

# Sind theoretische Konzepte aus der Kognitiven Psychologie auf empirische Fragestellungen der Informatik übertragbar?

Gerhard Rinkenauer

Institut für Arbeitsphysiologie an der Universität Dortmund  
44139 Dortmund  
rinkenauer@ifado.de

**Abstract:** Die Notwendigkeit einer empirischen Überprüfung der Effektivität von softwaretechnischen Werkzeugen wird in der Informatik zunehmend anerkannt. Daher besteht auch das Bestreben, Methoden aus anderen empirischen Wissenschaften wie der Psychologie oder den Sozialwissenschaften auf Fragestellungen in der Informatik zu übertragen bzw. zu adaptieren. Die Absicht empirischer Untersuchungen ist dabei, das Verhalten des Menschen im Umgang mit Software zu analysieren. Obwohl das Instrumentarium empirischer Methoden für softwaretechnische Fragestellungen zunehmend erweitert wird, mangelt es noch an theoretischen Konzepten. Durch den fehlenden theoretischen Hintergrund kommen daher selbst experimentelle Untersuchungen oft über einen beschreibenden Status nicht hinaus. In diesem Beitrag wird deshalb der Versuch unternommen, theoretische Konzepte über die menschliche Informationsverarbeitung, wie sie in der Kognitiven Psychologie verwendet werden, auf empirische Fragestellungen im Kontext von Visualisierung und Programmverständnis zu übertragen.

## 1 Einleitung

In der kognitiven Psychologie herrscht eine lange Tradition, Modelle und Theorien über die kognitiven Fähigkeiten des Menschen zu entwerfen und die Vorhersagen dieser theoretischen Konzepte empirisch zu überprüfen und weiter zu entwickeln. Ein zentrales theoretisches Konzept ist dabei der Informationsverarbeitungsansatz, der davon ausgeht, dass menschliche Informationsverarbeitung in Teilsysteme unterteilt werden kann. Dieser Ansatz spielt sowohl in der Grundlagenforschung als auch in der angewandten Forschung eine zentrale Rolle und liefert eine adäquate theoretische Basis zur Erklärung von kognitiven Fähigkeiten. Im Folgenden soll zuerst eine kurze Einführung in eine Modellklasse dieses Informationsverarbeitungsansatzes, dem so genannten Stufenmodell der Informationsverarbeitung, gegeben werden. Aufbauend darauf wird dann exemplarisch ein mögliches experimentelles Szenario vorgestellt, wie dieser theoretische Ansatz zu einem tieferen Verständnis über die Wirksamkeit von Visualisierungstechniken beitragen könnte.

## 2 Das Stufenmodell menschlicher Informationsverarbeitung

Eine in allen Wissenschaftsbereichen übliche Vorgehensweise zur Untersuchung komplexer Systeme ist die Identifikation von Teilsystemen oder Modulen. Diese Vorgehensweise wird auch in den Kognitionswissenschaften zum Verständnis von Modulen angewandt, die mit kognitiven Leistungen wie Wahrnehmung, Erinnerung oder Handlung assoziiert werden. Normalerweise sind die Leistungen dieser Module in den Verhaltensstrom integriert und treten nicht isoliert auf. Um aber die einzelnen Leistungen und Funktionen erforschen zu können, ist es notwendig, die entsprechenden kognitiven Module getrennt vom Gesamtsystem zu untersuchen (vgl. [PRM96]). In der Kognitionspsychologie wurden hierzu theoretische Modelle und Methoden entwickelt, die es erlauben, kognitive Module aufgrund ihrer zeitlichen Organisation zu identifizieren [Luc86]. Bei diesem Ansatz wird das Gehirn als abstraktes informationsverarbeitendes System gesehen und man geht davon aus, dass kognitive Prozesse, die zum Beispiel mit Wahrnehmung, Erinnern, Entscheiden oder Handeln assoziiert sind, als mehr oder weniger separate Verarbeitungsmodul beschrieben werden können. Eine Modellklasse, das so genannte Stufenmodell der Informationsverarbeitung (Abb. 1), geht davon aus, dass menschliche Informationsverarbeitung durch eine serielle Abfolge von informationsverarbeitenden Modulen oder Stufen beschrieben werden kann [Ste69, Ste01] und jede Stufe eine bestimmte Dauer zur Bearbeitung der eingehenden Information benötigt. Die Verarbeitungsstufen in diesem Modell leisten zum Beispiel die Wahrnehmung eines Ereignisses, die Suche nach Information im Gedächtnis, das Treffen von Entscheidungen basierend auf dieser Information und die Vorbereitung einer angemessenen Reaktion [MOIY88]. Der Input dieser Verarbeitungsstufen ist die Stimulusinformation und der Output ist eine beobachtbare Reaktion.

