Auswertung von Betriebserfahrung unbrauchbar machen: Wie oben bereits dargestellt, repräsentieren Regeln das Wissen implizit. Dadurch tritt oft das Problem mangelnder Flexibilität auf, da eine sich oft verändernde oder wachsende Wissensbasis nicht dadurch erweitert werden kann, daß wenige Regeln neu formuliert werden. Meist müssen viele und im ungünstigsten Fall alle Regeln den neuen Sachverhalten angepaßt werden. Auch der Inferenzmechanismus muß laufend angepaßt werden, damit alle neu erstellten Regeln im Verarbeitungsprozeß auch berücksichtigt werden (vgl. auch Schult, 1992).

Aus diesen Gründen hat die Technologie der regelbasierten Expertensysteme bisher nur Anwendungen für eng begrenzte Wissensräume hervorgebracht. Typische Anwendungen wurden u.a. in der medizinischen Diagnostik für eng abgegrenzte Krankheitsbilder erstellt (z.B. MYCIN; Shortliffe, 1976). Eine Analyse komplexer Probleme (z.B. ein allgemeines System zur medizinischen Diagnostik unterschiedlicher Krankheitsbilder) konnte mit diesen Mitteln aus den geschilderten Gründen nicht realisiert werden. Sie sind somit auch für die Auswertung von Ereignissen ungeeignet, da auch diese eine hohe Variabilität und Komplexität aufweisen, mit der regelbasiertes Design nicht zurecht kommt.

2. Das objektorientierte Design hat den Vorteil, daß der Aufwand der Regelformulierung entfällt. Es ist aus diesem Grunde gegenüber dem regelbasierten Design überlegen.

Die gesammelte Information kann im objektorientierten Design flexibler genutzt werden als dies beim regelbasierten Design der Fall ist, da der Zugriff auf die gesammelten Daten durch Klassenbildung möglich ist. Innerhalb einer Wissensbasis können also dadurch Schlußfolgerungen gezogen werden, daß Objekte mit gleichen Eigenschaften zu Klassen zusammengefaßt werden. Beim regelbasierten Design muß demgegenüber die Ähnlichkeit zweier Objekte explizit in einer Regel formuliert werden. Ausnahme sind hybride Systeme, die objekt- und regelorientierte Vorgehen erlauben (z.B. NEXPERT, 1990).

Insgesamt ist ein objektorientiertes Design zur Auswertung der Betriebserfahrung zu bevorzugen, da es sich bei Ereignissen um eine sich ändernde bzw. erweiternde Wissensbasis handelt. Zusätzlich handelt es sich bei den Ereignissen aus der Betriebser-

fahrung um fallbasierte Daten. Im Sinne der Expertensystemtechnologie bedeutet dies, daß zur Auswertung der Angaben des Beschreibungsmodells ein fallbasiertes System im objektorientierten Design zu bevorzugen ist.

Innerhalb der Expertensystemtechnologie fehlt allerdings ein geeignetes Verfahren, um aus einem Objektnetzwerk quantitative Informationen über die einzelnen Fälle (Ereignisse) zu gewinnen, wie es zur Auswertung der Ereignisse im Hinblick auf die menschliche Zuverlässigkeit erforderlich ist. Hierfür scheinen Fuzzy-Sets geeignet.

A.4.2 Fuzzy-Sets

- **Einführung**

Der Ansatz der Fuzzy-Sets (unscharfen Mengen) bietet die Möglichkeit, Ober- und Unterbegriffsstrukturen zueinander in Beziehung zu setzen und aus dieser Beziehung semantischer Begriffe quantitative Angaben zu gewinnen. Diese Eigenschaft macht die Fuzzy-Set Theorie interessant für die Auswertung von Betriebserfahrung, da hiermit sowohl qualitative (also semantische) als auch quantitative Angaben aus den gesammelten Ereignissen gewonnen werden können. Die Fuzzy-Set Theorie wird umfassend in Zimmermann (1990) beschrieben.

Anwendungen der Fuzzy-Set Theorie sind hauptsächlich aus der Steuerung technischer und physikalischer Prozesse bekannt (u.a. Pedrycz, 1989; Altrock, 1991; Abel, 1991). Beispielsweise wird die U-Bahn in Tokyo durch eine Fuzzy-Set Steuerung ohne Fahrer gefahren (siehe Preuß, 1992). Der Fuzzy-Set Ansatz nutzt zur Zuordnung von semantischen Begriffen zu quantitativen Größen als zentrale Annahme die sogenannte Membershipfunktion (übersetzt: Zugehörigkeitsfunktion).

- **Membershipfunktion**

Anhand der U-Bahn Anwendung ist das Funktionsprinzip der Membershipfunktion in der Fuzzy-Set Theorie am einfachsten zu veranschaulichen, wie folgendes kleine Beispiel verdeutlicht: Jede Membershipfunktion benötigt eine zugrundeliegende Dimension X (z.B. Haltebereich), die in mehreren Ausprägungen i (z.B. zu weit, gut, zu nah) vorliegt. In diesem Fall kann die Stärke, also das Maß der Zugehörigkeit zur zugrundeliegenden Dimension durch den Gewichtungswert $\mu_i(x)$ bestimmt werden.

Bild 4-5 zeigt eine einfache Membershipfunktion $\mu_i(x)$, die für diesen Sachverhalt gelten mag (die Bestimmung der Membershipfunktion wird weiter unten noch diskutiert). Der Parameter x repräsentiert dabei den Haltebereich, der an der U-Bahn Station in Form von cm oder m angegeben wird. Die drei verschiedenen möglichen Ausprägungen i der Dimension Haltebereich sind eingeteilt in "zu nah" ($i=1$), "gut" ($i=2$) und "zu weit" ($i=3$). Die schraffierten Bereiche der Membershipfunktion stellen Überschneidungsbereiche der verschiedenen Ausprägungen dar.

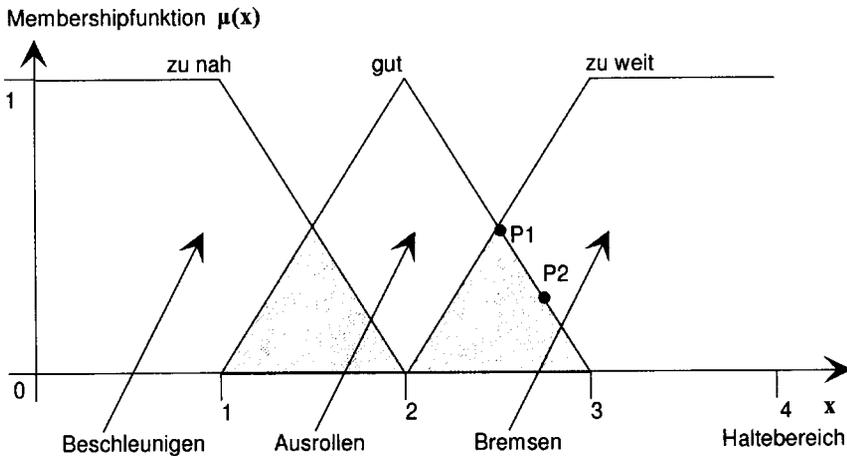


Bild 4-5 Eine einfache Membershipfunktion zur Bestimmung des Haltebereiches einer U-Bahn.

Wird nun die aktuelle Position x von einem Signalaufnehmer gemessen, so geht eine Fuzzy-Set Steuerung nicht so vor, daß z.B. ab der Position $x=1$ so gebremst wird, daß die U-Bahn genau am Punkt $x=2$ zum Halten zu kommt, wie es bei konventionellen Steuerungen der Fall ist. Eine Fuzzy-Set Steuerung reguliert die Bremskraft anhand der Membershipfunktion und nutzt dabei den Umstand aus, daß es unerheblich ist, ob die U-Bahn bei $x=1$ oder bei $x=3$ zum stehen kommt. Zur Bestimmung der Bremskraft werden die aktuellen Werte x auf der Dimension Haltebereich angegeben. Liegt der aktuelle Wert in der Fläche 'Beschleunigen', so nimmt die Fuzzy-Set Steuerung mit einer gewissen Kraft, die abhängig von $\mu_1(x)$ bestimmt wird, eine Beschleunigung vor. Liegt der aktuelle Wert in der Fläche 'Ausrollen', so wird keinerlei Kraft (weder zur Beschleunigung noch zur Verzögerung) aufgebracht. Liegt der aktuelle Wert in der Fläche 'Bremsen', so bremst die Fuzzy-Set Steuerung mit einer gewissen Kraft, die wiederum abhängig von $\mu_3(x)$ bestimmt wird.

Die eigentliche Leistung der Fuzzy-Set Steuerung liegt in den Bereichen, in denen unklar ist, ob beschleunigt, ausgerollt oder gebremst werden soll. In diesen Überschneidungsbereichen werden Funktionswerte der Membershipfunktionen $\mu_i(x)$ von den sich überschneidenden Ausprägungen miteinander verrechnet. Im Bild muß bei Punkt P2 beispielsweise stärker gebremst werden als bei Punkt P1. Üblicherweise geschieht die Verrechnung der Funktionswerte der beiden Membershipfunktionen durch eine Mittelwertbildung, d.h. es wird für Punkt 2 der Anteil der Zugehörigkeit zur Ausprägung 'Bremsen' $\mu_{zu\ weit}(P2)$ mit der Zugehörigkeit zur Ausprägung 'Ausrollen' $\mu_{gut}(P2)$ gemittelt; mehr zu verschiedenen Berechnungsmethoden in Zimmermann (1990).

Betrachtet man den Prozeß der Mittelwertbildung über verschiedene Zeitschritte t , so ist gut zu erkennen, worin der Vorteil der Fuzzy-Set Steuerung liegt: Der Sollwert einer Fuzzy-Set Steuerung zum Zeitpunkt $t+1$ wird durch den Mittelwert von Ist- und Sollwert zum Zeitpunkt t berechnet. Damit nimmt die Verteilung der Sollwerte über die Zeit einen exponentiell abnehmenden Verlauf von Halbwerten an. Der Sollwert nähert sich dem tatsächlichen Haltepunkt asymptotisch an. Aus diesem Grund bremsen Fuzzy-Set Steuerungen wesentlich "weicher" als dies durch konventionelle Steuerungen möglich ist.

Eine Membershipfunktion $\mu_i(x)$ kann aber nicht nur als Verteilungsfunktion gesehen werden; sie stellt auch ein Maß dar, mit dem eine Eigenschaft zu einer bestimmten Klasse gehört. Interpretiert man die Membershipfunktionen als Wahrscheinlichkeitsverteilungen, so ist in dem Beispiel der Punkt P2 sowohl als 'gut' (mit der Wahrscheinlichkeit $\mu_{gut}(x)=0,25$) als auch als 'zu weit' (mit der Wahrscheinlichkeit $\mu_{zu\ weit}(x)=0,75$) klassifizierbar. Dementsprechend kann man einen Fuzzy-Set Zusammenhang auch als Netz darstellen (vgl. Zimmermann, 1990). Dies ist in Bild 4-6 für die obige Membershipfunktion durchgeführt worden. Die Zugehörigkeit zu einer Klasse (Verzögerung bzw. Beschleunigung) wird durch die Aktivierungen der von einer Eigenschaft ausgehenden Relationen ausgedrückt. Die Eigenschaft erhält wiederum eine Aktivierung durch die eingehenden Ist-Werte x .

Wie das Bild verdeutlicht, kann eine kombinierte Häufigkeit zweier Ausprägungen (also die Schnittmenge bzw. der Überlappungsbereich zweier Membershipfunktionen) dadurch modelliert werden, daß ein übergeordneter Knoten Aktivierungen beider Ausprägungen aufnimmt.

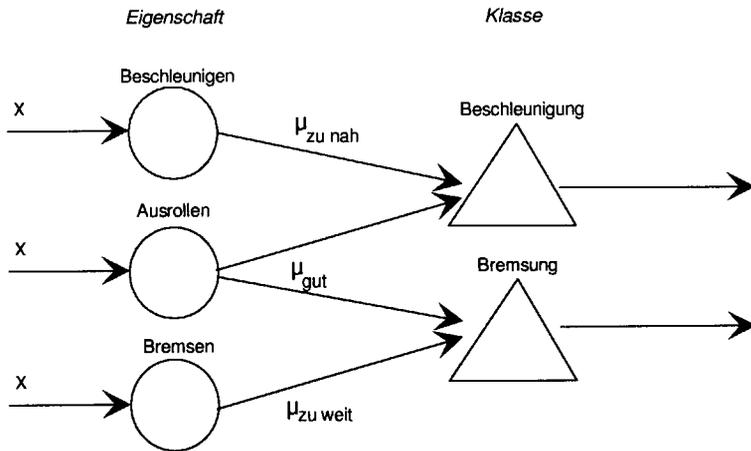


Bild 4- 6 Darstellung einer Membershipfunktion als Netz.

Verallgemeinernd kann die Schnittmenge von n Ausprägungen modelliert werden, indem ein Knoten Aktivierungen aller n Ausprägungen aufnimmt. Der aktuelle Wert eines Knotens ergibt sich dann durch Verrechnen der Eingangssignale, was beispielsweise nach der folgenden Gleichung geschehen kann:

$$h([Klasse]_j) = \frac{\sum_{i=1}^n (f(g_{ij}) * \mu[Eigenschaft]_i)}{n} \quad (4- 2)$$

mit:

n Anzahl aller eingehenden Relationen in die Klasse

$$f(g_{ij}) \begin{cases} 0 & \text{wenn } [Eigenschaft]_i - g_{ij} \rightarrow [Klasse]_j \leq 0 \\ 1 & \text{wenn } [Eigenschaft]_i - g_{ij} \rightarrow [Klasse]_j > 0 \end{cases}$$

Gegenüber regel- oder objektorientierten Systemen löst die Fuzzy-Set Theorie damit zwar nicht das oben angesprochene Relationenproblem, da die Anzahl der erforderlichen Relationen zur Bildung sämtlicher kombinatorisch möglichen Anfragen nicht reduziert wird. Dadurch, daß aber nur bestimmte Relationen beobachtet worden sind, bietet sie eine Möglichkeit mit diesem Problem umzugehen, indem die Relationen Gewichte erhalten. Ist bei einer gegebenen Anfrage (x) das Gewicht der Relation $g_{ij}=0$,

dann liefert die Eigenschaft i über die Relation $Eigenschaft_i - g_{ij} \rightarrow Klasse_j$ keinen Beitrag.

Das entscheidende Problem des Fuzzy-Set Ansatzes ist die Bestimmung der Membershipfunktion, welche die Häufigkeiten für die Klassen bei einem gegebenen Wert x korrekt berechnet. Das Problem ist um so schwieriger zu lösen, wenn für Kombinationen von Parametern korrekte Häufigkeiten mit Hilfe der Membershipfunktion angegeben werden müssen. Wie im obigen Beispiel dargestellt, gibt die Membershipfunktion Häufigkeiten dadurch an, daß bei einem gegebenen Wert x die Anteile verschiedener Funktionswerte $\mu_i(x)$ miteinander verrechnet werden. Dieses Vorgehen funktioniert für die Regelung eindimensionaler physikalischer Größen sehr gut. Problematisch wird jedoch die Anwendung auf mehrdimensionale Größen und damit die Anwendung auf die Auswertung von Ereignissen, da diese, wie in Kapitel 1 bereits herausgestellt wurde, immer multifaktoriell bedingt sind.

Dieses Problem, die Fuzzy-Set Theorie auf mehrdimensionale Größen anzuwenden, läßt sich am einfachsten verdeutlichen, wenn man sich mit der Konstruktion von Membershipfunktionen beschäftigt. Für mehrdimensionale Größen müssen die Verläufe der Membershipfunktionen für alle bei der Auswertung relevanten Bedingungen korrekte Häufigkeiten liefern. Alle $\mu_i(x)$ und deren Überschneidungsbereiche müssen dazu so aufeinander abgestimmt sein, daß für alle möglichen Kombinationen von Anfragen korrekte Angaben gemacht werden können. Das Problem der Abstimmung verdeutlicht eine kleine Veränderung des obigen Beispiels: Man möchte herleiten, wie bedeutsam der Einflußfaktor 'Wartengestaltung' ist. Der Einflußfaktor liegt dabei in den Ausprägungen 'schlecht', 'mittel' und 'gut' vor. Auch in diesem Fall nimmt die Fuzzy-Set Theorie an, daß die Zugehörigkeit zur zugrundeliegenden Dimension 'Wartengestaltung' durch die Gewichtungswerte $\mu_i(x)$ bestimmt werden kann. Bild 4-7 zeigt eine solche Membershipfunktion $\mu_i(x)$.

Der Parameter i repräsentiert in dem Bild die drei Ausprägungen "schlecht" ($i=1$), "mittel" ($i=2$) und "gut" ($i=3$). Wird mit Bezug zum obigen Beispiel von einer Person eine Ausprägung von $x=2,5$ als "gute Wartengestaltung" empfunden, so ist diese für eine andere Person "mittel" (Punkt P1). Die Ausprägung selbst bleibt $x=2,5$, sie kann aber zwei verschiedenen Ausprägungen zugeordnet werden: Einmal der Ausprägung "gut" mit der Stärke $\mu_1(2,5)=0,5$ und der Ausprägung "mittel" mit der Stärke $\mu_2(2,5)=0,5$. Wandert die Ausprägung zu einem höheren Wert von $x=2,75$, so nimmt der Anteil der Ausprägung "gut" zu und der Ausprägung "mittel" ab (Punkt P2).

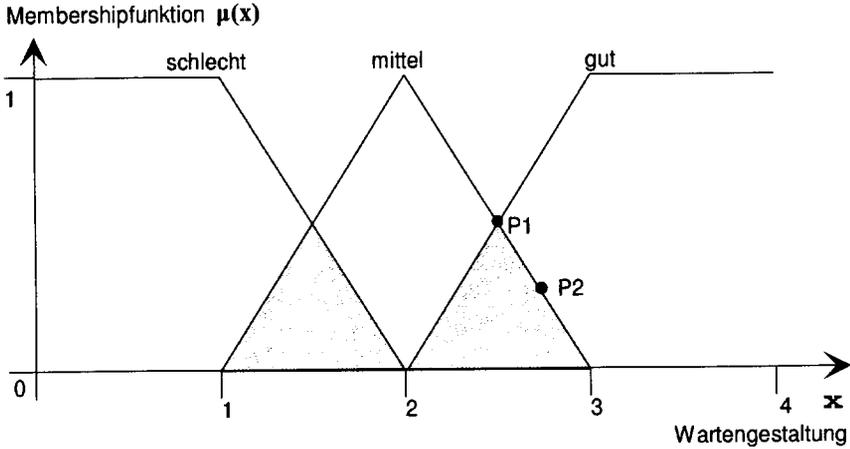


Bild 4-7 Eine einfache Membershipfunktion der Dimension 'Wartengestaltung'.

