

Modellierung des menschlichen Überwachungsverhaltens bei hochautomatisierten Prozeßführungsaufgaben

Dr.-Ing. Bernhard Döring
Forschungsinstitut für Anthropotechnik
5307 Wachtberg-Werthhoven

Einführung

In modernen, hochautomatisierten Mensch-Maschine-Systemen, z.B. in Prozeßleitwarten, schiffstechnischen Leitständen und Flugzeugen, hat der Mensch heute in zunehmendem Maße Überwachungs- und Entscheidungsaufgaben durchzuführen. Für die Modellierung derartiger Tätigkeiten wurden unterschiedliche Ansätze verwendet. Sie reichen von der Anwendung der Regelungs- und Warteschlangentheorie, der Theorie unscharfer Mengen, der Netzwerktechnik bis zur Anwendung von Produktionensystemen /9/,/10/. Hier wird über ein Modell der menschlichen Überwachungstätigkeit berichtet, das zur Analyse der Pilotentätigkeit während eines hochautomatisierten Landeanflugs entwickelt wurde. Bei einem solchen Anflug hat der Pilot eine Vielzahl unterschiedlicher Überwachungsaufgaben durchzuführen, zwischen denen situationsabhängige Vorgänger/Nachfolger-Beziehungen bestehen. Zu ihrer Modellierung wurde deshalb eine Netzwerktechnik verwendet. Die Detailbeschreibung der aufgabenspezifischen Informationsverarbeitung erfolgte mit Produktionensystemen. Über die Struktur des Modells und über seine Anwendung in einer Simulationsstudie wurde bereits an anderer Stelle berichtet /3/,/4/. Hier werden die Grundzüge der mathematischen Modellbeschreibung für Überwachungstätigkeiten bei der hochautomatisierten Prozeßführung am Beispiel des Piloten beschrieben. Einzelheiten der Modellbeschreibung sind bei Döring /2/ zu finden.

Problem- und Modellbeschreibung

Während eines automatischen Landeanflugs hat der Pilot unterschiedliche Überwachungsaufgaben durchzuführen. Hierbei nimmt er Inputinformationen aus seiner Cockpit-Umgebung auf, die anschließend verarbeitet werden. Mit den daraus resultierenden

Outputinformationen beeinflusst er die Flugprozesse und damit den Landeverlauf. Jede Aufgabe läßt sich in Basisfunktionen zerlegen, die die Bausteine der Pilotenaktivität darstellen. Diese Funktionen sind Wahrnehmung (Informationsaufnahme), Entscheidung (Informationsverarbeitung), Handlung (Informationsausgabe) und Informationsspeicherung /7/ (Bild 1). Hier wurde der Informationsfluß durch die einzelnen Funktionen nicht im Detail nachgebildet sondern nur durch die Zeitdauer berücksichtigt, die der Pilot für die Aufgabendurchführung, d.h. vom Beginn der Wahrnehmung bis zum Ende einer Handlung, benötigt. Es wurde angenommen, daß die Informationsaufnahme nur zu Beginn einer Aufgabe erfolgt und nicht während ihrer Durchführung.

