

Modellbasierte Analyse der menschlichen Leistung beim sequentiellen Durchblättern von Menüoptionen

Carsten Winkelholz, Mario Brandt & Helge Renkewitz

Zusammenfassung

Im Bereich von Fahrzeugsystemen steht für die Bedienung verschiedener Systeme nur begrenzt Raum für eine Informationsdarstellung zur Verfügung. Häufig finden sich daher Schnittstellen, in denen mögliche Optionen nur einzeln, sequenziell vom Benutzer durchgeblättert und betrachtet werden können. Hierbei kommt es zu dem Phänomen, dass der Benutzer den gesuchten Eintrag häufig überblättert. Untersuchungen haben gezeigt, dass die Häufigkeit des Überblätterns sowohl von der Eingabemodalität abhängt, als auch von der Art, wie die Option dargestellt wird. Beispielsweise zeigt sich für den Fall einer in der Antwortzeit längeren Spracheingabe eine geringere Rate für das Überblättern als bei einer schnellen Eingabe per konventioneller Maus. Umgekehrt zeigt sich, dass bei einer Darstellung der Optionen, in der die Erkennung erwartungsgemäß länger dauert, eine höhere Rate beim Überblättern zur Folge hat als wenn die Optionen in der Darstellung leichter zu diskriminieren sind. Eine modellhafte Betrachtung zeigt, dass ein Benutzer im Mittel schneller einen Eintrag beim Durchblättern auswählen kann, wenn er mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit in Kauf nimmt, die gewünschte Option zu überblättern, und dafür im Mittel schneller weiterblättert. Ein schnelleres Weiterblättern bedeutet, dass eine geringere Zeit für den Erkennungsprozess aufgewendet wird, womit sich dann die Wahrscheinlichkeit für das Überblättern erhöht. Bei welcher Rate des Überblätterns die erwartete Zeit für das Finden und Auswählen eines Eintrags minimal wird, hängt somit von den oben genannten Faktoren und der Länge der Liste von Optionen ab. Dieser Beitrag untersucht, inwieweit sich die beobachteten Wahrscheinlichkeiten für das Überblättern mit der Hypothese erklären lassen, dass ein Benutzer sich rational verhält und die Geschwindigkeit für das Weiterblättern in den Optionen derart anpasst, dass die erwartete Zeit, den gewünschten Eintrag auszuwählen, minimiert wird. Eine Hypothese aus dem Bereich der kognitiven Modellierung ist, dass sich das Verhalten eines kognitiven Systems an ein rationales Verhalten adaptiert (Anderson, 1990).

1 Einleitung - Motivation

Die hier vorliegende Analyse ist motiviert durch Ergebnisse einer Studie bezüglich Interaktionsverfahren in Augmented Reality (AR)-Anwendungen (Azuma et al., 2003; Milgram et al., 1999). Intuitive direkte Interaktionsverfahren sind für AR-Anwendungen schwer zu realisieren, da hierfür ein aufwendiges und genaues Tracking notwendig ist. Daher wurden in der ersten Phase der Studie verschiedene indirekte Interaktionsverfahren hinsichtlich ihrer Effizienz untersucht. Hierzu wurde ein Experiment durchgeführt. In diesem Experiment bestand die Aufgabe für die Probanden darin, eine Zielkonfiguration von vier Objekten, die sich in Farbe und Form unterscheiden, nachzustellen. Die vier Objekte waren räumlich um einen Mittelpunkt angeordnet. Die Zielkonfiguration wurde auf der rechten Seite des Sichtfeldes eingeblendet. Auf der linken Seite des Sichtfeldes wurden ebenfalls vier Objekte eingeblendet, die in der gleichen Weise in räumlicher Beziehung zueinander angeordnet waren, wie die Zielkonfiguration. Den Versuchsaufbau illustriert Bild 1.

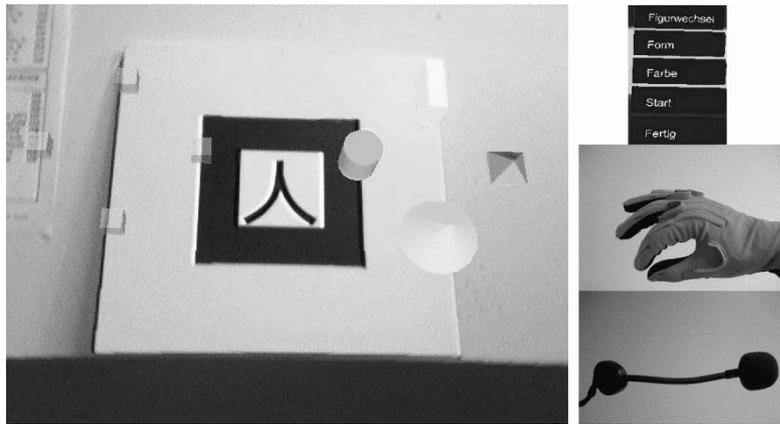


Bild 1: Illustration des Versuchsaufbaus zur Untersuchung von indirekten Interaktionsverfahren in AR-Anwendungen.

Dem Benutzer standen drei Kommandos zur Verfügung, um Farbe und Form der Objekte in dieser Konfiguration in die Zielkonfiguration zu überführen. In der links dargestellten, zu bearbeitenden Konfiguration ist durch einen erhöhten Kontrast ein Objekt hervorgehoben. Dieses Objekt gilt als selektiert. Die Farbe des selektierten Objekts kann durch das Kommando „Farbe“ gewechselt werden. Bei jedem Aufruf des Kommandos „Farbe“ wird die nächste Farbe einer imaginären, zyklischen Liste ausgewählt. Der Proband sieht nur das Resultat in der Art, dass die Farbe des Objekts sich ändert. Der Proband hat nicht die Möglichkeit, in der imaginären Liste rückwärts zu blättern. Wurde die richtige Farbe versehentlich durch einen voreiligen Aufruf des Kommandos „Farbe“ übersprungen, dann

muss der Proband die Liste komplett noch einmal durchlaufen, bis wieder die gewünschte Farbe erscheint. In der gleichen Art kann der Proband über das Kommando „Form“ die Form des selektierten Objekts aus einer imaginären, zyklischen Liste auswählen. Durch das Kommando „Weiter“ wird im Uhrzeigersinn das nächste Objekt selektiert und hervorgehoben, und der Proband kann entsprechend die Farbe und Form dieses Objekts ändern. Stimmt die zu bearbeitende Konfiguration mit der Zielkonfiguration überein, so beendet der Proband einen Durchgang mit dem Kommando „Ende“. Als unabhängige Variable wurde in den Experimenten die Modalität, mit der die Kommandos vom Probanden aufgerufen wurden, variiert. Hierbei wurden die drei Modalitäten Sprache, Handgestik und konventionelle Maus untersucht. Im Fall der Sprache wurden die Synonyme der Kommandos von dem Probanden ausgesprochen, die dann über eine Spracherkennungssoftware die entsprechenden Aktionen auslösten. Im Fall der Handgestik wurden vier Gesten für die vier Kommandos definiert. Die Bewegungen der Finger einer Hand wurden über einen Datenhandschuh registriert und ähnlich zu dem Fall der Sprache löste eine Erkennungssoftware die entsprechenden Aktionen aus. Das Berühren des Daumens und Zeigefingers entsprach beispielsweise dem Kommando „Form“. Als abhängige Variable wurde die Zeit betrachtet und die Anzahl, wie häufig eine Farbe oder Form überblättert wurde. Es nahmen sechs Probanden an den Versuchen teil. Jeder Proband wurde für alle drei Modalitäten mit je zehn Durchläufen getestet.