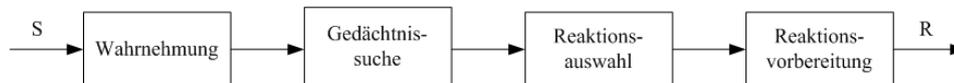


Abbildung 1: Beim Stufenmodell der Informationsverarbeitung wird angenommen, dass ein Stimulus (S) unterschiedliche Verarbeitungsstufen durchläuft, bevor eine Reaktion (R) beobachtet werden kann.

Das experimentelle Paradigma zur Untersuchung des Stufenmodells besteht aus Reaktionsaufgaben. In einem typischen Experiment wird ein Proband in einer Serie von Durchgängen getestet. Jeder Durchgang startet mit einem Warnsignal (z.B. Licht oder Ton), an das eine kurze Vorperiode angeschlossen ist. Diese Vorperiode soll dazu dienen, die Wachsamkeit und Aufmerksamkeit zu optimieren. Nach der Vorperiode wird dann das Reaktionssignal (visuelles oder akustisches Muster) präsentiert. Sobald das Reaktionssignal erscheint, soll die Versuchsperson so schnell und genau wie möglich eine Reaktion durchführen, die dem Reaktionssignal zugeordnet wurde (z.B. Drücken einer bestimmten Taste). Bei einer Einfachreaktionsaufgabe gibt es nur ein mögliches Reaktionssignal und nur eine mögliche Reaktion. Bei einer Wahlreaktionsaufgabe gibt es hingegen mehrere Reaktionssignale, denen unterschiedliche Reaktionen zugeordnet sind. Bewertet werden bei den Reaktionen die Reaktionszeit und die Fehlerrate. Die Reaktionszeit entspricht dem Zeitintervall vom Beginn des Reaktionssignals bis zum Beginn der beobachtbaren Reak-

tion. Die Fehlerrate ist das Verhältnis zwischen der Anzahl falscher Reaktionen und der Gesamtzahl der Reaktionen.

Die Interpretation von Reaktionszeitmustern im Kontext des Stufenmodells erlaubt Schlussfolgerungen darüber, wie sich experimentelle Manipulationen (Faktoren) auf die Verarbeitungsdauer von Stufen auswirken. Eine Verkürzung der Verarbeitungsdauer bedeutet dabei normalerweise eine Verbesserung der Informationsverarbeitung. Im Bereich der Kognitiven Ergonomie ist es zum Beispiel wichtig zu wissen, welche Verarbeitungsstufen des menschlichen Informationssystems durch technische Entwicklungen beeinflusst werden. Verbessert zum Beispiel eine neue Visualisierungsmethode die Wahrnehmung der dargebotenen Information oder aber auch zentrale Prozesse, wie Gedächtnis- oder Entscheidungsprozesse? Insbesondere, wenn man sich durch eine neue Visualisierungsmethode auch eine Verbesserung des Verständnisses der dargebotenen Inhalte erhofft (z.B. Programmverständnis), sollte unterschieden werden können, ob die Neuerung nur die Wahrnehmbarkeit verbessert oder ob sie sich tatsächlich auch auf Informationsverarbeitungsprozesse auswirkt, die direkter mit Programmverständnis assoziiert sein könnten. Eine Verbesserung von Gedächtnisprozessen durch eine neue Visualisierung wäre ein starker Beleg dafür, dass zentrale Verstehensprozesse verbessert werden. Um die Frage zu beantworten, wo in der Informationsverarbeitungskette eine bestimmte Manipulation wirkt, kombiniert man diesen neuen Faktor (z.B. neue vs. konventionelle Visualisierung) mit experimentellen Faktoren, von denen man bereits weiß, welche Verarbeitungsstufe sie selektiv beeinflussen. Soll zum Beispiel festgestellt werden, ob die Dimensionalität (2D- vs. 3D-Darstellung) die Wahrnehmung beeinflusst, dann kombiniert man zwei Ausprägungen des neuen Faktors „Dimension“ mit zwei Ausprägungen des Faktors „Stimulusqualität“, von dem bekannt ist, dass er selektiv die Dauer der Wahrnehmungsstufe beeinflusst. Die Ausprägungen des Faktors „Dimension“ sind dann  $D_1=2\text{D-Darstellung}$  vs.  $D_2=3\text{D-Darstellung}$ . Die Ausprägungen des Faktors „Stimulusqualität“ sind  $S_1=\text{deutlich}$  vs.  $S_2=\text{undeutlich}$ . Soll hingegen festgestellt werden, ob der neue Faktor „Dimension“ die Gedächtnisstufe beeinflusst, dann wird er mit dem Faktor „Gedächtnismenge“ kombiniert. Die zwei Ausprägungen des Faktors „Gedächtnismenge“ sind dann  $G_1=\text{wenige Elemente}$  vs.  $G_2=\text{viele Elemente}$ .