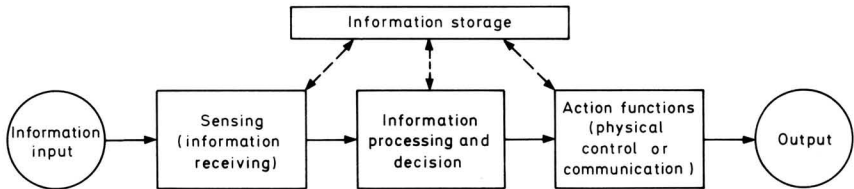


Bild 1: Basisfunktionen einer Aufgabe /7/

Die einzelnen Pilotenaufgaben wurden mit Produktionsregeln (PR) /1/, /8/ beschrieben. Der Bedingungsteil einer PR spezialisierte dabei die Werte der Größen, die der Pilot bei einer Aufgabe in seiner Umgebung wahrzunehmen und aus seinem Gedächtnis abzurufen hatte. Die Aktionsseite beschrieb die Werte der Größen, die von ihm bei einer Aufgabe zu generieren und abzugeben waren. Die zu einer Aufgabe gehörende Untermenge von PR wurde hierbei als Teil eines Produktionsuntersystems angesehen /11/. Dadurch war es möglich, das große Wissen, das vom Piloten beim Landeanflug benötigt wurde, zu strukturieren und den Produktionsuntersystemen entsprechend zu unterteilen. Die Auswahl der zu einer Aufgabe gehörende PR-Untermenge erfolgte durch die PR der Vorgänger-Aufgabe. Innerhalb einer Untermenge bestimmte die Anflugwichtigkeit einer PR ihre Stellung in der Rangfolge.

Mathematische Modellbeschreibung

Für die mathematische Modellbeschreibung wurde der Pilot als

sequentiell, gesteuertes System behandelt. Ein gesteuertes System ist ein offenes System /6/, das aus seiner Umwelt Inputs aufnimmt und seinerseits die Umwelt durch Outputs beeinflußt. Der Begriff "sequentiell" verdeutlicht den Sachverhalt, daß zu einem bestimmten Zeitpunkt der Output nicht nur vom Input abhängt sondern auch von der "Vorgeschichte", die sich beispielsweise im jeweiligen Systemzustand manifestiert /5/. Zur Beschreibung eines derartigen Systems definiert Klir /6/ Inputgrößen, Outputgrößen, interne Größen und Gedächtnisgrößen. Von diesen Größen, die auch hier zur Modellbeschreibung verwendet werden, wird im folgenden nur der mathematische Beschreibungsformalismus der Inputgrößen detailliert erläutert. Die Formalismen für die anderen Größen werden nur auszugsweise beschrieben.

Eine Aufgabe wird hier als kleinstes, diskretes Verhaltens-element angesehen, das nur zu den Zeitpunkten t_e seines Beginns und t_{e+1} seiner Beendigung definiert ist, wobei $t_e, t_{e+1} \in \mathbb{R}^{++}$, $\mathbb{R}^{++} = \mathbb{R} \cup \{0\}$ ($\mathbb{U}$ =Vereinigung) und $\mathbb{R}^+$ die Menge aller positiven, reellen Zahlen ist. Hierbei wird angenommen, daß jeder Zeitpunkt sowohl das Ende einer Aufgabe als auch den Beginn der nächsten spezifiziert. Ausnahmen hierbei sind der Startzeitpunkt $t_e=0$ der ersten Aufgabe, die keine Vorgängeraufgabe besitzt, und der Endzeitpunkt der letzten Aufgabe, der keine weitere Aufgabe mehr folgt. Einige Pilotenaufgaben sind z.B. "Einstellen Heading Marker", "Umschalten Lateral Mode", "Überwachen Heading", "Prüfen Fluggeschwindigkeit". Bei jeder Aufgabe ist das Intervall zwischen t_e und t_{e+1} durch die Aufgabendauer bestimmt, die hier durch eine Normalverteilung mit Mittelwert und Standardabweichung beschrieben wird. Ist A die Menge aller Aufgaben a_k , so läßt sich jedem a_k ein derartiger Mittelwert $d(a_k)$ zuweisen. Für die Dauer der einzelnen Aufgaben und die Menge T aller Beobachtungszeitpunkte folgt dann:

$$d : A \rightarrow \mathbb{R}^+ : \forall a_k \in A \exists_1 r \in \mathbb{R}^+ : d(a_k) = r ,$$

(1)

$$T = \{t : (t=t_e \vee t=t_{e+1}) \wedge t_{e+1}=t_e+d(a_k) \wedge t_e, t_{e+1} \in \mathbb{R}^{++} \wedge d(a_k) \in d\} .$$

Inputgrößen. Als Input nimmt der Pilot bei der Aufgabendurchführung über seine Sinneskanäle flugspezifische Größen aus seiner