Damit ist die Korrektheit einer Fuzzy-Set Aussage davon abhängig, daß (1) die Dimension x tatsächlich allgemein gültig ist und in die Klassen eingeteilt werden kann, die den Membershipfunktionen zugrunde liegen, und (2) der Funktionsverlauf der Membershipfunktionen für alle Werte x bekannt ist. Zur Bestimmung dieser Parameter werden heuristische Annahmen und Skalierungsverfahren genutzt:

Bei **heuristischen Annahmen** nimmt man die Verteilungsform der Membershipfunktion vorweg und bestimmt lediglich den Überlappungsbereich verschiedener Funktionen. In den Verteilungen der obigen Beispiele sind vereinfachenderweise Dreiecke angenommen worden. Diese Annahme reicht für einfache technische Regelaufgaben aus, stößt jedoch an Grenzen der Vorhersagegenauigkeit, wenn die der Membershipfunktion zugrundeliegende Dimension keine physikalisch meßbare Größe, sondern eine semantische Größe bzw. ein psychologisches Konstrukt ist.

Das einfachste Verfahren, zu semantischen Größen Membershipfunktionen zu konstruieren, ist aus der psychologischen Entscheidungstheorie als Signal-Entdeckungstheorie bekannt: Nach der Signal-Entdeckungstheorie ergeben sich vier Möglichkeiten, einen Begriff einem anderen zuzuordnen (Tabelle 4-1):

Tabelle 4- 1 Entscheidungstafel zur Bestimmung einer Membershipfunktion.

Tatsächliche Ausprägung Zuordnung der Ausprägung durch Experten	mittel	gut
mittel	Übereinstimmung (Hit) mit Ausprägung = mittel $F(\text{Hit}) = n\%$	Keine Übereinstimmung (False Alarm) mit Ausprägung = mittel $F(\text{False Alarm}) = (100-n)\%$
gut	Falsche Antwort (Miss) zur Ausprägung = mittel $F(\text{Miss}) = m\%$	Korrekte Zurückweisung (Correct Rejection) der Ausprägung = gut $F(\text{Correct Rejection}) = (100-m)\%$

Aus den Zuordnungen, die verschiedene Experten zu unterschiedlichen Ausprägungen der Wartengestaltung vorgenommen haben, kann dann eine Membershipfunktion konstruiert werden, wie es in Bild 4-8 gezeigt wird. Weitere Informationen zur Konstruktion einer Membershipfunktion mit Hilfe der Signal-Entdeckungstheorie werden in Wickens (1984) und Zimmermann (1990) gegeben.

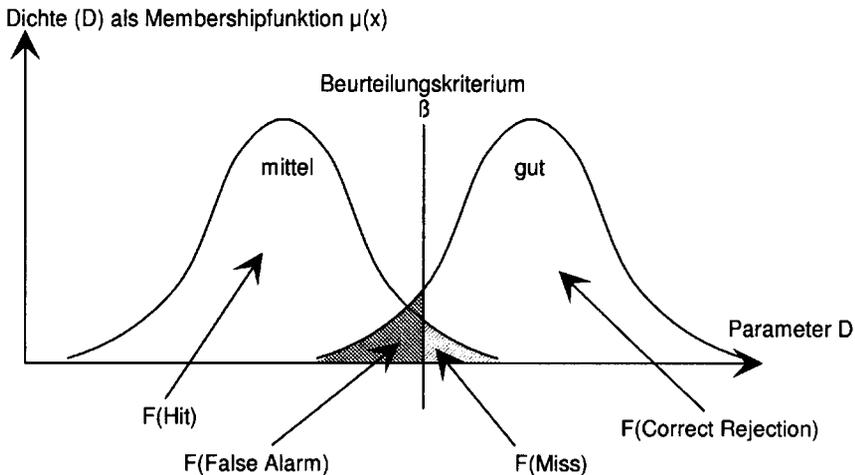


Bild 4- 8 Konstruktion einer Membershipfunktion mit der Signal-Entdeckungstheorie.

Auch bei der Signal-Entdeckungstheorie geht man davon aus, daß eine bestimmte Verteilung, die Normalverteilung, zugrunde liegt. Obwohl diese Verteilungsform auch für semantische Zusammenhänge oft beobachtet worden ist (Wickens, 1984), ist nicht sichergestellt, daß sie für jeden Zusammenhang, insbesondere für mehrparametrische Aussagen, gilt. Ferner ist dieses Vorgehen problematisch, da die tatsächliche Ausprägung in irgendeiner Form objektiv meßbar sein muß.

Bei **Skalierungsverfahren** wird auch die Verteilungsform der Membershipfunktion bestimmt. Dazu sind datenintensive Expertenbefragungen mit Methoden der psychologischen Testtheorie notwendig (siehe Zimmermann, 1990). In der Psychologie spricht man bei einer Größe, die auf einer Dimension abgebildet wird, obwohl diese Dimension nicht direkt meßbar ist, von einem psychologischen Konstrukt. Bei der Existenz eines psychologischen Konstruktes unterstellt man, daß (1) die Größe eindimensional ist und diese (2) durch die als Verteilungen angegebenen Ausprägungen vollständig beschrieben werden kann. Da diese Voraussetzungen in den seltensten Fällen erfüllt sind, geht man in der psychologischen Testtheorie davon aus, daß Konstrukte mehrdimensional sind (so hat das Konstrukt 'Wartengestaltung' vielfache Aspekte, wie z.B. Anordnung einzelner Elemente oder ganzer Systeme auf Pult A oder Pult B, Rückmeldung, Alarmsystem, Farbgebung etc.). Damit unterliegen die Eigenschaften einer individuellen Variabilität bezüglich der verschiedenen Aspekte. Ein Beispiel dazu: $n\%$ aller Personen finden das Mittel x zur Wartengestaltung gut, $(100-n)\%$ finden dieses schlecht; auf der anderen Seite finden beispielsweise $(100-n)\%$ das Mittel z zur Wartengestaltung gut und $n\%$ finden dieses schlecht. Damit können die beiden Gestaltungsmittel x und z nicht über eine einfache, stetig steigende Membershipfunktion abgebildet werden. Man würde zwei Funktionen für Mittel x und Mittel z benötigen oder eine Membershipfunktion mit zwei Gipfeln (einen bei Mittel x und einen bei Mittel z).

An dieser Stelle ergibt sich als wesentlicher Kritikpunkt an der Konstruktion der Membershipfunktion, daß die einer Membershipfunktion $\mu_i(x)$ zugrundeliegenden Dimensionen und Skalenintervalle kontextabhängig sind und insbesondere von demjenigen abhängen, der $\mu_i(x)$ konstruiert hat. Dies ist auch ein wesentlicher Kritikpunkt an der Fuzzy-Set Theorie, der von Scheffe (1987; p153) angemerkt wird. Danach sind konstruierte Dimensionen und Skalenintervalle in aller Regel unterschiedlich zu denjenigen der Realität; sie weisen also mangelnde Konstruktvalidität auf, wenn nicht intensive Untersuchungen zur Skalierung von $\mu_i(x)$ durchgeführt werden. Folglich muß untersucht werden, inwieweit die Konstrukte multifaktoriell sind oder durch wenige bzw. eine einzige Dimension beschrieben werden können.

Gelingt diese Reduktion auf wenige Dimensionen nicht, so bedeutet dies, daß streng genommen jede Membershipfunktion $\mu_i(x)$ m -parametrisch verteilt sein müßte, um Häufigkeiten für eine Kombination von n Eigenschaften korrekt abzubilden, wobei m wiederum die Anzahl aller möglichen Kombinationen nach Gleichung 4-3 umfaßt, um alle Wirkungszusammenhänge abbilden zu können.

$$m = \sum_{i=2}^k \binom{n}{i} \quad (4-3)$$

mit

k Anzahl aller bei der Auswertung gewünschten Kombinationen von Eigenschaften

n Anzahl aller Eigenschaften

- **Diskussion mit Bezug zum Auswertungsmodell**

Zusammenfassend kann festgehalten werden, daß in der Fuzzy-Set Theorie zwar Aussagen über Häufigkeiten mit Hilfe der Membershipfunktion bestimmt werden können. Das Hauptproblem der Fuzzy-Set Theorie liegt jedoch darin, daß eine einmal gebildete Zugehörigkeitsfunktion hinreichende Konstruktvalidität aufweisen muß, um mit ihr einen a priori gebildeten Zusammenhang a posteriori auch immer in der Form vorhersagen zu können. Um dies leisten zu können, muß die Membershipfunktion allgemein gültig sein.

Die Abbildung über Membershipfunktionen eignet sich also immer dann nicht, wenn die Verbindungen zwischen verschiedenen Begriffen nicht bekannt sind oder beliebige Kombinationen von Begriffen nicht über eine geringe Zahl von Membershipfunktionen abgebildet werden können, da das zugrundeliegende Konstrukt zu heterogen ist. In diesem Fall, der bei der Auswertung von Betriebserfahrung vorliegt, ist es erforderlich, nicht von eindimensionalen Größen auf der Ebene des Konstruktes auszugehen und die Zugehörigkeit zum Konstrukt über eine Membershipfunktion auszudrücken, sondern für einzelne Zusammenhänge eine spezifische Zugehörigkeit in Form einer gewichteten Relation anzugeben. Fuzzy-Sets gehen in diesem Fall in sogenannte probabilistische Netze über (vgl. Zimmermann, 1990), die im folgenden diskutiert werden.

A.4.3 Probabilistische Netze

Probabilistische Netze werden u.a. zur Modellierung von Expertenwissen in der medizinischen Diagnostik verwendet. Sie werden umfassend in Pearl (1988) dargestellt; einen Überblick über probabilistische Modelle geben u.a. Spiegelhalter et al. (1993). Ausgangspunkt der Überlegungen der probabilistischen Netze ist das **bayesche**

Theorem. Wird das bayesche Theorem auf verschiedene Aussagen angewendet, entsteht daraus ein sogenanntes bayesches oder auch **probabilistisches Netz**.

- **Bayesisches Theorem**

Das Bayesche Theorem für zwei voneinander abhängige Ereignisse A und C lautet (u.a. nach Bortz, 1989):

$$P(A|C) = \frac{P(A \cap C)}{P(C)} \Leftrightarrow P(A \cap C) = P(A|C) * P(C) \quad (4- 4)$$

mit:

C *Bedingung für A*

Für den Spezialfall der vollständigen Unabhängigkeit von A und C geht dieses Theorem über in die folgende Gleichung für vollständige Unabhängigkeit:

$$P(A|C) = P(A) = \frac{P(A \cap C)}{P(C)} \Leftrightarrow P(A \cap C) = P(A) * P(C) \quad (4- 5)$$

Nimmt man an, daß verschiedene Bedingungen C_i für das Ereignis A herrschen und das Ereignis A von allen Ereignissen C_i abhängt, so gilt unter der Voraussetzung, daß alle C_i vollständig unabhängig voneinander sind, folgender Zusammenhang:

$$P(A \cap C) = \sum_{i=1}^n (P(A|C_i) * P(C_i)) \quad (4- 6)$$

mit:

C_i *Bedingung oder Kontext für A*

n *Anzahl aller Bedingungen C_i für A*

Da in diesem Fall mehrere C_i für die Wahrscheinlichkeit $P(A \cap C)$ ausschlaggebend sind, wird die Menge aller C_i auch als **Kontext** für A bezeichnet (vgl. Pearl, 1988). Da ein Kontext bzw. die Bedingungen C_i entweder in zeitlicher oder logischer Hinsicht interpretiert werden können, wird probabilistischen Netzen zugeschrieben, nicht nur Zustände sondern auch zeitlich veränderliche Vorgänge abbilden zu können. Wird die

Gleichung 4-6 zur Darstellung mehrerer Ereignisse A_j unter mehreren Bedingungen C_{ij} genutzt, erhält man ein bayes'sches oder probabilistisches Netz.

• **Baysche bzw. probabilistische Netze**

Grundlage des Aufbaus eines probabilistischen Netzes ist die Graphentheorie. Dort wird unterschieden zwischen (1) hierarchischen und nicht hierarchischen, (2) gerichteten und ungerichteten sowie (3) zwischen a-zyklischen und zyklischen Graphen (Lipschutz, 1976). Haben die Kanten eine Bedeutung, werden sie als benannte Graphen bezeichnet (Bonato, 1990). Bild 4-9 stellt verschiedene Netztypen dar. Probabilistische Netze können nur gerichtete a-zyklische Graphen verarbeiten.

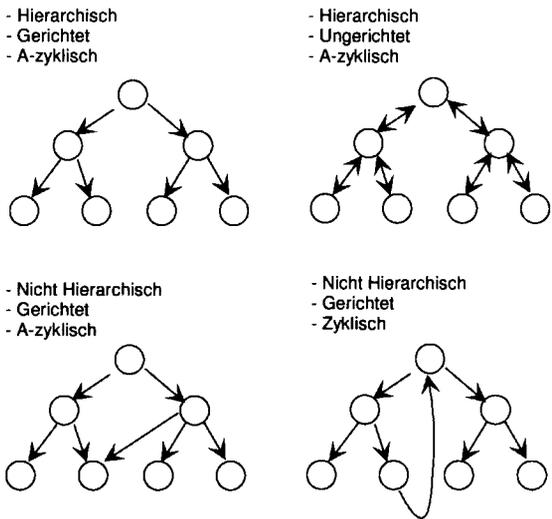


Bild 4-9 Verschiedene Typen von Graphen.

Für die weitere Diskussion probabilistischer Netze ist die Frage bedeutsam, was passiert, wenn verschiedene Merkmale des Kontextes abhängig voneinander sind. Eine genaue quantitative Auswertung eines Graphen mit Abhängigkeiten erfordert eine genaue Kenntnis aller $A|C_j$ und aller Wechselwirkungen $C_j|C_j$. Sind nicht alle Relationen bekannt bzw. werden bekannte Relationen nicht zur Berechnung der Wahrscheinlichkeit einer Aussage A berücksichtigt, so kann ein probabilistisches Netz nur über folgende Überlegung eine Aussage über das Zutreffen von A machen: Hängt ein Ereignis A von mehreren Ereignissen C_j ab, kann dies in einer Netzdarstellung dargestellt wer-

den, wie sie beispielhaft in Bild 4-10 gezeigt wird (zunächst sind nur die durchgezogenen Linien von Bedeutung).

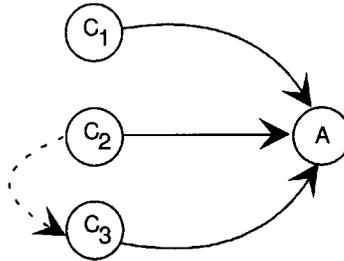


Bild 4-10 Ein einfaches probabilistisches Netz.

Ist eine vollständige Unabhängigkeit aller C_i gegeben, so berechnet sich die Wahrscheinlichkeit für das Ereignis A mit $\bar{P}(C) = \{0,3; 1,0; 0,1\}$ und $\bar{P}(A|C) = \{0,6; 0,5; 0,4\}$ nach Gleichung 4-6 zu:

$$P(A \cap C) = \begin{bmatrix} 0,3 \\ 1,0 \\ 0,1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 0,6 \\ 0,5 \\ 0,4 \end{bmatrix} = 0,18 + 0,5 + 0,04 = 0,72$$

Sind einige C_i nicht vollständig unabhängig voneinander, so berechnet die Gleichung 4-6 einen Wert, der keine Wahrscheinlichkeit mehr darstellt; sie ist streng genommen nicht mehr gültig. Im Bild ist beispielsweise eine Abhängigkeit zwischen C_2 und C_3 durch eine gestrichelte Verbindung unterstellt. Damit ergäbe sich die Wahrscheinlichkeit für das Ereignis A mit $\bar{P}(C) = \{0,3; 1,0; 1,0\}$ zu:

$$P(A \cap C) = \begin{bmatrix} 0,3 \\ 1,0 \\ 1,0 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 0,6 \\ 0,5 \\ 0,4 \end{bmatrix} = 0,18 + 0,5 + 0,4 = 1,08$$

Das Ergebnis ist größer als 1 und entspricht damit nicht mehr dem Wahrscheinlichkeitstheorem $P \in \{0, \dots, 1\}$. Um dieses Problem der Abhängigkeiten im Kontext zu umgehen, wird in probabilistischen Netzen statt mit Wahrscheinlichkeiten mit sogenannten Massen-Funktionen (mass-functions) gerechnet, wenn nicht alle Abhängigkeiten bekannt sind (siehe Schocken & Hummel, 1993). Durch die Massen-Funktion wird eine

Normalisierung der beobachteten Werte in den Grenzen $\{0, \dots, 1\}$ erreicht. Die Werte der obigen Gleichung können z.B. so begrenzt werden, daß gilt:

$$\text{Mass}(A \cap C) = \sum_{i=1}^n m_i = 1 \Leftrightarrow \sum_{i=1}^n (k * P(C_i) * P(A|C_i)) = 1 \quad (4-7)$$

mit:

- k *Normalisierungsfaktor*
- m_i *spezifische Masse der Relation i*
- n *Anzahl aller Bedingungen C_i für A*

Die Massen-Funktion repräsentiert somit keine Wahrscheinlichkeit gemäß Gleichung 4-6 mehr, sondern ist ein Maß, welches wechselseitige Abhängigkeiten innerhalb der Kontexte C_j so berücksichtigt, daß eine Aussage zum Ereignis A im Wertebereich von $\{0, \dots, 1\}$ liegt.

Um die Aussage über den Eintritt eines Ereignisses A unter den Bedingungen C_j mit einer Bedeutung zu verbinden, wird das Maß für das Zutreffen einer Aussage in probabilistischen Netzen als Believe-Funktion (übersetzt: Glaubensfunktion) bezeichnet. Der Glaube an ein Ereignis A unter den Bedingungen C_j ergibt sich aus Gleichung 4-7 als:

$$\text{Bel}(A \cap C) = \sum_{i=1}^{x \subseteq n} (k * P(C_i) * P(A|C_i)) = \sum_{i=1}^{x \subseteq n} m_i \quad (4-8)$$

mit:

- k *Normalisierungsfaktor*
- m_i *spezifische Masse der Relation i*
- x *Anzahl der Bedingungen C_i für A , die zur Aussage herangezogen werden*
- n *Anzahl aller Bedingungen C_i für A*

Innerhalb des Beispiels aus Bild 4-10 ist die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten eines Ereignisses A unter den Bedingungen $\bar{P}(C) = \{0,3; 1,0; 1,0\}$ beispielsweise gegeben durch:

$$\text{Bel}(A \cap C) = \begin{bmatrix} 0,925 * 0,3 \\ 0,925 * 1,0 \\ 0,925 * 1,0 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 0,6 \\ 0,5 \\ 0,4 \end{bmatrix} = 0,166 + 0,462 + 0,370 = 1,0$$

Soll nur die Bedeutung einer Untermenge des Kontextes für das Ereignis A betrachtet werden, ergäbe sich beispielsweise mit $\vec{P}(C) = \{0,0; 1,0; 1,0\}$:

$$\text{Bel}(A \cap C) = \begin{bmatrix} 0,925 * 0,0 \\ 0,925 * 1,0 \\ 0,925 * 1,0 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 0,6 \\ 0,5 \\ 0,4 \end{bmatrix} = 0,0 + 0,462 + 0,370 = 0,833$$

Der Differenzbetrag zwischen dem maximal möglichen Glauben und dem Glauben an den aktuellen Kontext beträgt in diesem Beispiel $1 - 0,833 = 0,166$ und wird als nicht festgelegter Glaube (uncommitted believe) bezeichnet, wenn seine Herkunft unbekannt ist.

