

Universität der Bundeswehr München
Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik
Institut für Systemdynamik und Flugmechanik

Pointillistische Analyse
der visuellen und nicht-visuellen
Interaktionsressourcen
am Beispiel Pilot - Assistenzsystem

Frank O. Flemisch

Vollständiger Abdruck der von
der Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik
der Universität der Bundeswehr München
zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs
genehmigten Dissertation

Vorsitzender: Prof. Dr.phil. B. Färber
1. Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. R. Onken
2. Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. B. Döring

Tag der Prüfung: 26. September 2000

Der Druck dieser Arbeit wurde gefördert aus Haushaltsmitteln der Universität der Bundeswehr

Berichte aus der Ergonomie

Frank Ole Flemisch

**Pointillistische Analyse
der visuellen und nicht-visuellen
Interaktionsressourcen
am Beispiel Pilot-Assistentensystem**

Shaker Verlag
Aachen 2001

Die Deutsche Bibliothek - CIP-Einheitsaufnahme

Flemisch, Frank Ole:

Pointillistische Analyse der visuellen und nicht-visuellen Interaktionsressourcen
am Beispiel Pilot-Assistenzsystem / Frank Ole Flemisch.

Aachen : Shaker, 2001

(Berichte aus der Ergonomie)

Zugl.: München, Univ. der Bundeswehr, Diss., 2000

ISBN 3-8265-8365-5

Copyright Shaker Verlag 2001

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen
oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungs-
anlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 3-8265-8365-5

ISSN 1617-1055

Shaker Verlag GmbH • Postfach 1290 • 52013 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • eMail: info@shaker.de

Vorwort

Lesen Sie dieses Buch nicht! Ich selbst habe es nur gelesen, weil ich mußte. Das Leben ist viel zu kurz, um dieses Buch zu lesen!

Diese vernichtende Kritik von Marcel Reich-Ranicki (Literarisches Quartett, Dezember 1999) galt zum Glück nicht der vor Ihnen liegenden Arbeit, und ich verspreche, daß dies das letzte Zitat sein wird, das nicht ordentlich gekennzeichnet ist. Aber vielleicht können Sie mir nachfühlen, daß mich, jungen Wissenschaftler kurz vor dem Schreiben der Dissertation, diese Kritik traf, als gelte sie mir. Lesen Sie diese Dissertation nicht, ich selbst habe sie nur geschrieben, weil ich mußte? Wenn das Leben schon viel zu kurz wäre, ein Buch zu lesen, um wieviel ist es dann zu kurz, ein Buch zu schreiben?

Wenn Sie dieses Vorwort lesen, liegt die Antwort vor Ihnen, unabhängig davon, was Herr Reich-Ranicki dazu sagen würde. Doch in diesem Augenblick, an diesem dritten Januar 2000, noch ein wenig müde vom Feiern, fange ich gerade erst an, diese Arbeit zu schreiben. Ich hoffe, daß sie eines Tages fertig ist und von Ihnen gelesen wird. Sie lesen immerhin das Vorwort, ein Anfang ist gemacht. Aber wer sind Sie? Sie kennen vielleicht mich, aber während hier vor meinen Augen Buchstabe für Buchstabe dieser Text entsteht, habe ich von Ihnen nur eine vage Vorstellung.

Gehören Sie zu der kleinen Handvoll Leser, die konkrete Antworten auf konkrete Fragen suchen? Wenn Sie in der Cockpitentwicklung oder in der Mensch-Maschine-Forschung tätig sind, wenn Sie mit dem Gedanken spielen, Blickrichtungsmessung einzusetzen oder an einer wissenschaftlichen Arbeit zur menschlichen Informationsverarbeitung schreiben, dann sind Sie gleich mein schwierigster Leser. Ich muß nicht nur damit rechnen, daß Sie sich gut auskennen, mir nicht von vornherein einen persönlichen Bonus geben werden, sondern vor allem damit, daß Sie auf der Basis dieser Dissertation Entscheidungen über Ihre eigene Arbeit treffen und jede Fehlinformation ausbaden müssen.

