

## Wie können Ressourcenbeschränkungen eines Dialogpartners erkannt und berücksichtigt werden?

Ralph Schäfer, Thomas Weis, Thomas Weyrath, Anthony Jameson\*

Fachbereich Informatik, Universität des Saarlandes, Postfach 151150, D-66041 Saarbrücken  
(e-mail: {ralph, tweis, tom, jameson}@cs.uni-sb.de)

### How Can the Resource Limitations of a Dialog Partner be Recognized and Taken Into Account?

**Summary.** This paper reports on research on the question of how a dialog system can recognize and adapt to the resource limitations of its user: specifically, limitations of time and working memory. The results of an exploratory study, together with other empirical research, yield a number of probabilistic causal relationships among relevant variables. It is shown how these relationships can be represented in dynamic Bayesian networks and used as a basis for inferences and decisions of a dialog system.

**Zusammenfassung.** Dieser Artikel berichtet über Forschung zur Frage, wie ein Dialogsystem die *Ressourcenbeschränkungen* des Dialogpartners erkennen und berücksichtigen kann: speziell Beschränkungen der Zeit und des Arbeitsgedächtnisses. Die Ergebnisse einer explorativen empirischen Studie, zusammen mit anderer empirischer Forschung, ergeben eine Reihe probabilistischer Kausalzusammenhänge zwischen relevanten Variablen. Es wird vorgeführt, wie diese Zusammenhänge in dynamischen Bayesschen Netzen dargestellt und als Grundlage für Inferenzen und Entscheidungen eines Dialogsystems verwendet werden können.

---

### 1 Einleitung

Stellen Sie sich vor, Sie fahren mit einem Auto über eine einsame Landstraße, als aus unerklärlichen Gründen der Motor streikt. Glücklicherweise können Sie mit Ihrem Mobiltelefon einen Bekannten anrufen. Der Be-

kannte ist Kraftfahrzeugmechaniker und kann Ihnen telefonisch Anweisungen geben, wie Sie das Fahrzeug wieder in Gang bringen können. Sie erwarten natürlich, daß er Rücksicht auf Ihre gegenwärtige Situation nimmt. So sollte er bei seinen Anweisungen darauf achten, daß Sie vielleicht aufgeregt sind und sich daher nicht viel merken können. Wenn Sie einen wichtigen Termin wahrnehmen müssen und daher wenig Zeit haben, sollte er seine Anweisungen auf das Wesentliche beschränken.

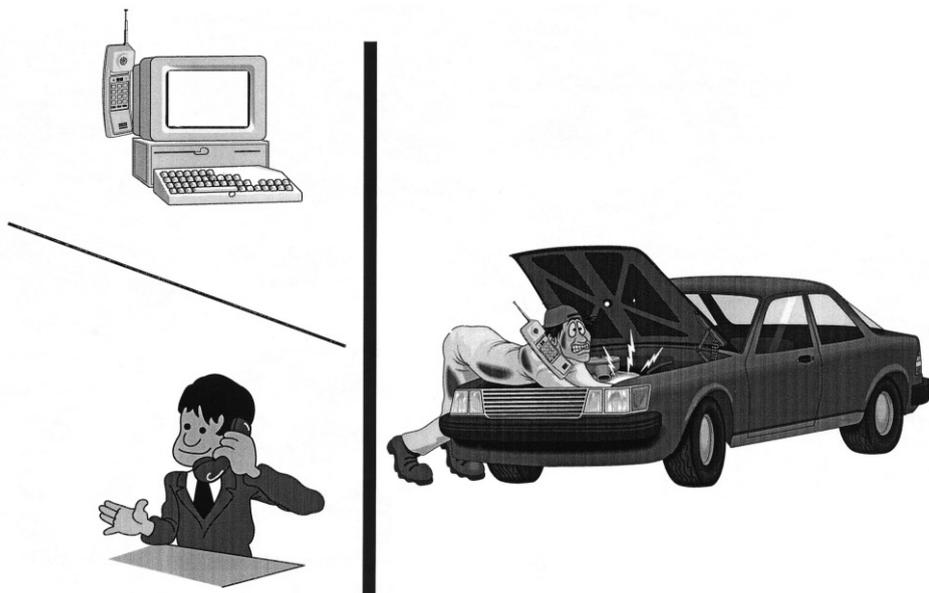
Falls Sie nicht zufällig einen Kraftfahrzeugmechaniker kennen, könnten Sie vielleicht stattdessen ein automatisches Hilfesystem gut gebrauchen. Auch von diesem würden Sie u. a. wünschen, daß es nicht einfach seine Ratschläge nach einem starren Schema auf sagt. Insbesondere sollte es seine Dialogbeiträge Ihren *Ressourcenbeschränkungen* anpassen, z. B. Ihrem momentanen Zeitdruck und dem aktuellen Zustand Ihres Arbeitsgedächtnisses. Diese Anpassungen sollten für Sie am besten auch noch *nachvollziehbar* sein, so daß Sie nicht durch das Verhalten des Systems verwirrt werden.

Die Beschreibung eines solchen Systems klingt gegenwärtig wie Zukunftsmusik; dennoch lohnt es sich, die wissenschaftlichen Grundlagen dafür zu legen. Dieses Ziel wird gegenwärtig im kognitionswissenschaftlich orientierten Forschungsprojekt „Ressourcenadaptive Dialogführung“ verfolgt. Es wird ein prototypisches **Ressourcenadaptives Dialogsystem (READY)** entwickelt, das die Rolle des Kraftfahrzeugmechanikers im oben skizzierten Szenario übernehmen soll (vgl. Abb. 1 und 2). Wahlster et al. (1995) geben eine kurze Gesamtübersicht des Projektes. Der vorliegende Beitrag soll vor allem die Aspekte der Forschung besprechen, die die Erkennung der Ressourcenbeschränkungen des Dialogpartners betreffen. Hierzu werden folgende übergeordnete Fragestellungen untersucht:

1. Wie schätzen Menschen die Arbeitsgedächtnisbelastung und den Zeitdruck eines Dialogpartners  $P$  ein? Diese Frage ist nicht nur aus der Sicht der Sprachpsychologie interessant, sondern auch im Hinblick auf die

---

\*Das Projekt „Ressourcenadaptive Dialogführung“ wird von der Deutschen Forschungsgemeinschaft gefördert im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 378, „Ressourcenadaptive kognitive Prozesse“. Wir danken den beiden anonymen Gutachtern für wertvolle Hinweise und Kommentare.



**Abb. 1.** Beispielszenario des Systems READY. (Das Dialogsystem hilft einem Autofahrer, ähnlich wie ein Kfz-Mechaniker, bei der Diagnose und der Reparatur einer Panne.)

<i>M:</i> %Hodab	<i>M:</i> Ach so äh <Z> <P> äh auf der rechten Seite liegt <Z> glaube ich <Z> ein Stab, auf der rechten Seite. Am ... ähäh auf'm Kotflügel, sozusagen.
<i>P:</i> Ja, ich hab' vier Minuten Zeit, um das Auto wieder flott zu kriegen.	...
<i>M:</i> Aha	<i>P:</i> Ja <P> und jetzt?
<i>P:</i> OK also <Z>, ich bin gefahr' und dann hat's <P> angefang' äh zu ruckeln <P> und <Z> ich kann so viel Gas geb'n wie ich will, es wird nicht schneller, es Auto. Und jetzt?	<i>M:</i> Äh <Z> <P> In der Mitte <Z> ist <Z> ein großes rundes Ding, <P> so'n Luftfilter <P>. Ah nee Moment <P> Stop. <P> Äh weiter rechts is' ne orangene Kappe.
<i>M:</i> Aber er läuft noch?	<i>P:</i> Ja.
<i>P:</i> Ach so ja %und %es %geht <#Knacken> ab und zu <%> aus. Ne?	<i>M:</i> Das ist gut zu erkennen. <P> Da gehen <P> fünf Kabel raus.
<i>M:</i> Ab und zu geht er aus? <P>	<i>P:</i> Ja <Z>
<i>P:</i> Ja.	<i>M:</i> Äh, das in der Mitte <P>
<i>M:</i> Motorhaube schon geöffnet?	<i>P:</i> Ja.
<i>P:</i> Nee, Motorhaube hab' ich noch nicht geöffnet.	<i>M:</i> lassen wir weg. Die anderen vier <P>, die mal verfolgen wohin die gehen.
<i>M:</i> Äh <Z>. Im <Z> Fußraum, das heißt <P> unterm Lenkrad <P> links <P> is'n Hebel. <P> Da dran ziehen.	<i>P:</i> %Ja.
<i>P:</i> Moment %grad %bitte <#Knistern> <P> OK <P> jetzt.	<i>M:</i> und kucken, ob die dann richtig draufgesteckt sind.
<i>M:</i> Jetzt Motorhaube öffnen?	<i>P:</i> OK, das eine hab' ich jetzt wieder draufgesteckt
<i>P:</i> <P> Wie rum <ächz> %geht'n der auf? So rum?	<i>M:</i> Ah. <P> Und jetzt mal probieren.
<i>M:</i> Ai, in der Mitte der Haube <oah> <Stöhnen> zwischen Haube und Kühlergrill durchgreifen, ...	<i>P:</i> Probieren?
<i>P:</i> Ja, ich hab's.	<i>M:</i> Ja <P>
<i>M:</i> *da ... *da ... ja?	<i>P:</i> <%> <#Knacken> <%> %geschäft. OK. <Lachen> <P> %Müssen %wir noch ... <stöhn, ächz>
<i>P:</i> <%><P> wie geht'n ... wie hält denn das Ding <Ächz>	<i>M:</i> Tschüß.

**Abb. 2.** Transliteration eines Teils eines Dialoges im Pannenhilfe-Szenario (vgl. Abb. 1). *M* = Mechaniker, *P* = Dialogpartner (Autofahrerin), <P> = Pause, <Z> = Zögern, <#> = nichtartikulatorisches Geräusch, \* = Nichtwort, % = Schwerverständliches, <%> = Unverständliches.

Entwicklung von READY. Erstens haben Menschen lange Erfahrung mit der Anpassung an Dialogpartner; ihr (größtenteils implizites) Wissen sollte erfaßt und ausgenutzt werden. Zweitens ist es wünschenswert, daß READY sich auf eine Art und Weise anpaßt, die dem Dialogpartner natürlich und nachvollziehbar erscheint. Die Anpassungsstrategien, die wir aus alltäglichen Dialogen kennen, sind in dieser Hinsicht gute Kandidaten für eine Übernahme durch das System.

2. Wie kann man ein System erstellen, das die augenblickliche Arbeitsgedächtnisbelastung und den Zeit-

druck eines Dialogpartners *P* einschätzt? Auch wenn wir die betreffenden Inferenzen von Menschen genau beschreiben könnten, wäre es immerhin noch eine beachtliche Herausforderung, geeignete Varianten davon in einem System zu realisieren.

3. Wie kann ein System aufgrund der gewonnenen Einschätzungen über den Dialogpartner seine Dialogbeiträge so gestalten, daß sie möglichst gut an die Ressourcen des Dialogpartners *P* angepaßt sind? Die Modellierung des Dialogpartners soll ja schließlich kein Selbstzweck sein, sondern der Verbesserung der Verständigung dienen.