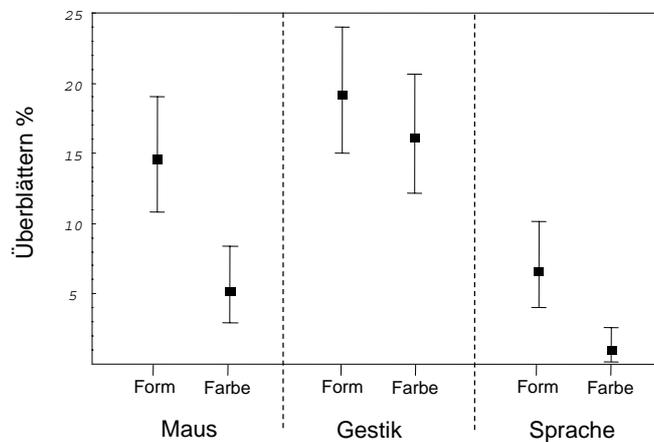


Bild 2: Relative Häufigkeiten des Überblätterns in Anhängigkeit der verschiedenen Modalitäten und des Attributs, das ausgewählt werden muss. Die Balken geben das für relative Häufigkeiten definierte Jeffrey's Credibility Intervall auf dem Niveau von 95% an.

Es zeigte sich, dass im Falle der Interaktion mit der Maus die Konfiguration am schnellsten nachgestellt werden konnte ($MT = 25,62$, $SD = 6,53$), gefolgt von der

Handgestik (MT = 51,34, SD = 33,03) und der Sprache (MT = 59,2, SD = 10,63). Eine univariate, einfaktorielle ANOVA zeigt signifikante Unterschiede in den Bearbeitungszeiten zwischen den Modalitäten an ($F = 44,3, p < 0,001$). Das Aussprechen des Kommandos nimmt eine längere Zeit in Anspruch als das Betätigen einer Schaltfläche mit der Maus. Das erklärt die im Vergleich zur Maus längere Bearbeitungszeit. Es wurde erwartet, dass für einen geübten Benutzer die Gestenerkennung zu ähnlichen Bearbeitungszeiten führt wie die Bearbeitung mit der Maus. Diese Erwartung wurde nur indirekt erfüllt, da die durchschnittliche Bearbeitungszeit deutlich länger ist. Die längere Bearbeitungszeit resultierte jedoch hauptsächlich aus einer nicht ausgereiften Erkennung der Gesten. So wurden zum Teil Gesten nur nach mehrmaligem Wiederholen erkannt, oder durch eine Geste wurde eine Aktion zweimal hintereinander ausgeführt, was häufig zu einem Überblättern der gewünschten Farbe oder Form führte. Das verlängerte die Bearbeitungszeit, da die einzelnen Einträge erneut durchgeblättert werden mussten. Die Darstellung der relativen Häufigkeiten für das Überblättern in Bild 2 illustriert dies. Die Abbildung zeigt jedoch auch einen anderen bemerkenswerten Effekt: Zum einen eine erhöhte Rate für das Überblättern im Falle der Maus gegenüber der Sprache und zum anderen eine allgemein erhöhte Rate für das Überblättern des Attributs „Form“ verglichen mit dem Überblättern des Attributes „Farbe“. Diese beiden Effekte lassen sich nicht über eine unzuverlässige Transformation von Benutzereingaben in Aktionen erklären. Die Spracheingabe funktionierte zuverlässig. Auch bei der Eingabe mit der Maus ist die Wahrscheinlichkeit, dass ein Kommando nicht erkannt wird, verschwindend gering, zumal wenn der Mauscursor auf die entsprechende Schaltfläche platziert wird, nur noch die Maustaste für ein Weiterblättern betätigt werden muss. Daher muss dieser Effekt auf einer Reiz-Reaktions-Ebene erklärt werden.

2 Modell

Der Einfachheit halber sei zunächst angenommen, dass der Benutzer nicht memoriert in welcher Reihenfolge die Einträge in der Liste aufgeführt sind. In diesem Fall ist er gezwungen, die einzelnen Einträge einzeln durchzugehen, bis der gesuchte auf dem Display erscheint. Dieser Prozess lässt sich zunächst vereinfacht wie folgt beschreiben:

1. Erkenne, ob der dargestellte Eintrag der Gesuchte ist.
 - a. Wenn ja, bestätige Selektion
 - b. Wenn nein, dann blättere weiter und fahre fort

Nach diesem einfachen Schema ist jedoch nicht zu erkennen, wie es zu einem Überblättern kommen kann. Ein Überblättern ist nur möglich, wenn der Prozess des Erkennens nicht bis zum Ende abgewartet wird oder ganz ausbleibt. Ein erster Ansatz wäre die Annahme, dass das kognitive System des Benutzers die Zeit, die es für einen Erkennungsprozess aufwendet, in irgendeiner Weise einteilen kann und nach einer bestimmten Zeit eine Entscheidung fällt, dass das dargestellte

Attribut dem gesuchten entspricht. Die Wahrscheinlichkeit, mit der eine solche Entscheidung falsch ist, hängt im Mittel von der Zeitdauer ab, die auf den Erkennungsprozess verwendet wird. Der funktionale Zusammenhang der Wahrscheinlichkeit zu Überblättern und der Zeitdauer hängt von dem Attribut ab, dass diskriminiert werden muss. Es ist zu erwarten, dass zwei Farben schneller und sicherer unterschieden werden können als zwei Formen. Eine einfache Möglichkeit eines solchen funktionalen Zusammenhangs $p(t)$ ist die Verwendung der am Wendepunkt gespiegelten kumulierten logistischen Wahrscheinlichkeitsdichte. Für die hier angegebenen Zwecke ist es sinnvoll, sie in der Weise

$$p(t, t_{\min}, t_{\max}, \alpha) = \left(1 + e^{\frac{2 \ln(1/\alpha - 1)(t - (t_{\min} + t_{\max})/2)}{t_{\max} - t_{\min}}} \right)^{-1} \quad (1)$$

zu parametrisieren, wobei $p(t_{\min}) = p(t_{\max}) = \alpha$. Bild 4 unten zeigt zwei hypothetische Kurvenverläufe für die Unterscheidung von Farben und für die Unterscheidung von Formen. Eine Alternative wäre, die Steigung der beiden Kurven in beiden Fällen konstant zu wählen und nur den Wendepunkt zu verschieben. Wie in Abschnitt 3 detaillierter diskutiert wird, kann jedoch davon ausgegangen werden, dass gerade bei der Diskriminierung unterschiedlicher Formen zunächst einfache Merkmale herangezogen werden und mit zunehmender Zeitdauer detaillierter Merkmale berücksichtigt werden. Dies führt dann zu einem flacheren Kurvenverlauf. Der Parameter t_0 repräsentiert daher die minimale Zeit, die benötigt wird, um einen Erkennungsprozess zu starten. Der Parameter t_{e1} repräsentiert dann entsprechend die benötigte Zeit für eine Erkennungsrate von $(1 - \alpha)$.

