

Human Error Analyse auf Basis Zweckbestimmter Kognitiver Modelle

Andreas Lüdtko, Sandro Leuchter

OFFIS Safety Critical Systems, Fraunhofer Institut für Informations- und Datenverarbeitung (IITB)

Zusammenfassung

In diesem Beitrag wird argumentiert, dass kognitive Modelle, die auf eine Unterstützung der Human Error Analyse abzielen, so einfach wie möglich und nur so komplex wie nötig konzipiert werden sollten. Der Detaillierungsgrad der einzelnen Modellkomponenten sollte im Hinblick auf die spezifische Analysefrage bestimmt werden. An einem Beispiel wird gezeigt, wie diese Strategie zur zweckbestimmten Konzeption eines Modells zur Vorhersage von Pilotenfehlern angewendet wurde.

1 Zweckbestimmte Kognitive Modelle

Bei der Entwicklung sicherheitskritischer Systeme wird parallel zur Entwicklung und Analyse der Systemfunktionalität eine auf die Sicherheit abzielende Analyse vorgenommen. Während bei der funktionalen Analyse analysiert wird, ob das System das tut, was es soll, wird bei der Sicherheitsanalyse untersucht, ob es etwas tut, was es *nicht* soll. Eng verbunden mit der Sicherheitsanalyse ist die Human Error Analyse. Hierbei werden potentielle Fehler der Mensch-Maschine Interaktion identifiziert und im Hinblick auf mögliche Gefahren eingestuft. Verglichen mit dem funktionalen Entwurf kommt im industriellen Entwicklungsprozess dem Entwurf der Mensch-Maschine Schnittstelle eine weitaus geringere Bedeutung zu. Grund dafür ist zum einen, dass die Anforderungen des Benutzers weit weniger verstanden und schwerer zu formalisieren sind als die funktionalen Anforderungen. Weiterhin fehlen adäquate Methoden und Werkzeuge. Das führt dazu, dass potentielle Handhabungsfehler erst spät im Entwicklungsprozess in Simulatorstudien antizipiert werden. Dieses Vorgehen stößt aufgrund der Komplexität moderner Geräte schnell an seine Grenzen.

Ein in der akademischen Forschung und auch bereits zaghaft in der Industrie an Bedeutung gewinnender Ansatz zur Analyse der Mensch-Maschine Interaktion, besteht darin, statt realer Benutzer „kognitive Crashtest-Dummys“ in Form kognitiver Modelle (zum Teil integriert mit anthropometrischer Modellen) zu verwenden. Auf diese Weise kann

der Faktor Mensch schon sehr früh im Entwicklungsprozess berücksichtigt werden, bereits dann, wenn lediglich ein formales Modell des späteren Systems vorliegt.

Kognitive Modelle umfassen einerseits das Wissen, welches zur Durchführung einer Aufgabe notwendig ist, und andererseits Mechanismen zur Verarbeitung dieses Wissens. Die Modelle sollen weitestgehend kognitiv adäquat sein, d.h. in empirischen Studien müssen deutliche Hinweise auf eine Äquivalenz zur menschlichen Kognition nachgewiesen worden sein. Um die Erstellung kognitiver Modelle zu erleichtern, lassen sich kognitive Architekturen anwenden. Kognitive Architekturen ermöglichen die Wiederverwendung bereits empirisch nachgewiesener Mechanismen. Sie basieren auf Erkenntnissen der Kognitionspsychologie und sind somit theoretisch fundiert. Daher kann die kognitive Modellierung als Schnittstelle zwischen den Theorien der Kognitionspsychologie und der Anwendung dieser Theorien betrachtet werden. Dabei wird die anwendungsspezifische Erstellung eines kognitiven Modelle erleichtert, weil durch die Architektur bereits bestimmte Mechanismen vorgegeben sind und deshalb nicht mehr ad-hoc erstellt werden müssen, oder wie Newell es formuliert: "Architectures provide a ready-made set of tools and theoretical constraints that can assist the cognitive modelling enterprise by constraining the possible models of a set of phenomena or even making the 'right' model an obvious consequence of the architectural constraint." (Newell 1990).