Der folgende Abschnitt berichtet über eine empirische Untersuchung zur ersten Fragestellung. Die Abschnitte 3 bis 5 zeigen schrittweise Antworten auf die zweite Fragestellung. Die Arbeiten in READY zur dritten Fragestellung werden schließlich in Abschnitt 6 skizziert.

## 2 Empirische Grundlagen

Techniken für die Einschätzung von Arbeitsgedächtnisbelastung und Zeitdruck sollten auf empirischen Erkenntnissen in bezug auf folgende Fragen beruhen:

- Was sind die *Ursachen* solcher Ressourcenbeschränkungen in alltäglichen Dialogen?
- Was sind typische *Symptome*, anhand derer man die Beschränkungen erkennen kann?

Experimentelle Untersuchungen auf dem Gebiet der Sprachpsychologie lieferten zahlreiche Teilantworten auf diese Fragen (s. für eine kurze Übersicht Jameson, 1997). Diese Untersuchungen hatten aber nicht den Zweck einer vollständigen Inventarisierung der Variablen, die für die Erkennung von Ressourcenbeschränkungen relevant sind. Sie müssen daher durch Studien ergänzt werden, die auf eine solche Inventarisierung abzielen. Im Projekt READY wurden bisher zwei explorative Studien ausgeführt, die aufzeigen sollten, wie Dialogteilnehmer die Ursachen und Symptome von Ressourcenbeschränkungen sehen. Diese Studien zeigen also nicht unbedingt, welche Kausalzusammenhänge tatsächlich bestehen. Aber jeder Zusammenhang, der regelmäßig von Dialogteilnehmern vorausgesetzt wird, sollte zumindest näher untersucht werden.

Die erste explorative Studie wurde mit Mitarbeitern der Feuerwehr Saarbrücken ausgeführt (vgl. Schäfer & Weyrath, 1997): Anhand von Aufnahmen von Notrufdialogen schätzten die Mitarbeiter die Ressourcenbeschränkungen der Anrufer ein. Über retrospektives lautes Denken wurden ihre Annahmen über Kausalzusammenhänge ermittelt.

In diesem Artikel soll nur über die zweite Studie berichtet werden, die die Ergebnisse der ersten bestätigte und erweiterte. In dieser Studie wurden die Einschätzungen von Versuchspersonen ohne besondere Erfahrung im Umgang mit Ressourcenbeschränkungen untersucht. Dafür bezogen sich die Einschätzungen auf genau den Typ von Dialog, den READY behandeln soll.

### 2.1 Methode

*Material.* In einer Voruntersuchung (s. Jameson, 1996a) wurde die Dialogsituation des Beispielszenarios (s. Abb. 1) mit Hilfe eines Kraftfahrzeugmechanikers möglichst realistisch inszeniert. Acht Pannenhilfe-Dialoge zwischen dem Mechaniker und jeweils einem als Versuchsperson dienenden Autofahrer wurden aufgenommen (vgl. Abb. 2). In vier dieser Dialoge wurde durch das Angebot einer Belohnung für besonders schnelle Behebung der Panne Zeitdruck erzeugt. Für die Hauptuntersuchung wurden aus fünf Dialogaufnahmen Teile entnommen und zusammengeschnitten. Die Gesamtlänge der Ausschnitte betrug 20 Minuten.

*Versuchspersonen.* An der Hauptuntersuchung nahmen 12 Studenten der Universität des Saarlandes teil.

*Prozedur.* Mit jeder Versuchsperson wurde ein Gespräch von ca. 50 Minuten geführt. Zu Beginn wurde

die Technik des retrospektiven lauten Denkens (vgl. Ericsson & Simon, 1993) erklärt und eingeübt. Danach wurde jeder Versuchsperson das Band mit den Dialogausschnitten vorgespielt. An bestimmten Stellen wurde das Band angehalten und die Versuchsperson um eine kurze und spontane Einschätzung gebeten, z. B. „Inwieweit wird der Anrufer durch die Situation/Frage/Äußerung des Mechanikers beansprucht?“ bzw. „Wie hoch ist der Grad der Eile des Anrufers/Mechanikers?“. Unmittelbar nach der -- zumeist kurzen -- Formulierung der Einschätzung wurde die Versuchsperson aufgefordert, ihre eigenen Arbeitsgedächtnisinhalte zu verbalisieren.

Die Bänder mit den Gesprächen wurden transliteriert und daraufhin kodiert, wie die Versuchspersonen die Ursachen und Folgen von Arbeitsgedächtnisbelastung und Zeitdruck sahen.

### 2.2 Ergebnisse

Fast alle Aussagen der Versuchspersonen drückten Unsicherheit und/oder Vagheit aus: „Sie ist *ziemlich* überfordert“, „Also *relativ* beansprucht“, „Es kann *vielleicht* daran liegen . . .“ oder „Er hat es *wahrscheinlich* nicht eilig“. Diese Tendenz bestätigte die Feststellung früherer Untersuchungen, daß die im Verhalten der Dialogteilnehmer enthaltenen Hinweise kaum sichere Schlußfolgerungen über die Ressourcenlage der Dialogteilnehmer erlauben.

Folgende Zusammenhänge wurden von den Versuchspersonen erwähnt, die meisten mehrmals:

*Ursachen von Arbeitsgedächtnisbelastung.* Eine Ursache von Arbeitsgedächtnisbelastung seitens des Sprechers ist eine *emotionale Belastung* (Versuchsperson: „klingt aufgeregt und anscheinend ein bißchen Panik“). Ein hoher *Schwierigkeitsgrad der Handlungen*, die während des Dialogs ausgeführt werden, führt ebenfalls zu einer hohen Belastung -- vor allem wenn das Wissensniveau des Sprechers in bezug auf die aktuelle Domäne gering ist. Zu den Ursachen von Arbeitsgedächtnisbelastung seitens des Hörers gehören Merkmale der Äußerungen des Sprechers: die syntaktische Schwierigkeit sowie die semantische Schwierigkeit, die u. a. durch die Verwendung von Fachbegriffen entstehen kann.

*Folgen von Arbeitsgedächtnisbelastung.* Zu den Folgen von Arbeitsgedächtnisbelastung beim Sprecher gehören Symptome in bezug auf den Inhalt sprachlicher Äußerungen: eine *undeutliche Aussprache*, eingefügte *nicht-sprachliche Äußerungen*, *unpassende deiktische Äußerungen* („Sie fragt ‚so rum‘, was eigentlich unlogisch ist am Handy . . . sie ist ziemlich überfordert“) sowie eine *geringe Qualität der Äußerungen*, die der Sprecher produziert. Auch eine besonders lange *Dauer einer ausgeführten Handlung* ist ein Zeichen von Überforderung.

*Folgen von Zeitdruck.* Was den Faktor Zeitdruck betrifft, ist vor allem die Frage nach den möglichen Folgen interessant, da es ja viele naheliegende Ursachen von Zeitdruck gibt. Hierzu gehören Symptome bzgl. des Inhalts sprachlicher Äußerungen wie eine geringe *Quali-*

tät der eigenen Äußerungen und das Weglassen irrelevanter Informationen („... läßt er sich Zeit für so Kleinigkeiten. Eile nicht zu groß“). Von allen Versuchspersonen wurde als Indiz für Zeitdruck die *Sprechgeschwindigkeit* genannt.

### 2.3 Diskussion

Ähnlich wie die Feuerwehrmitarbeiter in der früheren explorativen Studie gehen die Versuchspersonen in dieser Untersuchung davon aus, daß man aufgrund von Hinweisen im Verhalten des Dialogpartners mit Unsicherheit behaftete Schlüsse über seine Arbeitsgedächtnisbelastung und seinen Zeitdruck ziehen kann. Die von den verschiedenen Versuchspersonen genannten Kausalzusammenhänge stimmen sowohl miteinander als auch mit einschlägigen experimentellen Ergebnissen weitgehend überein. Allerdings geben die experimentellen Ergebnisse oft ein differenzierteres Bild. Beispielsweise ist der Zusammenhang zwischen Sprechgeschwindigkeit und Eile in Wirklichkeit komplexer, als die Inferenzen der Versuchspersonen nahelegen -- schon wegen der großen individuellen Unterschiede in bezug auf durchschnittliche Sprechgeschwindigkeit und Anpassung des Sprechtempos an Zeitdruck.

Aus Platzgründen können in diesem Artikel nicht für jede besprochene Variable die genaue Definition sowie die relevanten psychologischen und linguistischen Erkenntnisse besprochen werden. Vielmehr werden die folgenden Abschnitte zeigen, wie diese Variablen und ihre Zusammenhänge in einem Dialogsystem repräsentiert und verarbeitet werden können.

## 3 Konzeptualisierung

In diesem Abschnitt wenden wir uns der Frage zu, wie man die Belastung von *Ps* Arbeitsgedächtnis und *Ps* Zeitdruck modellieren kann, so daß Inferenzen wie die in Abschnitt 2.2 beschriebenen möglich sind. Die technische Realisierung wird dann im folgenden Abschnitt besprochen.

### 3.1 Modellierung von *Ps* Ressourcenbeschränkungen

In der kognitiven Psychologie wurden differenzierte Modelle des Arbeitsgedächtnisses sowie seiner Rolle bei der Sprachverarbeitung ausgearbeitet (s. z. B. Baddeley, 1986; Gathercole & Baddeley, 1993). Für einen ersten Versuch der Online-Modellierung des Arbeitsgedächtnisses in einem Dialogsystem sind diese Modelle zu feinkörnig: Da im Dialog nur wenige Informationen über das Arbeitsgedächtnis des Dialogpartners verfügbar sind, gibt es nur wenige Anhaltspunkte beispielsweise für Inferenzen über den aktuellen Zustand der phonologischen Schleife des Dialogpartners. Außerdem läßt die Grundlagenforschung selber viele Fragen über die genaue Rolle der Komponenten des Arbeitsgedächtnisses bei der Sprachverarbeitung offen.

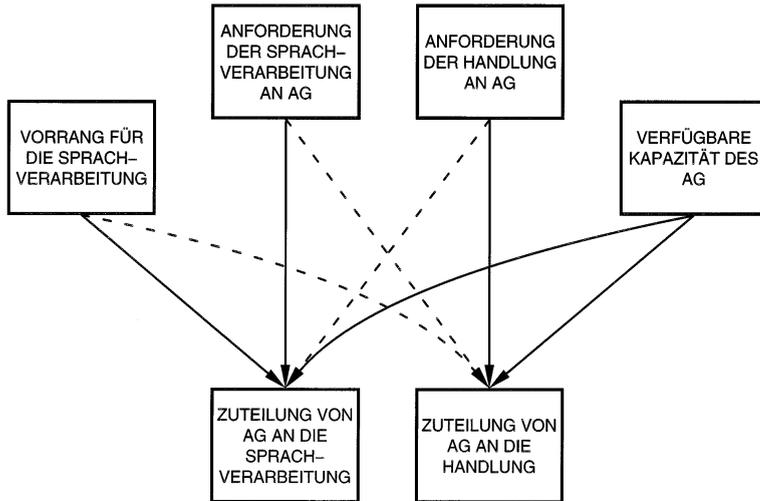
Für READY wird das Arbeitsgedächtnis deshalb in der ersten Annäherung als ein einziger Speicher mit einer gewissen *Kapazität* aufgefaßt (vgl. Just & Carpenter, 1992). Es ist von vornherein klar, daß diese Modellierung teilweise zu ungenauen Inferenzen führen muß. Die Frage ist aber, ob die Inferenzen insgesamt eine Verbesserung des Dialogverhaltens des Systems ermöglichen -- gegenüber Systemen, bei denen die Beschränkungen des Arbeitsgedächtnisses überhaupt nicht berücksichtigt werden. Bei späteren Modellierungsversuchen soll untersucht werden, inwieweit eine differenziertere Modellierung möglich und lohnend ist.