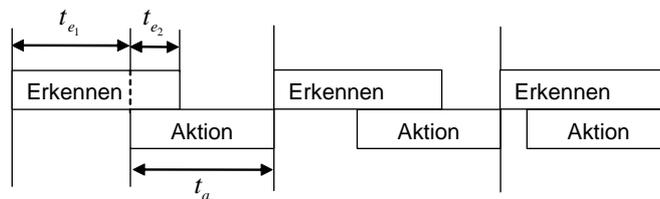


Bild 3: Prozess des Erkennens und dem Ausführens der Aktion für das Weiterblättern.

Das Klicken beansprucht eine gewisse Zeit. Nach der Theorie multipler Ressourcen kann der Erkennungsprozess parallel zu der Aktion des Weiterblätterns fortgeführt werden. Auf diese Weise lässt sich erklären, dass ein Überblättern häufig schon während oder direkt nach dem Weiterblättern bemerkt wird. Der Erkennungsprozess und die Aktion zum Weiterblättern überlappen sich demnach, wie es Bild 3 zeigt. Die Dauer für die Aktion ist durch die Modalität gegeben. Das Aussprechen eines Kommandos erfordert mehr Zeit als das Betätigen eines Tasters. Dass es zum Überblättern kommt, zeigt, dass es dem Benutzer möglich ist, weiterzublättern, bevor die Erkennungsphase abgeschlossen ist. Die Erken-

nungsphase teilt sich somit in eine Phase vor dem Auslösen der Aktion und nach dem Auslösen der Aktion. Die benötigte Zeit für das Umblättern wird im Folgenden mit t_a bezeichnet und die Zeit vor dem Umblättern im Erkennungsprozess mit t_{e1} . Die Gesamtzeit zwischen zwei Aktionen für das Weiterblättern ist somit: $t = t_{e1} + t_a$.

Je nach Zeitdauer, die für den Erkennungsprozess verwendet wird, verringert sich die Zeit für jedes Umblättern. Dabei besteht das Risiko, dass der Benutzer überblättert und alle Optionen erneut durchblättern muss. Das Überblättern ist dann rational, wenn im Mittel ein Eintrag trotz des Risikos des Überblätterns schneller ausgewählt werden kann. Hierzu ist zu untersuchen, für welche Zeit t_{e2} der Erwartungswert $\langle T \rangle$ für die Gesamtzeit bis zur erfolgreichen Auswahl einer Option minimal ist und welche Rate für das Überblättern daraus resultiert. Der Benutzer kann nur einen Fehler machen, wenn der dargestellte Eintrag der gesuchte ist. In dem anderen Fall, in dem der dargestellte Eintrag sich von dem gesuchten unterscheidet, bedeutet eine fehlerhafte Beurteilung, dass der Benutzer annimmt, beide Einträge seien gleich. In diesem Fall muss ein anderes Kommando ausgewählt werden, um entweder ein anderes Attribut weiterzublätern oder das nächste Objekt zu selektieren. Die hierzu kognitiv benötigten Ressourcen können parallel zum Fortführen des Erkennungsprozesses ablaufen. In der Regel wird der Erkennungsprozess bis zur tatsächlichen Ausführung der Aktion soweit fortgeschritten sein, dass der Unterschied bemerkt wird und entsprechend die Aktion abgebrochen und weitergeblättert wird. Der Benutzer wird in solch einem Fall vor dem Weiterblättern nur leicht zögern. Dieser Sachverhalt muss in soweit berücksichtigt werden, dass in Fällen, in denen das Weiterblättern die richtige Reaktion ist, das mögliche Zögern die mittlere Zeit Δt zwischen dem Weiterblättern um eine Faktor f erhöht: $\Delta t = f \cdot (t_{e1} + t_a)$. Primär von Bedeutung für das Überblättern und die erwartete Gesamtzeit sind die Fälle in denen die dargestellte Option der gesuchten entspricht. Die Wahrscheinlichkeit, dass der Benutzer nach einer Zeit t_{e1} im Erkennungsprozess überblättert, ist $(1 - p(t_{e1}))$ und damit, dass er i -mal überblättert $(1 - p(t_{e1}))^i p(t_{e1})$. Der Erwartungswert $\langle T \rangle$ ergibt sich dann aus folgender Berechnung:

$$\begin{aligned}
\langle T \rangle &= \sum_{i=0}^{\infty} (c(n, t_{e1}, t_a) \cdot i + \frac{f \cdot n \cdot (t_{e1} + t_a)}{2}) p(t_{e1})^i (1 - p(t_{e1})) \\
&= (1 - p(t_{e1})) \cdot \left[c(n, t_{e1}, t_a) \sum_{i=0}^{\infty} i \cdot p(t_{e1})^i + \frac{f \cdot n \cdot (t_{e1} + t_a)}{2} \sum_{i=0}^{\infty} p(t_{e1})^i \right] \\
&= (1 - p(t_{e1})) \cdot \left[c(n, t_{e1}, t_a) \frac{p(t_{e1})}{(1 - p(t_{e1}))^2} + \frac{f \cdot n \cdot (t_{e1} + t_a)}{2} \frac{1}{(1 - p(t_{e1}))} \right] \quad (2) \\
&= \left[c(n, t_{e1}, t_a) \frac{p(t_{e1})}{(1 - p(t_{e1}))} + \frac{f \cdot n \cdot (t_{e1} + t_a)}{2} \right]
\end{aligned}$$

Hierbei wird angenommen, dass die Wahrscheinlichkeit für die Position, in der der gesuchte Eintrag erscheint, gleichverteilt ist. Bei einer Liste mit n Einträgen werden daher beim ersten Durchblättern im Mittel $n/2$ Schritte benötigt, wobei jeder Schritt $f \cdot (t_{e1} + t_a)$ an Zeit kostet. Für jedes Überblättern müssen die Einträge noch einmal komplett neu durchgeblättert werden. Hierbei kann der Benutzer jedoch zu Beginn schneller weiterblättern, da zu Beginn nicht mit dem Auftauchen der gesuchten Option gerechnet werden muss. Daher wurde hier in der Berechnung der Kostenfaktor $c(n, t_{e1}, t_a)$ für das Überblättern eingeführt. Die Zeitdauer t_a für die Ausführung der Aktion wird beim erneuten Durchblättern konstant bleiben und daher einen linear mit der Länge der Liste skalierenden Beitrag liefern. Anders wird aus dem oben genannten Grund die Zeit für den Erkennungsprozess beim Weiterblättern nicht konstant sein und daher wird der Kostenfaktor hier nicht linear mit der Länge der Liste skalieren. In solchen Fällen wird häufig eine logarithmische Skalierung gewählt. Damit bietet sich dann folgender Ausdruck für den Kostenfaktor beim erneuten Durchblättern an:

$$c(n, t_{e1}, t_a) = t_{e1} \ln(n) + n t_a. \tag{3}$$

Mit diesem Kostenfaktor ergeben sich für $\langle T \rangle$ je nach Wahl von $t_{e \max}$ und t_a unterschiedliche Minima. Bild 4 zeigt die Kurvenverläufe für verschiedene Werte.