Die Ausprägungen des Faktors „Stimulusqualität“ könnten zum Beispiel durch die Manipulation des Kontrastes des Stimulusmaterials oder durch Überlagerung von Störmustern realisiert werden. In der deutlichen Bedingung würde dann das Originalstimulusmaterial präsentiert in der undeutlichen Bedingung das gleiche Stimulusmaterial entweder mit verringertem Kontrast oder mit einem überlagerten Störmuster dargestellt. Der Faktor „Gedächtnismenge“ wird üblicherweise durch unterschiedlich schwierige Wiedererkennungsbedingungen realisiert [Ste69, Ste01]. So muss zum Beispiel der Proband in der einfachen Bedingung durch seine Reaktion angeben, ob in einem präsentierten Stimulus eines von zwei vorher gemerkten Mustern präsentiert wurde oder nicht. In der schwierigen Bedingung muss er durch seine Reaktion anzeigen, ob in dem Stimulus eines von 6 gemerkten Mustern vorhanden ist oder nicht. Die Reaktion besteht dabei im Drücken von Antworttasten. Die Idee dabei ist, dass der Proband für jede Stimuluspräsentation die memorierten Muster in seinem Gedächtnis mit dem aktuell dargestellten Muster vergleichen muss, um entscheiden zu können, ob das präsentierte Muster in der Gedächtnismenge

vorhanden ist oder nicht. Je größer die Gedächtnismenge ist, desto schwieriger ist diese Aufgabe.

Für das Experiment werden alle Ausprägungen der Faktoren „Stimulusqualität“ und „Gedächtnismenge“ mit den beiden Ausprägungen des Faktors „Dimension“ kombiniert. Für die Kombination mit dem Faktor „Stimulusqualität“ würden somit die Ausprägungspaare  $\{(S_1, D_1), (S_1, D_2), (S_2, D_1), (S_2, D_2)\}$  und für die Kombination mit dem Faktor „Gedächtnismenge“ die Ausprägungspaare  $\{(G_1, D_1), (G_1, D_2), (G_2, D_1), (G_2, D_2)\}$  präsentiert. Jede dieser Kombinationen wird im Experiment für jeden Probanden ca. 20 – 30 mal dargeboten und für jede Kombination und Proband die mittlere Reaktionszeit berechnet. Diese Mittelwerte werden dann inferenzstatistisch analysiert. Für diese Form von Experimenten mit faktoriellen Versuchsplänen gibt es Standardverfahren (Varianzanalyse), die routinemäßig eingesetzt werden können.