• **Probabilistische Netze als Auswertungsmodell**

Aufgrund seiner Flexibilität in der Abbildung unterschiedlichster Relationen und aufgrund der Möglichkeit einer quantitativen Abbildung unbekannter Wirkungszusammenhänge über die Believe-Funktion, scheint dieser Ansatz ausreichend robust, um die als verschiedene Einzelereignisse gesammelte Betriebserfahrung auszuwerten. Damit ergäbe sich zur Vorhersage von quantitativen Angaben über die menschliche Zuverlässigkeit beispielsweise das in Bild 4-11 dargestellte Netz.

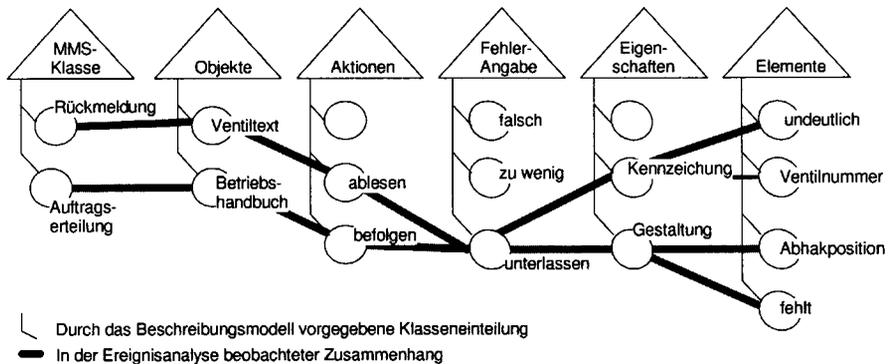


Bild 4-11 Ansatz eines probabilistischen Netzes zur Auswertung der Ereignisbeschreibungen.

Das in dem Bild dargestellte hypothetische Netz zeigt zwei mögliche Unterlassungsfehler: (1) Unterlassen des Ablesens eines Ventiltexes aufgrund undeutlicher Kennzeichnung der Ventilnummer und (2) Unterlassen des Befolgens eines Anweisungsschrittes innerhalb des Betriebshandbuches aufgrund fehlender Abhakpositionen. Sind 10 Er-

eignisse mit Unterlassungsfehlern beobachtet worden, so würde sich aus dem Netz für die Möglichkeit eines Unterlassungsfehlers beispielsweise die Häufigkeit

$$h(\text{unterlassen})=10$$

ergeben. Eine Anfrage für die Bedingungskonstellation bzw. den Kontext $\vec{C}_1=\{\text{Ventiltext, ablesen}\}$ würde beispielsweise

$$h(\text{unterlassen}|\vec{C}_1)=6$$

ergeben, da in diesen 10 Ereignissen 6 mal ein Ventiltext abzulesen war. Eine weitere Anfrage für die Bedingungskonstellation $\vec{C}_2=\{\text{Betriebshandbuch; befolgen}\}$ würde

$$h(\text{unterlassen}|\vec{C}_2)=7$$

ergeben, da in den 10 Ereignissen auch 7 mal Anweisungen im Betriebshandbuch zu befolgen waren. Würde man aber die Häufigkeiten für \vec{C}_1 und \vec{C}_2 miteinander addieren, würde man ein Ergebnis erhalten, welches deutlich größer ist als der maximal mögliche Wert $h(\text{unterlassen})$:

$$h(\text{unterlassen}|\vec{C}_1)+h(\text{unterlassen}|\vec{C}_2)=13$$

Der Grund für diese Überschätzung der Anzahl der Unterlassungsfehler liegt in diesem Beispiel daran, daß in 3 Ereignissen beide Kontexte gemeinsam wirksam waren und die Abhängigkeit beider Kontexte nicht im Netz abgebildet wurde. In diesem Fall bestünde nur durch die Believe-Funktion die Möglichkeit, die Häufigkeit des Auftretens von \vec{C}_1 und \vec{C}_2 zu interpretieren:

$$\text{Bel}(h(\text{unterlassen}|\vec{C}_1))+\text{Bel}(h(\text{unterlassen}|\vec{C}_2))=10$$

In diesem Fall können aber die einzelnen Beiträge von \vec{C}_1 und \vec{C}_2 nicht mehr als Häufigkeiten interpretiert werden. Damit kann zusammenfassend festgehalten werden, daß probabilistische Netze keine Möglichkeit bieten, sowohl für allgemeine Kontexte als auch für spezifische Kontexte ein einheitlich und eindeutig interpretierbares Maß zu geben (z.B. entweder in Form von Häufigkeiten oder in Form von Believe-Werten).

- **Diskussion mit Bezug zum Auswertungsmodell**

Die vorhergehenden Betrachtungen zeigen, daß probabilistische Netze nur dann zu sinnvollen qualitativen und korrekten quantitativen Aussagen führen, wenn das Netz einen gut strukturierten und gerichteten Suchraum ergibt. Uneindeutige quantitative Lösungen treten auf, falls Abhängigkeiten zwischen den Knoten des Netzes nicht vollständig bekannt sind. Sind Merkmale voneinander abhängig, kann dieses Problem nach Pearl (1988; p44) nur gelöst werden, wenn jede Abhängigkeit bekannt ist bzw. durch das Hinzufügen einer Hilfsvariable bekannt gemacht werden kann. Voraussetzung hierfür ist, daß überhaupt eine Hilfsvariable gefunden werden kann (vgl. auch Whittaker, 1993). Effekte aus der Korrelationsstatistik (z.B. Suppressionseffekte zwischen Variablen) müssen also vollständig aufgeklärt sein, bevor sie durch ein probabilistisches Netz beschrieben werden können. Die Beziehungen der beeinflussenden Variablen müssen dazu explizit angegeben werden (siehe z.B. Bortz, 1989).

Zusammenfassend führen Probabilistische Netze immer dann zu fehlerhaften Aussagen, wenn nicht zu allen theoretisch möglichen Kombinationen auch angegeben werden kann, mit welcher Wahrscheinlichkeit diese zu beobachten sind. Können solche Angaben nicht gemacht werden (wie im Fall verdeckter Wechselwirkungen), sind probabilistische Netze nicht zur Auswertung geeignet. Probabilistische Netze haben in diesem Fall gegenüber objektorientierten Ansätzen nur den Vorteil, relative Aussagen über die Beziehung zweier Kontexte machen zu können (z.B. Kontext 1 ist häufiger als Kontext 2). Dieser Nachteil, unvollständige Daten, die sich in Wechselwirkungen zwischen beobachteten Wirkungszusammenhängen äußern, nur mit Hilfe der Believe-Funktion richtig zu interpretieren, wird demzufolge den probabilistischen Netzen auch vorgeworfen (siehe Schocken & Hummel, 1993; p424). Somit ist dieser Ansatz nicht geeignet, um quantitative Angaben mit hinreichender Konsistenz zu berechnen. In der Betriebserfahrung liegen aber gerade unvollständige Angaben vor, da in einem Ereignis oder einer begrenzten Anzahl von Ereignissen nicht immer alle möglichen Wechselwirkungen beobachtet werden und somit immer unvollständige Daten vorhanden sind. Ferner können aus der Betriebserfahrung nur Häufigkeiten des gemeinsamen Auftretens von Begriffen beobachtet werden und keine Wahrscheinlichkeiten.

Damit sind probabilistischer Netze als Auswertungsmethode im wesentlichen aus drei Gründen nicht geeignet: (1) Die möglichen Wirkungszusammenhänge (Kombinationen) die im Beschreibungsmodell vorliegen, können nur durch kombinatorische Explosion der Relationen abgebildet werden. (2) Man benötigt vollständige An-

gaben zu allen Relationen. (3) Die Angaben müssen als Wahrscheinlichkeiten angegeben werden; absolute Häufigkeiten reichen nicht aus. Die Problemfelder, die sich aus diesen Nachteilen ergeben, sind übliche Einsatzgebiete neuronaler und konnektionistischer Netze.

A.4.4 Neuronale und konnektionistische Netze

Der "Neuere Konnektionismus" (Kempke, 1988) umfaßt eine Reihe von Ansätzen zur quantitativen und qualitativen Verarbeitung von Information. Der Zusatz "neuere" geht dabei auf den Umstand zurück, daß dieser Ansatz bereits um 1950 herum in der Kognitionspsychologie zur Modellierung menschlicher Informationsverarbeitung herangezogen wurde und um 1980 herum im ingenieurwissenschaftlichen Bereich wiederauflebte. Dort wurde der Ansatz zunächst als geeigneter Algorithmus zur Erkennung und Verarbeitung visueller oder auditiver Muster angesehen (Bildverarbeitung, Spracherkennung).

Auch in der Kognitionspsychologie wird dieser Ansatz als Alternative zu anderen Informationsverarbeitungsmodellen (z.B. an der Informatik orientierte Prozessor-Modelle) gesehen, da er sich (1) am Aufbau des Gehirns aus einfachen Nervenzellen orientiert und er (2) auf einfache Probleme der künstlichen Intelligenz angewendet werden konnte, wie das Worterkennungmodell von McClelland und Rumelhart (1981) oder das Modell zur Modellierung von Tippfehlern nach Rumelhart und Norman (1982). Neumann (1992) geht bei der Beurteilung der Bedeutung neuronaler Netze sogar so weit, den Konnektionismus aufgrund seiner Merkmale als neues Paradigma der kognitionspsychologischen Forschung anzusehen. Weitere Diskussionen zur kognitionspsychologischen Einordnung finden sich auch in Strube (1990) oder Stoffer (1989). Allerdings sind in konnektionistischen Modellen bisher kaum klassische kognitionspsychologische Befunde modelliert worden, wie z.B. Miller (1956), Sanders (1975) oder Attneave (1974). Ansätze zur kognitionspsychologischen Modellierung finden sich u.a. in Shastri (1988), Fu (1993) oder Emmanji et al. (1992).

Innerhalb der Theorie der neuronalen Netze gibt es eine Vielzahl unterschiedlicher Ansätze u.a. in Rumelhart und McClelland (1986), Kohonen (1988), Nauck et al. (1994). Einen Überblick über verschiedene Ansätze gibt Kempke (1988). Auf diese Vielzahl möglicher Ansätze soll hier im Detail nicht eingegangen werden. Für eine Betrachtung, inwieweit aus diesem Ansatz eine Lösung der oben angesprochenen Probleme probabilistischer Modelle bei der Auswertung der Informationen aus dem Be-

schreibungsmodell gewonnen werden kann, genügt die hier vorgenommene Charakterisierung und Diskussion.

Verglichen mit den bisherigen Ansätzen macht der Konnektionismus die wenigsten Restriktionen bezüglich des Aufbaus des informationsverarbeitenden Mechanismus. Aufgrund dieser hohen Anpassungsfähigkeit scheint dieser Ansatz geeignet, die Probleme zu lösen, welche die bisher besprochenen Modelle bei einer qualitativen und quantitativen Auswertung der Angaben des Beschreibungsmodells haben. Allerdings sind konnektionistische Modelle bisher hauptsächlich auf Bildverarbeitung oder Spracherkennung anwendbar und werden kaum im Zusammenhang mit der Verarbeitung semantischer bzw. symbolischer Information gesehen. Die Bauteile eines konnektionistischen Netzes sind Zellen, die dem neurobiologischen Vorbild nachgebildet sind, sowie die Architektur bzw. Topologie des durch die Zellen gebildeten Netzes. Innerhalb dieser Einteilung unterscheidet man zwischen der **Mikroebene** (den Vorgängen an den Zellen) und der **Makroebene** (den Leistungen des gesamten Netzes z.B. in Form von Bild- oder Sprachverarbeitung).

- **Mikroebene**

Die Mikroebene eines neuronalen Netzes ist stark angelehnt an die Struktur und Verarbeitungsweise einer neuronalen Zelle des menschlichen Gehirns. Man unterscheidet Dendriten auf der Eingabeseite, Axone auf der Ausgabeseite und das Soma (die Zelle) zur Verarbeitung der Eingangsinformation und Umformung in eine Ausgangsinformation. Bild 4-12 faßt diese Elemente zusammen.

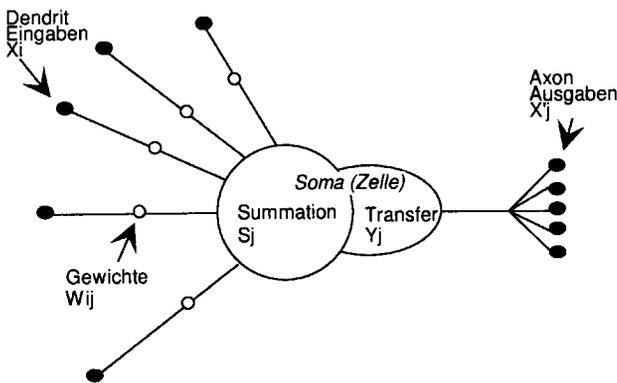


Bild 4-12 Aufbau einer Nervenzelle.

Wie aus dem Bild ersichtlich, findet eine Informationsverarbeitung dadurch statt, indem ein Vektor von Aktivierungen X_j aus vorgelagerten Zellen mit einem Gewichtungsvektor W_j zu einer Eingabeaktivierung einer Zelle j verrechnet wird. Diese Aktivierung wird dann mittels einer Transferfunktion (S_j) in der Zelle zu einem Ausgabevektor Y_j verarbeitet.

Die Transferfunktion, auch Aktivierungsfunktion genannt, begrenzt den Wertebereich in der Regel auf das Intervall $\{0, \dots, 1\}$ und ist monoton steigend aber nicht notwendigerweise stetig. Sie repräsentiert die Anzahl der Eingangsinformationen, welche die Zelle über die Dendriten zu einem Zeitpunkt t gerade erhält. Die durch die Transferfunktion gebildete Information des Ausgabevektors dient dann wiederum als Eingangsinformation für nachgeordnete Zellen. Die Informationsverarbeitung geschieht dabei im einfachsten Fall entsprechend der folgenden Gleichungen:

$$S_j = \sum_{i=1}^n (w_{ij} * x_{ij}) \quad (4-9)$$

und

$$Y_j = f(S_j) \in \left\{ \frac{S_j}{1+S_j}; \frac{e^{S_j}}{1+e^{S_j}}; \dots \right\} \quad (4-10)$$

mit:

i *Anzahl der eingehenden Verbindungen*

Y_j *Ausgangsaktivierungen*

X_i *Eingangsaktivierungen*

w_{ij} *Stärke von Knoten ij*

Wie bei dem biologischen Vorbild gilt in den meisten Anwendungen eine einheitliche Aktivierungsfunktion für alle Zellen. Eine Ausnahme bilden hybride Netze, die bezogen auf unterschiedliche Schichten unterschiedliche Aktivierungsfunktionen benutzen. Für Transferfunktionen gilt prinzipiell derselbe Sachverhalt, wie er bei den Membershipfunktionen der Fuzzy-Sets diskutiert wurde: Sie müssen so konstruiert sein, daß eine Zelle eine sinnvolle Funktion im gesamten Netz übernimmt. Auch bei neuronalen Netzen werden diese Funktionen aber auf der Basis heuristischer Überlegungen konstruiert und dadurch validiert, daß das Netz mit einer bestimmten Transferfunktion die besten Resultate erzeugt.

- **Makroebene**

Die Makroebene wird in verschiedene Verarbeitungsebenen (sogenannte Layer oder Schichten) unterteilt. Notwendige Verarbeitungsschichten sind Eingabeschicht und Ausgabeschicht. Zur Verarbeitung komplexer Informationen sind in einigen Netzarchitekturen zusätzlich verdeckte Schichten (hidden layer) zwischen Eingabe- und Ausgabeschicht eingearbeitet. Bild 4-13 zeigt eine Grobstruktur eines konnektionistischen Modells.

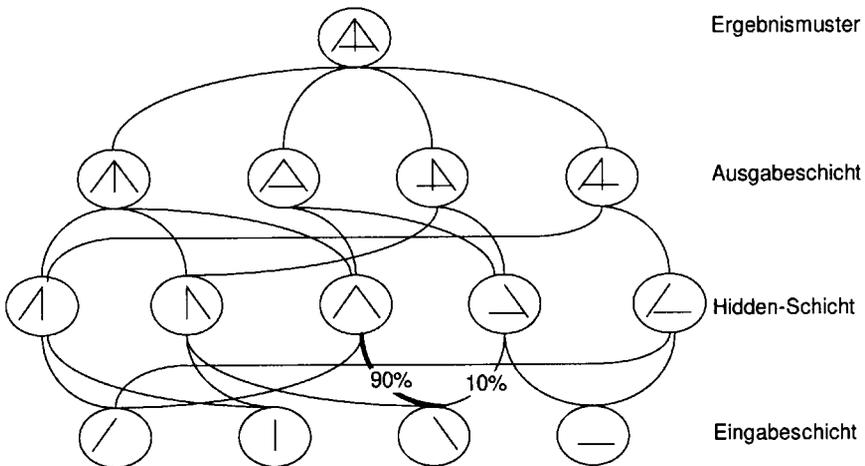


Bild 4-13 Grobstruktur eines einfachen konnektionistischen Modells.

Das Netz besteht aus Knoten und Verbindungen zwischen verschiedenen Knoten. Durch die Anordnung der Knoten ist es möglich, aus einfachen Mustern (Eingabeschicht auf der unteren Ebene) komplexere Muster zusammenzusetzen (Verdeckte Schichten auf den mittleren Ebenen), die sich schließlich zu einem Endmuster (Ausgabeschicht auf der oberen Ebene) zusammenfügen. Jede Ebene (bzw. Klasse) stellt dabei einen bestimmten Abstraktionsgrad dar, der von der Information abhängig ist, die auf diesen Ebenen zu finden ist. Sowohl Knoten als auch Verbindungen besitzen Gewichtungen und die Möglichkeit, Aktivierungen aufzunehmen. Durch diese Eigenschaft können bestimmte Wege in dem Netz verstärkt werden. Hierdurch kann z.B. eine Aussage bei unvollständigen Mustern getroffen werden, wie der dickere Pfad in der Abbildung verdeutlicht: Auf der untersten Ebene ist z.B. nur das Zeichen "/" als Information verfügbar. Aufgrund der stärkeren Verbindung zum Zeichen "^" wird dieses übergeordnete Muster als wahrscheinlicher angesehen als das benachbarte Zeichen ">".

Bezüglich der Funktionalität eines neuronalen Netzes werden verschiedene Unterteilungen vorgenommen. Nach Strube (1990) kann beispielsweise bezüglich des Anwendungsziels zwischen symbolischer (quantitativer) und semantischer (qualitativer) Verarbeitung unterschieden werden. Zur weiteren Diskussion neuronaler Netze in dieser Arbeit ist eine Unterteilung in assoziative und konnektionistische Netze von Bedeutung.