Auch wenn jede Aussage in dieser Arbeit zwei neue Fragen aufwirft, wird es konkrete Antworten geben. Ich werde mir Mühe geben, darüber zuverlässige Information zu liefern. Sollten Sie über irgend etwas im Zweifel sein, stehe ich Ihnen auch für Rückfragen zur Verfügung. Nehmen Sie mich dafür beim Wort.

Sie, geschätzter Herr Onken, werden diese Arbeit als mein Doktorvater lesen, mir ist ein bißchen bang vor Ihrer scharfen Analytik und Argumentationsstärke, aber im Laufe der Jahre und gemeinsamen Veröffentlichungen haben wir zu einer so fruchtbaren und vertrauten Zusammenarbeit gefunden, daß ich mich auf Ihre Rückkopplung richtig freue.

Sie, verehrter Zweitgutachter, kenne ich zu diesem Zeitpunkt noch gar nicht, aber auch Ihrer Rückkopplung und Kritik sehe ich gespannt entgegen. Und der ehemalige Betreuer meiner Diplomarbeit wird vielleicht entdecken, daß Spaß am wissenschaftlichen Arbeiten durchaus abfährt.

Ihr, meine Team- und Institutskollegen, seid mit dem Hintergrund bestens vertraut, habt zum Teil selbst kräftig daran mitgewirkt und werdet diese Arbeit aller Voraussicht nach nur ausschnittsweise lesen. Vielleicht darf ich Euch die Kapitel mit den konkreten Untersuchungsbeispielen ans Herz legen, soweit Ihr diese noch nicht kennt. Eine lange Strecke sind wir zusammen gegangen, oft steile, steinige Pfade, aber mit herrlichen Gipfeln!

Vielleicht wird einer unserer Piloten diese Arbeit lesen, die dafür jede Menge Schweiß gelassen haben. Trotz allem wissenschaftlichen Zwang zur Abstraktion findet Ihr Euch hoffentlich wieder. Wenn es nicht Euch im Cockpit geben würde, wäre es nicht mal halb so spannend. Aber auch nicht halb so sicher.

Weiterhin gibt es da noch ein kleines Häuflein Nicht- oder „Halb“-Ingenieure, ohne deren Gesellschaft und Einfluß ich einen gewissen Brückenschlag zwischen der natur- und der geisteswissenschaftlichen Denkart, zwischen einem quantitativen und qualitativen Ansatz gar nicht erst versucht hätte. Drückt bitte bei den geisteswissenschaftlichen Anteilen ein Auge zu und laßt die technischen Details aus, so wie wir das bei unseren inspirierenden Diskussionen immer gehalten haben.

Und natürlich meine Frau, Eltern, Bruder, Verwandte, Freunde: Schade, daß die Wissenschaft heutzutage oft so spezialisiert, vom normalen Leben so weit weg ist. Gerade Euch, die Ihr mich die ganzen Jahre im normalen Leben gehalten habt, würde ich gerne die Faszination näher bringen, die mich ins Labor getrieben hat. Unter Umständen werde ich das mit dieser Arbeit nicht schaffen...

Nicht auszuschließen, daß meinem Sohn diese Arbeit eines Tages in die Hände fällt: Manchmal hätte ich mir gewünscht, Brücken oder Häuser zu bauen, die ich Dir heute stolz zeigen könnte, so wie Du mir damals Deine. Wie schwer ist es doch, mit Software etwas zu schaffen, das von Dauer ist. Aber jede Zeit hat ihre eigenen Fragen, ihre eigenen Leute, die diese Fragen stellen und – hoffentlich – Antworten finden. Auf jeden Fall hatte ich mit Dir auf dem Spielplatz Freude wie selten im Leben.

Wenn ich so recht darüber nachdenke, an diesem dritten Januar 2000, kurz bevor ich zum Mittagessen gehe und danach diese Dissertation anfangen zu schreiben, und mich dabei als Autor wieder hinter die Trennwand der wissenschaftlichen Objektivität zurückziehe:

Es ist ein Privileg, eine überschaubare Zahl von Lesern, Sie als Leser zu haben. Ich müßte zwar diese Arbeit auch ohne Sie schreiben, aber sie würde nicht so werden, wie sie jetzt vor Ihnen liegt. Ohne Sie so etwas zu schreiben, das Leben wäre tatsächlich viel zu kurz, ich freue mich, daß es Sie gibt!