Das vereinfachte Modell geht von folgenden Annahmen aus: Zu jedem Zeitpunkt hat der Dialogpartner *P* eine gewisse *verfügbare Kapazität* des Arbeitsgedächtnisses („AG“), die für die Bewältigung der Aufgaben im Szenario eingesetzt werden kann. Diese verfügbare Kapazität kann zeitweise geringer sein als die gesamte Arbeitsgedächtniskapazität von *P*, z. B. wenn *P* emotional belastet ist oder durch Ereignisse in der Umgebung abgelenkt wird.

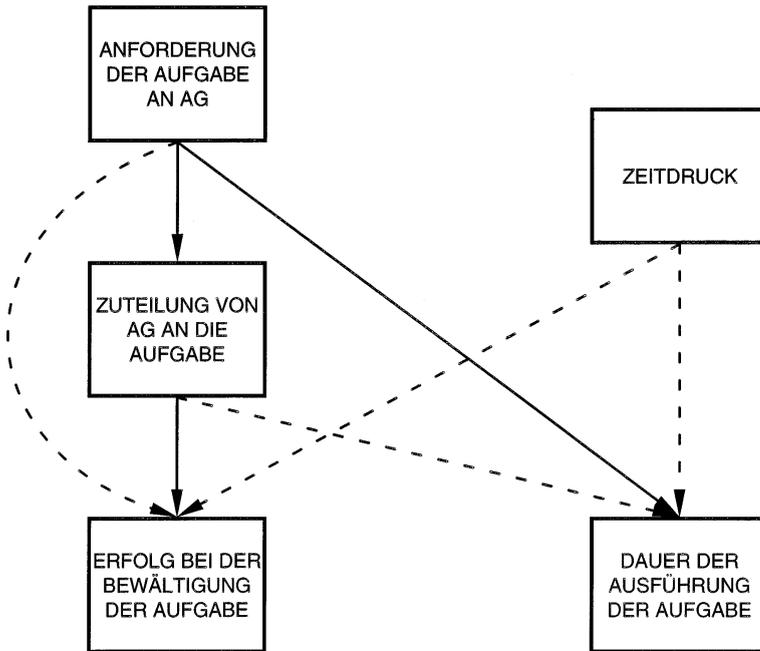
Noch wichtiger als solche Schwankungen der verfügbaren Kapazität sind die konkurrierenden Anforderungen, die verschiedene Aufgaben gleichzeitig an das Arbeitsgedächtnis von *P* stellen können. Soll *P* eine bestimmte Aufgabe ausführen, entsteht eine *Anforderung* an das Arbeitsgedächtnis von *P* entsprechend der Höhe der durch diese Aufgabe verursachten Belastung. Müssen zwei Aufgaben gleichzeitig ausgeführt werden, kann es sein, daß die Gesamtkapazität des Arbeitsgedächtnisses zu gering für die (problemlose) Ausführung beider Aufgaben ist. In diesem Fall hängt die Zuteilung von Kapazität an die beiden Aufgaben unter anderem von ihren Prioritäten für *P* ab. (Solche Prioritäten entstehen z. B. im Rahmen des Doppelaufgabenparadigmas, wenn die Versuchspersonen angewiesen werden, der einen Aufgabe den Vorrang gegenüber der anderen zu geben.) Diese Annahmen werden in Abb. 3 für den Fall veranschaulicht, daß *P* gleichzeitig mit den Aufgaben „Sprachverarbeitung“ und „Handlung“ beschäftigt ist. Hat z. B. die Sprachverarbeitung Vorrang, so wird dieser Aufgabe die benötigte Kapazität zugeordnet; soweit wie möglich wird die Anforderung der Handlung erfüllt.

Wie wir später sehen werden, kann READY anhand des Schemas in Abb. 3 Inferenzen wie die folgenden machen, wenn es Hinweise darauf erhält, daß *P* der Sprachverarbeitung nur wenig Arbeitsgedächtniskapazität zugeteilt hat: „*P* wird wohl mit einer Handlung beschäftigt sein, und sie gibt ihr offenbar Vorrang gegenüber der Sprachverarbeitung.“

Warum ist es für READY wichtig, einzuschätzen, wie *P* Arbeitsgedächtniskapazität an Aufgaben zuteilt? Wie im linken Teil von Abb. 4 veranschaulicht wird, führt eine größere Zuteilung für eine Aufgabe -- sei diese eine sprachliche oder eine nicht-sprachliche -- unter sonst gleichen Umständen eher zu einem besseren Erfolg bei der Ausführung einer Aufgabe. Diese Beziehung hängt allerdings auch stark von der ANFORDERUNG



**Abb. 3.** Stark vereinfachtes Modell der Zusammenhänge zwischen Anforderung und Zuteilung von verfügbarer Arbeitsgedächtniskapazität bei zwei Aufgaben. (Ein durchgezogener bzw. gestrichelter Pfeil von A nach B bedeutet: A beeinflusst B positiv bzw. negativ)



**Abb. 4.** Modellierung der Auswirkungen von Ressourcenbeschränkungen auf die Ausführung von Aufgaben durch P

DER AUFGABE AN AG ab: Ist die Zuteilung im Vergleich zur Anforderung gering, kann der Erfolg leiden.

Ähnlich beeinflussen die Anforderung und die Zuteilung die Dauer der Ausführung einer Aufgabe (s. die rechte Hälfte von Abb. 4). Diese Variable ist deshalb für READY besonders wichtig, weil Zeitbeschränkung eine häufig vorkommende Art von Ressourcenbeschränkung des Dialogpartners ist. Zeitbeschränkungen werden mithilfe einer Variablen ZEITDRUCK modelliert. Diese Variable drückt aus, inwieweit P sich subjektiv zeitlich unter Druck fühlt. Ein erhöhter ZEITDRUCK führt tendenziell zu einer kürzeren DAUER DER AUSFÜHRUNG DER AUFGABE, da P sich beeilt. Dieser Zeitgewinn wird aber manchmal auf Kosten des Erfolges erkaufte, d. h. erhöhter Zeitdruck macht einen großen ERFOLG BEI DER BEWÄLTIGUNG DER AUFGABE weniger wahrscheinlich.

### 3.2 Modellierung zeitveränderlicher Variablen

Ein Grund, warum die hier betrachteten Variablen eine besondere Herausforderung für die Benutzermodellierung darstellen, liegt in ihrer zeitlichen Veränderlichkeit. Benutzereigenschaften wie Beruf, Interessen und sogar Wissen ändern sich im Laufe einer Interaktion wenig oder gar nicht. Ganz anders sieht es aus bei Variablen wie etwa EMOTIONALE BELASTUNG. Kann der Mechaniker z. B. P beruhigen, so wird Ps EMOTIONALE BELASTUNG sinken. Wie kann ein System den Wert einer Variablen einschätzen, während dieser Wert sich ständig ändert?

Zeitliche Entwicklungen dieser Art werden häufig mit Hilfe von Zeitscheiben modelliert (vgl. Abschnitt 4). Jede Scheibe entspricht einem Zeitraum, während dessen die Änderungen vernachlässigt werden. Abbildung 5 zeigt ein Beispiel einer solchen Modellierung.

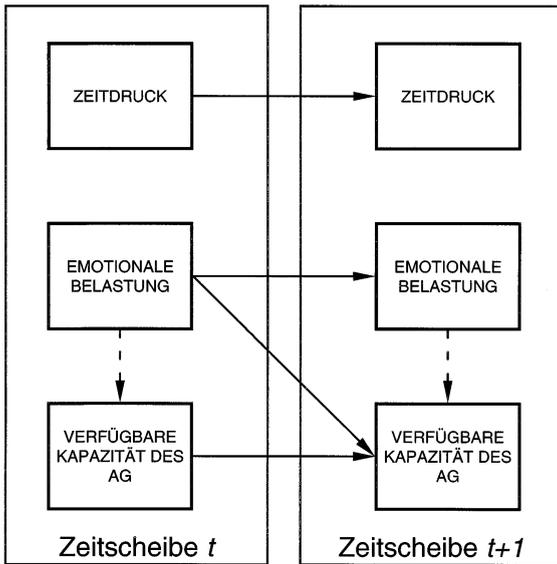


Abb. 5. Beispiele für die Modellierung zeitveränderlicher Variablen (Erläuterung im Text)

In bezug auf Zeitdruck wird in unseren Beispielen die folgende einfache Annahme getroffen: Das subjektive Gefühl von Zeitdruck hat die Tendenz zuzunehmen, da (a) die Ausführung von Aufgaben häufig länger dauert, als man erwartet, und (b) man sich immer stärker der gegebenen Zeitbeschränkungen bewußt wird, je weniger Zeit verbleibt. Das heißt, wenn das System in der Zeitscheibe  $t$  ein gewisses Maß von Zeitdruck bei  $P$  vermutet, sollte es in der folgenden Zeitscheibe  $t + 1$  etwas mehr Zeitdruck vermuten, auch wenn es keine neuen Hinweise auf Zeitdruck erhalten hat. Der erste Pfeil in der Abbildung drückt die Annahme aus, daß der Zeitdruck zu  $t + 1$  von dem Zeitdruck zu  $t$  abhängt, obwohl er dadurch nicht völlig bestimmt wird.

Die Modellierung solcher Zusammenhänge wird komplexer, wenn zeitlich veränderliche Variablen miteinander zusammenhängen. Beispielsweise können sich sowohl die EMOTIONALE BELASTUNG von  $P$  als auch seine VERFÜGBARE KAPAZITÄT DES AG über die Zeit ändern, wie Abb. 5 zeigt. Dabei wird die VERFÜGBARE KAPAZITÄT DES AG u. a. durch die EMOTIONALE BELASTUNG beeinflusst. Schäfer und Weyrath (1997) vergleichen mehrere Möglichkeiten, solche Zusammenhänge zu modellieren; Abb. 5 zeigt nur eine dieser Möglichkeiten: Die VERFÜGBARE KAPAZITÄT DES AG in der Zeitscheibe  $t + 1$  wird als abhängig betrachtet von (a) derselben Variablen in der Zeitscheibe  $t$  und (b) der Veränderung in der emotionalen Belastung zwischen den beiden Zeitscheiben.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Der Einfluß von EMOTIONALE BELASTUNG in Zeitscheibe  $t$  auf VERFÜGBARE KAPAZITÄT DES AG in Zeitscheibe  $t + 1$  ist in folgendem Sinne *positiv*: Je höher die EMOTIONALE BELASTUNG zu  $t$ , desto geringer ist die *Steigerung* im Wert dieser Variablen zwischen  $t$  und  $t + 1$ ; und je geringer diese Steigerung, desto höher ist die VERFÜGBARE KAPAZITÄT DES AG zu  $t + 1$ .