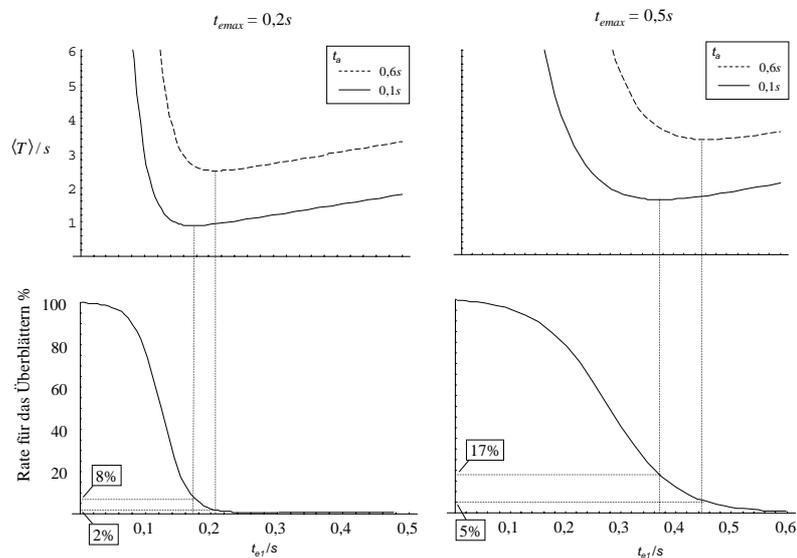


Bild 4: Oben: Verschiedene Kurvenverläufe der erwarteten Zeit $\langle T \rangle$ für die Auswahl einer Option. Unten: Die für die Berechnung von $\langle T \rangle$ entsprechend hypothetisch angenommene Kurven für die Fehlerrate bei der Beurteilung und damit des Überblätterns.

Verwendet der Benutzer die zu einem Minimum entsprechende Zeit auf den Erkennungsprozess, so entspricht dies einem optimierten Verhalten. Wie aus Bild 4 offensichtlich wird, ergeben sich für einen optimierten Zeitaufwand im Erkennungsprozess unterschiedliche Fehlerraten, abhängig von der Zeit, die im Mittel eine Aktion zum Weiterblättern kostet, und wie steil die Kurve für die Wahrscheinlichkeit einer fehlerhaften Beurteilung abfällt. Die gewählten Werte in Bild 4 entsprechen Werten aus der Literatur. Kieras (2004) gibt für die minimale Zeit, die für eine motorische Antwort benötigt wird, 100ms an. Dies entspricht der Zeit für das erneute Betätigen eines Tasters ähnlich dem Fall des Weiterblätterns mit der Maus in den für diese Arbeit durchgeführten Experimenten. Für die Abschätzung der Zeit für das Erkennen der Farben kann die Arbeit von Jones & Wilkinson (1975) herangezogen werden. Sie berichten, dass ein Proband ca. 300ms benötigt, um zu erkennen, ob ein Lichtreiz chromatisch oder achromatisch ist. Die Antwortmodalität war auch in diesen Experimenten das Auslösen eines Kontaktes mit einem Finger. Zieht man entsprechend die 100ms für die motorische Aktion ab, so ergibt sich für die Zeit des Erkennungsprozesses $t_{e,max} = 0,2s$. Als minimale Zeit für den Erkennungsprozess wurde $t_{e,min} = 0,05s$ gewählt. Dies entspricht der allgemeinen Annahme (siehe bspw. ACT-R; Anderson et al., 2004), dass jeder kognitive Schritt mindestens 50ms dauert. Schwieriger im Vorfeld festzulegen, sind der Parameter $t_{e,max}$ für das Unterscheiden von geometrischen Formen und der Parameter α . Über den Parameter $t_{e,max}$ für das Erkennen von Formen lässt sich hauptsächlich vermuten, dass er größer ist als der für das Erkennen von Farben. Der Parameter α bestimmt, wie groß die Rate für das Überblättern an den Grenzen $t_{e,min}$ und $t_{e,max}$ ist. Für $t_{e,min}$ ist die Rate für das Überblättern $1-\alpha$ und α für $t_{e,max}$. In den in diesem Abschnitt behandelten Beispielen wurde $\alpha = 0,025$ gewählt.

Aus der Bestimmung der Fehlerraten an den Minima lassen sich schon folgende Beobachtungen ableiten. Je geringer die für eine Antwort benötigte Zeit, desto vorteilhafter ist es, im Erkennungsprozess eine größere Fehlerrate in Kauf zu nehmen. So erweist sich bspw. für die Annahme $t_{e,max} = 0,2s$ für $t_a = 0,1s$ eine Fehlerrate von 8% als vorteilhaft und für $t_a = 0,6s$ nur eine Fehlerrate von 2%. Dasselbe gilt für den Fall, wenn die maximale Zeit für die Erkennung höher ist mit $t_{e,max} = 0,5s$. So ist dann für $t_a = 0,1s$ eine Fehlerrate von 17% optimal und für $t_a = 0,6s$ eine Fehlerrate von 8%. Diese Zahlenpaare zeigen auch, dass für den Fall einer größeren maximalen Erkennungszeit die optimale Fehlerrate wächst. Dass dies nicht nur für diese speziellen Zahlenwerte der Fall ist, zeigt sich, wenn man für mehrere Zahlenwerte die optimale Fehlerrate bestimmt und entsprechend wie in Bild 5 gezeigt aufrägt. Hiermit bestätigt sich dieser tendenzielle Zusammenhang.

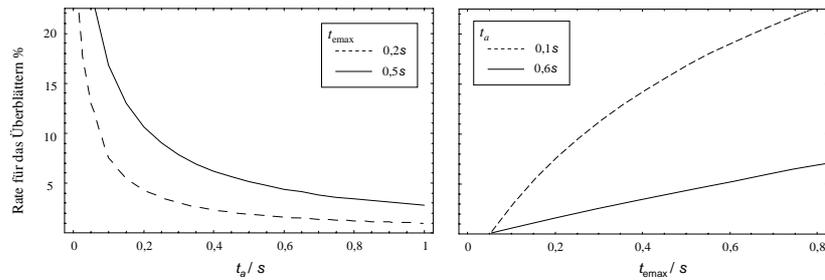


Bild 5: Kurvenverlauf der Fehlerraten in Abhängigkeit von $t_{e,max}$ und t_a , wenn der Benutzer die Zeit t_{e1} für den Erkennungsprozess in Hinblick auf $\langle T \rangle$ optimiert.