Da kommt Andrè und holt mich zum Mittagessen ab. Was es wohl geben wird?

3.1.2000 Frank O. Flemisch

„Die Erde schenkt uns mehr Selbsterkenntnis als alle Bücher, weil sie uns Widerstand leistet. Und nur im Kampfe findet der Mensch zu sich selber. Aber er braucht dazu ein Werkzeug, einen Hobel, einen Pflug. Der Bauer ringt mit zäher Arbeit der Erde immer wieder eines ihrer Geheimnisse ab, und die Wahrheiten, die er ausgräbt, sind allgültig. So stellt auch das Flugzeug, das Werkzeug des Luftverkehrs, den Menschen allen alten Welträtseln gegenüber und wird uns zum Werkzeug der Erkenntnis und der Selbsterkenntnis...

Wer nur um Gewinn kämpft, erntet nichts, was der Mühe wert ist.“

[Saint-Exupéry 1956]

In Erinnerung an
Marius Morawski,
Pilot, Ingenieur und
ans Herz gewachsener Diplomand.
+ 17.7.1999

II

Übersicht

Die derzeitige technologische Entwicklung ist geprägt durch ein immer rascher zunehmendes Angebot an Information und technischen Funktionalitäten. Diese Entwicklung zeigt sich nicht nur im Flugzeugcockpit, wo jedoch die technologischen Fortschritte der vergangenen 20 Jahre kaum Sicherheitsgewinne gebracht haben.

Fortschrittlichere, mehr auf den Menschen abgestimmte Ansätze wie z.B. kognitive Automation und deren Umsetzung in Form von Assistenzsystemen können hier Abhilfe schaffen, aber nur, wenn sie nicht die gleichen Fehler begehen wie konventionelle Systeme, nur wenn Probleme schon früh im Entwicklungszyklus durch geeignete Methoden erkannt und beseitigt werden.

Ein möglicher Grund für Probleme mit technischen Systemen sind die begrenzten Interaktionsressourcen des Bedieners. Er besitzt zwar eine ausgeprägte Fähigkeit zum Management dieser Ressourcen, Technik kann jedoch Ressourcen und deren Management so weit überfordern, daß es zum völligen Versagen des Mensch-Maschine-Systems kommt.

Der pointillistische Ansatz der vorliegenden Arbeit besteht darin, den Gebrauch dieser Interaktionsressourcen im Zusammenspiel zwischen Mensch und Technik, inklusive des Blickverhaltens, maschinell zu erfassen, zu analysieren und danach wieder in einer intuitiv begreifbaren Form zusammenzusetzen. Das Auflösungspektrum reicht dabei vom einzelnen Byte bzw. Lidschlag über mittelnde Perspektiven wie der visuellen Aufmerksamkeitsverteilung im Cockpit bis hin zu einem integrierten Replay aufgezeichneter Flüge im Simulator. Qualitative, subjektive Aspekte können so einer quantitativen, objektiven Analyse gegenübergestellt werden.

Der auf diesem Konzept basierende Prototyp eines Test- und Bewertungswerkzeuges wird zur Untersuchung von Teilfunktionalitäten eines Assistenzsystems eingesetzt, um das Ressourcenmanagement des Menschen im Zusammenspiel mit dieser neuen Technik näher zu beschreiben.

Die Arbeit ist wie folgt aufgebaut:

- Das Kapitel 1 „Probleme zwischen Mensch und Technik am Beispiel Luftfahrt“ führt in das Thema ein. Neben einigen Erklärungsversuchen wird als mögliche Lösung die „kognitive Automation“ skizziert. Eine Umsetzung dieses Konzeptes und der exemplarische Untersuchungsgegenstand dieses Ansatzes ist das Assistenzsystem CAMA. Ein Bedarf nach weiterentwickelten Analysemethoden wird hergeleitet.