Die starke theoretische Fundierung kognitiver Architekturen bringt aber auch mit sich, dass die enthaltenen Mechanismen lediglich unter Laborbedingungen untersucht wurden. Nur unter Laborbedingungen lassen sich kontrollierte Experimente zur Validierung der modellierten Aspekte durchführen. Ziel der Kognitionspsychologie ist es, ein möglichst genaues Modell menschlichen Verhaltens zu entwickeln. Hiervon unterscheidet sich das Ziel der Anwendung kognitiver Modelle zur Unterstützung der Human Error Analyse. Hierbei müssen die Vorhersagen über menschliches Verhalten nur in soweit exakt sein, als dass sie eine Unterscheidung zwischen alternativen Systementwürfen im Hinblick auf potentielle Interaktionsprobleme ermöglichen. Solange diese Maßgabe nicht verletzt wird, kann von irrelevanten Details kognitiver Prozesse abstrahiert werden. Die in diesem Beitrag vertretene Position ist, dass kognitive Modelle, deren Intention in der Analyse von Systementwürfen besteht, nur so komplex wie notwendig und damit so schlank wie möglich sein sollten. Die Komplexität soll sich an den konkreten Analysen orientieren, um handhabbare und nachvollziehbare Modelle zu garantieren. Nur so lässt sich eine Akzeptanz auf Seiten der Systementwickler erreichen.

Ein Beispiel einer möglichen Abstraktion ist die Berücksichtigung von Gedächtnisprozessen. Liegt der Fokus der Analyse auf Workloadspitzen bei der Interaktion mit einem System, dann ist es in vielen Fällen nicht notwendig zu berücksichtigen, wie ein Element aus dem Gedächtnis abgerufen wird, sondern lediglich, welche Arbeitslast für die Kognition dabei erzeugt wird. Sollen hingegen Gedächtnisprozesse wie das korrekte Erinnern bestimmter Bedienungsabläufe in unterschiedlichen Arbeitslastsituationen untersucht werden, dann muss sehr wohl ein detailliertes Gedächtnismodell gegeben sein.

Eine weitere Anforderung an kognitive Modelle zur Verwendung bei der Human Error Analyse ergibt sich aus der Wahl der konkreten Analysetechnik. Gemeint ist die Unterscheidung zwischen Simulation und Verifikation. Simulationen bieten die Möglichkeit, die Interaktion zwischen Mensch und Maschine detailliert in konkreten Szenarien zu untersuchen. Allerdings bleibt diese Technik immer selektiv, da es aus Komplexitätsgründen nicht möglich ist, alle Szenarien zu simulieren. Mit formalen Verifikationstechniken wird eine automatisierte mathematisch vollständige Analyse aller erreichbaren Zustände innerhalb einer Modellierung angestrebt. Dabei müssen allerdings Abstriche bzgl. der Modellkomplexität hingenommen werden. Die Inputsprachen der Verifikationstools verlangen meist bestimmte Modellierungsbeschränkungen, wie z.B. Endlichkeit der Datentypen, und bieten im Vergleich zu vielen kognitiven Architekturen eine stark eingeschränkte Menge von Modellierungskonzepten. Im Hinblick auf die angestrebte Anwendung zur Entwurfsanalyse ist die Akzeptanz kognitiver Modelle wesentlich von der Möglichkeit der formalen Verifikation abhängig. Somit ist es bei jeder Modellierung kognitiver Prozesse notwendig zu berücksichtigen, dass die verwendete Formalisierung in eine äquivalente Form überführen lässt, die sich als Eingabesprache für existierende Verifikationstools eignet.

Folgende Fragestellungen können eine Richtung bei der Erstellung, Erweiterung oder Auswahl eines kognitiven Modells vorgeben:

- Welche potentiellen Interaktionsprobleme sollen analysiert werden? Es sollte klar definiert werden, für welche Analysen das Modell geeignet ist und für welche nicht.
- Welche kognitiven Prozesse sind für die Analysen relevant? Diese Frage lässt sich unter Berücksichtigung psychologischer Theorien beantworten.
- Wie lassen sich die kognitiven Prozesse modellieren? Von welchen Details kann abstrahiert werden, ohne die Relevanz der Vorhersagen zu verfälschen?