### 3.3 Integration und Erweiterung der Modellierung

Wie können nun die bisher vorgestellten Überlegungen in ein Gesamtmodell integriert werden?

Im Pannenhilfe-Szenario kann fast jede Tätigkeit des Autofahrers  $P$  einer der Kategorien *Sprachanalyse*, *Sprachgenerierung* bzw. *Handlung* (in bezug auf das Auto) zugeordnet werden. Jedoch kann  $P$  auch gleichzeitig mit einer Handlung und mit der Sprachanalyse bzw. Sprachgenerierung beschäftigt sein.

Für jede kurze Dialogsequenz (z. B. Frage vom System, Antwort von  $P$ ) können die Zusammenhänge in einem gesonderten Schema angegeben werden. Durch Aneinanderreihung solcher Schemata können dann viele verschiedene Dialoge in unserem Szenario charakterisiert werden. Diese Schemata stellen insofern einen nützlichen Ausgangspunkt für die detailliertere Modellierung (s. Abschnitt 5) dar.

Abbildung 6 zeigt ein solches Schema für eine typische Sequenz im Pannenhilfe-Szenario: In Zeitscheibe  $t$  gibt das System (im folgenden mit der Abkürzung  $S$  bezeichnet) eine Anweisung und in der darauffolgenden Zeitscheibe  $t + 1$  führt  $P$  die Anweisung aus.

Auf der linken Seite von Abb. 6 werden die Zusammenhänge dargestellt, die bei der Analyse einer Anweisung durch  $P$  relevant sind. Die meisten dieser Zusammenhänge wurden bereits besprochen. Neu hinzugekommen sind einige Variablen, die in der Abbildung in Gruppen zusammengefaßt werden, die mit gestrichelten Kästchen gekennzeichnet werden. Die Gruppe *SPRACHLICHE EIGENSCHAFTEN DER ANWEISUNG* umfaßt Variablen wie z. B. die Länge der Anweisung, die im Hinblick auf die Ressourcenbeschränkungen von  $P$  von Bedeutung sind. Diese Eigenschaften sind dem System weitgehend bekannt, da es die Anweisung ja selber generiert. Insofern kann  $S$  vorhersagen, welche Anforderung seine Anweisung an das Arbeitsgedächtnis von  $P$  stellen wird. Durch einige dieser Variablen wird auch der *INFORMATIONSGEHALT DER ANWEISUNG* beeinflusst. Diese Variable ist aus folgendem Grunde wichtig: Eine Anweisung mit geringem Informationsgehalt führt in der Regel zu einer höheren Beanspruchung des Arbeitsgedächtnisses von  $P$ , da  $P$  bei der Ausführung der Anweisung mehr Inferenzen machen muß.

Die Gruppe *SITUATIVE EINFLÜSSE AUF DAS ARBEITSGEDÄCHTNIS* umfaßt Variablen wie *EMOTIONALE BELASTUNG*, die die *VERFÜGBARE KAPAZITÄT DES AG* von  $P$  beeinflussen können; sie sind dem System nur teilweise bekannt.

Eine dritte Gruppe von Variablen, *HINWEISE AUF ERFOLG DER SPRACHANALYSE* (unten links in der Abbildung), umfaßt beobachtbare Variablen, anhand derer  $S$  beurteilen kann, ob  $P$  die Anweisung erfolgreich analysiert hat. Ein Beispiel ist eine Rückmeldung wie „OK“.

Die Variable *ANFORDERUNG DER HANDLUNG AN AG* wird in der ersten Zeitscheibe  $t$  im Schema aufgenommen, weil es möglich ist, daß  $P$  während der betreffenden Zeitscheibe mit einer anderen Handlung beschäftigt ist. Inwieweit  $S$  über diese Handlung informiert ist, hängt von der jeweiligen Situation ab; beispielsweise kann  $S$  die Handlung selber durch eine Anweisung veranlaßt haben.

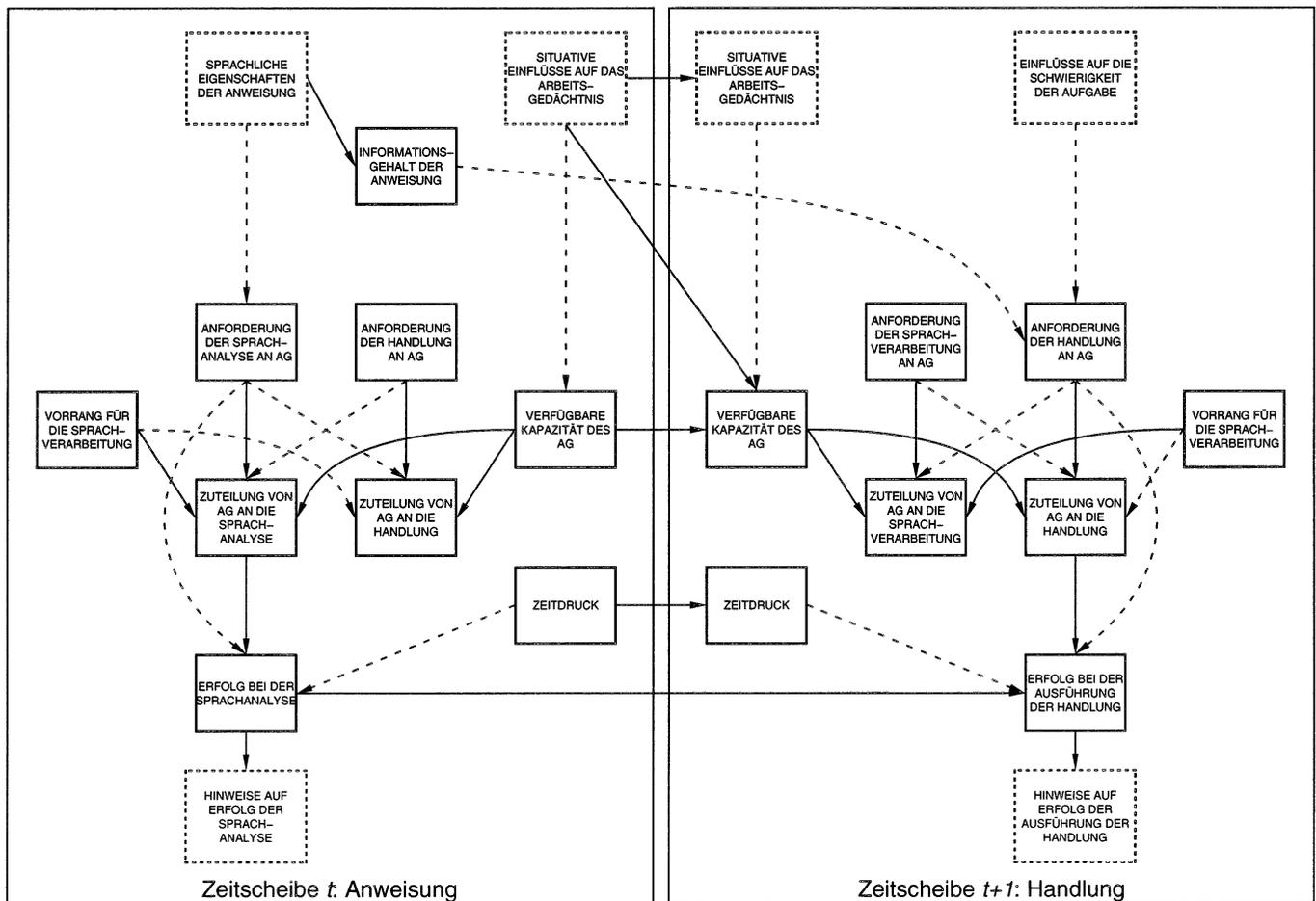


Abb.6. Schema für die Modellierung bei der Sequenz „Anweisung/Handlung“. (Ein durchgezogener bzw. gestrichelter Pfeil von A nach B bedeutet: A beeinflusst B positiv bzw. negativ)

wäre. S kann auch (mit Unsicherheit behaftete) Rückschlüsse ziehen, wenn es beispielsweise Hinweise darauf erhält, daß seine Anweisung nicht erfolgreich ausgeführt wurde.

Während der darauffolgenden Zeitscheibe (rechts in Abb.6) wird P wahrscheinlich mit der Ausführung der vorgeschlagenen Handlung beschäftigt sein. Auch hier ist es aber möglich, daß eine Konkurrenz zwischen Handlung und Sprachverarbeitung auftritt, z.B. weil P bei der Ausführung der Handlung Rückfragen stellt oder mit einer anderen Person spricht. Eine solche Konkurrenz kann zu einer geringen Zuteilung von Arbeitsgedächtniskapazität an die Ausführung der Handlung führen, was sich wiederum auf den ERFOLG BEI DER AUSFÜHRUNG DER HANDLUNG auswirken kann. Die Variablengruppe HINWEISE AUF ERFOLG DER AUSFÜHRUNG DER HANDLUNG umfaßt beobachtbare Variablen, anhand derer S während der zweiten Zeitscheibe einschätzen kann, ob P die Handlung erfolgreich ausgeführt hat.

Bei der Planung einer Anweisung sollte S auch andere Faktoren berücksichtigen, die mitbestimmen, inwieweit P eine bestimmte Anweisung wird ausführen können. Entsprechende Variablen gehören zur Gruppe EINFLÜSSE AUF DIE SCHWIERIGKEIT DER AUFGABE.

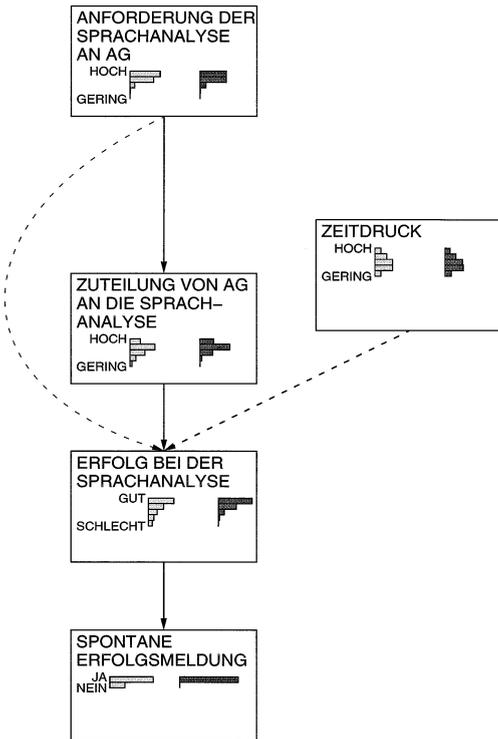
Im Rahmen dieses Schemas kann S nicht nur vorher-sagen, inwieweit eine bestimmte Formulierung einer Anweisung in einer gewissen Situation angemessen

#### 4 Modellierung mit dynamischen Bayesschen Netzen

Die bisher vorgestellten Diagramme haben einige zentrale Kausalzusammenhänge erfaßt; sie sind aber von vollständigen Spezifikationen für ein lauffähiges Computerprogramm noch weit entfernt. Wie können solche Überlegungen nun in einem Programm realisiert werden?

Als erstes brauchen wir einen geeigneten Formalismus, mit dem das einschlägige Wissen dargestellt und die nötigen Inferenzen berechnet werden können. Wie wir mehrfach gesehen haben, muß dieser Formalismus auf jeden Fall Kausalzusammenhänge behandeln können, die mit Unsicherheit behaftet sind.