Cockpit-Umgebung auf. Derartige Größen sind z.B. Fluggeschwindigkeit, Heading, Sollkurs, Höhe und Sinkgeschwindigkeit. Ist X die Menge aller beim Landeanflug benötigten Inputgrößen x_i , X_i die Menge aller möglichen Werte der Größe x_i und $x_i(t)$ der Wert der Größe x_i zum Zeitpunkt $t \in T$, dann gilt mit der Indexmenge I_X :

$$(2) \quad \begin{aligned} X &= \{x_i : i \in I_X\} \quad , \\ X_i &= \{x_i(t) : t \in T\} \quad . \end{aligned}$$

Hier wird angenommen, daß die Werte $x_i(t)$ der Inputgröße x_i ebenso wie die Werte der anderen Größen diskreter Natur sind. Dies ist zulässig, da der jeweilige Auflösungsgrad der Wertemengen bei der Aufgabenanalyse entsprechend wählbar ist.

Für eine Aufgabe benötigt der Pilot nur eine aufgabenrelevante Teilmenge der in X enthaltenen Inputgrößen. Diese Teilmenge muß von ihm aus den verfügbaren Inputgrößen selektiert werden. Zur Beschreibung dieses Selektionsvorgangs wird eine Relation $R_X \subset A \times X$ eingeführt, die die Aufgabenmenge A mit der Menge X aller Inputgrößen in Beziehung setzt. Ein Element $a_k R_X x_i$ der Relation R_X charakterisiert dann den Sachverhalt, daß die Inputgröße x_i vom Piloten bei der Aufgabe a_k benötigt wird. Gewöhnlich wird mehr als eine Inputgröße für die Aufgabendurchführung benötigt. Zur eindeutigen Beschreibung des Selektionsvorgangs wird deshalb eine Inputselektionsfunktion S_X eingeführt, deren Definitionsbereich die Menge A und deren Wertebereich die Potenzmenge $P(X)$ der Menge X ist (Bild 2):

$$(3) \quad \begin{aligned} S_X : A \rightarrow P(X) : \forall a_k \in A \exists_1 X^* \in P(X) : S_X(a_k) = X^* \quad , \\ S_X(a_k) = \{x_i : x_i \in X \wedge a_k R_X x_i\} \quad . \end{aligned}$$

Auch von der zu einer Inputgröße $x_i \in S_X(a_k)$ gehörenden Wertemenge X_i wird bei einer Aufgabe a_k nur eine aufgabenrelevante Teilmenge benötigt, d.h. vom Piloten ausgewählt. Zur mathematischen Beschreibung dieses Auswahlvorgangs wird eine Relation $R_{X_i} \subset A \times X_i$ eingeführt, die die Aufgabenmenge A mit der Wertemenge X_i in Beziehung setzt. Ein Element $a_k R_{X_i} x_i(t)$ der Relation R_{X_i} charakterisiert dann den Sachverhalt, daß der Pilot

den Wert $x_i(t)$ der Inputgröße x_i bei der Aufgabe a_k benötigt. Gewöhnlich werden bei einer Aufgabe mehrere Werte einer Inputgröße benötigt. Zur eindeutigen Beschreibung des Auswahlvorgangs wird deshalb eine Selektionsfunktion SX_i definiert, deren Definitionsbereich durch die Aufgabenmenge A und deren Wertebereich durch die Potenzmenge $P(X_i)$ der Menge X_i gebildet wird (Bild 2):

$$(4) \quad \begin{aligned} SX_i : A \rightarrow P(X_i) : \forall a_k \in A \exists_1 X_i^* \in P(X_i) : SX_i(a_k) = X_i^* , \\ SX_i(a_k) = \{ x_i(t) : x_i(t) \in X_i \wedge a_k R X_i x_i(t) \} . \end{aligned}$$

Mit $XX(a_k)$ als Menge aller zur Aufgabe a_k gehörenden Wertemengen $SX_i(a_k)$ gilt:

$$(5) \quad XX(a_k) = \{ SX_i(a_k) : SX_i(a_k) \in SX_i \wedge x_i \in SX(a_k) \} .$$