Überraschend ist, dass die Tendenz einer optimalen Fehlerrate bezüglich einer Variation von $t_{e,max}$ und t_a gegenläufig ist. Plausibel ist, dass je schneller die Aktionsdauer für die Antwort ist, die Liste umso schneller wiederholt durchgeblättert werden kann und es sich umso eher lohnt, ein Überblättern zu riskieren. Im Fall der maximalen Erkennungsdauer $t_{e,max}$ ist es schwerer eine plausible Argumentation zu finden. Bezeichnend ist jedoch, dass für $t_{e,max} \rightarrow 50\text{ms}$ die optimale Fehlerrate gegen 0% strebt. Für diesen Wert fällt die Rate für das Überblättern zwischen $t_{e,min} < t_e < t_{e,max}$ steil ab. Das bedeutet, dass nur eine um wenige ms verkürzte Zeitspanne im Erkennungsprozess ein stark erhöhtes Risiko zu überblättern nach sich zieht, obwohl im Verhältnis wenig Zeit eingespart wird. Daher ist in diesem Fall eine geringe Fehlerrate ideal. Entsprechend, je größer $t_{e,max}$ ist, desto weniger Auswirkung hat eine möglicherweise – in Relation auf die Gesamtzeit für ein Umblättern gesehen – verringerte Zeitspanne im Erkennungsprozess auf die Erkennungsleistung.

Zusammenfassend lassen sich damit aus dieser ersten Analyse folgende zwei wichtige Punkte folgern:

- Das Verhalten des Überblätterns lässt sich aus einem rationalen Verhalten des Benutzers erklären.
- Passt der Benutzer seine Zeitspanne im Erkennungsprozess an das Optimum an, ergeben sich qualitativ die Wechselwirkungen in den beobachteten Raten für das Überblättern.

Es fragt sich allerdings, ob der Benutzer sich tatsächlich derart schnell anpasst. Bevor dies anhand einer zweiten Analyse der Daten untersucht wird, wird der zunächst heuristisch begründete Kurvenverlauf für die Erkennungsrate durch eine detaillierte Beschreibung der Vorgänge bei der Erkennung beschrieben.

3 Detaillierte Betrachtung des Erkennungsprozesses

Für eine detaillierte Beschreibung des Erkennungsprozesses ließen sich folgende zwei Hypothesen aufstellen:

1. Der Erkennungsprozess läuft hierarchisch ab, und es werden sequentiell verschiedene Attribute bezüglich ihrer Übereinstimmung getestet.
2. Der Erkennungsprozess über verschiedene Attribute verläuft parallel.

Die zweite Hypothese widerspricht einer zeitlichen Abhängigkeit der Erkennungsrate. Eine zeitliche Abhängigkeit impliziert, dass nicht alle zu einer Entscheidung nötigen Prozesse parallel ablaufen, sondern zum Teil auch sequentiell. Darüber, welche Informationen in einem Schritt des Entscheidungsprozesses parallel verarbeitet werden, lässt sich spekulieren. Im Wesentlichen lassen sich nur aufgrund der ersten Hypothese, dass der Erkennungsprozess aus sequentiellen Schritten zusammengesetzt ist, schon einige Zusammenhänge zwischen zeitlicher Dauer und Erkennungsleistung ableiten. Basierend auf dieser Hypothese wäre dann speziell für den Fall, dass zwei Formen unterschieden werden müssen, der in Bild 6 dargestellte Ablauf denkbar.

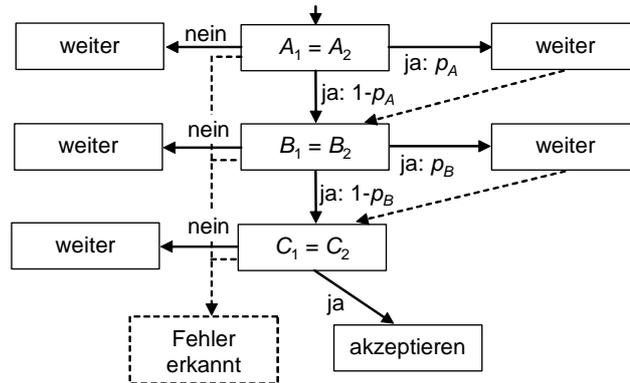


Bild 6: Schematischer Ablauf im Erkennungsprozess. Während die motorischen Aktionen für ein Weiterblättern ausgeführt werden, kann der hierarchische Prozess des Erkennens weiterlaufen, was hier durch die gestrichelte Linie angedeutet wird.

Zunächst wird überprüft, ob die Größe der beiden zu vergleichenden Icons übereinstimmen. In einem zweiten Schritt könnten weitere grobe Form-Attribute überprüft werden, beispielsweise ob ein Icon eher rundlich oder eckig ist. Zeigen die Icons durch die groben Merkmale keine Unterschiede, können feinere räumliche Relationen von Merkmalen innerhalb eines Icons verglichen werden, bis hin zum zeitaufwendigen Abzählen einzelner Ecken. Bei einer solchen Betrachtungsweise erscheint es unplausibel, dass der Benutzer den Erkennungsprozess

nicht bis zum Ende abwartet und vorher schon eine Entscheidung in Form des Weiterblätterns wählt. Wie im vorangegangenen Abschnitt jedoch gezeigt wurde, kann auch ein Abbrechen des Erkennungsprozesses Vorteile besitzen, wenn sich abhängig von der Zeit, die für den Erkennungsprozess aufgewendet wird, die Wahrscheinlichkeit für das Überblättern kontinuierlich verringert. Eine regelbasierte Modellierung teilt diesen Entscheidungsprozess in einzelne Stadien, in denen mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit einer von zwei möglichen Wegen eingeschlagen wird. Einen solchen Ablauf zeigt Bild 6. In der mittleren Reihe finden sich die einzelnen Schritte in denen nacheinander verschiedene Merkmale A , B , und C verglichen werden.