Der Begriff *Unsicherheit* kann unterschiedlich aufgefaßt werden (vgl. z.B. Spies, 1993). Dementsprechend stehen unterschiedliche numerische Inferenzmechanismen für den Umgang mit Unsicherheit zur Auswahl. Die vielen Überlegungen, die bei der Auswahl berücksichtigt werden müssen, betreffen sowohl theoretische als auch praktische Fragen. (Eine Besprechung der einschlägigen Überlegungen in bezug auf Probleme der Benutzermodellierung bietet Jameson, 1996b.)



**Abb. 7.** Vereinfachtes Beispiel für einen Teil des Bayesschen Netzes von Abb. 8 (Erläuterung im Text)

In der vorliegenden Situation geht es nicht so sehr um die Unschärfe von Begriffen bzw. um die Unvollständigkeit kausaler Modelle, für deren Behandlung sich die Fuzzy-Logik bzw. die Dempster-Shafer-Theorie besonders anbieten würden. Vielmehr geht es um probabilistische Kausalzusammenhänge zwischen Variablen, die sich teilweise über mehrere Zeitscheiben erstrecken können. Gerade für die Behandlung dieser Art von Unsicherheit wurden *Bayessche Netze* entwickelt -- speziell die Variante, die als *dynamisches Bayessches Netz* bezeichnet wird. In diesem Abschnitt soll dieser Formalismus anhand eines Beispiels aus der vorliegenden Domäne kurz vorgestellt werden. (Für ausführliche Einführungen s. etwa Pearl, 1988 oder Neapolitan, 1990.)

Abbildung 7 zeigt einen kleinen Teil eines Netzes, das unten in Abschnitt 5 besprochen wird. Das Teilnetz wird vom System verwendet (a) um vorherzusagen, ob in einem bestimmten Fall *P*s sprachliche Analyse einer Äußerung des Systems erfolgreich sein wird; und (b) um die Beobachtung zu interpretieren, daß *P* sein Verständnis der Äußerung explizit ausgedrückt (bzw. nicht ausgedrückt) hat. Bis auf die Variable SPONTANE ERFOLGSMELDUNG wurden alle Variablen und Zusammenhänge bereits oben besprochen.

Ein Bayessches Netz ist, technisch gesehen, ein gerichteter, azyklischer Graph, dessen Knoten Zufallsvariablen darstellen. Mit jedem Knoten werden zwei oder mehr Hypothesen assoziiert. Jede Hypothese entspricht einem möglichen Zustand oder Wert der betreffenden Variablen. Für den Knoten SPONTANE ERFOLGSMELDUNG in Abb. 7 besagt die eine Hypothese (hier kurz mit JA

bezeichnet), daß der Dialogpartner *P* gerade eine Äußerung gemacht hat, die zum Ausdruck bringt, daß er die letzte Äußerung des Systems verstanden hat; die zweite Hypothese für diesen Knoten ist die Verneinung der ersten. Die anderen Knoten in der Abbildung entsprechen Variablen, die an sich kontinuierlich sind; aus praktischen Gründen werden diese mit Variablen approximiert, die nur eine begrenzte Anzahl möglicher Werte haben. Beispielsweise werden hier fünf mögliche Grade von ZEITDRUCK unterschieden. Für nicht-beobachtbare Variablen wie diese ist es natürlich nicht einfach, die Grenzen zwischen den Hypothesen zu definieren. Andererseits ist es nicht nötig oder nützlich, entsprechende operationale Definitionen zu geben, die sich etwa auf ausdrückliche Selbsteinschätzungen von *P* beziehen könnten: Das System wird schließlich fast niemals die Daten erhalten, die zur Anwendung einer solchen Definition benötigt würden. Vielmehr wird die Bedeutung der einzelnen Hypothesen implizit durch die quantitativen, teilweise indirekten Verbindungen der betreffenden Variablen mit beobachtbaren Variablen bestimmt.

Für jede Hypothese in bezug auf eine Variable wird die Wahrscheinlichkeit des Zutreffens der Hypothese verwaltet. Zusammen ergeben diese Wahrscheinlichkeiten eine Wahrscheinlichkeitsverteilung, die die Erwartung des Systems in bezug auf die betreffende Variable widerspiegelt. In Abb. 7 werden diese Wahrscheinlichkeitsverteilungen für zwei Zeitpunkte durch Histogramme dargestellt: bevor *P* die Gelegenheit hatte, eine Erfolgsmeldung zu geben (helle Histogramme links), und gleich nach der Gelegenheit zur Erfolgsmeldung (dunklere Histogramme rechts). Beispielsweise zeigt das linke Histogramm für die Variable SPONTANE ERFOLGSMELDUNG, daß das System mit einer subjektiven Wahrscheinlichkeit von ca. 75 % erwartet, daß *P* eine Erfolgsmeldung geben wird. Nachdem eine solche Meldung tatsächlich beobachtet worden ist, steigt diese Wahrscheinlichkeit auf 100 %, wie das rechte Histogramm zeigt.

Die Verbindungen zwischen den Knoten repräsentieren die Abhängigkeiten zwischen den entsprechenden Variablen. Beispielsweise wird der Knoten SPONTANE ERFOLGSMELDUNG als „Kind“ des Knotens ERFOLG BEI DER SPRACHANALYSE bezeichnet, da die erste Variable durch die zweite beeinflusst wird. Der Zusammenhang wird quantitativ durch eine Reihe bedingter Wahrscheinlichkeiten angegeben. Beispielsweise drückt eine bedingte Wahrscheinlichkeit die Annahme aus, daß eine SPONTANE ERFOLGSMELDUNG sehr unwahrscheinlich ist, wenn der ERFOLG BEI DER SPRACHANALYSE schlecht war. Eine größere Anzahl bedingter Wahrscheinlichkeiten muß angegeben werden, wenn eine Variable durch zwei oder mehr andere Variablen beeinflusst wird. In bezug auf ERFOLG BEI DER SPRACHANALYSE gibt z. B. eine der insgesamt 625 bedingten Wahrscheinlichkeiten an, daß ein schlechter Erfolg wahrscheinlich ist, wenn die Anforderung an die Arbeitsgedächtniskapazität hoch ist, die Zuteilung von Arbeitsgedächtniskapazität gering ist und *P* außerdem unter hohem Zeitdruck steht.

Ein Kernbeitrag der Technologie der Bayesschen Netze stellen Methoden für die *Evaluation* der Netze

**Tabelle 1.** Kodierung eines Dialogfragmentes für die Verarbeitung durch die Benutzermodellierungskomponente von READY (vgl. Abb. 2)

Äußerung	Aufgabe	Bekannte Faktoren	Beobachtbare Symptome
<i>Zeitscheibe t<sub>0</sub>:</i> S: Äh <Z>. Im <Z> Fußraum, das heißt <P> unterm Lenkrad <P> links <P> is'n Hebel. <P> Da dran ziehen. P: Moment % grad % bitte	Sprachanalyse	ÄUSSERUNGSLÄNGE = LANG, INFORMATIONSDICHTE = HOCH, SYNTAKTISCHE SCHWIERIGKEIT = HOCH, SEMANTISCHE SCHWIERIGKEIT = MITTEL	SPONTANE ERFOLGS- MELDUNG = JA
<i>Zeitscheibe t<sub>1</sub>:</i> P: <# Knistern> <P> OK <P> jetzt.	Handlung	SCHWIERIGKEIT = MITTEL, DIALOGUNTERSTÜTZUNG = GERING	SPONTANE ERFOLGS- MELDUNG = JA
<i>Zeitscheibe t<sub>2</sub>:</i> S: Jetzt Motorhaube öffnen?	Sprachanalyse	ÄUSSERUNGSLÄNGE = KURZ, INFORMATIONSDICHTE = GERING, SYNTAKTISCHE SCHWIERIGKEIT = GERING	SPONTANE ERFOLGS- MELDUNG = NEIN
	Handlung	SCHWIERIGKEIT = MITTEL	SPONTANE ERFOLGS- MELDUNG = NEIN
<i>Zeitscheibe t<sub>3</sub>:</i> P: <P> Wie rum <ächz> % geht'n der auf? So rum?	Sprach- generierung	VORSTRUKTURIERUNG = GERING	UNPASSENDE DEIXIS = JA, DEUTLICHKEIT DER AUS- SPRACHE = SCHLECHT NICHT-SPRACHLICHE ÄUSSE- RUNGEN = JA
	Handlung	SCHWIERIGKEIT = MITTEL	SPONTANE ERFOLGS- MELDUNG = NEIN

in Übereinstimmung mit den Grundsätzen der Wahrscheinlichkeitstheorie dar, d.h. Methoden für die *Vorhersage* der Werte von Variablen und für die *Interpretation* von beobachteter Evidenz.

Beispielsweise wurde die erste Erwartung in bezug auf die Variable SPONTANE ERFOLGSMELDUNG von der Erwartung in bezug auf ERFOLG BEI DER SPRACHANALYSE abgeleitet: Da ein guter oder mäßiger Erfolg erwartet wird, kann die Vorhersage abgeleitet werden, daß *P* wahrscheinlich eine Erfolgsmeldung geben wird. Die Erwartung in bezug auf ERFOLG BEI DER SPRACHANALYSE wurde wiederum von den ursprünglichen Erwartungen in bezug auf die „Eltern“-Variablen abgeleitet.

Die dunklen Histogramme zum zweiten Zeitpunkt zeigen ein Beispiel für eine Interpretation von Beobachtungen: Nachdem eine Erfolgsmeldung von *P* beobachtet worden ist, wird die Einschätzung der Variablen ERFOLG BEI DER SPRACHANALYSE leicht nach oben angepaßt (im wesentlichen durch eine Anwendung der bekannten Bayesschen Regel). Das System „erklärt“ dann den vermuteten Erfolg der Sprachanalyse, indem es jetzt etwas günstigere Werte für die Variablen vermutet, die diesen Erfolg beeinflussen. Die Anpassungen der Einschätzungen in bezug auf diese Variablen sind allerdings gering; dieses Ergebnis ist leicht nachvollziehbar, denn immerhin bieten sich gleichzeitig drei verschiedene Erklärungen für diese geringe Änderung an.

Eine andere Art von Beziehung zwischen Variablen entsteht, wenn das System einschätzen muß, wie sich eine Variable über mehrere Zeitscheiben verändert (s. Abschnitt 3.2). Für solche Einschätzungen wurden *dynamische Bayessche Netze* entwickelt. Eine typische Anwendung für ein solches Netz ist etwa die Aufgabe,

die Position eines sich bewegenden Fahrzeuges festzustellen (vgl. z. B. Nicholson & Brady, 1994; Forbes et al., 1995). Die Grundidee solcher Netze wurde bereits in Abschnitt 3.2 vorgestellt; Beispiele für die konkrete Realisierung werden unten in Abschnitt 5 gegeben.

Die Verwendung Bayesscher Netze ist in mancher Hinsicht differenzierter als der ältere Stereotypen-Ansatz, der in Systemen für die Benutzermodellierung häufig eingesetzt worden ist (s. z.B. Rich, 1979, 1989). Beispielsweise werden in bezug auf eine Variable, deren Wert unbekannt ist, stets mehrere Hypothesen gleichzeitig berücksichtigt und nicht etwa nur eine Hypothese, die dem aktivierten Stereotyp entspricht.