In assoziativen Netzen sind die Knoten den verdeckten Schichten derart mit den Knoten der Eingabe- und Ausgabeschicht verbunden, daß keine Möglichkeit besteht, einen kausalen Zusammenhang zwischen Eingabe und Ausgabe herzustellen. Weder die Verbindungen noch die Knoten in den verdeckten Schichten tragen spezifische semantische Information. Vielmehr ist das gesamte Wissen, welches zur Umformung der Eingabeinformation in die Ausgabeinformation notwendig ist, verteilt auf die Aktivierung der Knoten und auf die Gewichtungen der Verbindungen abgelegt. Ein gutes Beispiel für diese Art der Repräsentation sind bildverarbeitende Netze. In konnektionistischen Netzen kann die Information in jeder Ebene und an jedem Knoten als semantische Information interpretiert werden. Jeder Knoten im Netz trägt eine ganz bestimmte semantische Information. Die einfachste Form eines konnektionistischen Netzes ist ein ungerichteter hierarchischer Graph oder ein semantisches Netz (Bonato, 1990). Zusammenhänge in konnektionistischen Netzen werden aufgrund von Gewichtungen der einzelnen Bedeutungsträger (Knoten) gewonnen. Damit besteht bei konnektionistischen Netzen eine gewisse Verwandtschaft zu probabilistischen Netzen, wenn ein probabilistisches Netz als nicht lernfähiges konnektionistisches Netz angesehen wird.

Obwohl assoziative und konnektionistische Netze auf der Makroebene zu identischen Leistungen fähig sein können, unterscheiden sie sich stark hinsichtlich der Verteilung der Aktivierungen und Gewichtungen. Die ursprüngliche Information wird durch die verdeckten Schichten in assoziativen Netzen so sehr verteilt, daß in der Ausgabeschicht nichts mehr auf ihre ursprüngliche Bedeutung hinweist, also keine semantischen Beziehungen zwischen Eingabe und Ausgabe hergestellt werden können.

- **Eigenschaften neuronaler Netze**

Die Eigenschaften neuronaler Netze lassen sich mit den Begriffen **Lernfähigkeit**, **Ähnlichkeitsbestimmung** und **Selbstorganisation** umschreiben. Sie sind in herkömmlichen Datenbanken mit fester Erfassungs- und fester Auswertungsstruktur in dieser Form nicht möglich.

Zentrale Hypothese des Lernens in neuronalen Netzen ist, daß Relationen zwischen Knoten mit gemeinsamer Aktivierung verstärkt werden (Hebb'sche Synapsen-Modifikationsregel genannt; Hebb, 1949). Lernfähigkeit beschränkt sich in neuronalen Netzen meist auf die Veränderung von Aktivierungen von Knoten oder von Verbindungsstärken. Die Modifikation wird dabei während einer Lernphase vorgenommen, indem iterativ ein oder mehrere zu lernende Muster an der Eingabeschicht präsentiert werden und diese in der Ausgabeschicht zu einem gewünschten Ausgabemuster führen müssen. Ziel während der Lernphase ist es, die Fehler zwischen Ist-Ausgabe und Soll-Ausgabe zu minimieren. Der Fehler wird dabei entweder bezogen auf das gesamte Netz (Thermodynamische Modelle), bezogen auf die Ausgabeschicht oder bezogen auf die einzelnen Verbindungen (Backpropagation-Modelle) berechnet. Nach der Lernphase ist das Netz dann im Idealfall zur Identifikation verschiedener Ausgabemuster auf der Basis der Eingangsinformation fähig.

Lernen geschieht in neuronalen Netzen hauptsächlich "mit Bewerter". Es fehlt ein Algorithmus, welcher den sinnvollen Aufbau von Verbindungsstärken oder die sinnvolle Ergänzung neuer Neuronen in den gesamten Zellverband steuert. In Kohonen (1988) wird zwar die Möglichkeit angesprochen, statistisch signifikante Zusammenhänge zwischen den Eingabemustern hierfür zu nutzen. Diese sogenannten selbstorganisierenden Netze (self organizing networks), welche eine Lernmöglichkeit 'ohne Bewerter' bieten, führten jedoch bisher aufgrund des Umstandes, daß statistische Zusammenhänge schwer semantisch zu interpretieren sind, kaum zu leistungsfähigen Anwendungen. Die Hauptschwierigkeit besteht darin, daß statistische Zusammenhänge noch nichts darüber aussagen, welcher Qualität diese Zusammenhänge sind (z.B. kann ein Zusammenhang zweier Variablen durch Konfundierungs- oder Suppressionseffekte einer unbekanntem dritten Variable zustande gekommen sein).

- **Diskussion mit Bezug zum Auswertungsmodell**

Die neuronalen und konnektionistischen Netze besitzen die Möglichkeit, die bisher angesprochenen Probleme bei der Auswertung der Daten des Beschreibungsmodells zu lösen. Dies scheint aus dem Grunde möglich, da sie eine Reihe von Eigenschaften besitzen, die für das Auswertungsmodell erforderlich sind. Bezüglich dieser Eigenschaften kann festgehalten werden:

Konnektionistische und assoziative Netze: Bezogen auf die Unterscheidung zwischen konnektionistischen und assoziativen Netzen wurde deutlich, daß in assoziativen Net-

zen keine Beurteilung der semantischen Bedeutung der Knoten oder Relationen zwischen Eingabe- und Ausgabeschicht möglich ist. Sie sind aus diesem Grunde für eine Auswertung von Betriebserfahrung ungeeignet. Konnektionistische Netze scheinen dagegen geeignet, Betriebserfahrung auszuwerten.

Lernfähigkeit: In konnektionistischen Modellen werden oft auftretende Begriffe (Knoten) oder Verbindungen zwischen verschiedenen Knoten durch ihr gemeinsames Auftreten verstärkt. Andere Verbindungen, die nicht genutzt werden, schwächen dagegen ihre Verbindung in Relation zu den gestärkten. Hierdurch ist das Netz lernfähig. Oft beobachtete Begriffe oder Verbindungen von Begriffen stellen die Erfahrung des Netzes dar. Nicht beobachtete Begriffe werden dagegen schwächer und isolieren sich mit zunehmender Erfahrung vom restlichen Netz.

Selbstorganisation: Bezüglich der Beschreibung und Auswertung von Ereignissen bedeutet Selbstorganisation folgendes: Zum einen können neue Ereignisse mit bereits vorhandenen Begriffen beschrieben werden, so daß die Verbindungsstärken zwischen den benutzten Begriffen selbständig modifiziert werden und ein Lernen ohne Bewerter möglich ist. Zum anderen besteht die Möglichkeit, neue Begriffe einzuführen und auch diese neuen Begriffe in einen sinnvollen Zusammenhang mit bereits vorhandenen zu bringen, da die neuen Begriffe über die gemeinsame Nutzung mit bereits bekannten Begriffen in einem Ereignis und dort bezogen auf eine bestimmte Klasse (MMS-Komponente oder Beschreibungsstufe) semantisch festgelegt werden und so in die Objekthierarchie eingebunden werden.

Ähnlichkeitsbestimmung: Wie bereits oben beschrieben, sind Ähnlichkeiten in konnektionistischen Netzen immer durch eine Entsprechung in den Aktivitätsverteilungen der Muster repräsentiert. Diese Möglichkeit, Ähnlichkeiten verschiedener Ereignisse zu bestimmen, ist erforderlich, um unterschiedlich detaillierte Abfragen stellen zu können, wie sie für eine HRA (Human Reliability Analysis) gefordert sind. Durch diese Eigenschaft können auch Angaben über Fallentsprechungen und somit Maße für die Übertragbarkeit der Informationen verschiedener Ereignisse erarbeitet werden.

Polymorphie: Konnektionistische und assoziative Netze können polymorphe Beziehungen abbilden, indem Beziehungen zwischen beliebigen Kombinationen von Begriffen innerhalb einer verdeckten Schicht abgebildet werden.

- **Ansatz für das Auswertungsmodell**

Wenn ein konnektionistisches Netz zur Auswertung von Ereignisbeschreibungen konstruiert werden soll, ergeben sich insgesamt die folgende Varianten einer Netztopologie, um Häufigkeitsangaben für komplexe Aussagen zu generieren: (1) Topologie bezogen auf die Aussagen, die man mit Hilfe des Netzes gewinnen will. (2) Topologie bezogen auf die Objekte, die zur Ereignisbeschreibung genutzt werden. (3) Topologie bezogen auf die Ereignisse, die ausgewertet werden sollen.

Die Topologie soll dazu dienen, sowohl Häufigkeiten bestimmen zu können, mit der eine Aussage in den bisher beobachteten Ereignissen aufgetreten ist, als auch Relationen zu Begriffen bestimmen zu können, welche mit dieser Aussage zusammenhängen. Um dies zu erreichen, sollen alle drei Netztopologien anhand der Umsetzung der Aussage A='UND Ventil UND öffnen UND unterlassen' im folgenden diskutiert werden.

- **Variante 1: Aussagenbezogene Topologie**

Die augenscheinlichste Variante ist die aussagenbezogene Topologie. In dieser wird jede Aussage, die höherwertig ist als eine Kombination von zwei Knoten, durch einen neuen Knoten dargestellt. Jeder Knoten auf der Aussageebene hat in diesem Fall Relationen zu allen Begriffen, die in der Aussage von Bedeutung sind. Bild 4-14 zeigt eine einfache Realisierung der obigen Aussage in der aussagenbezogenen Topologie.

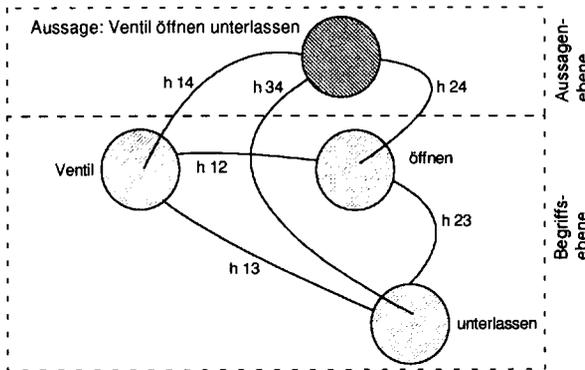


Bild 4-14 Aussagenbezogene Topologie eines konnektionistischen Netzes.

Zwei Lösungen bieten sich innerhalb dieser Topologie an, die Häufigkeit der Aussage 'UND Ventil UND öffnen UND unterlassen' zu ermitteln: (1) Alle Ereignisse werden

nach der Aussage durchsucht und diejenigen ausgezählt, in denen diese Kombination vorgekommen ist. Diese Lösung führt zu denselben Problemen, wie bei den bereits weiter oben diskutierten Verfahren. Die Anzahl der Aussagen, nach denen alle Ereignisse durchsucht werden müssen, explodiert kombinatorisch. (2) Die Häufigkeit der Aussage *A* wird über die Gewichte der Relationen bestimmt. Im Bild 4-14 sind dies h_{14} , h_{24} und h_{34} . Die gesuchte Angabe ergäbe sich dann beispielsweise über:

$$h(\text{UND Ventil UND öffnen UND unterlassen}) = h_{14} * h(\text{Ventil}) + h_{24} * h(\text{öffnen}) + h_{34} * h(\text{unterlassen})$$

Die Häufigkeiten $h_{i,j}$ gehen jedoch weder direkt aus der Anzahl der Begriffe noch aus der Anzahl der beobachteten Ereignisse hervor. Diese Variante ist also nicht zur Ereignisauswertung geeignet, da die notwendigen Angaben zum Aufbau des Netzes fehlen oder der Auswertungsaufwand, der gerade minimiert werden soll, kombinatorisch explodiert.

- **Variante 2: Objektbezogene Topologie**

Konnektionistische Netze können sowohl aktivierende (exzitatorische) als auch hemmende (inhibitorische) Aktivierungen verarbeiten. In Variante 2 wird dieser Umstand genutzt, um jede höherwertige Aussage durch eine bestimmte Menge hemmender Impulse auf eine maximal zwei-wertige Verbindung zu realisieren (Bild 4-15). Das Verhalten dieser Variante ist in der Physiologie unter dem Namen *Laterale Hemmung* bekannt.

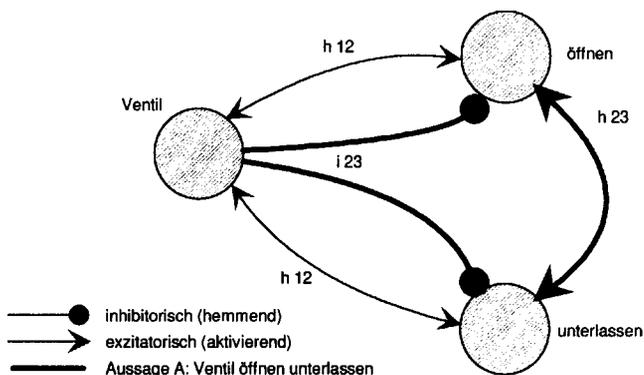


Bild 4-15 Objektbezogene Topologie mit inhibitorischen Verbindungen.

Die Aussage A käme in dieser Variante dadurch zustande, daß man eine zwei-wertige Verbindung h_{ij} aus der n -wertigen Aussage auswählt und darauf alle weiteren Knoten bis auf Knoten i und j hemmend auf die Knoten i und j einwirken ließe. Die Frage, wie stark eine solche Hemmung sein sollte, kann man folgendermaßen beantworten: Die Häufigkeit einer zwei-wertigen Aussage muß um diesen Betrag verringert werden, so daß eine korrekte Häufigkeitsangabe für die höherwertige Aussage möglich wird. Dies bedeutet, daß die Aussage 'UND Ventil UND öffnen UND unterlassen' auch durch folgende Berechnung ausgedrückt werden kann:

$$h(\text{UND Ventil UND öffnen UND unterlassen}) = h(\text{UND öffnen UND unterlassen}) - i_{23}$$

In einem konnektionistischen Netz ist eine derartige Verrechnung nur dann möglich, wenn für jeden Knoten die Höhe der hemmenden Relation bestimmt werden kann, welche zur Produktion höherwertiger Aussagen erforderlich ist. Diese geht nicht direkt aus den einzelnen Ereignissen hervor. Damit benötigt auch diese Variante Angaben, die nicht direkt aus Ereignissen beobachtbar sind. Da es um so schwieriger wird, die Stärke der hemmenden Verbindungen zu bestimmen, je höher die Wertigkeit der Aussagen ist, erscheint auch diese Variante nicht praktikabel.

- **Variante 3: Ereignisbezogene Topologie**

In Variante 3 wird jede Relation über ein Ereignis realisiert. Ein entscheidender Unterschied zu den vorherigen Varianten ist, daß in dieser Variante auch zwei-wertige Aussagen nicht als direkte Verbindungen zweier Knoten abgebildet werden, sondern auch diese (wie höherwertige Aussagen) einen "Umweg" über die Ereignis-Knoten gehen müssen, wie beispielsweise h_{12} im Bild 4-16.

Ein Ereignis-Knoten hat in dieser Variante direkte Verbindungen nur zu all den Knoten, die in der Ereignisbeschreibung genutzt worden sind. Im Bild sind beispielsweise zwei Ereignisse beobachtet worden. Im Ereignis 1 wurde beobachtet, daß ein Ventil geöffnet wurde, und im Ereignis 2, daß ein Öffnen eines Ventils unterlassen wurde.

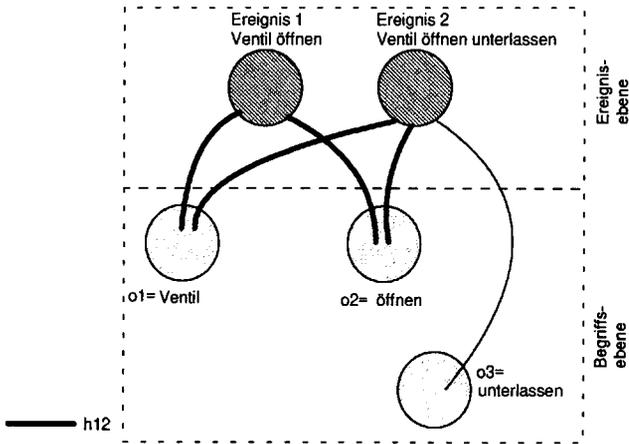


Bild 4-16 Ereignisbezogene Topologie eines konnektionistischen Netz.

Damit ergibt sich für die Häufigkeit, mit der die Aufgabe 'Ventil öffnen' durchzuführen war,

$$h(\text{UND Ventil UND öffnen})=h_{12}=2,$$

da diese Aufgabe in zwei Ereignissen beobachtet wurde. Für die Anzahl der Unterlassungen, die bei der Durchführung der Aufgabe 'Ventil öffnen' aufgetreten sind, ergibt sich

$$h(\text{UND Ventil UND öffnen UND unterlassen})=1,$$

da dies in nur einem Ereignis beobachtet wurde.

Da alle Informationen, die für Variante 3 erforderlich sind, direkt aus den Ereignissen gewonnen werden können (der Begriff, der zur Ereignisbeschreibung genutzt wurde, und die Relation zu dem Ereignis, in dem er genutzt wurde), bietet sich diese Variante als Netztopologie für das Auswertungsmodell an.

Anhang 5: Extrakt des Kapitels 20 des THERP-Handbuches

In diesem Anhang werden die Tabellen und Flußdiagramme aus Swain und Guttman (1983) dargestellt, mit welchen die Angaben aus der Betriebserfahrung verglichen worden sind. Der Anhang soll demjenigen Leser, dem diese Literatur nicht zur Verfügung steht, die erforderliche Information geben, um den durchgeführten Vergleich nachvollziehen zu können.

Table 20-1. Initial-screening model of estimated HEPs and EFs for diagnosis within time T by control room personnel of abnormal events annunciated closely in time¹

Item	T(min) after To ²	HEP for first event	EF	Item	T(min) after To ²	HEP for ³ second event	EF
(1)	1	1.0	--	(7)	1	1.0	--
(2)	10	0.5	5	(8)	10	1.0	--
(3)	20	0.1	10	(9)	20	0.5	5
(4)	30	0.01	10	(10)	30	0.1	10
				(11)	40	0.01	10
(5)	60	0.001	10	(12)	70	0.001	10
(6)	1500	0.0001	30	(13)	1510	0.0001	30

Footnotes:

¹ "Closely in time" refers to cases in which the annunciation of the second abnormal event occurs while CR personnel are still actively engaged in diagnosing and/or planning responses to cope with the first event. This is situation-specific, but for the initial analysis, use "within 10 minutes" as a working definition of "closely in time".

Note that this model pertains to the CR crew rather than to one individual.

² For points between the times shown, the medians and EFs may be chosen from figure below (press F9 key to look at the figure) and interpolate between tabled values for the second event.

³ To is a compelling signal of an abnormal situation and is usually taken as a pattern of annunciators. A probability of 1.0 is assumed for observing that there is some abnormal situation.

⁴ Assign HEP=1.0 for the diagnosis of the third and subsequent abnormal events annunciated closely in time.

Table 20-2. Initial-screening model of estimated HEPs and EFs for rule-based actions by control room personnel after diagnosis of an abnormal event]

Item	Potential Errors	HEP	EF
	Failure to perform rule-based actions correctly when written procedures are available and used:		
(1)	Errors per critical step without recovery factors	.05	10
(2)	Errors per critical step with recovery factors	.025	10
	Failure to perform rule-based actions correctly when written procedures are not available or not used:		
(3)	Errors per critical step with or without recovery factors	1.0	--
(4)	Failure to perform an immediate emergency action for the reactor vessel/-containment critical parameters, when (a) it can be judged to have been committed to memory, (b) it can be classified as skill-based actions, and there is a backup written procedure	.01	5

Footnotes:

| Note that this model pertains to the CR crew rather than to one individual.