Je nach Ergebnis dieses Vergleichs, wird die Aktion „Weiterblättern“ angestoßen oder der nächste Schritt im Erkennungsprozess. Auch wenn die Aktion „Weiterblättern“ angestoßen wird, kann der Erkennungsprozess weiterlaufen, da die Prozesse der motorischen Tätigkeit parallel zu visuellen und kognitiven Prozessen verarbeitet werden können. Das heißt, der Erkennungsprozess wird auf alle Fälle zu Ende geführt, so dass am Ende vom Benutzer erkannt wird, ob versehentlich überblättert wurde. Das Erkennen, dass die Icons sich in einem Attribut unterscheiden, lässt nur die Aktion des Weiterblätterns zu. Werden in einem Schritt keine Unterschiede erkannt, dann stellt sich die Frage, ob der Erkennungsprozess weiterläuft oder ob weitergeblättert werden soll. Es ist zu erwarten, dass ein Benutzer die Wahl stochastisch trifft. Die im Folgenden geführte Diskussion lehnt sich an einen Modellierungsansatz entsprechend der ACT-R Architektur an. Innerhalb von ACT-R wird der nächste mögliche Schritt nach einem bestimmten Schema ausgewählt. Kommen vom aktuellen Kontext mehrere Schritte in Frage, so wird entsprechend einem Kosten-Nutzen-Verhältnis zufällig einer der in Frage kommenden Schritte ausgewählt. Ein Schritt mit einem höheren erwarteten Kosten-Nutzen-Verhältnis wird mit einer größeren Wahrscheinlichkeit ausgewählt als ein Schritt mit einem niedrigeren Kosten-Nutzen-Verhältnis. Die Parameter für das Kosten-Nutzen-Verhältnis eines Schrittes in dem Modell adaptieren sich an die Aufgabenumgebung, je nachdem wie erfolgreich die Wahl eines Schrittes in der Vergangenheit war. Da die Wahrscheinlichkeit, mit der ein Schritt ausgewählt wird, mit ihrem Kosten-Nutzen-Verhältnis korreliert, werden im Folgenden als Parameter des Prozesses direkt die Wahrscheinlichkeiten p_A und p_B , mit denen der Prozess bei gleich erkannten Attributen weiterblättert oder den Erkennungsprozess fortsetzt, betrachtet. Mit den Parametern p_A und p_B ändert sich auch die erwartete Zeit $\langle t_{el} \rangle$, die der Erkennungsprozess dauert:

$$\langle t_{el} \rangle = p_A t_A + (1 - p_A) p_B (t_A + t_B) + (1 - p_A)(1 - p_B)(t_A + t_B + t_C) \quad (4)$$

Aus der Sicht der kognitiven Modellierung passen sich die Parameter p_A und p_B entsprechend so an, dass die Gesamtleistung für die Bewältigung der Aufgabe optimiert wird. In Bezug auf die Betrachtung im vorangegangenen Abschnitt ist jedoch der funktionale Zusammenhang zwischen der Rate des Überblätterns und

der mittleren Zeit $\langle t_{e1} \rangle$, die auf den Erkennungsprozess aufgewendet wird, von Interesse. Dieser funktionale Zusammenhang lässt sich herstellen, indem die Gleichung (4) nach p_B aufgelöst wird. Hieraus ergibt sich:

$$p_B(\langle t_{e1} \rangle, p_A) = \frac{-\langle t_{e1} \rangle - p_A(t_B + t_C) + (t_A + t_B + t_C)}{(1 - p_A)t_C} \quad (5)$$

Dieser funktionale Zusammenhang wird in Bild 7 auf der linken Seite illustriert. Mit den Parametern p_A und p_B ändert sich auch die Rate für das Überblättern mit

$$p = p_A + (1 - p_A)p_B \quad (6)$$

Berücksichtigt man für eine festes $\langle t_{e1} \rangle$ den funktionalen Zusammenhang von p_A und p_B in (5), dann lässt sich die Rate für das Überblättern noch mit p_A entsprechend dem in Bild 7 auf der rechten Seite gezeigten funktionalen Zusammenhang beeinflussen.

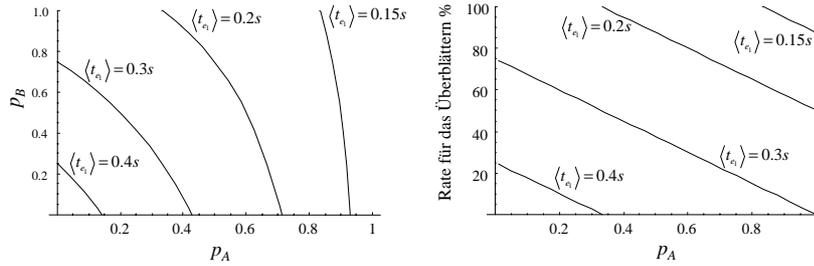


Bild 7: Links: Für fixierte Erkennungsdauer $\langle t_{e1} \rangle$ gültige Wertepaare für p_A und p_B . Rechts: Rate für das Überblättern bei fixierter Erkennungsdauer $\langle t_{e1} \rangle$ parametrisiert über den Parameter p_A .

Ein rationales Verhalten ist, dass sich p_A so anpasst, dass bei fixiertem $\langle t_{e1} \rangle$ die Rate für das Überblättern minimal wird. Da die Rate für das Überblättern ebenso wie $p_B(\langle t_{e1} \rangle, p_A)$ monoton mit p_A fällt, ist die optimale Wahl für p_A , wenn $p_B(\langle t_{e1} \rangle, p_A) = 0$ gilt.

Dies ist ein interessantes Ergebnis, da es bedeutet, dass für ein optimiertes Verhalten nur am Anfang entschieden werden muss, ob direkt weitergeblättert werden soll, oder ob der gesamte Erkennungsprozess durchlaufen werden soll. Bei näherem Hinsehen gilt dies auch, wenn noch weitere mögliche Attribute im Erkennungsprozess sequentiell unterschieden werden können. Auch hier gilt, dass für ein rationales Verhalten entweder direkt zu Beginn weitergeblättert werden sollte oder aber alle Attribute geprüft und der Erkennungsprozess komplett durchlaufen werden sollte. Rückschauend erscheint dies auch plausibel, denn a priori muss der Benutzer davon ausgehen, dass die beiden Icons verschieden sind.

Mit jedem Schritt, in dem ein Attribut als identisch erkannt wird, steigt die posteriori-Wahrscheinlichkeit, dass beide Icons gleich sind, und damit wird in jedem Schritt, in dem weitergeblättert wird, die a priori Vermutung wider der neuen Fakten bestätigt. Während des Entscheidungsprozesses gegen die Fakten zu entscheiden, ist daher irrational. Auf makroskopischer Ebene lässt sich ein solch irrationaler Wankelmut häufiger beobachten. Auf einer mikroskopischen Ebene ist dagegen eher ein rationaler Entscheidungsprozess zu erwarten. Geht man von rationalem Verhalten aus, dann ist die Rate für das Überblättern p_A . Bestimmt man p_A durch $p_B(\langle t_{e1} \rangle, p_A) = 0$, so ergibt sich:

$$p_{\bar{U}} = p_A = \frac{-t + (t_A + t_B + t_C)}{t_B + t_C} \quad (7)$$

Das bedeutet aufgrund der Randbedingungen, dass $p_{\bar{U}} = 1$ für $t_{e1} \leq t_A$ und $p_{\bar{U}} = 0$ für $t_{e1} \geq t_A + t_B + t_C$. Zwischen diesen beiden Punkten besteht ein linearer Zusammenhang. Mit größerer Komplexität der Erkennung, aufgrund von mehreren einzelnen Attributen, die erkannt werden müssen, oder weil die einzelnen Schritte eine längere Zeit in Anspruch nehmen, wird die Steigung der Kurve für das Überblättern flacher, da sich nur der Punkt, an dem der Erkennungsprozess abgeschlossen ist, nach hinten verschiebt. Diese Parametrisierung entspricht der aus Gleichung (1) im ersten Abschnitt. Es ist unwahrscheinlich, dass jeder Schritt im Erkennungsprozess immer exakt die gleiche Zeit in Anspruch nimmt. Die Annahme einer Varianz in der zeitlichen Dauer der einzelnen Schritte und dass diese mit längerer Zeitdauer zunimmt, ergibt dann qualitativ für die Rate des Überblätterns den im ersten Abschnitt gewählten Kurvenverlauf.