## 5 Beispiellauf der Implementation

Die bisher analysierten konkreten Beispiele waren noch recht einfach. Liefert der hier vorgestellte Ansatz auch dann glaubwürdige Inferenzen, wenn er auf die volle Komplexität eines echten Dialoges angewandt wird?

Eine völlig überzeugende Antwort auf diese Frage wird erst zur Verfügung stehen, nachdem das System READY vollständig implementiert und evaluiert worden ist. Zur Zeit ist aber die Komponente für die Ressourceneinschätzung weit genug realisiert, so daß sie die erforderlichen Inferenzen für typische Dialogsituationen berechnen kann.<sup>2</sup> Insofern kann die Brauchbarkeit des vorgestellten Ansatzes eingeschätzt werden.

<sup>2</sup> Für die Implementation wurde das Werkzeug NETICA verwendet, das die Konstruktion von Bayesschen Netzen und Einflußdiagrammen (Abschnitt 6.2) unterstützt.

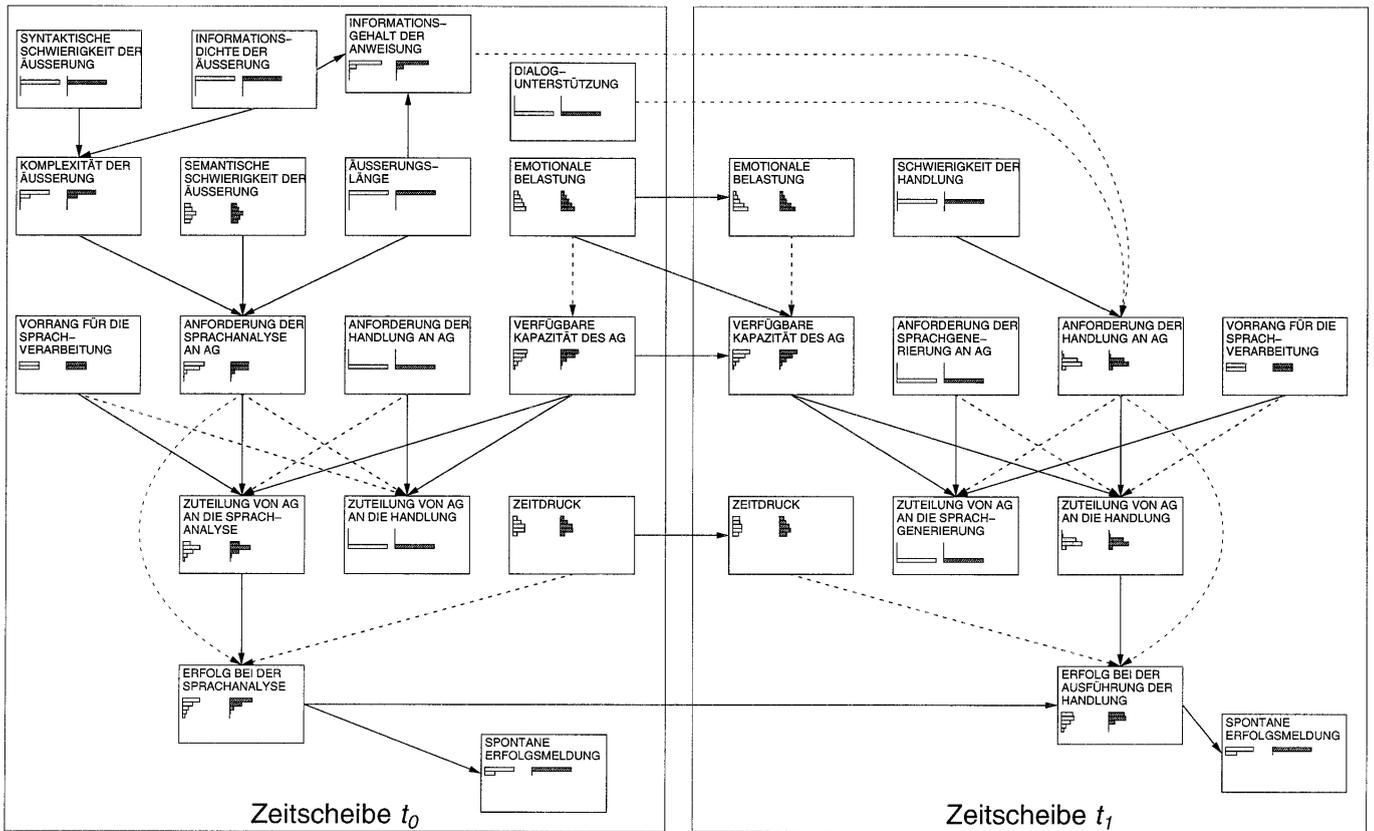


Abb. 8. Ausschnitt aus dem Bayesschen Netz zur Modellierung der Zeitscheiben  $t_0$  und  $t_1$  des Dialogfragmentes

Die Modellierung soll für einen typischen Ausschnitt aus dem Dialog der Abb. 2 vorgestellt werden. Der Ausschnitt wird in der linken Spalte von Tabelle 1 wiedergegeben. In der dritten und der vierten Spalte werden die Informationen aufgeführt, die der Benutzermodellierungskomponente von READY zur Verfügung stehen würden, wenn in einem Dialog mit dem System die entsprechenden Äußerungen vorkommen würden: Die „bekannten Faktoren“ sind Eigenschaften der Äußerungen des Systems bzw. der vom System vorgeschlagenen Handlungen. Die „beobachtbaren Symptome“ sind Aspekte des Verhaltens von P. (Es ist keine triviale Aufgabe, die konkreteren Informationen in der Dialogsituation auf Variablenbelegungen dieser Art abzubilden; diese Aufgabe fällt aber außerhalb des Bereiches der Benutzermodellierungskomponente.)

Es liegt in den ersten beiden Zeitscheiben eine Beziehung „Anweisung/Handlung“ vor, auf die das Schema von Abb. 6 anwendbar ist. Der Mechaniker S gibt zunächst die Anweisung, nach dem Hebel zum Öffnen der Motorhaube zu suchen und daran zu ziehen. P muß also in der Zeitscheibe  $t_0$  eine Sprachanalyse dieser Anweisung ausführen. Die in der Tabelle aufgeführten Variablen wie AUSSERUNGSLÄNGE gehören zur Gruppe SPRACHLICHE EIGENSCHAFTEN DER ANWEISUNG (vgl. Abb. 6). Die Äußerung „Moment ...“ von P wird als Erfolgsmeldung in bezug auf das Verstehen der Anweisung kodiert.

In den Abb. 8 und 9 wird gezeigt, wie das Fragment des Beispieldialoges mit Bayesschen Netzen modelliert wird. Für die beiden ersten Zeitscheiben baut das System ein dynamisches Bayessches Netz auf, in dem u. a. die in Abb. 6 dargestellten Zusammenhänge modelliert werden. Abbildung 8 zeigt einen Ausschnitt dieses Netzes.

Aufgrund der sprachlichen Eigenschaften seiner Anweisung (oben links in der Abbildung) sagt S vorher, daß die ANFORDERUNG DER SPRACHANALYSE AN AG wahrscheinlich eher hoch sein wird. Da aber P in diesem Augenblick nicht mit einer Handlung beschäftigt ist, wird die ANFORDERUNG DER HANDLUNG AN AG als minimal eingeschätzt.

Die Histogramme unten links zeigen, wie die beobachtbare SPONTANE ERFOLGSMELDUNG von P zunächst vorhergesagt und dann interpretiert wird. Die wesentlichen Aspekte dieser Inferenzen wurden bereits im Zusammenhang mit dem vereinfachten Ausschnitt dieses Netzes in Abb. 7 erläutert. Insgesamt wird die Erwartung des Systems in bezug auf die Ressourcen von P weitgehend bestätigt.

In Zeitscheibe  $t_1$  erfolgt als Handlung die Ausführung der Anweisung durch P: P sucht den Hebel und zieht daran. Die Anweisung hat einen hohen Informationsgehalt, was an sich die Anforderung der Handlung an das Arbeitsgedächtnis von P verringern müßte; andererseits bietet die Anweisung wenig DIALOGUNTERSTÜTZUNG, d.h. ausdrückliche Hinweise über die Art und Weise, wie P die Aufgabe umsetzen soll. Insofern erwartet S, daß die Anweisung etwa eine mittelhohe Anforderung an das Arbeitsgedächtnis von P stellen

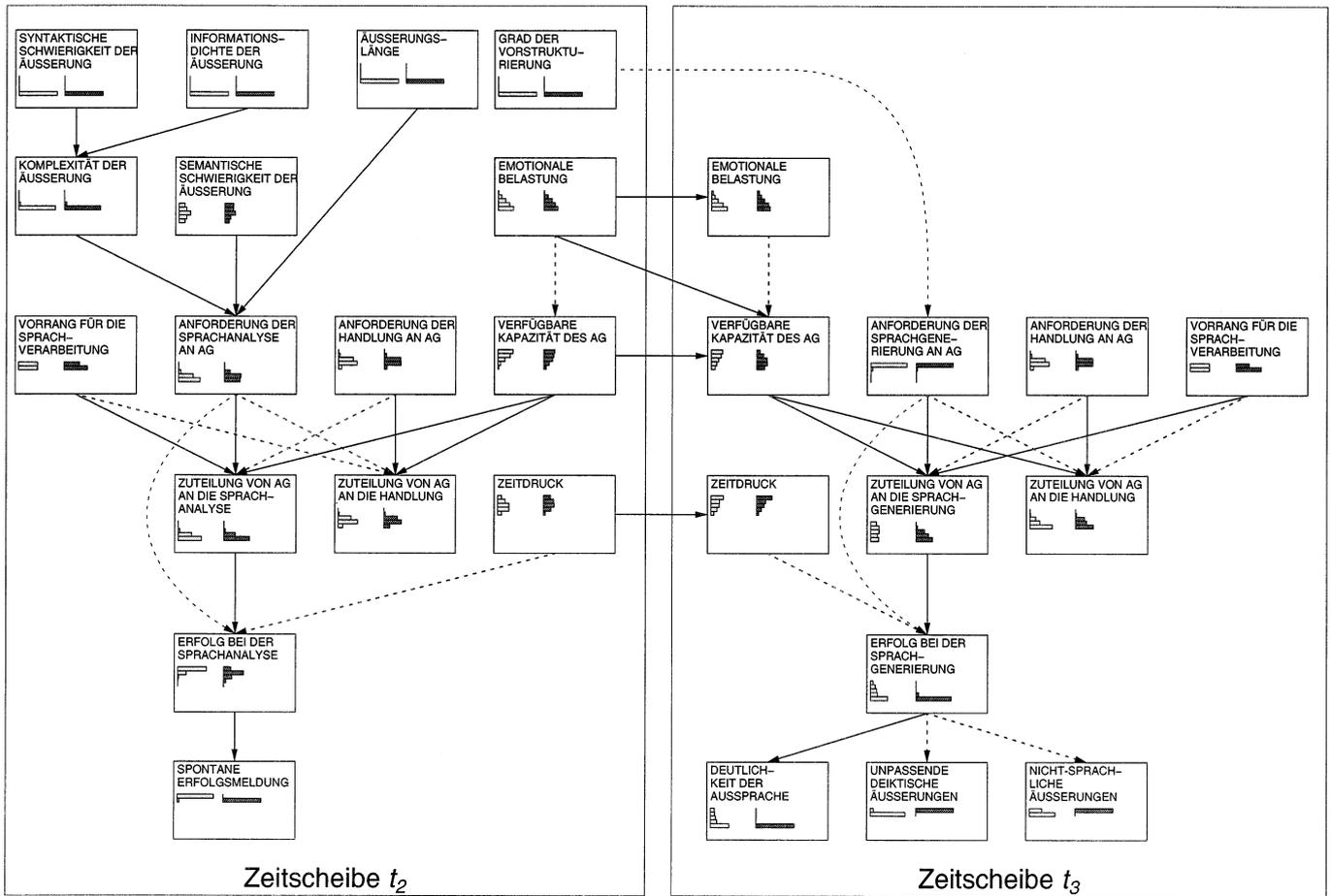


Abb.9. Ausschnitt aus Bayesschem Netz zur Modellierung der Zeitscheiben  $t_2$  und  $t_3$  des Dialogfragmentes

wird. Dementsprechend ist die Erwartung von  $S$  in bezug auf den Erfolg von  $P$  bei der Ausführung eher hoch. Wie in der vorherigen Zeitscheibe kommt die SPONTANE ERFOLGSMELDUNG von  $P$  nicht unerwartet.