Table 20-3. Nominal model of estimated HEPs and EFs for diagnosis within time T by control room personnel of abnormal events annunciated closely in time(**).

Item	T(min) after To(#)	HEP for first event	EF	Item	T(min)(**) after To(#)	HEP for(##) second event	EF	Item	T(min)(**) after To(#)	HEP for(##) third event	EF
(1)	1	1.0	--	(7)	1	1.0	--	(14)	1	1.0	--
(2)	10	0.1	10	(8)	10	1.0	--	(15)	10	1.0	--
(3)	20	0.01	10	(9)	20	0.1	10	(16)	20	1.0	--
(4)	30	0.001	10	(10)	30	0.01	10	(17)	30	0.1	10
				(11)	40	0.001	10	(18)	40	0.01	10
								(19)	50	0.001	10
(5)	60	0.0001	30	(12)	70	0.0001	30	(20)	80	0.0001	30
(6)	1500	0.00001	30	(13)	1510	0.00001	30	(21)	1520	0.00001	30

Footnotes:

(*)"Closely in time" refers to cases in which the annunciation of the second abnormal event occurs while CR personnel are still actively engaged in diagnosing and/or planning responses to cope with the first event. This is situation-specific, but for the initial analysis, use "within 10 minutes" as a working definition of "closely in time".

Note that this model pertains to the CR crew rather than to one individual.

The nominal model for diagnosis includes the following activities: "perceive", "discriminate", "interpret", "diagnosis", and the first level of "decision-making. The modeling includes those aspects of behaviour included in the Annunciator Response Model; therefore, when the nominal model for diagnosis is used, the annunciator model should not be used for the initial diagnosis. The annunciator model may be used for estimating recovery factors for an incorrect diagnosis.

(**)For points between the times shown, the medians and EFs may be chosen from figure below (press F9 key to look at the figure) and interpolate between tabled values for subsequent events.

(#)To is a compelling signal of an abnormal situation and is usually taken as a pattern of annunciators. A probability of 1.0 is assumed for observing that there is some abnormal situation.

(##)Guidelines for adjusting nominal HEPs are as follows:

- (1) Use upper bound if:
 - (a) the event is not covered in training (or)
 - (b) the event is covered but not practiced except in initial training of operators for becoming licensed (or)
 - (c) the talk-through and interviews show that not all operators know the pattern of stimuli associated with the event.
- (2) Use lower bound if:
 - (a) the event is a well-recognized classic (and)
 - (b) the talk-throughs and interviews indicate that all the operators have a good verbal recognition of the relevant stimulus patterns and know what to do or which written procedures to follow.
- (3) Use nominal HEP if:
 - (a) the only practice of the event is in simulator requalification exercises and all operators have had this experience (or)
 - (b) none of the rules for the use of upper or lower bound apply.

Table 20-4. Number of reactor operators and advisors available to cope with an abnormal event and their related levels of dependence : assumptions for PRA]

Item	Time after recognition of an abnormal event]	Operators or advisors handling unit affectedø	Dependence levels with othersø
(1)	0 to 1 minute	on-duty RO	
(2)	at 1 minute	on-duty RO SRO (assigned SRO or supervisor, an SRO)	high with RO
(3)	at 5 minutes	on-duty RO assigned SRO shift supervisor 1 or more AOs§	high with RO low to moderate with other operators
(4)	at 15 minutes	on-duty RO assigned SRO shift supervisor shift technical advisor 1 or more AOs	high with RO low to moderate with other operators low to moderate with others for diagnosis & major events; high to complete for detailed operations

Footnotes:

| These assumptions are nominal and can be modified for plant- and situation-specific conditions.

| For PRA, "recognition" is usually defined as the response to a compelling signal, such as the alarming of one or more annunciators.

ø No credit is given for additional operators or advisors.

øø This column indicates the dependence between each additional person and those already on station. The levels of dependence are assumed to remain constant with time and may be modified in a plant-specific analysis.

§ Availability of other AOs after 5 minutes and related levels of dependence should be estimated on a plant- and situation-specific basis.

Table 20-5. Estimated HEP per item (or perceptual unit§) in preparation of written material]

Item	Potential Errors	HEP	EF
(1)	Omitting a step or important instruction from a formal or ad hoc procedure or a tag from a set of tags.	.003	5
(2)	Omitting a step or important instruction from written notes taken in response to oral instructionsø.	Negligible	
(3)	Writing an item incorrectly in a formal or ad hoc procedure or on a tag.	.003	5
(4)	Writing an item incorrectly in written notes made in response to oral instructionsø.	Negligible	

Footnotes:

| Except for simple reading and writing errors, errors of providing incomplete or misleading technical information are not addressed in the Handbook.

The estimates are exclusive of recovery factors, which may greatly reduce the nominal HEPs.

| Formal written procedures are those intended for long-time use; ad hoc written procedures are one-of-a-kind, informally prepared procedures for some special purpose.

ø A maximum of five items is assumed. If more than five items are to be written down, use .001 (EF=5) for each item in the list.

§ A perceptual unit is either (1) an individual item such as a display, control, valve, etc., or (2) some functional group of items that are completely dependent and that are the equivalent of a single item with regard to EOMS. It is the operator's perception of what is functionally related that defines this unit.

Table 20-6. Estimated HEPs related to failure of administrative control.

Item	Task	HEP	EF
(1)	Carry out a plant policy or scheduled tasks such as periodic tests or maintenance performed weekly, monthly, or at longer intervals.	.01	5
(2)	Initiate a scheduled shiftly checking or inspection function. Use written operations procedures under:	.001	3
(3)	normal operating conditions	.01	3
(4)	abnormal operating conditions	.005	10
(5)	Use a valve change or restoration list.	.01	3
(6)	Use written test or calibration procedures.	.05	5
(7)	Use written maintenance procedures.	.3	5
(8)	Use a checklist properly.]	.5	5

Footnotes:

| Read a single item, perform the task, check off the item on the list. For any item in which a display reading or other entry must be written, assume correct use of the checklist for that item.

Table 20-7. Estimated probabilities of errors of omission per item of instruction when use of written procedures is specified.]

Item]	Omission of item:	HEP	EF
	When procedures with checkoff provisions are correctly used:		
(1)	Short list, <= 10 items	.001	3
(2)	Long list, > 10 items	.003	3
	When procedures without checkoff provisions are used, or when checkoff provisions are incorrectly used:		
(3)	Short list, <= 10 items	.003	3
(4)	Long list, > 10 items	.01	3
(5)	When written procedures are available and should be used but are not used	.05 §	5

Footnotes:

| The estimates for each item (or perceptual unit) presume zero dependence among the items (or units) and must be modified by using the dependence model when a nonzero level of dependence is assumed.

] The term "item" for this column is the usual designator for tabled entries and does not refer to an item of instruction in a procedure.

• Correct use of checkoff provisions is assumed for items in which written entries such as numerical values are required of the user.

•• Table 20-6 ("Administrative Control") lists the estimated probabilities of incorrect use of checkoff provisions and of nonuse of available written procedures.

§ If the task is judged to be "second nature", use the lower uncertainty bound for .05, i.e., use .01 (EF=5).

Table 20-8. Estimated probabilities of errors in recalling oral instruction items not written down. (*)

HEPs as a function of number of items to be remembered(**)								
Item(#)	Number of Oral Instruction Items (Perceptual Units)	Pr[F] to recall item "N", order of recall not important		Pr[F] to recall all items, order of recall not important		Pr[F] to recall all items, order of recall is important		
		HEP	EF	HEP	EF	HEP	EF	
Oral instructions are detailed:								
(1)	1(##)	.001	3	.001	3	.001	3	
(2)	2	.003	3	.004	3	.006	3	
(3)	3	.01	3	.02	5	.03	5	
(4)	4	.03	5	.04	5	.1	5	
(5)	5	.1	5	.2	5	.4	5	
Oral instructions are general:								
(6)	1(##)	.001	3	.001	3	.001	3	
(7)	2	.006	3	.007	3	.01	3	
(8)	3	.02	5	.03	5	.06	5	
(9)	4	.06	5	.09	5	.2	5	
(10)	5	.2	5	.3	5	.7	5	

Footnotes:

(*)It is assumed that if more than five oral instruction items or perceptual units are to be remembered, the recipient will write them down. If oral instructions are written down, use Table 20-5 for errors in preparation of written procedures and Table 20-7 for errors in their use.

(**)The first column of HEPs (a) is for individual oral instruction items, e.g., the second entry, .003 (item 2a), is the Pr[F] to recall the second of two items, given that one item was recalled, and order is not important. The HEPs in the other columns for two or more oral instruction items are joint HEPs, e.g., the .004 in the second column of HEPs is the Pr[F] to recall both of two items to be remembered, when order is not important. The .006 in the third column of HEPs is the Pr[F] to recall both of two items to be remembered in the order of performance specified.

(#)The term "item" for this column is the usual designator for tabled entries and does not refer to an oral instruction item.

(##)The Pr[F] in rows 1 and 6 are the same as the Pr[F] to initiate the task.

Table 20-9. Estimated probabilities of errors in selecting unannunciated displays or annunciator displays no longer annunciating for quantitative or qualitative readings.

Item	Selection of Wrong Display:	HEP	EF
(1)	when it is dissimilar to adjacent displays	Negligible	
(2)	from similar-appearing displays when they are on a panel with clearly drawn mimic lines that include displays	.0005	10
(3)	from similar-appearing displays when they are part of well-delineated functional groups on a panel	.001	3
(4)	from an array of similar-appearing displays identified by labels only	.003	3

Footnotes:

The listed HEPs are independent of recovery factors. In some cases, the content of the quantitative or qualitative indication from an incorrect display may provide immediate feedback of the selection error, and total error can be assessed as negligible.

This assumes the operator knows the characteristics of the display for which he is searching.

Table 20-10. Estimated HEPs for errors of commission in reading and recording quantitative information from unannunciated displays.

Item	Display or Task	HEP	EF
(1)	Analog meter	.003	3
(2)	Digital readout (<=4 digits)	.001	3
(3)	Chart recorder	.006	3
(4)	Printing recorder with large number of parameters	.05	5
(5)	Graphs	.01	3
(6)	Values from indicator lamps that are used as quantitative displays	.001	3
(7)	Recognize that an instrument being read is jammed, if there are no indicators to alert the user	.1	5
	Recording task: Number of digits or letters to be recorded:		
(8)	<= 3	Negligible	
(9)	> 3	.001 (per symbol)	3
(10)	Simple arithmetic calculations with or without calculators	.01	3
(11)	Detect out-of-range arithmetic calculations	.05	5

Footnotes:

| Multiply HEPs by 10 for reading quantitative values under a high level of stress if the design violates a strong populational stereotype; e.g., a horizontal analog meter in which values increase from right to left.

| In this case, "letters" refer to those that convey no meaning. Groups of letters such as MOV do convey meaning, and the recording HEP is considered to be negligible.

Table 20-11. Estimated HEPs for errors of commission in check-reading displays.

Item	Display or Task	HEP	EF
(1)	Digital indicators (these must be read, there is no true check-reading function for digital displays)	.001	3
	Analog meters:		
(2)	with easily seen limit marks	.001	3
(3)	with difficult-to-see limit marks, such as scribe lines	.002	3
(4)	without limit marks	.003	3
	Analog-type chart recorders:		
(5)	with limit marks	.002	3
(6)	without limit marks	.006	3
(7)	Confirming a status change on a status lamp	Negligible ^a	
(8)	Misinterpreting the indication on the indicator lamps	Negligible ^a	

Footnotes:

| "Check-reading means reference to a display merely to see if the indication is within allowable limits; no quantitative reading is taken. The check-reading may be done from memory or a written checklist may be used. The HEPs apply to displays that are checked individually for some specific purpose, such as a scheduled requirement, or in response to some developing situation involving that display.

| If operator must hold a switch in a spring-loaded position until a status lamp lights, use HEP=.003 (EF=3), from Table 20-12 (Errors of commission in operating manual controls), item 10.

^a For levels of stress higher than optimal, use HEP=.001 (EF=3).

Table 20-12. Estimated probabilities of errors of commission in operating manual controls.

Item	Potential Errors	HEP	EF
(1)	Inadvertent activation of a control	Situation-specific	
(1A)	Select wrong control when it is dissimilar to adjacent controls	Negligible	
	Select wrong control on a panel from an array of similar-appearing controls:		
(2)	identified by labels only	.003	3
(3)	arranged in well-delineated functional groups	.001	3
(4)	which are part of well-defined mimic layout	.0005	10
	Turn rotary control in wrong direction (for two-position switches, see item 8):		
(5)	when there is no violation of populational stereotypes	.0005	10
(6)	when design violates a strong populational stereotype and operating conditions are normal	.05	5
(7)	when design violates a strong populational stereotype and operation is under high stress	.5	5
(8)	Turn a two-position switch in wrong direction or leave it in wrong setting	ø	
(9)	Set a rotary control to an incorrect setting (for two-position switches, see item 8)	.001	10øø
(10)	Failure to complete change of state of a component if switch must be held until change is completed	.003	3
	Select wrong circuit breaker in a group of circuit breakers:		
(11)	densely grouped and identified by labels only	.005	3
(12)	when PSFs are more favourable	.003	3
(13)	Improperly mate a connector (this includes failure to seat connectors completely and failure to test locking features of connectors for engagement)	.003	3

Footnotes:

| The HEPs are for errors of commission only and do not include any errors of decision as to which controls to activate.

| If controls or circuit breakers are to be restored and are tagged, adjust the tabled HEPs according to Table 20-15 (Tagging levels).

ø Divide HEPs for rotary controls (items 5-7) by 5 (use the same EFs).

øø This error is a function of clarity with which indicator position can be determined: designs of control knobs and their position indications vary greatly. For plant specific analyses, an EF of 3 may be used.

Table 20-13. Estimated HEPs for selection errors for locally operated valves.

Item	Potential Errors	HEP	EF
	Making an error of selection in changing or restoring a locally operated valve when the valve to be manipulated is:		
(1)	Clearly and unambiguously labeled, set apart from valves that are similar in all of the following: size and shape, state, and presence of tags	.001	3
(2)	Clearly and unambiguously labeled, part of a group of two or more valves that are similar in one of the following: size and shape, state, or presence of tags	.003	3
(3)	Unclearly or ambiguously labeled, set apart from valves that are similar in all of the following: size and shape, state, and presence of tags	.005	3
(4)	Unclearly or ambiguously labeled, part of a group of two or more valves that are similar in one of the following: size and shape, state, or presence of tags	.008	3
(5)	Unclearly or ambiguously labeled, part of a group of two or more valves that are similar in all of the following: size and shape, state, and presence of tags	.01	3

Footnotes:

| Unless otherwise specified, Level 2 tagging is presumed. If other levels of tagging are assessed, adjust the tabled HEPs according to Table 20-15 (Tagging levels).

Table 20-14. Estimated HEPs in detecting stuck locally operated valves.

Item	Potential Errors	HEP	EF
	Given that a locally operated valve sticks as it is being changed or restored the operator fails to notice the sticking valve, when it has:		
(1)	A position indicator only	.001	3
(2)	A position indicator and a rising stem	.002	3
(3)	A rising stem but no position indicator	.005	3
(4)	Neither rising stem nor position indicator	.01	3

Footnotes:

| Equipment reliability specialists have estimated that the probability of a valve's sticking in this manner is approximately .001 per manipulation, with an error factor of 10.

| A position indicator incorporates a scale that indicates the position of the valve relative to a fully opened or fully closed position. A rising stem qualifies as a position indicator if there is a scale associated with it.

Table 20-15. The four levels of tagging or locking systems.

Level	Description	Modifications to Nominal HEPs
1	A specific number of tags is issued for each job. Each tag is numbered or otherwise uniquely identified. A record is kept of each tag, and a record of each tag issued is entered in a suspense sheet that indicates the expected time of return of the tag; this suspense sheet is checked each shift by the shift supervisor. An operator is assigned the job of tagging controller as a primary duty. For restoration, the numbers on the removed tags are checked against the item numbers in the records, as a recovery factor for errors of omission or selection. OR The number of keys is carefully restricted and under direct control of the shift supervisor. A signout board is used for the keys. Keys in use are tagged out, and each incoming shift supervisor takes an inventory of the keys.	Use lower UCBS
2	Tags are not accounted for individually - the operator may take an unspecified number and use them as required. In such a case, the number of tags in his possession does not provide any cues as to the number of items remaining to be tagged. For restoration, the record keeping does not provide a thorough checking for errors of omission or selection. If an operator is assigned as tagging controller, it is a collateral duty, or the position is rotated among operators too frequently for them to maintain adequate control tags and records and to retain skill in detecting errors of omission or selection. OR The shift supervisor retains control of the keys and records their issuance but does not use visual aids such as signout boards or tags.	Use nominal HEPs
3	Tags are used, but record keeping is inadequate to provide the shift supervisor with positive knowledge of every item of equipment that should be tagged or restored. No tagging controller is assigned. OR Keys are generally available to users without logging requirements.	Use upper UCBS
4	No tagging system exists. OR No locks and keys are used.	Perform separate analysis

Footnotes:

| The nominal HEPs are those in the Handbook that relate to tasks involving the application and removal of tags and, unless otherwise specified, are based on Level 2 tagging.

Table 20-16. Modifications of estimated HEPs for effects of stress and experience levels.

Item	Stress Level	Modifiers for Nominal HEPs	
		(a)Skilled	(b)Novice
(1)	Very low (Very low task load):	x2	x2
	Optimum (Optimum task load):		
(2)	Step-by-step	x1	x1
(3)	Dynamic	x1	x2
	Moderately high (Heavy task load):		
(4)	Step-by-step	x2	x4
(5)	Dynamic	x5	x10
	Extremely high (Threat stress)		
(6)	Step-by-step	x5	x10
(7)	Dynamic Diagnosis	.25 (EF=5)	.50 (EF=5)

These are the actual HEPs to use with dynamic tasks or diagnosis - they are NOT modifiers.

Footnotes:

| The nominal HEPs are those in the data tables. Error factors are listed in

Table 20-17. Equations for conditional probabilities of success and failure on Task "N", given success or failure on previous Task "N-1", for different levels of dependence.

Level of Dependence	Success Equation	Equation No.	Failure Equation	Equation No.
ZD	$P[S(N)/S(N-1)] = n$	(10-9)	$P[F(N)/F(N-1)] = N$	(10-14)
LD	$P[S(N)/S(N-1)] = (1+19n)/20$	(10-10)	$P[F(N)/F(N-1)] = (1+19N)/20$	(10-15)
MD	$P[S(N)/S(N-1)] = (1+6n)/7$	(10-11)	$P[F(N)/F(N-1)] = (1+6N)/7$	(10-16)
HD	$P[S(N)/S(N-1)] = (1+n)/2$	(10-12)	$P[F(N)/F(N-1)] = (1+N)/2$	(10-17)
CD	$P[S(N)/S(N-1)] = 1.0$	(10-13)	$P[F(N)/F(N-1)] = 1.0$	(10-18)

Table 20-18. Conditional probabilities of success or failure for Task "N" for the five levels of dependence, given FAILURE on preceding Task "N-1".