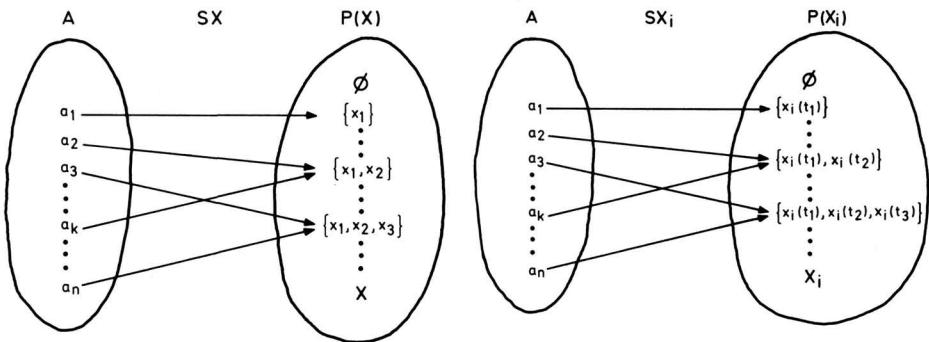


Bild 2: Exemplarische Selektionsfunktionen SX und SX_i der aufgabenrelevanten Inputgrößen und ihrer Werte.

Outputgrößen. Ein wesentliches Merkmal einer Aufgabe ist der Output, den der Pilot erbringen muß, um die Flugprozesse zu beeinflussen. Einige Outputgrößen sind z.B. Heading Marker, Sollkurs, Autopilot-Betriebsart. Ist Y_i die Wertemenge der Outputgröße y_i , Y die Menge aller beim Landeanflug erforderlichen Outputgrößen y_i , so lassen sich die aufgabenrelevanten Outputgrößen und ihre aufgabenrelevanten Werte mit Hilfe der Selektionsfunktionen SY und SY_i spezifizieren, für die gilt:

$$(6) \quad \begin{aligned} SY : A \rightarrow P(Y) : \forall a_k \in A \exists_1 Y^* \in P(Y) : SY(a_k) = Y^* , \\ SY_i : A \rightarrow P(Y_i) : \forall a_k \in A \exists_1 Y_i^* \in P(Y_i) : SY_i(a_k) = Y_i^* . \end{aligned}$$

Mit $YY(a_k)$ als Menge aller zur Aufgabe a_k gehörenden Wertemengen $SY_i(a_k)$ folgt:

$$(7) \quad YY(a_k) = \{ SY_i(a_k) : SY_i(a_k) \in SY_i \wedge Y_i \in SY(a_k) \} .$$

Interne Größen. Es wird angenommen, daß der Pilot während der Aufgabendurchführung temporäre Größen erzeugt, die für die Generierung der aufgabenrelevanten Outputgrößen und für die Auswahl der Folgeaufgabe benötigt werden. Da diese temporären Größen extern nicht in Erscheinung treten, werden sie als interne Größen bezeichnet. Durch ihre Berücksichtigung ist es möglich, den Zusammenhang zwischen Input- und Outputgrößen eindeutig als Funktion zu beschreiben. Interne Größen des Piloten sind z.B. Entscheidungsvariable, die das Einhalten der Toleranzbereiche für Heading- und Flughöhe charakterisieren. Ist W_i die Wertemenge der internen Größe w_i und W die Menge aller internen Größen w_i , so gelten für die Auswahl der aufgabenrelevanten internen Größen und ihrer Werte die Selektionsfunktionen SW und SW_i :

$$(8) \quad \begin{aligned} SW : A \rightarrow P(W) : \forall a_k \in A \exists_1 W^* \in P(W) : SW(a_k) = W^* , \\ SW_i : A \rightarrow P(W_i) : \forall a_k \in A \exists_1 W_i^* \in P(W_i) : SW_i(a_k) = W_i^* . \end{aligned}$$