Die Verwendung kognitiver Modelle beim Systemdesign ist eine noch junge Disziplin. Dennoch haben bereits erzielte Ergebnisse gezeigt, dass dieser Ansatz einen wertvollen Beitrag zur menschenzentrierten Entwicklung interaktiver Systeme liefern kann. Für die Zukunft wäre es wünschenswert, die Potentiale der kognitiven Modellierung stärker innerhalb der Informatik zu nutzen und fortzuentwickeln. Um es mit den Worten von Card, Moran and Newell (1983, S. 16) auszudrücken: "Models of the human user have a place alongside models of compilers and language interpreters." Nachfolgend wird ein Beispiel der Anwendung eines kognitiven Modells bei der Human Error Analyse kurz vorgestellt.

2 Ein Kognitives Modell Gelernter Sorglosigkeit

In Kooperation mit der Lufthansa Flight Training wurden in einer Flugsimulatorstudie Pilotenfehler bei der Interaktion mit dem Autopiloten einer Piper Cheyenne IIIA untersucht (Lüdtke 2005). Dabei wurde das Verhalten von vier Pilotenschülern videografiert

(22,5 Stunden Videomaterial), Verlaufsdaten zur Interaktion mit dem Autopiloten transkribiert, in Aufgabenprotokolle segmentiert und schließlich Fehler bei der Autopilotenbedienung identifiziert. Wesentlich für die beobachteten Bedienungsfehler ist die Ausstattung moderner Cockpitassistenzsysteme mit einer Vielzahl von Modi. Ein Modus kann als eine Systemkonfiguration mit einer spezifischen Funktionalität verstanden werden. Modi ermöglichen, dasselbe Gerät für unterschiedliche Manöver zu nutzen und erlauben somit ein hohes Maß an Systemflexibilität. Andererseits erhöhen sie den kognitiven Bedienungsaufwand, was sich in so genannten Modusfehlern äußern kann. Hierbei führt der Pilot eine Aktion durch, die in bestimmten Modi korrekt im aktuellen Modus aber inkorrekt ist.

Durch Analyse der Fehlerraten der Piloten wurde ein Phänomen aufgedeckt, bei dem die Probanden bestimmte Aktionssequenzen anfangs durchaus korrekt durchführten und erst dann fehlerhaft agierten, wenn über eine gewisse Anzahl von Aufgabenwiederholungen immer dasselbe Verhalten verlangt war und plötzlich eine abweichende Situation eintrat, in der das Verhalten umgestellt werden musste. Dies führte zu der Hypothese, dass das korrekte Wissen durch Routinebildung verlernt wird. Auf Basis der Ergebnisse der empirischen Studie wurde ein kognitives Modell zur Analyse solcher Routinefehler konzipiert und anschließend zusammen mit einer Werkzeugumgebung prototypisch implementiert (Lüttke 2005). Im folgenden wird das dabei verfolgte Vorgehen aus Perspektive der oben aufgeführten Fragestellungen beleuchtet.

2.1 Welche Interaktionsprobleme sollen analysiert werden?

Im Zentrum der Analyse steht ein Autopilotendesign. Mit Hilfe des erstellten Werkzeugs soll es möglich sein, Fehler der oben beschriebenen Kategorie Modusfehler vorherzusagen. Analysiert werden diskrete Pilotenaktionen, die zur Bedienung des zu untersuchenden Autopiloten notwendig sind. Dabei wird davon ausgegangen, dass sich die Bedienung in Form von Regeln, welche einzuhaltende Aktionssequenzen und -bedingungen vorgeben, beschreiben lässt. Relevant sind insbesondere Bedingungen, die sich auf die Überprüfung der aktuellen Systemmodi beziehen. Analysiert wird, wie wahrscheinlich es ist, dass solche Modusbedingungen durch den Piloten verletzt werden und ob resultierende Fehler zu gefährlichen Situationen führen. Ziel ist es, das Autopilotendesign so abzuändern, dass es sich als robust gegenüber wahrscheinlichen Modusfehlern erweist.