Item	Task "N" Conditional Probabilities(*)									
	ZD(**)		LD		MD		HD		CD	
	S	F	S	F	S	F	S	F	S	F
(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)	(g)	(h)	(i)	(j)	
(1)	.75	.25	.71	.29	.64	.36	.37	.63	0	1.0
(2)	.9	.1	.85	.15	.77	.23	.45	.55	0	1.0
(3)	.95	.05	.9	.1	.81	.19	.47	.53	0	1.0
(4)	.99	.01(#)	.94	.06	.85	.15	.49	.51	0	1.0
(5)	.995	.005	.95	.05	.85	.15	.50	.50	0	1.0
(6)	.999	.001	.95	.05	.86	.14	.50	.50	0	1.0
(7)	.9995	.0005	.95	.05	.86	.14	.50	.50	0	1.0
(8)	.9999	.0001	.95	.05	.86	.14	.50	.50	0	1.0
(9)	.99999	.00001	.95	.05	.86	.14	.50	.50	0	1.0

Footnotes:

(*) All conditional probabilities are rounded. Equations 10-14 through 10-18 (Table 20-17 - Dependence Equations) were used to calculate the values in the F columns. The values in the S columns were obtained by subtraction.

(**) The conditional probabilities given ZD are the basic probabilities for Task "N".

(#) For PRA purposes, it is adequate to use CHEPs of .05 (for LD), .15 (for MD), and .5 (for HD) when BHEP <= .01.

Table 20-19. Conditional probabilities of success or failure for Task "N" for the five levels of dependence, given SUCCESS on preceding Task "N-1".

Item	Task "N" Conditional Probabilities(*)									
	ZD(**)		LD		MD		HD		CD	
	S	F	S	F	S	F	S	F	S	F
(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)	(g)	(h)	(i)	(j)	
(1)	.75	.25	.76	.24	.79	.21	.87	.13	1.0	0
(2)	.9	.1	.9	.1	.91	.09	.95	.05	1.0	0
(3)	.95	.05	.95	.05	.94	.06	.97	.03	1.0	0
(4)	.99	.01	.99	.01	.991	.009	.995	.005	1.0	0
(5)	.995	.005	.995	.005	.996	.004	.997	.003	1.0	0
(6)	.999	.001	.999	.001	.999	.001	.9995	.0005	1.0	0
(7)	.9995	.0005	.9995	.0005	.9996	.0004	.9997	.0003	1.0	0
(8)	.9999	.0001	.9999	.0001	.99991	.00009	.99995	.00005	1.0	0
(9)	.99999	.00001	.99999	.00001	.999991	.000009	.999995	.000005	1.0	0

Footnotes:

(*) All conditional probabilities are rounded. Equations 10-9 through 10-13 (Table 20-17 - Dependence Equations) were used to calculate the values in the S columns. The values in the F columns were obtained by subtraction.

(**) The conditional probabilities given ZD are the basic probabilities for Task "N".

Table 20-20. General guidelines for estimating uncertainty bounds for estimated HEPs.

Item	Task and HEP Guidelines	EF \emptyset
(1)	Task consists of performance step-by-step procedure $\emptyset\emptyset$ conducted under routine circumstances (e.g., a test, maintenance, or calibration task); stress level is optimal: Estimated HEP < .001	10
(2)	Estimated HEP .001 to .01	3
(3)	Estimated HEP > .01	5
(4)	Task consists of performance of step-by step procedure $\emptyset\emptyset$ but carried out in nonroutine circumstances such as those involving a potential turbine/reactor trip; stress level is moderately high: Estimated HEP < .001	10
(5)	Estimated HEP \leq .001	5
(6)	Task consists of relatively dynamic $\emptyset\emptyset$ interplay between operator and system indications, under routine conditions, e.g., increasing or reducing power; stress level is optimal: Estimated HEP < .001	10
(7)	Estimated HEP \leq .001	5
(8)	Task consists of relatively dynamic $\emptyset\emptyset$ interplay between operator and system indications but carried out in nonroutine circumstances; stress level is moderately high	10
(9)	Any task performed under extremely high stress conditions, e.g., large LOCA; conditions in which status of ESFs is not perfectly clear; or conditions in which the initial operator responses have proved to be inadequate and now severe time pressure is felt	5 \S

Footnotes:

| The estimates in this table apply to experienced personnel.

| For UCBs for HEPs based on the dependence model, see Table 20-21 (Conditional HEPs & UCBs).

\emptyset The highest upper bound is 1.0.

$\emptyset\emptyset$ See Table 20-16 (Stress - Experience) for definitions of step-by step and dynamic procedures.

\S An EF of 5 is assigned for the extremely high stress conditions because the upper UCB is truncated at 1.0, and it is desirable to have a more conservative (i.e., higher) lower UCB for such tasks.

Table 20-20 (Estimate UCBs).

- | A skilled person is one with 6 months or more experience in the tasks being assessed. A novice person is one with less than 6 months experience. Both levels have the required licensing or certificates.
- o Step-by step tasks are routine, procedurally guided tasks, such as carrying out written calibration procedures. Dynamic tasks require a higher degree of man-machine interaction, such as decision-making, keeping track of several functions, controlling several functions, or any combination of these. These requirements are the basis of the distinction between step-by-step tasks and dynamic tasks, which are often involved in responding to an abnormal event.
- oo Diagnosis may be carried out under varying degrees of stress, ranging from optimum to extremely high (threat stress). For threat stress, the HEP of .25 is used to estimate performance of an individual. Ordinarily, more than one person will be involved. Tables 20-1 (Diagnosis - screening model) and 20-3 (Diagnosis - nominal model) list joint HEPs based on the number of control room personnel presumed to be involved in the diagnosis of an abnormal event for various times after announcement of the event, and their presumed dependence levels, as presented in the staffing model in Table 20-4

Table 20-21. Approximate CHEPs and their UCBs for dependence levels(*) given FAILURE on the preceding task.

Item	Levels of Dependence					
	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)
(1) ZD**	<.01 (EF=3,5,10)	.05 (EF=5)	.1 (EF=5)	.15 (EF=5)	.2 (EF=5)	.25 (EF=5)
(2) LD	.05 (.015,.15)	.1 (.04,.25)	.15 (.05,.5)	.19 (.05,.75)	.24 (.06,1.0)	.29 (.08,1.0)
(3) MD	.15 (.04,.5)	.19 (.07,.53)	.23 (.1,.55)	.27 (.1,.75)	.31 (.1,1.0)	.36 (.13,1.0)
(4) HD	.5 (.25,1.0)	.53 (.28,1.0)	.55 (.3,1.0)	.58 (.34,1.0)	.6 (.36,1.0)	.63 (.4,1.0)
(5) CD	1.0 (.5,1.0)	1.0 (.53,1.0)	1.0 (.55,1.0)	1.0 (.58,1.0)	1.0 (.6,1.0)	1.0 (.63,1.0)

Footnotes:

(*) Values are rounded. All values are based on skill personnel (i.e., those with > 6 months experience on the task being analyzed).

(**) ZD = BHEP. EFs for BHEPs should be based on Table 20-20 (Estimate Uncertainty Bounds).

(#) Linear interpolation between stated CHEPs (and UCBs) for values of BHEPs between those listed is adequate for most PRA studies.

Table 20-22. Estimated probabilities that a checker will fail to detect errors made by others]

Item	Checking operation	HEP	EF
(1)	Checking routine tasks, checker using written materials (includes over-the-shoulder inspections, verifying position of locally operated valves, switches, circuit breakers, connectors, etc., and checking written lists, tags, or procedures for accuracy)	.1	5
(2)	Same as above, but without written materials	.2	5
(3)	Special short-term, one-of-a-kind checking with alerting factors	.05	5
(4)	Checking that involves active participation, such as special measurements	.01	5
	Given that the position of a locally operated valve is checked (item 1 above), noticing that it is not completely opened or closed:		
(5)	Position indicator only	.1	5
(6)	Rising stem with or without position indicator	.5	5
(7)	Neither a position indicator nor rising stem	.9	5
(8)	Checking by reader/checker of the task performer in a two-men team, OR checking by a second checker, routine task (no credit for more than 2 checkers)	.5	5
(9)	Checking the status of equipment if that status affects one's safety when performing his tasks	.001	5
(10)	An operator checks change or restoration tasks performed by a maintainer	Above HEPs 8 2	5

Footnotes:

| This table applies to cases during normal operating conditions in which a person is directed to check the work performed by others either as the work is being performed or after its completion.

| A position indicator incorporates a scale that indicates the position of the valve relative to a fully opened or fully closed position. A rising stem qualifies as a position indicator if there is a scale associated with it.

Table 20-23. The Annunciator Response Model: estimated HEPs(*) for multiple annunciators alarming closely in time(**).

Item	Number of ANNs	Pr[F1] for each annunciator (ANN) or completely dependent set of ANNs) successively addressed by the operator										Pr[F1]#
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)	(g)	(h)	(i)	(j)	(k)	
(1)	1	.0001									.0001	
(2)	2	.0001	.001								.0006	
(3)	3	.0001	.001	.002							.001	
(4)	4	.0001	.001	.002	.004						.002	
(5)	5	.0001	.001	.002	.004	.008					.003	
(6)	6	.0001	.001	.002	.004	.008	.016				.005	
(7)	7	.0001	.001	.002	.004	.008	.016	.032			.009	
(8)	8	.0001	.001	.002	.004	.008	.016	.032	.064		.02	
(9)	9	.0001	.001	.002	.004	.008	.016	.032	.064	.13	.03	
(10)	10	.0001	.001	.002	.004	.008	.016	.032	.064	.13	.25	.05
(11)	11-15										.10	
(12)	16-20										.15	
(13)	21-40										.20	
(14)	>40										.25	

Footnotes:

(*) The HEPs are for the failure to initiate some kind of intended corrective action as required. The action carried out may be correct or incorrect and is analyzed using other tables. The HEPs include the effects of stress and should not be increased in consideration of stress effects. EF of 10 is assigned to each HEP. Based on compute simulation, use of EF of 10 for Pr[F1] yields approximately correct upper bounds for the 95th percentile. The corresponding lower bounds are too high; they are roughly equivalent to 20th percentile rather than the usual 5th percentile bounds. Thus, use an EF of 10 for the mean Pr[F1] values provide a conservative estimate since lower bounds are biased high.

(**) "Closely in time" refers to cases in which two or more annunciators alarm within several seconds or within a time period such that the operator perceives them as a group of signals to which he must selectively respond.

(#) Pr[F1] is the expected Pr[F1] to initiate action in response to a randomly selected ANN (or completely dependent set of ANNs) in a group of ANNs competing for the operator's attention. It is the arithmetic mean of the Pr[F1]s in a row, with upper limit of .25. The column (k) assumes that all of the ANNs (or completely dependent sets of ANNs) are equal in terms of the probability of being noticed.

Table 20-24. Estimated HEPs for annunciated legend lights|

Item	Task	HEP	EF
(1)	Respond to one or more annunciated legend lights	See Annunciator Response Model	
(2)	Resume attention to a legend light within 1 minute after an interruption (sound and blinking cancelled before interruption)	.001	3
(3)	Respond to a legend light if more than 1 minute elapses after an interruption (sound and blinking cancelled before interruption)	.95	5
(4)	Respond to a steady-on legend light during initial audit	.90	5
(5)	Respond to a steady-on legend light during other hourly scans	.95	5

Footnotes:

| No written materials are used.

| "Respond" means to initiate some action in response to the indicator whether or not the action is correct. It does not include the initial acts of cancelling the sound and the blinking; these are assumed to always occur.

Table 20-25. Estimated probabilities of failure to detect one (of one) unannunciated deviant display at each scan, when scanned hourly

Item	Display Type	(Initial Audit)							
		1	2	3	4	5	6	7	8
		(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)	(g)	(h)
Analog meters:									
(1)	with limit marks	.05	.31	.50	.64	.74	.81	.86	.90
(2)	without limit marks	.15	.47	.67	.80	.87	.92	.95	.97
Analog-type chart recorders:									
(3)	with limit marks	.10	.40	.61	.74	.83	.89	.92	.95
(4)	without limit marks	.30	.58	.75	.85	.91	.94	.97	.98
(5)	Annunciator light no longer annunciating	.90	.95	.95	.95	.95	.95	.95	.95
(6)	Legend light other than annunciator light	.98	.98	.98	.98	.98	.98	.98	.98
(7)	Indicator lamps	.99	.99	.99	.99	.99	.99	.99	.99

Footnotes:

* "One display" refers to a single display or a group of completely dependent displays, i.e., a perceptual unit.

** For error factors, refer to Table 20-20 (Estimate Uncertainty bounds).

Written materials not used.

These displays are rarely scanned more than once per shift, if at all. HEPs for each are listed for completeness only.

Table 20-26. Estimated probabilities of failing to detect at least one of one to five unannunciated deviant displays as a function of the BHEP for detection of a single deviant display during periodic scanning.

Item	1 BHEP (a)	Number of Deviant Indications			
		2 Pr[F] to detect at least one deviant display (b)	3 (c)	4 (d)	5 (e)
(1)	.99	.985	.98	.975	.97
(2)	.95	.93	.90	.88	.86
(3)	.90	.85	.81	.77	.73
(4)	.80	.72	.65	.58	.52
(5)	.70	.59	.51	.43	.37
(6)	.60	.48	.39	.31	.25
(7)	.50	.37	.28	.21	.16
(8)	.40	.28	.20	.14	.10
(9)	.30	.19	.13	.08	.05
(10)	.20	.12	.07	.04	.03
(11)	.10	.05	.03	.02	.01
(12)	.05	.03	.01	.007	.004
(13)	.01	.005	.003	.001	.001

Footnotes:

* To estimate the HEP for failure to detect other concurrent unannunciated deviant displays when one has been detected, use the HEP for the initial audit for those displays that are not functionally related to the display detected (from Table 20-25 - Scanning - One Deviant Display) and use the Annunciator Response Model for those displays that are functionally related to the display detected (from Table 20-23 - Annunciator Response Model). The HEPs apply when no written materials are used.

** For EFs, refer to Table 20-20 (Estimate Uncertainty Bound).

Table 20-27. Estimated probabilities that the basic walk around inspection will fail to detect a particular deviant indication of equipment outside the control room within 30 days

Item	Number of days between walk-arounds per Inspector ^a	Cumulative Pr[F] within 30 days given one inspection per shift ^b
(1)	1 (daily walk-around for each inspector)	.52
(2)	2	.25
(3)	3	.05
(4)	4	.003
(5)	5	.0002
(6)	6	.0001
(7)	7 (weekly walk-around for each inspector)	.0001

Footnotes:

| One of the assumptions for basic walk-around inspections is that no written procedure is used; if a written procedure is used for a walk-around, use the tables related to errors of omission and commission for performance of rule-based tasks.

| Three shifts per day are assumed.

^a It is assumed that all inspectors have the same number of days between walk-arounds.

^b For EFs, use the procedure for UCBs propagation or use EF=10 as an approximation.

Anhang 6: Kriterien zur Auswahl der HF-Fälle, Abfrageergebnisse zu den THERP-Tabellen

In diesem Anhang werden zunächst die Kriterien zur Auswahl der HF Fälle und darauf die Abfrageergebnisse für den Vergleich der berechneten HEP-Werte mit den THERP-Tabellen dargestellt.

- **Kriterien zur Auswahl der HF Fälle,**

Bei der Suche nach HF-Fällen wurde nach entsprechenden Wortpassagen in den Ereignisbeschreibungen gesucht, die auf ein HF-, HR- oder ein technisches Ereignis hinweisen. Ein Ereignis wurde entsprechend klassifiziert, wenn die Wortpassage auftritt. Dabei wurden zunächst technische Ereignisse, darauf HR-Ereignisse und schließlich HF-Ereignisse klassifiziert.

Die Wortpassagen sind in Tabelle 6-1 aufgeführt. In der Tabelle sind verschiedene Kodierungen verwendet worden. Ein vorangestelltes "+" bedeutet, daß nach diesem Wort unter Beachtung der Groß- und Kleinbuchstaben gesucht wurde (z.B. bei Schlüsselwörtern). Ein unvollständiges Wort, wie z.B. "irrtu" sucht nach verschiedenen Worten wie "Irrtum", "irrtuemlich" o.ä.

- **Abfrageergebnisse zu den THERP-Tabellen**

In den darauf folgenden Tabellen werden zunächst die Abfragen für die absoluten Häufigkeiten n_j (Tabelle 6-2), darauf die Abfragen für die Bezugsgrößen m_j (Tabelle 6-3) und für die Zeitzuverlässigkeits-Angaben (Tabelle 6-4) dargestellt. Wenn Bezugsgrößen für ganze Tabellen und Bezugsgrößen für einzelne Items in den Tabellen angegeben sind, haben die Bezugsgrößen für einzelne Items Vorrang vor den allgemeineren Bezugsgrößen für ganze Tabellen. Auf die Abfragen folgen die in den Abfragen genutzten Klassen (Tabelle 6-5). Sie sind am vorangestellten "-" zu erkennen. Abschließend wird in Tabelle 6-6 die Gegenüberstellung der berechneten HEP-Werte mit denen des THERP-Verfahrens dargestellt.

Anmerkung: In Fällen, in denen HEP-Werte von verschiedenen Items des THERP-Kataloges addiert wurden, war es erforderlich, die HEP-Werte erst in Erwartungswerte umzurechnen, diese dann zu addieren und wiederum in den HEP-Wert umzurechnen. Der Grund hierfür ist, daß die HEP-Werte logarithmisch-normalverteilt sind und nur die Erwartungswerte (EW), nicht die HEP-Werte addiert werden dürfen. Dies geschieht nach den in Reer (1988) angegebenen Rechenregeln.