Eine zentrale Annahme des Stufenmodells ist, dass wenn zwei Faktoren die gleiche Stufe beeinflussen, interaktive Effekte auf die Reaktionszeit gefunden werden sollten. Beeinflussen die Faktoren hingegen verschiedene Stufen, dann sollten sich additive Reaktionszeiteffekte finden. In unserem Beispiel sei nun angenommen, dass bei der Kombination der Faktoren „Stimulusqualität“ und „Dimension“ ein additiver Reaktionszeiteffekt gefunden wird (Abbildung 2, links), nämlich der Reaktionszeitunterschied zwischen den beiden Ausprägungen  $D_1$  und  $D_2$  ist für jede der beiden Ausprägungen für den Faktor „Stimulusqualität“ gleich. Das würde bedeuten, dass der Faktor „Dimension“ die Dauer der Wahrnehmungsstufe nicht beeinflusst, sondern die Dauer einer oder mehrerer anderer Stufen in der Informationsverarbeitungskette verändert hat. Für die Kombination der Faktoren „Gedächtnismenge“ und „Dimension“ sei angenommen, es findet sich ein interaktiver Effekt (Abbildung 2, rechts), nämlich bei der schwierigen Gedächtnisaufgabe ( $G_2$ ) zeigen die Probanden einen größeren Reaktionszeitunterschied zwischen  $D_1$  und  $D_2$  als bei der leichten Gedächtnisaufgabe ( $G_1$ ). Solch ein Ergebnis würde bedeuten, dass beide Faktoren die Verarbeitungsdauer der Gedächtnisstufe beeinflussen.

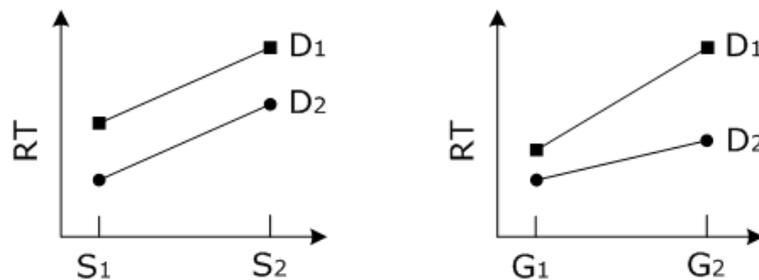


Abbildung 2: Hypothetische Ergebnisse für die gemittelten Reaktionszeiten (RT) in Abhängigkeit von den Experimentalfaktoren „Stimulusqualität“ ( $S_1, S_2$ ), „Gedächtnismenge“ ( $G_1, G_2$ ) und „Dimension“ ( $D_1, D_2$ ).

Insgesamt könnten dann die Befunde des Beispiels wie folgt interpretiert werden (siehe auch Abbildung 3): Die Unterschiede in der Dimensionalität der Darstellung wirken sich auf die Gedächtnisstufe aus. Die 3D-Visualisierung hat dabei im Vergleich zur 2D-Visualisierung einen positiven Einfluss auf die Gedächtnissuche. Dieser positive Einfluss

kann nicht auf Vorteile in der Wahrnehmung zurückgeführt werden. Der positive Einfluss auf die Gedächtnissuche könnte dafür sprechen, dass die 3D-Darstellung den Probanden eine günstigere Gedächtnisrepräsentation oder die Bildung eines effektiveren mentalen Modells ermöglicht. Bei Visualisierungen im Kontext von Programmverständnis könnte solch ein Befund dafür sprechen, dass diese Visualisierung das Verständnis der dargestellten Inhalte verbessern könnte.

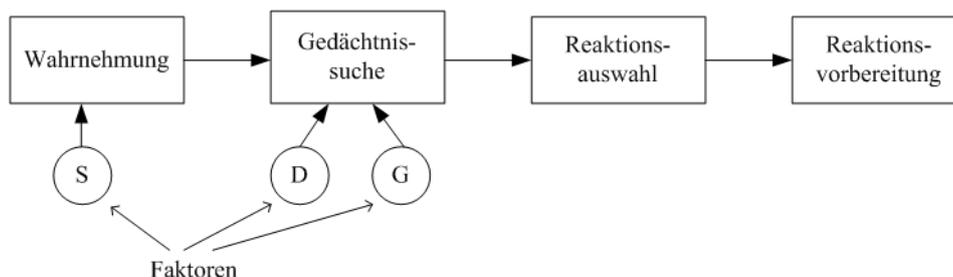


Abbildung 3: Aufgrund der in Abbildung 2 dargestellten hypothetischen Reaktionszeitmuster könnten die hier dargestellten Zuordnungen der Faktoren Stimulusqualität (S), Dimension (D) und Gedächtnismenge (G) abgeleitet werden.