Mit $WW(a_k)$ als Menge aller Wertemengen $SW_i(a_k)$ der aufgabenrelevanten internen Größen $w_i \in SW(a_k)$ folgt:

$$(9) \quad WW(a_k) = \{ SW_i(a_k) : SW_i(a_k) \in SW_i \wedge w_i \in SW(a_k) \} .$$

Gedächtnisgrößen. Bei der Aufgabendurchführung verwendet der Pilot Größen, die von ihm während der Ausbildung in seinem Langzeitgedächtnis abgespeichert oder während der Durchführung vorangegangener Aufgaben aktualisiert wurden. Diese Größen, Gedächtnisgrößen genannt, sind somit gespeicherte Input-, Output- oder interne Größen. Gedächtnisgrößen des Piloten sind

z.B. die Toleranzbereiche für Heading und Flughöhe. Bezeichnet U_i die Wertemenge der Gedächtnisgröße u_i und U die Menge aller u_i , so läßt sich der Auswahlprozeß der aufgabenrelevanten Gedächtnisgrößen und ihrer Werte mit den Selektionsfunktionen SU und SU_i beschreiben:

$$(10) \quad \begin{aligned} SU : A \rightarrow P(U) : \forall a_k \in A \exists_1 U^* \in P(U) : SU(a_k) = U^* , \\ SU_i : A \rightarrow P(U_i) : \forall a_k \in A \exists_1 U_i^* \in P(U_i) : SU_i(a_k) = U_i^* . \end{aligned}$$

Mit $UU(a_k)$ als Menge aller zur Aufgabe a_k gehörenden $SU_i(a_k)$ folgt:

$$(11) \quad UU(a_k) = \{ SU_i(a_k) : SU_i(a_k) \in SU_i \wedge u_i \in SU(a_k) \} .$$

Eine spezielle Art von Gedächtnisgrößen muß vom Piloten bei der Aufgabendurchführung temporär im Kurzzeitgedächtnis gespeichert werden, um später bei anderen Aufgaben verwendet werden zu können. Dieses können ebenfalls aufgabenrelevante Input-, Output- oder interne Größen sein. Eine dieser Größen ist z.B. die interne Entscheidungsvariable, die die verfügbare Zeit bis zum Erreichen des Soll-Headings charakterisiert. Ist v_i eine derartige Gedächtnisgröße und V die Menge aller v_i , so gilt:

$$(12) \quad V = X \cup Y \cup W \quad \text{und} \quad v_i \in V .$$

Ist V_i die Wertemenge der Größe v_i , so läßt sich die Auswahl der bei einer Aufgabe a_k abzuspeichernden aufgabenrelevanten Teilmengen von V und V_i durch die Selektionsfunktionen SV und SV_i beschreiben:

$$(13) \quad \begin{aligned} SV : A \rightarrow P(V) : \forall a_k \in A \exists_1 V^* \in P(V) : SV(a_k) = V^* , \\ SV_i : A \rightarrow P(V_i) : \forall a_k \in A \exists_1 V_i^* \in P(V_i) : SV_i(a_k) = V_i^* . \end{aligned}$$

Bezeichnet $VV(a_k)$ die Menge aller Wertemengen $SV_i(a_k)$ der bei der Aufgabe a_k abzuspeichernden Größen $v_i \in SV(a_k)$, so gilt:

$$(14) \quad VV(a_k) = \{ SV_i(a_k) : SV_i(a_k) \in SV_i \wedge v_i \in SV(a_k) \} .$$