Tabelle 6-1

<i>Kategorie</i>	<i>Kriterien</i>
HF_Ereignis	<ul style="list-style-type: none"> +ABBRUCH DER PRUEFUNG +BEDIENUNGSFEHLER +falsch erkannt +falsch montiert +FALSCHE LAGEBEURTEILUNG +FALSCHE MASSNAHME +FEHLBEDIENUNG +FEHLENDE/FALSCHE ANZEIGE +FEHLHANDLUNG +FREISCHALTFEHLER +KOMMUNIKATIONSFEHLER +MASSNAHME ENTGEGEN BETRIEBSHANDBUCH +MASSNAHME ENTGEGEN INTERNER VORSCHRIFT +PERSONALSCHULUNG +UMSCHALTUNG AUF HANDBETRIEB UNTERLASSEN +UNTERLASSENE MASSNAHME +VERWECHSLUNG Aufmerksamkeit Bedienungsfehler belehr davon ausgegangen Fehlbed Fehleinst Fehlererkennung Herstellungfehler irrtu Montagefehler nicht erkannt nicht erkennbar nicht montiert schlecht ausgefuehrt schul Stoerungssuche uebersah uebersehen unbeabs unterlassen Ursachenermittlung versah versehentlich verwechs

Tabelle 6-1

Kategorie	Kriterien
HR_Ereignis	+AENDERUNG D. BETRIEBSANWEISUNG +AENDERUNG D. PRUEFPLANS +ANWEISU +ARBEITSANWEISUNG +BHB +ERGAENZUNG ADMIN. ANWEISU +ERGAENZUNG PRUEFANWEISUNG +FALSCH EINSTELLUNG +KORREKTUR BHB +LUECKENHAFTE BETRIEBSANWEISUNG +MELDUNG +MELDUNGSKONZEPTAENDERUNG +NHB +PRUEFPLAN +UNSACHGEMAESSE AUSFUEHRUNG +UNVOLLSTAENDIGES VERFAHREN +UNZUTREFFENDE SPEZIFIKATION +WHP +WKP Anweis Bedien Belehr Betriebshandbuch Bildschirm Einstellung Fehlstellen geplant handbuch Instandhaltung Instandsetzung Instrument Kommunikation Meldung Monitor Personal Prozedur pruef Rueckmeldung sachgem versehen verwechs von Hand Vorschrift Wahl Warte Wiederholungs Pruefung Wiederkehrende Pruefung
Technisches Ereignis	(alle restlichen Ereignisse)

Tabelle 6-2

<i>Titel</i>	n_j	n_j <i>max</i>	n_j <i>min</i>	<i>Anfragen zur Bildung der absoluten Häufigkeiten</i>
THERP 20-01 (1) THERP 20-03 (1)	15	20	0	und MMS Typ A oder MMS Typ Ba oder MMS Typ B oder MMS Typ C verschlechternd und Situation -Tsw1 oder Situation -Tsw12
THERP 20-01 (2) THERP 20-03 (2)	9	12	0	und MMS Typ A oder MMS Typ Ba oder MMS Typ B oder MMS Typ C verschlechternd und Situation -Tsw12 oder Situation -Tsw23
THERP 20-01 (3) THERP 20-03 (3)	6	8	0	und MMS Typ A oder MMS Typ Ba oder MMS Typ B oder MMS Typ C verschlechternd und Situation -Tsw123 oder Situation -Tsw23 oder Situation -Tsw3 oder Situation -Tsw34
THERP 20-01 (4) THERP 20-03 (4)	3	3	0	und MMS Typ A oder MMS Typ Ba oder MMS Typ B oder MMS Typ C verschlechternd und Situation -Tsw34 oder Situation -Tsw45
THERP 20-01 (5) THERP 20-03 (5)	4	4	0	und MMS Typ A oder MMS Typ Ba oder MMS Typ B oder MMS Typ C verschlechternd und Situation -Tsw45 oder Situation -Tsw5
THERP 20-01 (6) THERP 20-03 (6)	1	1	0	und MMS Typ A oder MMS Typ Ba oder MMS Typ B oder MMS Typ C verschlechternd und Situation -Tsw6
THERP 20-02 (1,2)	43	54	0	und Aufgabe [Fehler] oder Person [Fehler] oder Tätigkeit [Fehler] und Auftragserteilung Anweisung
THERP 20-02 (3)	119	191	0	und Aufgabe [Fehler] oder Person [Fehler] oder Tätigkeit [Fehler] und nicht Auftragserteilung Anweisung
THERP 20-02 (4)	4	20	0	und Situation -T11 oder Situation -T12 und Aufgabe [Fehler] oder Person [Fehler] oder Tätigkeit [Fehler] und Auftragserteilung Anweisung
THERP 20-05 (1)	13	54	0	und Aufgabe unterlassen und nicht Tätigkeit falsch und Auftragserteilung Anweisung
THERP 20-05 (3)	3	6	0	und Auftragserledigung [Fehler] oder Auftragserledigung [Eigenschaft] und Auftragserledigung Anweisung oder Auftragserledigung Anschlusspläne oder Auftragserteilung Anweisung
THERP 20-06 (1)	34	49	0	und Situation WKP und Aufgabe [Fehler] oder Person [Fehler] oder Tätigkeit [Fehler] oder Rückmeldung [Fehler] oder Auftragserledigung [Fehler] oder Auftragserteilung [Fehler]
THERP 20-06 (2)	19	49	0	und Situation WKP und Aufgabe kontrollieren oder Aufgabe prüfen oder Aufgabe inspizieren und Aufgabe [Fehler] oder Person [Fehler] oder Tätigkeit [Fehler] oder Rückmeldung [Fehler] oder Auftragserledigung [Fehler] oder Auftragserteilung [Fehler]
THERP 20-06 (3)	45	54	0	und MMS Typ A oder MMS Typ Ba oder MMS Typ A0 oder MMS Typ B oder MMS Typ T und Aufgabe [Fehler] oder Person [Fehler] oder Tätigkeit [Fehler] oder Rückmeldung [Fehler] oder Auftragserledigung [Fehler] oder Auftragserteilung [Fehler] und Auftragserteilung
THERP 20-06 (4)	2	34	0	und MMS Typ C und Aufgabe [Fehler] oder Person [Fehler] oder Tätigkeit [Fehler] oder Rückmeldung [Fehler] oder Auftragserledigung [Fehler] oder Auftragserteilung [Fehler] und Auftragserteilung Anweisung

Tabelle 6-2

<i>Titel</i>	n_j	n_j <i>max</i>	n_j <i>min</i>	<i>Anfragen zur Bildung der absoluten Häufigkeiten</i>
THERP 20-06 (5)	8	38	0	und Aufgabe Ventil oder Tätigkeit Ventil und Aufgabe [Fehler] oder Person [Fehler] oder Tätigkeit [Fehler] oder Rückmeldung [Fehler] oder Auftragserledigung [Fehler] oder Auftragserteilung [Fehler] und Auftragserteilung Anweisung
THERP 20-06 (6)	25	54	0	und Aufgabe kontrollieren oder Aufgabe prüfen oder Aufgabe inspizieren oder Aufgabe einstellen oder Aufgabe angleichen oder Aufgabe vermindern oder Aufgabe reduzieren oder Aufgabe normalisieren und Aufgabe [Fehler] oder Person [Fehler] oder Tätigkeit [Fehler] oder Rückmeldung [Fehler] oder Auftragserledigung [Fehler] oder Auftragserteilung [Fehler] und Auftragserteilung Anweisung
THERP 20-06 (7)	32	54	0	und Situation WKP oder Situation Revision oder Person Instandhaltungspersonal oder Person Wartungspersonal oder Person Herstellerpersonal oder Person Montagepersonal oder Person Fremdpersonal und Aufgabe [Fehler] oder Person [Fehler] oder Tätigkeit [Fehler] oder Rückmeldung [Fehler] oder Auftragserledigung [Fehler] oder Auftragserteilung [Fehler] und Auftragserteilung Anweisung
THERP 20-06 (8)	39	39	-	und Auftragserteilung Anweisung befolgen [Fehler]
THERP 20-07 (1+2+3+4+5)	13	52	0	und Aufgabe unterlassen und nicht Tätigkeit falsch und Auftragserteilung Anweisung
THERP 20-08 (1)	4	4	-	und Auftragserledigung Personal [Fehler]
THERP 20-08 (6)	4	4	-	und Auftragserledigung Personal [Fehler]
THERP 20-09 (2)	11	13	0	und Tätigkeit [Fehler] und Rückmeldung -Display oder Rückmeldung -Display/qualitativ oder Rückmeldung -Display/quantitativ und Rückmeldung [Fehler] und Rückmeldung Markierung oder Rückmeldung Anzeigegegenauigkeit oder Rückmeldung Zuverlässigkeit oder Rückmeldung Anzeigebereich
THERP 20-09 (3)	4	6	0	und Tätigkeit [Fehler] und Rückmeldung -Display oder Rückmeldung -Display/qualitativ oder Rückmeldung -Display/quantitativ und Rückmeldung [Fehler] und Rückmeldung Anordnung
THERP 20-09 (4)	4	5	0	und Tätigkeit [Fehler] und Rückmeldung -Display oder Rückmeldung -Display/qualitativ oder Rückmeldung -Display/quantitativ und Rückmeldung [Fehler] und Rückmeldung Kennzeichnung
THERP 20-10 (1,3,5)	5	14	0	und Tätigkeit [Fehler] und Rückmeldung [Fehler] und Rückmeldung -Reading/quantitative und Rückmeldung -Meter/Analog
THERP 20-10 (2)	0	12	1	und Rückmeldung [Fehler] und Rückmeldung -Reading/quantitative und Rückmeldung -Meter/Digital
THERP 20-10 (4)	4	14	0	und Tätigkeit [Fehler] und Rückmeldung [Fehler] und Rückmeldung -Reading/quantitative und Rückmeldung -Meter/Print

Tabelle 6-2

<i>Titel</i>	n_j	n_j <i>max</i>	n_j <i>min</i>	<i>Anfragen zur Bildung der absoluten Häufigkeiten</i>
THERP 20-10 (6)	12	49	0	und Tätigkeit [Fehler] und Rückmeldung [Fehler] und nicht Rückmeldung -Reading/qualitative und Rückmeldung -Display/quantitativ
THERP 20-10 (7)	40	49	0	und Tätigkeit [Fehler] und Rückmeldung [Fehler] und Rückmeldung -Display/qualitativ oder Rückmeldung - Display/quantitativ
THERP 20-11 (1)	7	12	1	und Rückmeldung [Fehler] und Rückmeldung -Reading/qualitative und Rückmeldung -Meter/Digital
THERP 20-11 (2,5)	17	48	0	und Rückmeldung [Fehler] und Rückmeldung -Meter/Analog oder Rückmeldung -Meter/Graph und nicht Rückmeldung [Eigenschaft]
THERP 20-11 (3,4,6)	16	24	0	und Rückmeldung [Fehler] und Rückmeldung -Meter/Analog oder Rückmeldung -Meter/Graph und Rückmeldung [Eigenschaft]
THERP 20-12 (2)	6	12	0	und Tätigkeit falsch und Tätigkeit -Control oder Tätigkeit -Control/Switch oder Tätigkeit - Control/System und Tätigkeit Bedienbarkeit
THERP 20-12 (3+4)	1	6	0	und Tätigkeit falsch und Tätigkeit -Control oder Tätigkeit -Control/Switch oder Tätigkeit - Control/System und Rückmeldung Anordnung
THERP 20-12 (5+6)	37	66	0	und Tätigkeit -Control oder Tätigkeit -Control/System und Tätigkeit falsch oder Tätigkeit fehlerhaft
THERP 20-12 (7)	7	50	0	und Situation -T11 oder Situation -T12 oder Aufgabe Aufgabenvor- bereitung oder Aufgabe Zeitdruck oder Aufgabe Präzision oder Aufgabe Komplexität und nicht Aufgabe Einfachheit und Tätigkeit -Control oder Tätigkeit -Control/System und Tätigkeit falsch oder Tätigkeit fehlerhaft
THERP 20-12 (8->5+6)	39	47	0	und Tätigkeit -Control/Switch und Tätigkeit falsch oder Tätigkeit fehlerhaft
THERP 20-12 (8->7)	10	47	0	und Situation -T11 oder Situation -T12 oder Aufgabe Aufgabenvor- bereitung oder Aufgabe Zeitdruck oder Aufgabe Präzision oder Aufgabe Komplexität und nicht Aufgabe Einfachheit und Tätigkeit -Control/Switch und Tätigkeit falsch oder Tätigkeit fehlerhaft
THERP 20-12 (9)	17	36	0	und Tätigkeit -Control oder Tätigkeit -Control/System und Tätigkeit -Quantitative Fehler
THERP 20-12 (.10)	8	21	0	und Tätigkeit -Control oder Tätigkeit -Control/Switch und Tätigkeit -Zeit Fehler
THERP 20-12 (.11)	6	17	0	und Tätigkeit -Control/Switch und Tätigkeit falsch und Tätigkeit Bedienbarkeit oder Rückmeldung Anordnung
THERP 20-12 (.12)	26	47	0	und Tätigkeit -Control/Switch und Tätigkeit falsch und nicht Tätigkeit Bedienbarkeit und nicht Rückmeldung Anordnung
THERP 20-12 (.13)	9	29	-	und Tätigkeit -Control/Switch und Tätigkeit fehlerhaft
THERP 20-13 (1+2)	13	38	0	und Aufgabe Ventil oder Tätigkeit Ventil und Tätigkeit falsch oder Aufgabe unterlassen und Umgebung vor Ort
THERP 20-13 (3+4+5)	3	6	0	und Aufgabe Ventil oder Tätigkeit Ventil und Tätigkeit falsch oder Aufgabe unterlassen und Rückmeldung Markierung und Umgebung vor Ort

Tabelle 6-2

<i>Titel</i>	n_j	n_j <i>max</i>	n_j <i>min</i>	<i>Anfragen zur Bildung der absoluten Häufigkeiten</i>
THERP 20-14 (1+2+3+4)	6	38	0	und Aufgabe Ventil oder Tätigkeit Ventil und Aufgabe unterlassen und Umgebung vor Ort
THERP 20-16 (1)	7	7	-	und Aufgabe Einfachheit oder Tätigkeit Monotonie
THERP 20-16 (4)	21	26	0	und MMS Statisch und Aufgabe Aufgabenvorbereitung oder Aufgabe Präzision oder Aufgabe Komplexität
THERP 20-16 (5)	3	26	0	und MMS Dynamisch und Aufgabe Aufgabenvorbereitung oder Aufgabe Präzision oder Aufgabe Komplexität
THERP 20-16 (6)	10	27	0	und MMS Statisch und Situation -T1 oder Aufgabe Zeitdruck
THERP 20-16 (7)	10	27	0	und MMS dynamisch und Situation -T1 oder Aufgabe Zeitdruck
THERP 20-22 (1)	16	54	0	und Aufgabe prüfen oder Aufgabe kontrollieren oder Aufgabe ins- pizieren oder Aufgabe überwachen oder Aufgabe beobachten oder Rückmeldung -Display/Checker oder Auftrags erledigung Personal und Aufgabe [Fehler] und Auftragserteilung Anweisung
THERP 20-22 (2)	34	90	0	und Aufgabe prüfen oder Aufgabe kontrollieren oder Aufgabe ins- pizieren oder Aufgabe überwachen oder Aufgabe beobachten oder Rückmeldung -Display/Checker oder Auftrags erledigung Personal und Aufgabe [Fehler]
THERP 20-22 (3)	8	45	0	und Aufgabe prüfen oder Aufgabe kontrollieren oder Aufgabe ins- pizieren oder Aufgabe überwachen oder Aufgabe beobachten oder Rückmeldung -Display/Checker oder Auftrags erledigung Personal und Aufgabe [Fehler] und Rückmeldung Meldung oder Rückmeldung Alarm
THERP 20-22 (4)	7	13	0	und Aufgabe messen oder Aufgabe suchen und Aufgabe [Fehler]
THERP 20-22 (5)	3	38	0	und Aufgabe prüfen oder Aufgabe kontrollieren oder Aufgabe ins- pizieren oder Aufgabe überwachen oder Aufgabe beobachten oder Rückmeldung -Display/Checker oder Auftrags erledigung Personal und Aufgabe [Fehler] und Aufgabe Ventil oder Tätigkeit Ventil und Umgebung Vor Ort
THERP 20-23 (1a-j)	2	2	-	und Rückmeldung Meldung nicht möglich oder Rückmeldung Meldung unterlassen oder Rückmeldung Alarm nicht möglich oder Rückmeldung Alarm unterlassen
THERP 20-24 (2)	1	17	0	und Situation -T11 oder Situation -T12 und Aufgabe [Fehler] oder Person [Fehler] oder Tätigkeit [Fehler] und Rückmeldung Meldesystem oder Rückmeldung Signal oder Rückmeldung Instrumentierung oder Rückmeldung Signalisie- rung
THERP 20-24 (3,4,5)	12	17	0	und Aufgabe [Fehler] oder Person [Fehler] oder Tätigkeit [Fehler] und Rückmeldung Meldesystem oder Rückmeldung Signal oder Rückmeldung Instrumentierung oder Rückmeldung Signalisie- rung

Tabelle 6-3

Titel	m_j	Anfragen zur Bildung der relativen Häufigkeiten
THERP 20-01 n	32	und Situation -Tsw1 oder Situation -Tsw12 oder Situation -Tsw123 oder Situation -Tsw23 oder Situation -Tsw3 oder Situation -Tsw34 oder Situation -Tsw45 oder Situation -Tsw5 oder Situation -Tsw56 oder Situation -Tsw6 oder Situation -Tsw7
THERP 20-02 (3) n	19	und Situation -T11 oder Situation -T12
THERP 20-06 n	58	und Auftrags erledigung [Objekt] oder Auftragserteilung [Objekt]
THERP 20-07 n	52	und Auftragserteilung Anweisung
THERP 20-09 n, 20-10 n, 20-11 n	94	und Rückmeldung [Objekt]
THERP 20-10 (7) n	94	und Rückmeldung -Display/qualitativ oder Rückmeldung -Display/quantitativ oder Rückmeldung -Display/Checker
THERP 20-12 (7) n, 20-12 (8->7) n	24	und Situation -T11 oder Situation -T12 oder Aufgabe Aufgabenvorbereitung oder Aufgabe Zeitdruck oder Aufgabe Präzision oder Aufgabe Komplexität und nicht Aufgabe Einfachheit und Tätigkeit -Control oder Tätigkeit -Control/System oder Tätigkeit -Control/Switch
THERP 20-12 n	146	und Tätigkeit [Objekt]
THERP 20-13 (1+2) n	132	und Umgebung vor Ort
THERP 20-13 (3+4+5) n	13	und Aufgabe Ventil oder Tätigkeit Ventil und Tätigkeit falsch oder Aufgabe unterlassen und Umgebung vor Ort
THERP 20-14 (1+2+3+4) n	23	und Aufgabe Ventil oder Tätigkeit Ventil und Umgebung Vor Ort
THERP 20-16 (4,6) n	157	und MMS Sequentiell und Aufgabe [Fehler] oder Person [Fehler] oder Tätigkeit [Fehler]
THERP 20-16 (5,7) n	24	und MMS Dynamisch und Aufgabe [Fehler] oder Person [Fehler] oder Tätigkeit [Fehler]
THERP 20-22 (5) n	10	und Aufgabe prüfen oder Aufgabe kontrollieren oder Aufgabe inspizieren oder Aufgabe überwachen oder Aufgabe beobachten oder Rückmeldung - Display/Checker oder Auftrags erledigung Personal und Aufgabe Ventil oder Tätigkeit Ventil und Umgebung Vor Ort
THERP 20-23 n	45	und Rückmeldung Meldung oder Rückmeldung Alarm
THERP 20-24 n	17	und Rückmeldung Meldesystem oder Rückmeldung Signal oder Rückmeldung Instrumentierung oder Rückmeldung Signalisierung

Tabelle 6-4

Titel	n_{MMS}	Anfragen für Zeit-Zuverlässigkeitsverteilung [TRC]
TRC Typ T1	16	und MMS Typ A oder MMS Typ Ba oder MMS Typ B oder MMS Typ C verschlechternd und Situation -T11 oder Situation -T12
TRC Typ T2	5	und MMS Typ A oder MMS Typ Ba oder MMS Typ B oder MMS Typ C verschlechternd und Situation -T21 oder Situation -T22
TRC Typ T3	4	und MMS Typ A oder MMS Typ Ba oder MMS Typ B oder MMS Typ C verschlechternd und Situation -T3
TRC Typ T4	3	und MMS Typ A oder MMS Typ Ba oder MMS Typ B oder MMS Typ C verschlechternd und Situation -T4
TRC Typ T5	1	und MMS Typ A oder MMS Typ Ba oder MMS Typ B oder MMS Typ C verschlechternd und Situation -T5