Es folgen drei domänenunabhängige Kapitel zum Hintergrund der Arbeit:

- Das Kapitel 2 „Von Systemen, Maschinen und Menschen“ beleuchtet interdisziplinäre, allgemeinere Aspekte des vorliegenden Ansatzes vor dem Hintergrund der Systemtheorie.
- Das Kapitel 3 „Kognitionspsychologische Konzepte zur Mensch-Maschine Interaktion“ gibt eine Übersicht über die im Rahmen dieser Fragestellung relevanten Konzepte zur menschlichen Informationsverarbeitung. Beschrieben werden Mehrfachressourcen, Beanspruchung, das Rasmussen-Schema, Situationsbewußtsein, Aufmerksamkeit, Aufmerksamkeitssteuerung sowie der Zusammenhang zwischen diesen Konzepten.

- Das Kapitel 4 „Die visuelle Ressource und Blickrichtungsmessung“ fokussiert dabei auf den visuellen Teil der Informationsverarbeitung. Wie funktioniert das Sehen, was steuert es, wie kann man es messen, welche Einschränkungen gibt es dabei?
- Das Kapitel 5 „Analyse des Blickverhaltens in der Luftfahrt“ beschreibt anhand ausgewählter Beispiele die Entwicklung und den Stand dieser Analysetechnik.

Der Weg über die Grundlagen zum domänenunabhängigen Konzept und zur Realisierung in einem Flugsimulator erscheint zwar nicht als der kürzeste, aber es war wert, ihn zu gehen:

- Das Kapitel 6 „Konzept einer pointillistischen Analyse der Interaktionsressourcen“ entwickelt aus einer Analogie zur Malerei heraus eine Vorgehensweise, welche einen Teil der bisher aufgeworfenen, scheinbar unvereinbaren Fragestellungen beantworten kann.
- Das Kapitel 7 „Realisierungsaspekte des ergonomischen Analysewerkzeuges“ konkretisiert das Konzept am Beispiel eines Werkzeuges zur Untersuchung der Interaktion Pilot – Assistenzsystem.

Es folgen vier Kapitel, die exemplarisch zum einen den Einsatz des Konzeptes und des Prototypen, zum anderen den Untersuchungsgegenstand selbst, den Zusammenhang zwischen Technik und dem Gebrauch der Interaktionsressourcen, verdeutlichen:

- Das Kapitel 8 „Beispiel: Elektronische Checkliste und Replay“ beschreibt den praktischen Einsatz eines Teilaspektes des Konzeptes, des Simulatorreplays, bei der Evaluierung einer isolierten Assistenzsystemfunktion, hier einer „elektronischen Checkliste für den Lastenabwurf mit konfigurierbarer Teilautomation“, mit anschließender Bewertung der Untersuchungsmethodik durch die Piloten.
- Das Kapitel 9 „Beispiel: Aufmerksamkeitsverteilung bei manuellem Fliegen und Navigation“ verdeutlicht einen weiteren Teilaspekt des Konzeptes für vergleichende Untersuchungen und dessen Einordnung in den Werkzeugkasten der Ergonomie. Beschrieben wird eine Reihe von Kurzexperimenten, bei denen die Teilaufgaben „manuelles Fliegen“ und „Navigation“ kombiniert und mit unterschiedlichen technischen Maßnahmen, z.B. einem 3D-Display oder einer maschinell generierten Konfliktlösung unterstützt werden. Aus den visuellen Aufmerksamkeitsverteilungen der Piloten sowie ihrer subjektiven Beanspruchung und objektiven Performanz werden qualitative Zusammenhänge zwischen technischen Maßnahmen und Ressourcengeschehen hergeleitet.
- Das Kapitel 10 „Beispiel: Modelle zur Analyse von Interaktionsmustern“ veranschaulicht den detailliertesten Auflösungsgrad des Konzeptes und fokussiert dazu auf Einzelexperimente des vorhergehenden Kapitels. Die visuelle und nicht-visuelle Interaktion zweier Interaktionsmuster wird mit Zustandsautomaten / *State Machines* und Markov Prozessen zuerst einzeln modelliert und mit im Simulator gewonnenen Daten quantifiziert, anschließend in der Kombination untersucht. Der Zusammenhang zwischen diesen Modellen und dem vermuteten mentalen Modell des Bedieners wird diskutiert, die Anwendung zur Analyse von Interaktionsproblemen anhand von Beispielen skizziert.
- Das Kapitel 11 „Beispiel: Absturz durch ein Interaktionsproblem“ schlägt wieder den Bogen zurück zur Praxis und beschreibt einen im Simulator aufgezeichneten Flugunfall.
- Das Kapitel 12 „Zusammenfassung und Ausblick“ beschließt die Arbeit.