Einige Augenblicke später gibt der Mechaniker in Zeitscheibe  $t_2$  die Anweisung, am Kühler die Motorhaube zu öffnen -- obwohl er aufgrund des Kontextes und der Geräusche vermuten kann, daß  $P$  mit dieser Aufgabe bereits begonnen hat. Abbildung 9 zeigt die Einschätzungen, die  $S$  im Zusammenhang mit dieser Anweisung macht. Auf der linken Seite ist zu sehen, daß die sprachlichen Eigenschaften der Äußerung des Mechanikers zu einer vermutlich geringen Anforderung an das Arbeitsgedächtnis von  $P$  führen; dafür wird  $P$  aber wahrscheinlich durch die gleichzeitige Ausführung einer Handlung abgelenkt. Insofern ist  $S$  nicht ganz sicher, ob  $P$  die Äußerung verstehen wird; und diese Einschätzung wird beim Ausbleiben einer Erfolgsmeldung durch  $P$  noch etwas pessimistischer.  $S$  vermutet unter anderem, daß der VORRANG FÜR DIE SPRACH-VERARBEITUNG gering war, denn  $S$  geht in dieser Situation davon aus, daß  $P$  bei Konflikten zwischen Sprachverarbeitung und Handlung entweder der einen oder der anderen Aufgabe den Vorrang geben kann.

In Zeitscheibe  $t_3$  findet ein Ereignis statt, das in den bislang gegebenen Beispielen nicht vorkam:  $P$  generiert eine Äußerung, die weder eine bloße Erfolgsmeldung noch eine Antwort auf eine Frage von  $S$  darstellt. Daher wird für diese Äußerung der GRAD DER VORSTRUKTURIERUNG als gering eingeschätzt.

Die für  $S$  beobachtbaren Variablen in dieser Zeitscheibe beziehen sich in diesem Fall hauptsächlich auf  $P$ s Sprachverarbeitung: Sie dienen als Symptome der Ressourcenbeschränkungen von  $P$ .

Die drei verfügbaren Beobachtungen in Zeitscheibe  $t_3$  deuten auf einen geringen ERFOLG BEI DER SPRACHGENIERUNG hin. Für diese Hypothese bieten sich wiederum mehrere mögliche Erklärungen an: Es kann sein, daß der ZEITDRUCK höher, die VERFÜGBARE KAPAZITÄT DES AG geringer, der VORRANG FÜR DIE SPRACHVERARBEITUNG geringer oder die ANFORDERUNG DER HANDLUNG AN AG höher war, als zuvor vermutet. Es wäre willkürlich, eine dieser Erklärungen als einzige anzunehmen, und in der Tat ergeben die Inferenzen im Bayesschen Netz eine Anpassung in bezug auf jede dieser Erklärungen.

In diesem Beispiellauf können wir bereits zwei typische Eigenschaften der Inferenzen im Rahmen dieses Ansatzes erkennen:

1. Nach einer Interpretation von Hinweisen im Verhalten von  $P$  ändern sich die einzelnen Hypothesen von  $S$  in bezug auf die Ressourcen von  $P$  zumeist nur geringfügig. Der Grund ist, daß für jede Beobachtung in der Regel mehrere Faktoren verantwortlich sein könn-

ten, so daß *S* keine eindeutige Schlußfolgerung in bezug auf eine einzelne Variable ziehen kann. Diese Tendenz bedeutet nicht etwa, daß die Interpretation der verfügbaren Hinweise überflüssig ist: Wenn *S* etwas später eine Vorhersage macht, werden wiederum mehrere derselben Variablen das Ergebnis der Vorhersage mitbestimmen. Die kleinen Änderungen in den einzelnen Variablen können zusammen sehr wohl einen erheblichen Einfluß auf die Vorhersage haben. Ein alltägliches Beispiel kann dieses Muster veranschaulichen: Wenn auf einem Treffen mit mehreren Kollegen Ihr Taschenrechner verschwindet, können Sie in bezug auf jeden einzelnen Kollegen nur mit einer geringen subjektiven Wahrscheinlichkeit vermuten, daß er die allgemeine Neigung hat, das Eigentum anderer Personen zu entwenden. Andererseits werden Sie beim nächsten Treffen mit derselben Gruppe sehr wohl zögern, eine wertvolle Sache unbewacht stehen zu lassen.

2. Bei *Vorhersagen* in bezug auf eine gewisse Variable (z.B. ERFOLG BEI DER SPRACHANALYSE) entstehen zum Teil stark unterschiedliche Ergebnisse in Abhängigkeit von den Erwartungen in bezug auf die für die Vorhersage relevanten Variablen. Einer der Gründe hierfür wurde eben genannt; ein anderer ist, daß eine Vorhersage in der Regel zum Teil Variablen berücksichtigt -- z.B., ob *P* zu einem bestimmten Zeitpunkt mit der Ausführung einer komplexen Handlung beschäftigt ist --, die nur für kurze Zeit überhaupt definiert sind, aber dafür einen starken Einfluß auf andere Variablen haben können.

Vorhersagen über den Dialogpartner sind eine wichtige Grundlage für den Entscheidungsprozeß des Systems, da sie eine Abschätzung der Folgen der Dialogzüge des Systems erlauben. Im nächsten Abschnitt wird kurz auf die Frage eingegangen, wie ein System wie READY mit Hilfe der bisher besprochenen Modellierungstechniken seine eigenen Handlungen und Äußerungen planen kann.

## 6 Ressourcenadaptive Dialogplanung

Menschen passen sich auf unterschiedlichen Ebenen den Ressourcenbeschränkungen ihrer Dialogpartner an: Auf hoher Ebene verfolgen sie Dialogstrategien, die der Schonung des Arbeitsgedächtnisses dienen, indem sie z.B. jeweils den aktuellen Dialogfokus berücksichtigen (s. z.B. Grosz & Sidner, 1986) oder die Konventionen beachten, die den Sprecherwechsel im Dialog regeln (s. z.B. Schegloff & Sacks, 1973). Beim Geben von Anweisungen versuchen sie manchmal Handlungen vorzuschreiben, die auf die aktuelle Ressourcenlage des Partners zugeschnitten sind (s. z.B. Weis, 1997). In diesem Artikel kann aus Platzgründen nur auf eine andere Ebene eingegangen werden, die Ebene der *Äußerungsformulierung*: Wie kann ein bestimmter Inhalt so verbalisiert werden, daß die Äußerung den Ressourcenbeschränkungen des Dialogpartners Rechnung trägt?

Dieses Problem kann als Entscheidungsproblem aufgefaßt werden, bei dem verschiedene Bewertungskriterien und ggf. auch Zielkonflikte zu berücksichtigen sind. Der Charakter eines solchen Entscheidungspro-

blems kann anhand eines Beispiels veranschaulicht werden, bei dem man in einer alltäglichen Situation besonders gründlich nachdenken würde: Stellen Sie sich z.B. vor, Sie müssen für einen Kollegen Anweisungen zur Bedienung eines Diaprojektors während eines Vortrages aufschreiben, und Sie vermuten, daß er vor dem Vortrag wenig Zeit zum Studieren der Anweisungen haben wird. Sie können versuchen, diesen Zeitdruck zu berücksichtigen, indem Sie die Anweisungen knapp formulieren. Hierdurch entsteht aber die Gefahr, daß der Kollege über die Anweisungen lange nachdenken muß, um sie zu verstehen, oder daß er die Anweisungen sogar falsch versteht und bei der Bedienung des Apparates peinliche Fehler macht. Bei der Suche nach einer geeigneten Formulierung der Anweisungen sollten Sie also mehrere Faktoren berücksichtigen und dabei auch in die Zukunft schauen.

Als Sprecher in Dialogsituationen geben wir uns normalerweise nicht die Mühe, so gründlich über jede einzelne unserer Äußerungen nachzudenken. Warum sollte aber ein Dialogsystem das nicht tun, wenn Entscheidungsprozesse dieser Art auf effiziente Weise implementiert werden können?

### 6.1 Ressourcenadaptive Äußerungsauswahl

Die einfachste Art der Entscheidung für das System tritt dann auf, wenn für einen gegebenen Inhalt (z.B. die Frage, ob die Motorhaube bereits geöffnet wurde) von vornherein nur eine kleine Anzahl möglicher Formulierungen zur Verfügung steht. In diesem Fall kann das System für jede mögliche Formulierung vorhersagen, wie sie sich im Dialog auswirken würde. Die Formulierung mit den voraussichtlich günstigsten Auswirkungen kann dann gewählt werden.

Vergleichbare Vorhersagen (z.B. in bezug auf die Variable ERFOLG BEI DER SPRACHANALYSE) wurden ja von READY bereits im Zusammenhang mit der Einschätzung von Ressourcenbeschränkungen gemacht. Insofern stellen die bisher besprochenen Bayesschen Netze schon einen Ausgangspunkt für die Lösung des Problems der Äußerungsauswahl dar. Sowohl für die Erkennung von Ressourcenbeschränkungen als auch für ihre Berücksichtigung ist es immerhin nützlich, die Kausalzusammenhänge zwischen relevanten Variablen zu kennen.