Tabelle 6-5

<i>Klasse</i>	<i>Begriff</i>	<i>Klasse</i>	<i>Begriff</i>
-Armaturen	Armatur	-T11	1,7 Sekunden
-Armaturen	Klappe	-T11	2 Sekunden
-Armaturen	Pumpe	-T11	23 Sekunden
-Armaturen	Schieber	-T11	etwa 100 Sekunden
-Armaturen	Ventil	-T11	sofort
-Control	Armatur	-T12	3 Minuten
-Control	Drossel	-T12	4 Minuten
-Control	Hebel	-T12	5 Minuten
-Control	Klappe	-T12	6 Minuten
-Control	Motor	-T12	8 Minuten
-Control	Pumpe	-T21	10-15 Minuten später
-Control	Schieber	-T21	12 Minuten
-Control	Ventil	-T21	18 Minuten
-Control	Vorsteuermagnet- ventil	-T22	30 Minuten
-Control/Switch	24/48-V-Gleichstro- manlage	-T22	32 Minuten
-Control/Switch	Batterie	-T22	39 Minuten
-Control/Switch	Baugruppe	-T3	1,5 Stunden
-Control/Switch	Digitalmultimeter	-T3	2 Stunden
-Control/Switch	Gleichrichter	-T3	2,5 Stunden
-Control/Switch	Kabel	-T3	3 Stunden
-Control/Switch	Klemme	-T4	24 Stunden
-Control/Switch	Meßgerät	-T4	4 Tage
-Control/Switch	Multimeter	-T4	7 Tage später
-Control/Switch	Pin	-T5	14 Tage lang
-Control/Switch	Rechner	-Tsw1	1,7 Sekunden
-Control/Switch	Relais	-Tsw1	2 Sekunden
-Control/Switch	Schaltanlage	-Tsw1	23 Sekunden
-Control/Switch	Schaltanlagen- einschub	-Tsw1	etwa 100 Sekunden
-Control/Switch	Schalter	-Tsw1	sofort
-Control/Switch	Schaltkarte	-Tsw12	3 Minuten
-Control/Switch	Schiene	-Tsw12	4 Minuten
-Control/Switch	Sicherung	-Tsw12	5 Minuten
-Control/Switch	Speicher	-Tsw123	6 Minuten
-Control/Switch	Stecker	-Tsw123	8 Minuten
-Control/Switch	Steuerung	-Tsw23	10-15 Minuten später
-Control/Switch	Taste	-Tsw23	12 Minuten
-Control/Switch	Umschaltautomatik	-Tsw3	18 Minuten
-Control/Switch	Zeitbaugruppe	-Tsw34	30 Minuten
-Control/System	Ausbauvorrichtung	-Tsw34	32 Minuten
-Control/System	BE-Greifer	-Tsw45	39 Minuten
-Control/System	KAM	-Tsw5	1,5 Stunden
-Control/System	Kühler	-Tsw5	2 Stunden
-Control/System	Prüfgerät	-Tsw5	2,5 Stunden
-Control/System	Turbine	-Tsw56	3 Stunden
-Display/Checker	Fernglas	-Tsw6	24 Stunden
-Display/Checker	Fernsehkamera	-Tsw7	4 Tage
		-Tsw7	7 Tage später
		-Tsw7	14 Tage lang

Tabelle 6-5

<i>Klasse</i>	<i>Begriff</i>	<i>Klasse</i>	<i>Begriff</i>
-Display/qualitativ	Alarm	-Reading/qualitative	abwarten
-Display/qualitativ	Anschluß	-Reading/qualitative	ausgefallen
-Display/qualitativ	Bild	-Reading/qualitative	ausgelöst
-Display/qualitativ	Buchse	-Reading/qualitative	bemerken
-Display/qualitativ	Fernsehkamera	-Reading/qualitative	beobachten
-Display/qualitativ	Form	-Reading/qualitative	erkennen
-Display/qualitativ	Form	-Reading/qualitative	kontrollieren
-Display/qualitativ	Grenzwert	-Reading/qualitative	lesen
-Display/qualitativ	Meldesystem	-Reading/qualitative	sehen
-Display/qualitativ	Meldung	-Reading/qualitative	vernehmen
-Display/qualitativ	Schild		
-Display/qualitativ	Signal		
-Display/qualitativ	Signalisierung		
-Display/qualitativ	Ventil	-Reading/quantitative	ablesen
		-Reading/quantitative	angezeigt
-Display/quantitativ	Anzeige	-Reading/quantitative	auswerten
-Display/quantitativ	Anzeigebereich	-Reading/quantitative	geöffnet
-Display/quantitativ	Druck	-Reading/quantitative	geschlossen
-Display/quantitativ	Druck	-Reading/quantitative	stehengeblieben
-Display/quantitativ	Füllstand	-Reading/quantitative	verfolgen
-Display/quantitativ	Instrumentierung	-Reading/quantitative	zurückgegangen
-Display/quantitativ	Multimeter		
-Display/quantitativ	MW-Anzeige	-Quantitative Fehler	zu fest
-Display/quantitativ	Rechner	-Quantitative Fehler	zu schwach
-Display/quantitativ	Schreiber	-Quantitative Fehler	zu ungenau
-Display/quantitativ	Stellung	-Quantitative Fehler	zu viel
-Display/quantitativ	Zu-Stellung	-Quantitative Fehler	zu weit
		-Quantitative Fehler	zu wenig
-Meter/Analog	Anzeige		
-Meter/Analog	Anzeigebereich	-Zeit Fehler	zu früh
-Meter/Analog	Fernglas	-Zeit Fehler	zu lange
-Meter/Analog	Fernsehkamera	-Zeit Fehler	zu schnell
-Meter/Analog	Füllstand	-Zeit Fehler	zu spät
-Meter/Analog	Multimeter		
-Meter/Analog	MW-Anzeige		
-Meter/Analog	Schreiber		
-Meter/Analog	Stellung		
-Meter/Analog	Form		
-Meter/Digital	Form		
-Meter/Digital	Rechner		
-Meter/Digital	Schild		
-Meter/Digital	Schlüssel		
-Meter/Digital	Zu-Stellung		
-Meter/Graph	Bild		
-Meter/Print	Meldung		
-Meter/Signal	Signal		
-Meter/Signal	Signalisierung		

Tabelle 6-6

Item	Cahr	THERP	THERP max	THERP min	Cahr. max	Cahr. min	CAHR. n°/ki= m/mi	mi für ki	Grund für ki	Tref. fer ges.	Tref. fer TH-ERP
T 20-01 (1)	3,98E-01	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	5,79E-01	2,18E-01	77,34375	5,15625	32 nur 32 Fälle mit Zeitangaben	0	0
T 20-01 (2)	5,28E-02	5,00E-01	1,00E+00	1,00E+00	4,21E-01	2,18E-01	46,40625	5,15625	32 "	1	0
T 20-01 (3)	1,59E-02	1,00E-01	1,00E+00	1,00E-02	3,45E-01	2,18E-01	30,9375	5,15625	32 "	1	1
T 20-01 (4)	4,67E-03	1,00E-02	1,00E-01	1,00E-03	2,61E-01	2,18E-01	15,46875	5,15625	32 "	1	1
T 20-01 (5)	7,03E-03	1,00E-03	1,00E-02	1,00E-04	2,77E-01	2,18E-01	20,625	5,15625	32 "	1	1
T 20-01 (6)	2,05E-03	1,00E-04	3,00E-03	3,33E-06	2,31E-01	2,18E-01	5,15625	5,15625	32 "	1	1
T 20-02 (1)	4,07E-02	5,00E-02	5,00E-01	5,00E-03	9,28E-02	1,36E-03	43	1	165 alle Fälle, da Handlungen rule-based (belegt durch Log-Normalverteilung)	1	1
T 20-02 (2)	4,07E-02	2,50E-02	2,50E-01	2,50E-03	9,28E-02	1,36E-03	43	1	165 "	1	1
T 20-02 (3)	9,49E-01	1,00E+00	1,00E+00	9,43E-01	1,00E+00	1,36E-03	119	1	165 "	1	1
T 20-02 (4)	2,14E-02	1,00E-02	5,00E-02	2,00E-03	6,98E-01	3,19E-01	34,736842	8,68421	19 nur 19 der 32 Zeitangaben hier relevant	1	1
T 20-03 (1)	3,98E-01	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	5,79E-01	2,18E-01	77,34375	5,15625	32 nur 32 Fälle mit Zeitangaben	0	0
T 20-03 (2)	5,28E-02	1,00E-01	1,00E+00	1,00E-02	4,21E-01	2,18E-01	46,40625	5,15625	32 "	1	1
T 20-03 (3)	1,59E-02	1,00E-02	1,00E-01	1,00E-03	3,45E-01	2,18E-01	30,9375	5,15625	32 "	1	1
T 20-03 (4)	4,67E-03	1,00E-03	1,00E-02	1,00E-04	2,61E-01	2,18E-01	15,46875	5,15625	32 "	1	1
T 20-03 (5)	7,03E-03	1,00E-04	3,00E-03	3,33E-06	2,77E-01	2,18E-01	20,625	5,15625	32 "	1	0
T 20-03 (6)	2,05E-03	1,00E-05	3,00E-04	3,33E-07	2,31E-01	2,18E-01	5,15625	5,15625	32 "	1	0
T 20-05 (1)	4,01E-03	3,00E-03	1,50E-02	6,00E-04	1,03E-01	1,84E-03	13,575949	1,0443	158 alle Fälle für die keine Anweisungen fehlen	1	1
T 20-05 (3)	1,74E-03	3,00E-03	1,50E-02	6,00E-04	2,90E-04	1,80E-03	3,1329114	1,0443	158 "	1	1
T 20-06 (1)	2,28E-02	1,00E-02	5,00E-02	2,00E-03	8,32E-02	1,80E-03	35,506329	1,0443	158 "	1	1
T 20-06 (2)	6,61E-03	1,00E-03	3,33E-04	8,32E-02	1,80E-03	1,80E-03	19,841772	1,0443	158 "	1	0
T 20-06 (3)	4,74E-02	1,00E-02	3,00E-02	3,33E-03	8,02E-02	1,36E-03	45	1	165 "	0	0
T 20-06 (4)	1,59E-03	5,00E-03	5,00E-02	5,00E-04	2,02E-02	1,36E-03	2	1	165 "	1	1
T 20-06 (5)	3,51E-03	1,00E-02	3,33E-03	3,33E-03	1,99E-01	1,17E-02	11,891892	1,48649	111 nur Wartungstätigkeiten	1	1
T 20-06 (6)	2,59E-02	5,00E-02	2,50E-01	1,00E-02	4,70E-01	1,17E-02	37,162162	1,48649	111 "	1	1
T 20-06 (7)	5,76E-02	3,00E-01	1,00E+00	6,00E-02	4,70E-01	1,17E-02	47,567568	1,48649	111 "	1	0
T 20-06 (8)	9,07E-01	5,00E-01	1,00E+00	1,00E+00	6,90E-01	8,95E-02	110,94828	2,84483	58 nur wenn administrative Kontrolle	1	1
T 20-07 (1+2+3+4+5)	3,56E-02	9,01E-02	3,87E-01	2,08E-02	8,89E-01	1,13E-01	41,25	3,17308	52 nur wenn Anweisungen genutzt werden	1	1

Tabelle 6-6

Item	Cahr	THERP	THERP. max	THERP. min	Cahr. max	Cahr. min	CAHR. n° ki=	m/mi	mi für ki	Grund für ki	Tref- fer TH- ges. ERP
T 20-08 (1)	1,87E-03	1,00E-03	3,00E-03	3,33E-04	1,87E-03	1,36E-03	4	1	165	allgemeine Annahme, daß in jedem Fall in irgendeiner Form eine Kommunikation stattfindet	1
T 20-08 (6)	1,87E-03	1,00E-03	3,00E-03	3,33E-04	1,87E-03	1,36E-03	4	1	165	"	1
T 20-09 (2)	3,74E-03	5,00E-04	5,00E-03	5,00E-05	9,19E-03	3,27E-03	12,692308	1,15385	143	in jedem Ereignis ist irgendeine Rückmeldung gegeben, falls nicht explizit als fehlend angegeben	1
T 20-09 (3)	1,96E-03	1,00E-03	3,00E-03	3,33E-04	5,27E-03	3,27E-03	4,6153846	1,15385	143	"	1
T 20-09 (4)	1,96E-03	3,00E-03	9,00E-03	1,00E-03	4,87E-03	3,27E-03	4,6153846	1,15385	143	"	1
T 20-10 (1)	2,15E-03	3,00E-03	9,00E-03	1,00E-03	9,95E-03	3,27E-03	5,7692308	1,15385	143	"	1
T 20-10 (2)	1,36E-03	1,00E-03	3,00E-03	3,33E-04	8,49E-03	3,48E-03	0	1,15385	143	"	1
T 20-10 (3)	2,15E-03	6,00E-03	1,80E-02	2,00E-02	9,95E-03	3,27E-03	5,7692308	1,15385	143	"	1
T 20-10 (4)	1,96E-03	5,00E-02	2,50E-01	1,00E-02	9,95E-03	3,27E-03	4,6153846	1,15385	143	"	0
T 20-10 (5)	2,15E-03	1,00E-02	3,00E-02	3,33E-03	9,95E-03	3,27E-03	5,7692308	1,15385	143	"	1
T 20-10 (6)	4,10E-03	1,00E-03	3,00E-03	3,33E-04	1,42E-01	3,27E-03	13,846154	1,15385	143	"	0
T 20-10 (7)	5,18E-02	1,00E-01	5,00E-01	2,00E-02	1,42E-01	3,27E-03	46,153846	1,15385	143	"	1
T 20-11 (1)	2,59E-03	1,00E-03	3,00E-03	3,33E-04	8,49E-03	3,47E-03	8,0769231	1,15385	143	"	1
T 20-11 (2)	6,49E-03	1,00E-03	3,00E-03	3,33E-04	1,32E-01	3,27E-03	19,615385	1,15385	143	"	0
T 20-11 (3)	5,92E-03	2,00E-03	6,00E-03	6,67E-04	2,19E-02	3,27E-03	18,461538	1,15385	143	"	1
T 20-11 (4)	5,92E-03	3,00E-03	9,00E-03	1,00E-03	2,19E-02	3,27E-03	18,461538	1,15385	143	"	1
T 20-11 (5)	6,49E-03	2,00E-03	6,00E-03	6,67E-04	1,32E-01	3,27E-03	19,615385	1,15385	143	"	0
T 20-11 (6)	5,92E-03	6,00E-03	1,80E-02	2,00E-03	2,19E-02	3,27E-03	18,461538	1,15385	143	"	1
T 20-12 (2)	2,33E-03	3,00E-03	9,00E-03	1,00E-03	7,54E-03	2,90E-03	6,7808219	1,13014	146	nur wenn Betätigung erfolgte	1
T 20-12 (3+4)	1,49E-03	2,35E-03	1,18E-02	4,66E-04	4,66E-03	2,90E-03	1,130137	1,13014	146	"	1
T 20-12 (5+6)	3,72E-02	6,89E-02	3,48E-01	1,37E-02	3,64E-01	2,90E-03	41,815068	1,13014	146	"	1
T 20-12 (7)	6,01E-02	5,00E-01	1,00E+00	1,00E-01	9,54E-01	2,77E-01	48,125	6,875	24	nur wenn Betätigung unter hohem Streß erfolgte	0
T 20-12 (8->5+6)	4,42E-02	1,38E-02	6,96E-02	2,73E-03	1,11E-01	2,92E-03	44,075342	1,13014	146	nur wenn Betätigung erfolgte	1
T 20-12 (8->7)	2,50E-01	1,00E-01	5,00E-01	2,00E-02	9,43E-01	2,77E-01	68,75	6,875	24	nur wenn Betätigung unter hohem Streß erfolgte	1

Tabelle 6-6

Item	Cahr	THERP	THERP. max	THERP. min	Cahr. max	Cahr. min	CAHR. n°/ki=	mi für ki	Grund für ki	Tref-fer ges.	Tref-fer TH-ERP
T 20-12 (9)	6,29E-03	1,00E-03	1,00E-02	1,00E-04	4,93E-02	2,95E-03	19,212329	1,13014	146 nur wenn Betätigung erfolgte	1	1
T 20-12 (10)	2,80E-03	3,00E-03	9,00E-03	1,00E-03	1,54E-02	2,92E-03	9,0410959	1,13014	146 "	1	1
T 20-12 (11)	2,33E-03	5,00E-03	1,50E-02	1,67E-03	1,12E-02	2,90E-03	6,7808219	1,13014	146 "	1	1
T 20-12 (12)	1,41E-02	3,00E-03	9,00E-03	1,00E-03	1,11E-01	3,74E-03	29,383662	1,13014	146 "	1	0
T 20-12 (13)	3,06E-03	3,00E-03	9,00E-03	1,00E-03	2,87E-02	2,90E-03	10,171233	1,13014	146 "	1	1
T 20-13 (1+2)	4,97E-03	4,20E-03	1,26E-02	1,40E-03	9,62E-02	5,07E-03	16,25	1,25	132 nur Vor Ort Tätigkeiten	1	1
T 20-13 (3+4+5)	2,78E-02	2,58E-02	7,75E-02	8,61E-03	4,90E-01	3,73E-01	38,076923	12,6923	13 nur der Anteil der Fehler, der auf unklare Beschriftung zurückgeht	1	1
T 20-14 (1+2+3+4)	4,08E-02	2,00E-02	5,99E-02	6,66E-03	8,93E-01	2,85E-01	43,043478	7,17391	23 nur Fehler an Ventilen vor Ort	1	1
T 20-22 (1)	1,81E-02	1,00E-01	5,00E-01	2,00E-02	7,46E-01	3,77E-02	32,592593	2,03704	81 nur wenn prüfende Tätigkeiten	1	0
T 20-22 (2)	2,57E-01	2,00E-01	1,00E+00	4,00E-02	9,81E-01	3,77E-02	69,259259	2,03704	81 "	1	1
T 20-22 (3)	4,99E-03	5,00E-02	2,50E-01	1,00E-01	5,89E-01	3,77E-02	16,296296	2,03704	81 "	1	0
T 20-22 (4)	4,24E-03	1,00E-02	5,00E-02	2,00E-03	9,98E-02	3,78E-02	14,259259	2,03704	81 "	1	1
T 20-22 (5)	6,66E-02	1,00E-01	5,00E-01	2,00E-01	9,33E-01	4,01E-01	49,5	16,5	10 nur wenn prüfende Tätigkeit vor Ort	1	1
T 20-23 (1a+)	2,44E-03	5,00E-03	5,00E-02	5,00E-04	1,62E-01	1,42E-01	7,33333333	3,66667	45 nur wenn Rückmeldung Alarm oder Meldung	1	1
T 20-24 (2)	1,36E-03	1,00E-03	3,00E-03	3,33E-04	6,64E-01	3,36E-01	0	9,70588	17 nur wenn Rückmeldung Signal	1	1
T 20-24 (3)	9,38E-01	9,50E-01	1,00E+00	1,90E-01	6,64E-01	3,36E-01	116,47059	9,70588	17 "	1	1
T 20-24 (4)	9,38E-01	9,00E-01	1,00E+00	1,80E-01	6,64E-01	3,36E-01	116,47059	9,70588	17 "	1	1