4 Adaption des Benutzers

Aus den in den beiden vorangegangenen Abschnitten beschriebenen modellhaften Betrachtungen ergeben sich unter der Annahme, dass der Benutzer sich einer zeitlich optimalen Ausführung der Aufgabe adaptiert hat, zwei Hypothesen:

1. Die mittlere Antwortzeit beim Durchblättern der Formen ist länger als beim Durchblättern der Farben.
2. Beim Überblättern ist die Antwortzeit gegenüber dem des Nichtüberblätterns durchschnittlich kürzer.

Die erste Hypothese ergibt sich aus der Diskussion in Abschnitt 2 und hier insbesondere aus dem funktionalen Zusammenhang von $t_{e\max}$ und der Fehlerrate.

Denn, betrachtet man diesen funktionalen Zusammenhang in Bild 5 aus der Perspektive der Fehlerrate, dann bedeutet eine erhöhte Fehlerrate bei rationalem Verhalten auch eine größere Zeit für $t_{e\max}$. Für die Formattribute wurde eine größere Fehlerrate als bei den Farbattributen gemessen und entsprechend müsste dann auch $t_{e\max}$ und damit auch die mittlere Antwortzeit für die Formattribute

länger sein. Die zweite Hypothese ergibt sich aus der Diskussion in Abschnitt 3. Denn hier wurde dargelegt, dass für ein rationales Verhalten entweder der gesamte Entscheidungsprozess durchlaufen oder mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit direkt weitergeblättert werden sollte. Das bedeutet, dass für den Fall des Überblätterns die posteriori-Wahrscheinlichkeit, dass direkt weitergeblättert wurde, erhöht und damit die mittlere Antwortzeit verkürzt ist.

Um diese Hypothesen zu prüfen, wurden die Daten für die Interaktion mit der Maus einer zweiten Analyse unterzogen, in der die Antwortzeiten betrachtet wurden. Die Ergebnisse illustrieren die Boxplots in Bild 8. Der linke Boxplot zeigt, dass die erste Hypothese nicht von den Daten bestätigt wird. Für eine statistische Auswertung wurde eine ANOVA für die Faktoren Attribut, Index und Proband durchgeführt. Wobei der Index $ix=0$ das Überblättern bezeichnet. Ein negativer Index $ix=-n$ bedeutet das n -te Überblättern von Beginn an gezählt, und mit einem positiven Index $ix=n$ ist das n -te Weiterblättern vom Überblättern gemeint. Vor und nach dem Überblättern spielen für die Antwortzeiten unterschiedliche Effekte eine Rolle. Daher wurde zunächst eine $2 \times 5 \times 6$ ANOVA durchgeführt, das heißt es wurden zunächst nur die Antwortzeiten vor und während des Überblätterns betrachtet, also für den Faktor ix die fünf Ausprägungen (0,-1,-2,-3,-4).

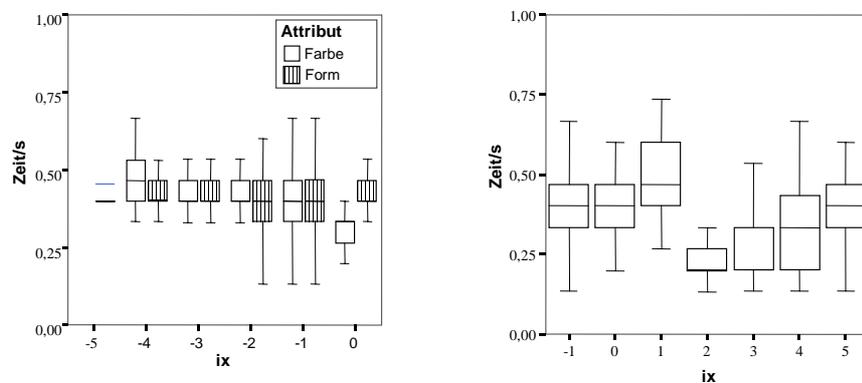


Bild 8: Links: Antwortzeiten zwischen dem Weiterblättern, bevor die Option erscheint, in Abhängigkeit, ob Farboption oder Formoption durchgeblättert wurden. Rechts: Antwortzeiten zwischen dem Weiterblättern nachdem überblättern wurde. Für die negativen Indizes sind die mittleren Antwortzeiten für ein Weiterblättern, bevor das gesuchte Attribut erscheint, aufgetragen.

Die Varianzanalyse zeigt hier für den Faktor des Attributs keine signifikante Wirkung ($p = 0,13$). Bemerkenswert ist jedoch die geringere mittlere Antwortzeit des Farbattributs beim Überblättern ($ix = 0$). Es ergibt sich hier sogar eine signifikante Wechselwirkung zwischen Attribut und Index ($p < 0,05$). Damit bestätigt

sich die zweite Hypothese nur für das Farbattribut. Interessant sind auch die Antwortzeiten nach dem Überblättern, die in dem rechten Boxplot von Bild 8 aufgetragen sind. Es zeigt sich hier ein signifikanter Effekt bezüglich der Position des Weiterblätterns in der Folge ($p < 0,001$).

Der Verlauf der Antwortzeiten bestätigt die in dem Modell aus Abschnitt 2 verwendete Annahme, dass der Proband nach einem Überblättern zunächst schneller weiterblättert, da das Überblättern erkannt und damit realisiert wird, dass der gesuchte Eintrag zunächst nicht wieder zu erwarten ist. Bemerkenswert ist auch die erhöhte Antwortzeit direkt nach dem Überblättern. Diese hervorgehobene Antwortzeit bestätigt auch ein Tukey post-hoc-Test, der diesen Wert allein in eine Gruppe einordnet. Die erhöhte Antwortzeit direkt nach dem Überblättern zeigt, dass sich der Proband umstellen muss. Die Zeit liegt im Durchschnitt 100ms über dem Wert vor dem Überblättern. Hinter dieser zusätzlichen Zeit könnte sich eine mentale Abschätzung des Probanden verbergen, wie oft weitergeblättert werden muss, um erneut zum gesuchten Eintrag zu gelangen.

Trotz dieses Hinweises auf kognitive Vorgänge bei dieser einfachen Reiz-Reaktionsaufgabe ist der fehlende Nachweis einer Anpassung der Antwortzeiten beim Weiterblättern an ein rationales Verhalten enttäuschend. Auch, dass sich die aus dem Modell prognostizierte geringere Antwortwahrscheinlichkeit nur bei dem Farbattribut beim Überblättern beobachten lässt, deutet an, dass hier Bedarf an einer tiefer gehenden Untersuchung besteht. Zum einen wäre interessant, ob sich dieser qualitative Unterschied auch bei einer größeren Stichprobe bestätigt. Sollte er sich bestätigen, so würde das auf einen prinzipiellen Unterschied in der perceptiven Verarbeitung von Farben und Formen hinweisen. Auch muss dann noch einmal die generelle Diskussion zum Erkennungsprozess aus Abschnitt 3 kritischer hinterfragt werden.