verhaltensbeschreibung. Da eine Aufgabe a_k nur zu den Zeitpunkten ihres Beginns t_e und ihrer Beendigung $t_{e+1}=t_e+d(a_k)$ definiert ist, wird angenommen, daß bei t_e die aufgabenrelevanten Größen x_i und u_i selektiert und bei t_{e+1} die aufgabenrelevanten Größen y_i , v_i und w_i generiert werden. Wegen der zeitlichen Verschiebung können diese Größen formal nicht in Beziehung gesetzt werden. Mit bijektiven Abbildungen und einem zeitlichen Verschiebungsparameter λ , der hier die Werte $-d(a_k)$ und 0 annimmt, lassen sich die aufgabenrelevanten Größen aber in neue verhaltensrelevante Größen transformieren /6/. Bezogen auf den Zeitpunkt t_{e+1} folgt dann bei einer Aufgabe a_k für die verhaltensrelevanten Größen p_m , p_n , q_r , und q_s mit $t_e, t_{e+1} \in T$, $x_h(t_{e+1}-d(a_k)) \in SX_h(a_k)$, $u_i(t_{e+1}-d(a_k)) \in SU_i(a_k)$, $y_j(t_{e+1}) \in SY_j(a_k)$, $w_l(t_{e+1}) \in SW_l(a_k)$ (Bild 3):

$$\begin{aligned}
 p_m(t_{e+1}) &= x_h(t_{e+1}-d(a_k)) & : & \quad (h, -d(a_k)) \leftrightarrow m, \\
 p_n(t_{e+1}) &= u_i(t_{e+1}-d(a_k)) & : & \quad (i, -d(a_k)) \leftrightarrow n, \\
 q_r(t_{e+1}) &= y_j(t_{e+1}) & : & \quad (j, 0) \leftrightarrow r, \\
 q_s(t_{e+1}) &= w_l(t_{e+1}) & : & \quad (l, 0) \leftrightarrow s.
 \end{aligned}
 \tag{15}$$

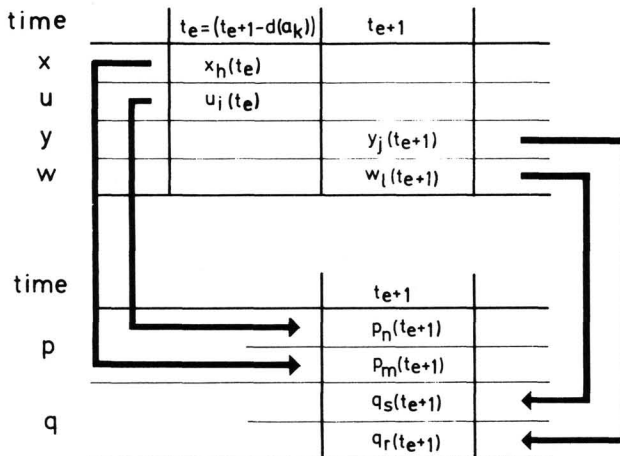


Bild 3: Transformation der aufgabenrelevanten Größen x , u , y , und w in die verhaltensrelevanten Größen p und q .

Mit den zu P_m , P_n , Q_r , und Q_s gehörenden Wertemengen P_m , P_n , Q_r und Q_s folgt:

$$(16) \quad P_m = SX_h(a_k), P_n = SU_i(a_k), Q_r = SY_j(a_k), Q_s = SW_l(a_k) .$$

Ist $C(a_k)$ die Menge, die alle zu einer Aufgabe a_k gehörenden P_m , P_n , Q_r und Q_s enthält, so gilt:

$$(17) \quad C(a_k) = XX(a_k) \cup UU(a_k) \cup YY(a_k) \cup WW(a_k) .$$

Das für die Durchführung einer Aufgabe a_k erforderliche Pilotenverhalten läßt sich dann durch eine Menge $RQ(a_k)$ von binären Relationen beschreiben, die temporär und invariant während der Dauer $d(a_k)$ zwischen den Mengen P_i und Q_j bestehen. Zu ihrer mathematischen Beschreibung werden die Mengendifferenzen $\bar{Q}_r = C(a_k) - \{Q_r\}$ und $\bar{Q}_s = C(a_k) - \{Q_s\}$ gebildet und binäre Relationen RQ_r und RQ_s zwischen den kartesischen Produkten $X\bar{Q}_r$ und $X\bar{Q}_s$ dieser Differenzen und den Mengen Q_r und Q_s formuliert /6/. Für die binären Relationen $RQ_r \subset (X\bar{Q}_r, Q_r)$ und $RQ_s \subset (X\bar{Q}_s, Q_s)$ folgt dann:

$$RQ_r = \{(\bar{q}_r(t_{e+1}), q_r(t_{e+1})) : \bar{q}_r(t_{e+1}) \in X\bar{Q}_r \wedge q_r(t_{e+1}) \in Q_r\} ,$$

$$(18) \quad RQ_s = \{(\bar{q}_s(t_{e+1}), q_s(t_{e+1})) : \bar{q}_s(t_{e+1}) \in X\bar{Q}_s \wedge q_s(t_{e+1}) \in Q_s\} ,$$

$$RQ(a_k) = RQ_r \cup RQ_s .$$

Jedes Element $(\bar{q}_i(t_{e+1}), q_i(t_{e+1}))$ einer Relation RQ_i beschreibt hierbei eine Produktionsregel. Der Vergleich eines Elements mit einer PR zeigt, daß $\bar{q}_i(t_{e+1})$ die Situationsseite der PR und $q_i(t_{e+1})$ ihre Aktionsseite spezifiziert. Einige Elemente beschreiben die Auswahl der Nachfolger-Aufgabe. $RQ(a_k)$ repräsentiert somit die Untermenge aller zu einer Aufgabe gehörenden PR.

Zusammenfassung

Zur Modellierung der Überwachungstätigkeit eines Piloten bei einem hochautomatisierten Landeanflug wurde eine Netzwerktechnik mit Produktionensystemen kombiniert. Die Beschreibung des Modells erfolgte mit den Formalismen der Allgemeinen Systemtheorie von Klir /6/. Dazu wurde das zu einer Aufgabe gehörende

Produktionenuntersystem durch eine Menge von temporären und zeitinvarianten binären Relationen beschrieben, die sowohl die aufgabenspezifische Informationsverarbeitung als auch die Verzweigung zwischen den Aufgaben spezifizieren. Die für die Beschreibung benötigten Input-, Output, Gedächtnis- und internen Größen sowie ihre funktionale Verknüpfung wurden definiert.

Literaturverzeichnis

- /1/ Barr, A., E.A. Feigenbaum (Ed.)(1981). The Handbook of Artificial Intelligence, Vol I. William Kaufmann Inc., Los Altos, CAL.
- /2/ Döring, B. (1983). Analyse des Arbeitsprozesses bei der Fahrzeugführung am Beispiel eines Landeanflugs; Eine systemergonomische Simulationsstudie. Forschungsinstitut für Anthropotechnik, Wachtberg-Werthhoven, Bericht Nr. 59.
- /3/ Döring, B. (1984). Eine Simulationsstudie zur Analyse des Pilotenverhaltens beim Landeanflug. In: F. Breitenecker, W. Kleinert (Hrg). Simulationstechnik. Informatik-Fachberichte 85. Springer-Verlag, Berlin, 539-543.
- /4/ Döring, B., A. Knäuper (1983). A simulation study with a combined network and production systems model of pilot behavior on an ILS-approach. In: Automatica, Vol.19, No.6, 741-747.
- /5/ Kämmerer, W. (1974). Einführung in mathematische Methoden der Kybernetik, 2.Auflage. Akademie Verlag, Berlin.
- /6/ Klir, G.J. (1969). An Approach to General Systems Theory. Van Nostrand Reinhold Comp., New York, London.
- /7/ McCormick, E.J. (1976). Human Factors in Engineering and Design. McGraw-Hill Book Comp., New York, London.
- /8/ Nilsson, N.J. (1980). Principles of Artificial Intelligence. Tioga Publishing Comp., Palo Alto, CAL.
- /9/ Pew, R.W., S. Baron, C.E. Fehrer, D.C. Miller (1977). Critical review and analysis of performance models applicable to man machine systems evaluation. Bolt, Beranek, and Newman Inc., Cambridge, MA, BBN Report No. 3446.
- /10/ Rouse W.B. (1980). Systems Engineering Models of Human-Machine-Interaction. North-Holland, Oxford, New York.
- /11/ Winston, D.H. (1977). Artificial Intelligence. Addison-Wesley, London.