2.2 Welche kognitiven Prozesse sind relevant?

Um eine detaillierte Hypothese bzgl. der verursachenden kognitiven Prozesse zu treffen, wurden die Situationen, in denen Modusfehler auftraten, genauer betrachtet. Auffällig ist, dass die Fehler an Entscheidungspunkten auftraten, also an Punkten, an denen es, abhängig vom aktuellen Modus, mehrere Möglichkeiten der Aufgabenfortführung gibt. Dies erfordert vom Piloten, dass er jedes Mal, wenn er an einen solchen Punkt gelangt, prüft, in welchem Modus sich das System aktuell befindet, und sein Verhalten entspre-

chend anpasst. Wie oben erwähnt, treten die Fehler auf, wenn sich Routine einschleicht, d.h. nachdem über mehrere Aufgabenwiederholungen immer derselbe Modus angezeigt wurde. Wird berücksichtigt, dass die Autopilotenbedienung eine sicherheitskritische Aufgabe ist, dann lässt sich die Routinebildung im Licht der Theorie gelernter Sorglosigkeit von Frey und Schulz-Hardt (1997) erklären. Die Theorie beschreibt einen kognitiven Prozess, bei dem Menschen Sorglosigkeit lernen, wenn sich beim Handeln in sicherheitskritischen Umgebungen Erfolge einstellen, obwohl aus Gründen der Bequemlichkeit oder Zeitersparnis Sicherheitsvorkehrungen außer Acht gelassen werden. Je häufiger sich der Erfolg beim sicherheitswidrigen Handeln einstellt, desto mehr verfestigt sich ein Zustand der Sorglosigkeit. Das Prüfen des aktuellen Modus ist eine Sicherheitsmaßnahme, die einen zusätzlichen Aufwand bedeutet und deshalb nach der Theorie der Gefahr unterliegt, als überflüssig betrachtet zu werden, wenn sich der Erfolg wiederholt auch ohne sie einstellt. Ein gewisses Maß an Sorglosigkeit ist durchaus notwendig, denn übervorsichtiges Handeln kann in komplexen Umgebungen zur Handlungsunfähigkeit führen. Deshalb muss es bei der Analyse der Bedienung sicherheitskritischer Systeme darum gehen, genau die Interaktionabläufe aufzudecken, an denen sorgloses Handeln gefährlich sein kann.

2.3 Wie lassen sich die kognitiven Prozesse modellieren?

Es wurde ein kognitives Modell der Entstehung und Anwendung gelernter Sorglosigkeit erstellt, um diesen Prozess für die Fehlerprognose nutzbar zu machen (Lüdtke & Möbus 2004). Die wesentlichen Komponenten sind eine Wissensbasis, eine Wissensverarbeitungs-, eine Gedächtnis- und eine Lernkomponente. Der Prozess der Wissensverarbeitung besteht in einem Zyklus, in dem abhängig von der aktuellen Umgebungssituation und dem aktuellen Ziel Regeln aus der Wissensbasis ausgewählt und „gefeuert“ werden. Nach jeder erfolgreichen Aufgabendurchführung werden die Regeln innerhalb der Lernkomponente durch Regelkomposition modifiziert. Hierbei werden mehrfach erfolgreich nacheinander angewendete Regeln zu kompakteren Komposita verschmolzen. Entscheidend ist, dass dabei Subziele und unter bestimmten Bedingungen auch Perzeptionen, d.h. auch Aktionen zur Überprüfung des aktuellen Modus, eliminiert werden. Zu Beginn enthält die Wissensbasis normative Regeln. Nach mehrmaliger erfolgreicher Durchführung von Flugaufgaben können sorglose Regeln entstehen. Die Plausibilität der Modellierung wurde detailliert durch Vergleich des Modellverhaltens mit den Daten der Simulatorstudie untersucht (Lüdtke 2005). Die Ergebnisse liefern starke Hinweise auf die Validität (teilweise signifikant auf Basis des McNemar Tests for Significance of Change) und Vollständigkeit des Modellverhaltens.