### 3 Zusammenfassung

Für die Erklärung von menschlichem Verhalten im Kontext von informationstechnologischen Entwicklungen sind geeignete theoretische Ansätze erforderlich. Die Entwicklung von Theorien über die kognitiven Fähigkeiten des Menschen hat in der Kognitionspsychologie eine lange Tradition. Ziel dieses Beitrags ist es, einen theoretischen Ansatz aus der Kognitiven Psychologie auf eine softwaretechnische Fragestellung zu übertragen. An einem Beispiel wurde gezeigt, dass es grundsätzlich möglich sein sollte, mit Hilfe von theoretischen Konzepten über die menschliche Informationsverarbeitung auch zu einem tieferen Verständnis über die Wirksamkeit von softwaretechnischen Entwicklungen zu gelangen. Das Stufenmodell hat den Vorteil, dass mit einfachen Mitteln theoretisch fundierte Schlussfolgerungen über die Wirksamkeit von experimentellen Manipulationen möglich sind. Analog zur hier vorgestellten Vorgehensweise kann auch untersucht werden, inwieweit sich andere Eigenschaften von Kommunikations- und Informationsumgebungen auf Wahrnehmung, Gedächtnis, Entscheidung und Handlungsvorbereitung auswirken [San98]. Es muss allerdings erwähnt werden, dass die Annahmen des Stufenmodells sehr stark vereinfachend sind und sich dadurch Einschränkungen in der Interpretation von Experimentalergebnissen ergeben können (z.B. [MOIY88, Ste98, Ste01]). Problematisch für die Interpretation ist auch, wenn die Fehlerrate über die einzelnen Bedingungen stark variiert. Für solche Fälle stehen aber erweiterte Modelle und Methoden zur Verfügung (z.B. [ROU<sup>+</sup>04]), die es erlauben, Veränderungen in der Fehlerrate theoretisch fundiert zu interpretieren und somit auch ein erweitertes Bild über die Wirksamkeit von experimentellen Manipulationen erlauben. Ein nicht zu unterschätzender Vorteil des Stufenmodells ist, dass

es einen generellen theoretischen Rahmen über die menschliche Informationsverarbeitung bietet und daher hilfreich sein kann, auch eine gemeinsame Sprache für diesen Kontext zu finden. Eine gemeinsame Sprache zwischen den Fachdisziplinen ist eine wichtige Voraussetzung, um tiefer ausgearbeitete moderne Theorien und Methoden aus der Psychologie (siehe z.B. [WH00]) auf empirische Fragestellungen der Informatik übertragen zu können. Umgekehrt ist zu erwarten, dass sich die Etablierung von theoretischen Konzepten und empirischen Methoden in der Informatik wiederum positiv auf die Theorienbildung in der Psychologie auswirkt.

## Literatur

- [Luc86] R. D. Luce. *Response times: Their role in inferring elementary mental organization*. Oxford University Press, 1986.
- [MOIY88] D. E. Meyer, A. M. Osman, D. E. Irwin und S. Yantis. Modern mental chronometry. *Special Issue: Event related potential investigations of cognition. Biological Psychology*, 26(1-3):3–67, 1988.
- [PRM96] W. Prinz, G. Roth und S. Maasen. *Kopf-Arbeit: Gehirnfunktionen und kognitive Leistungen*, Kapitel Kognitive Leistungen und Gehirnfunktionen, Seiten 3–34. Spektrum Akademischer Verlag, 1996.
- [ROU<sup>+</sup>04] G. Rinkenauer, A. Osman, R. Ulrich, H. Müller-Gethmann und S. Mattes. On the locus of speed-accuracy tradeoff in reaction time: Inferences from the lateralized readiness potential. *Journal of Experimental Psychology: General*, 133:261–282, 2004.
- [San98] A. F. Sanders. *Elements of human performance: Reaction processes and attention in human skill*. Lawrence Erlbaum Associates, 1998.
- [Ste69] S. Sternberg. The discovery of processing stages: Extensions of Donder’s method. *Acta Psychologica*, 30:276–315, 1969.
- [Ste98] S. Sternberg. *An invitation to cognitive science: Methods, models, and conceptual issues*, Kapitel Discovering mental processing stages: The method of additive factors, Seiten 701–863. The MIT press, 2nd ed.. Auflage, 1998.
- [Ste01] S. Sternberg. Separate modifiability, mental modules, and the use of pure and composite measures to reveal them. *Acta Psychologica*, 106:147–246, 2001.
- [WH00] C. D. Wickens und J. G. Holland. *Engineering psychology and human performance*. Prentice Hall, 2000.