IV

Diese Arbeit handelt von Stärken und Schwächen in der Zusammenarbeit von Technik und Menschen. Die Leser sind Menschen. Ingenieurwissenschaftliche, nüchterne Analytik wird nur einem Teil dieser Aspekte und nur einem Teil dieser Menschen gerecht, andere Aspekte lassen sich besser in anderen Darstellungsformen fassen. Der ingenieurwissenschaftliche Leser wird um Toleranz gebeten.

Inhaltsverzeichnis

Kapitel 1

Probleme zwischen Mensch und Technik am Beispiel Luftfahrt.....	1
Das Problem	1
Erklärungsversuche	3
Lösungsansätze	6
Eine mögliche umfassende Lösung: kognitive Automation.....	8
Reichen bestehende Bewertungskonzepte aus?.....	10

Kapitel 2

Von Systemen, Maschinen und Menschen	13
Warum den Aufwand einer Systemperspektive?.....	13
Das System	14
Das Mensch-Maschine-System	15
Disziplinen zur Gestaltung von Mensch-Maschine-Systemen.....	17
Lebenszyklus des Mensch-Maschine-Systems.....	19
Ressourcen- und Risikomanagement im Lebenszyklus	20
Methodenspektrum im Lebenszyklus.....	22
Der Fokus auf Interaktionsprobleme und auf das Interface	23
Wer löst wie Interaktionsprobleme im Mensch-Maschine-System und im Metasystem? ...	24
Menschen und zwischenmenschliche Spannungsfelder	25
Spannungsfeld zwischen praktizierender und wissenschaftlicher Ergonomie.....	26
Spannungsfeld Objektiv / Subjektiv	27
Spannungsfeld Qualitativ / Quantitativ	27
Spannungsfeld Bediener – Entwickler: Was kommt nach <i>user-centered</i> ?	29
Spannungsfeld Bediener – Entwickler – Ergonomen.....	30
Zusammenfassung und Fragen an den Ansatz	32

Kapitel 3

Kognitionspsychologische Konzepte zur Mensch-Maschine-Interaktion	37
Mehrfachressourcenmodell von Wickens	37
Belastung, Beanspruchung, Workload, Performanz.....	39
Rasmussen-Schema	41
Situationsbewußtsein	43
Aufmerksamkeit	45
Ressourcenmanagement des Bedieners.....	46
Zusammenfassung und Fragen an den Ansatz	48

Kapitel 4

Die visuelle Ressource und Blickrichtungsmessung.....	51
Bedeutung des Sehens für die Interaktion	51
Wie entsteht Sehen, wie läßt es sich klassifizieren?.....	52
Was steuert das Sehen?.....	55
Prinzipielle Einschränkungen der Blickrichtungsmessung	58
Verfahren der Blickrichtungsmessung	59
Konkretes Beispiel für ein Blickrichtungsmeßgerät: ASL4000.....	60
Zusammenfassung und Fragen an den Ansatz	61

Kapitel 5

Analyse des Blickverhaltens in der Luftfahrt	63
[Fitts et al. 1950]: Die Not der Einfachheit schult die Tugend der Vorstellungskraft	63
[Carbonell et al. 1968]- [Senders 1983]: Regelungstheoretischer Hintergrund	64
[Edwards et al. 1982]: Frühe industrielle Anwendung bei Boeing	65
[Itoh et al. 1990]: Vergleich elektromechanischer Anzeigen / modernes Glascockpit	66
[Hughes & Creed 1994]: Vergleich farbiger mit monochromen Cockpitdisplays	66
[Schulte 1996]: Piloten im militärischen Tiefflug	67
[Wickens et al. 1994 – 2000]: Anbindung an kognitions-wissenschaftliche Konzepte	67
[Tautz 1998]: Blickverhalten im modernen Glascockpit	69
[Knorr 1999]: Maschinelle Auswertung von Blickverhalten im Glascockpit	70
[VINTHEC 1999]: Internationales Konsortium zum Blickverhalten im Cockpit	71
Zusammenfassung und Fragen an den Ansatz	72