Abstrahiert wurde bei der Modellierung von einer detaillierten Ausgestaltung der Perzeptions- und Motoraktionen, die lediglich durch einfaches Lesen und Schreiben von Variablen einer softwaremäßig simulierten Flugumgebung realisiert wurden. Weiterhin wurde von einer ausgearbeiteten Gedächtniskomponente mit der Möglichkeit von Vergessensprozessen verzichtet und ebenfalls auf Performanzbeeinflussungen durch Faktoren wie Workload, Stress, Müdigkeit. Das kognitive Modell basiert auf der Annahme,

dass die mögliche Entstehung gefährlicher sorgloser Regeln vermieden werden sollte, auch wenn die Regelanwendung lediglich bei hoher Arbeitslast, Stress oder Müdigkeit wahrscheinlich ist. Schließlich ist das Modell derzeit nicht in der Lage, mehrere Aufgaben gleichzeitig durchzuführen. Die Analyse ist auf einzelne Aufgaben ohne Unterbrechungen beschränkt. Erweiterung zur Aufhebung dieser Beschränkung werden aktuell durchgeführt.

Das kognitive Modell wird innerhalb einer Simulationsplattform mit dem Designtool Statemate und einer Flugsimulatorsoftware gekoppelt und ausgeführt. Ein Schnappschuss der dabei gelernten Regeln wird zwecks vollständiger Fehleridentifikation mittels formaler Verifikation in die Entwurfsnotation transformiert und mit dem System integriert. Bei der Transformation wird das kognitive Modell weitgehend strukturerhaltend auf äquivalente State- und Activitychart-Strukturen übersetzt. Mittels Verifikation sollen automatisch Szenarien generiert werden, in denen die gelernten Regeln zu Bedienungsfehlern und in der Folge zur Verletzung des Aufgabenziels führen. Der Autopilotenentwurf muss so geändert werden, dass sich das System robust gegenüber der prognostizierten gelernten Sorglosigkeit erweist.

3 **Schlussteil**

In diesem Beitrag wurde für die Erstellung zweckbestimmter kognitiver Modelle plädiert und anhand eines Modells zur Anwendung innerhalb der Human Error Analyse skizziert. Zur Unterstützung der Erstellung solcher Modelle, wäre eine konfigurierbare kognitive Architektur wünschenswert, die es erlaubt, je nach Analyseanforderung unterschiedlich detaillierte kognitive Komponenten auszuwählen und zu einer Gesamtarchitektur zu integrieren. Zu diesem Thema wird an der Carl-von-Ossietzky Universität in Oldenburg aktuell eine studentische Projektgruppe durchgeführt. Ziel ist es, ein komponentenbasiertes Framework mit kognitiven Beispielkomponenten zur Analyse von Pilotenfehlern zu erstellen.

4 **Literaturverzeichnis**

- Card, S. K.; Moran, T. P.; Newell, A. (1983): *The Psychology of Human-Computer Interaction*. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates, Publishers.
- Frey, D; Schulz-Hardt, S. (1997): Eine Theorie der gelernten Sorglosigkeit. In: Mandl, H. (Hrsg.): Bericht über den 40. Kongress der Deutschen Gesellschaft für Psychologie. Göttingen, Bern, Toronto, Seattle: Hogrefe Verlag für Psychologie, S. 604-611.
- Lüdtkke, A. (2005): *Kognitive Analyse Formaler Sicherheitskritischer Steuerungssysteme auf Basis eines integrierten Mensch-Maschine-Modells*. Dissertationen zur Künstlichen Intelligenz, DISKI Band 288. Berlin: Akad. Verl.-Ges. Aka.

Lüdtke, A.; Möbus, C. (2004): A Cognitive Pilot Model to Predict Learned Carelessness for System Design. In: Pritchett, A.; Jackson, A. (Hrsg.): Proceedings of the International Conference on Human-Computer Interaction in Aeronautics (HCI-Aero), 29.09.-01.10.2004, Toulouse, France.

Newell, A. (1990). Unified Theories of Cognition. Cambridge: Harvard University Press.

Kontaktinformation

Dr. Andreas Lüdtke

OFFIS

Safety Critical Systems

Escherweg 2

D-26121 Oldenburg

Tel: +49 441 9722-530

Fax: +49 441 9722-102

E-Mail: luedtke@offis.de

<http://www.offis.de>

Dipl.-Inform. Sandro Leuchter

Fraunhofer Institut für Informations- und Datenverarbeitung (IITB)

Abt. Interoperabilität und Assistenzsysteme

Fraunhoferstr. 1

D-76131 Karlsruhe

Tel +49 721 60 91-424

Fax +49 721 60 91-413

<http://www.iitb.fraunhofer.de/IAS>