Dass sich ein Benutzer in den Antwortzeiten dennoch im Sinne einer Optimierung des Zeitbedarfs bei der Aufgabe anpassen kann, zeigt ein Blick auf die Antwortzeiten vor dem Überblättern aufgeschlüsselt auf die einzelnen Probanden (Bild 9).

Für eine Gruppe von vier Probanden ist die Antwortzeit über den Index nahezu konstant, während bei zwei Probanden die Antwortzeiten variieren. Eine Varianzanalyse zeigt auch eine signifikante Interaktion zwischen den Faktoren Proband und Index an ($p < 0,01$). Eine Versuchsperson (Vp4) scheint vor dem ersten Weiterblättern zu zögern. Interessanter ist der Zusammenhang von Antwortzeit und Index für Vp5. Die Antwortzeiten von Vp5 sind zu Beginn sehr kurz und werden mit zunehmendem Weiterblättern länger. Dieser Effekt entspricht dem Verhalten aller Versuchspersonen nach dem Überblättern. Dieses Verhalten ist auch vor dem Überblättern rational, da die Position, an der der gesuchte Eintrag in der Liste erscheint, in den Experimenten gleichverteilt war. Das bedeutet, dass die bedingte Wahrscheinlichkeit, mit der der gesuchte Eintrag in der Liste erscheint, bei fortschreitendem Weiterblättern steigt und es damit auch rational ist, zu Beginn eher etwas schneller weiterzublätern als gegen Ende. Bemerkenswerter-

weise war der Proband, der dieses Verhalten gezeigt hat, der Entwickler der Versuchsumgebung. Er hatte schon viel mehr Testdurchläufe als die anderen Probanden absolviert und sich entsprechend dieser optimierten Strategie angepasst.

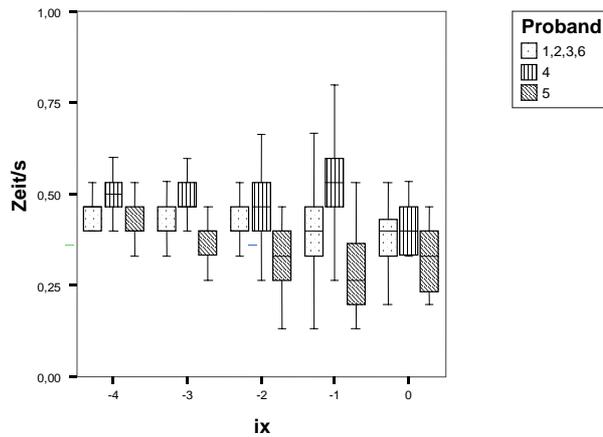


Bild 9: Links: Zeiten zwischen dem Weiterblättern, bevor die Option erscheint, in Abhängigkeit davon, ob Farboption oder Formoption durchgeblättert wurde. Rechts: Zeiten zwischen dem Weiterblättern, nachdem überblättert wurde.

5 Schlussfolgerungen & Ausblick

In dieser Arbeit wurde aufgrund der beobachteten Fehlerraten beim sequentiellen Durchblättern von Menüoptionen ein Modell zur Erklärung entwickelt. Aus diesem Modell wurden neue Hypothesen für die Antwortzeiten beim Durchblättern abgeleitet, die dann anhand der erhobenen Daten überprüft wurden. Auch wenn die Hypothesen nur zum Teil bestätigt wurden, so liefert das Modell doch einige interessante Aspekte, die in zukünftigen Arbeiten weitergehend untersucht werden können.

Es stellt sich zum Beispiel die Frage, ob sich ein Merken der Reihenfolge der Optionen in der Liste für das Durchblättern überhaupt auszahlt. Das Abrufen von Informationen aus dem Gedächtnis ist sehr zeitintensiv. Daher ist es fraglich, ob es rational ist, bei einer solchen Aufgabe das Gedächtnis zu bemühen. Derartige Fragen könnten durch eine Modellierung der Aufgabe innerhalb von ACT-R (Anderson, 2004) untersucht werden.

Ein weiterer interessanter Punkt ist die nicht beobachtete Verkürzung der Antwortzeit beim Überblättern der Formattribute. Denn die in Abschnitt 3 durchgeführte Modellierung des Erkennungsprozesses lehnt sich stark an den durch die

ACT-R Architektur vorgegebenen Rahmen an. Entsprechend könnte sich hier eine prinzipielle Grenze in der Modellierung innerhalb dieses Rahmens zeigen.

Dennoch scheint die Modellierung von einfachen Abläufen in kurzen Zeithorizonten vielversprechend, da hier die Modelle in einem für Dritte überschaubaren Umfang bleiben und wissenschaftlich kritisch hinterfragt werden können. Effekte ergeben sich im Millisekundenbereich. Effekte in derart kleinen Zeitspannen können aber gerade, z.B. bei der Führung von Fahrzeugen, entscheidend sein.

Literatur

- Anderson, J.R. (1990). *The Adaptive Character of Thought*. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Association.
- Anderson, J.R., Bothell, D., Byrne, M.D. & Lebiere, C. (2004). An Integrated Theory of the Mind. *Psychological Review*, 111, (4), 1036-1060.
- Azuma, R.T., Baillet, Y., Behringer, R., Feiner, S., Julier, S. & MacIntyre, B. (2001): Recent Advances in Augmented Reality. *IEEE Computer Graphics and Applications* 21 (2001), November/Dezember, Nr. 6, 34–47.
- Brandt, M., Renkewitz, H. & Alexander T. (2006). Natürliche Interaktionsverfahren für Augmented Reality. In *Proceedings „Virtual Reality und Augmented Reality zum Planen, Testen und Betreiben technischer Systeme“ der 9. IFF-Wissenschaftstage am Fraunhofer IFF, Marburg*.
- Jones, P.D. & Wilkinson, H. (1975). Latency differences to monochromatic stimuli measured by disjunctive reaction time. *Perceptual and Motor Skills*, 41, 55-59.
- Kieras, D.E. (2004). *EPIC architecture: Principles of operation*. Unpublished manuscript from <ftp://www.eecs.umich.edu/people/kieras/EPICtutorial/EPICPrinOp.pdf>.
- Milgram, P. & Colquhoun, H. jr. (1999). A Taxonomy of Real and Virtual World Display Integration. In Y. Ohta & H. Tamura (Eds.), *Mixed Reality? Merging Real and Virtual Worlds* (S. 5–30). Springer Verlag.

Autoren

- | | |
|------------------------------------|--|
| Dr.-Ing. Dipl.-Phys. C. Winkelholz | FGAN-Forschungsinstitut für Kommunikation, Informationsverarbeitung und Ergonomie, Wachtberg |
| cand. ing. M. Brandt | |
| Dipl.-Inf. H. Renkewitz | |