Kapitel 6

Konzept einer pointillistischen Analyse der Interaktionsressourcen	75
Grundgedanke: Pointillistischer Ansatz	75
Dekomposition der technischen Vorgänge	77
Rückkomposition der technischen Vorgänge: Replay	79
De- und Rückkomposition der Umwelt	80
Dekomposition der Interaktion	81
Rückkomposition der Interaktion	85
Zusammenfassung	86

Kapitel 7

Realisierungsaspekte des ergonomischen Analysewerkzeuges	87
Aufbau des Analysewerkzeuges caSBAro	87
Dekomposition der technischen Vorgänge und der Umwelt	89
Organisation der Daten	90
Dekomposition der Interaktion	90
Exemplarische Detailbeschreibung: Dekomposition des Blickverhaltens	92
Integrierte Bedienung und Rückkomposition	96
Konkreter Ablauf eines typischen Einsatzes von caSBAro	98
Zusammenfassung	99

Kapitel 8

Beispiel: Elektronische Checkliste und Replay	101
Einbettendes CAMA-Szenario und Piloten	101
Die elektronische Checkliste für den Lastenabwurf in CAMA	102
Kurze Diskussion der technischen Funktionalität	103
Beurteilung der Replay-Evaluation	104
Zusammenfassung	106

Kapitel 9**Beispiel: Aufmerksamkeitsverteilung bei manuellem Fliegen und Navigation** 109

Versuchsbedingungen	110
Die Teilaufgaben „Manuelles Fliegen“ und „Navigation“	111
Variation und Kombination der Teilaufgaben	112
Datenerhebung	113
Vergleich I: Variation des Manuellen Fliegens, keine Navigation	116
Vergleich II: Interpersonelle Unterschiede	118
Vergleich III: Variation der Navigation, Fliegen mit Autopilot	120
Vergleich V: Extremkombinationen für Fliegen / Navigation	124
Vergleich VI: Gleiche Unterstützung, versuchte Streßinduzierung	126
Probe aufs Exempel: Falsche Navigationsempfehlung	127
Probe aufs Exempel: Kollisionsflugzeug	128
Diskussion der Übertragbarkeit auf die Realität	129
Diskussion bzgl. der CAMA-Funktionalitäten	131
Diskussion bzgl. der Methode	133

Kapitel 10**Beispiel: Modelle zur Analyse von Interaktionsmustern** 135

Einordnung in die Bedienermodellierung	135
Manuelles Fliegen mit 3D-Display: Annäherung an die Teilaufgabe	138
Manuelles Fliegen: Inhaltliche Zusammenhänge des Interaktionsmusters	140
Manuelles Fliegen: Zeitliche Zusammenhänge des visuellen Verhaltens	141
Manuelles Fliegen: Zeitliche Zusammenhänge Auge - Hand	144
Navigation ohne Unterstützung: Annäherung an die Teilaufgabe	149
Navigation: Inhaltliche Zusammenhänge des Interaktionsmusters	151
Navigation: Zeitliche Zusammenhänge des Interaktionsmusters	152
Kombination der Teilaufgaben	159
Zwischendiskussion: Bedienermodell und mentales Modell des Bedieners	164
Von der Modellierung zur Diagnose von Interaktionsproblemen (Beispiele)	167

Kapitel 11**Beispiel: Absturz durch ein Interaktionsproblem** 171**Kapitel 12****Zusammenfassung und Ausblick** 177

Die Frage nach dem Wissen	177
Die Frage nach dem Tun	178
Die Frage nach der Hoffnung	180
Was ist der Mensch?	181

Nachwort und Danksagung 183**Literatur** 185**Anhang: MORE ON THE EYE** 196**Anhang: Versuchsumgebung** 197**Anhang: Fragebögen** 201

Fragebogen 1 „Replay“	201
Fragebogen 2 „Meßverfahren“	204
Fragebogen 3 „Schwierige Situationen“	207