Hierzu müssen die Bayesschen Netze allerdings in zweierlei Hinsicht erweitert werden:

1. Es müssen neue Variablen eingeführt werden, anhand derer die Eigenschaften möglicher Formulierungen auf differenzierte Weise gekennzeichnet werden können; denn allein anhand der bisher besprochenen Variablen wie z.B. ÄUSSERUNGSLÄNGE können die Auswirkungen verschiedener Formulierungen nicht differenziert genug vorhergesagt werden, um eine Auswahl zu begründen. Abbildung 10 zeigt einige entsprechende Zusammenhänge graphisch. (Aus Platzgründen werden einige Variablen in der Zeichnung weggelassen). So führt z.B. die VERWENDUNG VON FACHBEGRIFFEN tendenziell zu kürzeren Äußerungen, gleichzeitig aber zu höheren

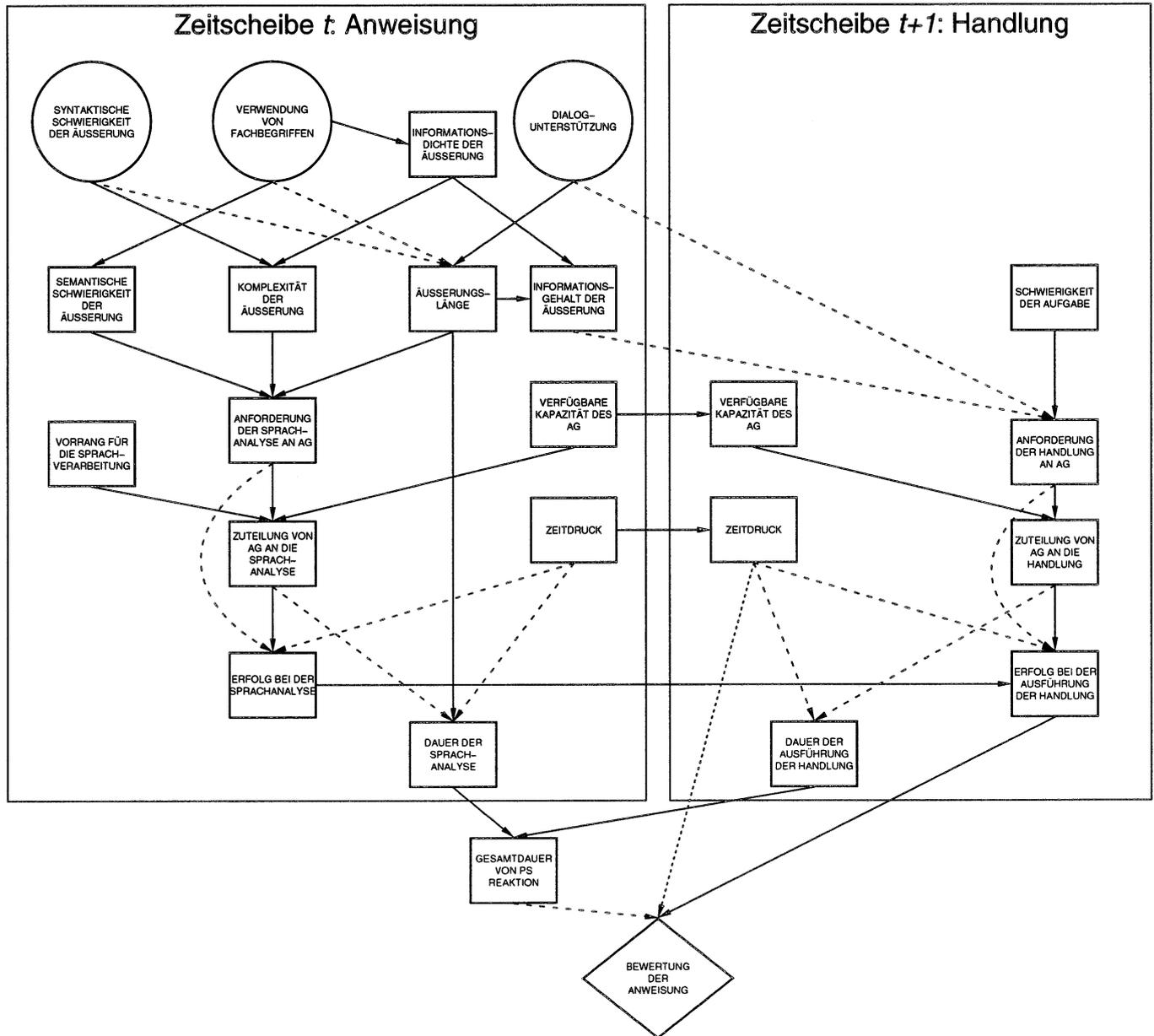


Abb. 10. Einflußdiagramm für Anweisung/Handlung (vgl. Abb. 6)

Werten von INFORMATIONSDICHTE DER ÄUSSERUNG. Diese bestimmt dann indirekt -- zusammen mit mehreren anderen Variablen -- die ANFORDERUNG DER SPRACHANALYSE AN AG von P.

2. In Abb. 10 ist weiterhin zu sehen, daß der mögliche Zeitgewinn durch die VERWENDUNG VON FACHBEGRIFFEN auf Kosten der Erfolgsaussichten gehen kann, wenn es bei P aufgrund einer zu hohen ANFORDERUNG DER SPRACHANALYSE AN AG zu Verständnisschwierigkeiten kommt. Welche Äußerung ist nun vorzuziehen: die kurze oder die sichere? Die Antwort auf diese Frage hängt natürlich von den Bewertungsprioritäten des Sprechers (hier: des Systems) ab. In der Abbildung wird davon ausgegangen, daß sich das System bei der Bewertung von Äußerungen nach dem Zeitdruck des Dialogpart-

ners richtet: Die Einschätzung dieses Zeitdrucks bestimmt das relative Gewicht der beiden Bewertungskriterien ERFOLG BEI DER AUSFÜHRUNG DER HANDLUNG und GESAMTDAUER VON PS REAKTION. Der untere Teil von Abb. 10 zeigt, wie eine solche Bewertung in ein Bayessesches Netz mit aufgenommen werden kann. Anders als bei der Erkennung von Ressourcenbeschränkungen wird jetzt nicht mehr in erster Linie beobachtbares Verhalten des Dialogpartners vorhergesagt, sondern etwas weniger greifbares: die Gesamtbewertung einer möglichen Formulierung.

### 6.2 Ein allgemeinerer Ansatz: Einflußdiagramme

Wird das in Abb. 10 dargestellte Netz als normales Bayessesches Netz aufgefaßt, so ermöglicht es die Beantwortung von Fragen der Form: „Als Formulierung des Inhaltes I, wie gut ist die Formulierung F?“

Im allgemeinen ist aber die Beantwortung von Fragen der folgenden Form nützlicher: „Was für Merkmale hätte eine optimale Formulierung des Inhaltes *I*?" Mit anderen Worten, wir möchten günstige Werte für die Variablen oben in Abb.10 finden, die mit Kreisen gekennzeichnet sind, ohne erst allerlei konkrete Formulierungen bewerten zu müssen. Das Wissen über Kausalzusammenhänge, das im Netz bereits repräsentiert ist, kann hierzu benutzt werden, aber es ist eine andere Inferenztechnik erforderlich. Diese Inferenztechnik liegt dem Formalismus der *Einflußdiagramme* zugrunde, der eine Erweiterung von Bayesschen Netzen darstellt (s. z.B. Shachter, 1986, Pearl, 1988). In einem Einflußdiagramm kommen neben den Zufallsvariablen zwei weitere Variablentypen vor:

- *Entscheidungsvariablen* sind die Variablen des Entscheidungsproblems, für die eine optimale Belegung gefunden werden soll. Solche Variablen werden in Abb.10 als Kreise dargestellt.
- Eine *Bewertungsvariable* nimmt für jede Kombination von Werten ihrer „Eltern“-Variablen einen reellen Wert an. Dieser Wert wird beim Lösen des Einflußdiagrammes maximiert. Eine Bewertungsvariable wird graphisch als Raute dargestellt.

Die Verwendung von Einflußdiagrammen für die Dialogplanung bringt mehr neue Herausforderungen mit sich als die Verwendung Bayesscher Netze -- u. a. deshalb, weil dieser Formalismus bisher erst selten zum Zwecke der Systemadaption eingesetzt wurde und dementsprechend weniger einschlägige Erfahrungen vorliegen. Die ersten Ergebnisse bestätigen aber die Erwartung, daß Einflußdiagramme sich auch in diesem Zusammenhang als mächtiger und natürlicher Inferenzmechanismus erweisen werden.

## 7 Schlußfolgerungen und Ausblick

Dieser Artikel hat über einige Schritte in Richtung des ersten Dialogsystems berichtet, das die Beschränkungen der Zeit und des Arbeitsgedächtnisses des Dialogpartners erkennt und berücksichtigt. Es wurde eine gewisse Konvergenz in den empirischen Evidenzen bzgl. der Kausalzusammenhänge festgestellt, die berücksichtigt werden müssen; und es wurde gezeigt, wie mächtige Techniken eingesetzt werden können, um aufgrund dieser Kausalzusammenhänge Inferenzen und Entscheidungen abzuleiten.

Zur Zeit wird noch an mehreren wesentlichen Ergänzungen zur hier beschriebenen Forschung gearbeitet, u. a. der differenzierteren und genaueren Bestimmung der Zusammenhänge zwischen den betrachteten Variablen, der Integration der hier beschriebenen Techniken in ein abgerundetes Dialogsystem sowie die empirische Überprüfung ihrer Effektivität im Rahmen dieses Systems.

Die Zielsetzung dieser Forschung stellt eine erhebliche Herausforderung an die Kognitionswissenschaft dar: Es müssen Ergebnisse und Methoden aus mehreren

Teilgebieten der Kognitionswissenschaft übertragen und angewandt werden, wobei die genaue Art und Weise der Übertragung meistens nicht auf der Hand liegt.

## Literatur

- Baddeley, A. D. (1986) *Working memory*. Oxford: Oxford University Press.
- Ericsson, K. A. & Simon, H. A. (1993) *Protocol analysis: Verbal reports as data* (Verb. Aufl.). Cambridge, MA: MIT Press.
- Forbes, J., Huang, T., Kanazawa, K. & Russell, S. (1995) The BATmobile: Towards a Bayesian Automated Taxi. In: C.S. Mellish (ed.), *Proceedings of the Fourteenth International Joint Conference on Artificial Intelligence* (pp. 1878--1885). San Mateo, CA: Morgan Kaufmann.
- Gathercole, S.E. & Baddeley, A.D. (1993) *Working memory and language*. Hove, UK: Erlbaum.
- Grosz, B.J. & Sidner, C.L. (1986) Attention, intentions, and the structure of discourse. *Computational Linguistics* 12, 175--204.
- Jameson, A. (1996 a) Inferenzen über das Arbeitsgedächtnis eines Dialogpartners. In: R.H. Kluwe & M. May (Hrsg.), *Proceedings der 2. Fachtagung der Gesellschaft für Kognitionswissenschaft* (S.59--61). Hamburg: Universität der Bundeswehr.
- Jameson, A. (1996b) Numerical uncertainty management in user and student modeling: An overview of systems and issues. *User Modeling and User-Adapted Interaction* 5, 193--251.
- Jameson, A. (1997) Wie gehen wir mit dem Arbeitsgedächtnis unserer Dialogpartner um? Eine Integration von Ergebnissen aus vier Forschungsrichtungen. In: H. Mandl (Hrsg.), *Bericht über den 40. Kongreß der Deutschen Gesellschaft für Psychologie*. Göttingen: Hogrefe.
- Just, M. A. & Carpenter, P.A. (1992) A capacity theory of comprehension: Individual differences in working memory. *Psychological Review* 99, 122--149.
- Neapolitan, R.E. (1990) *Probabilistic reasoning in expert systems: Theory and algorithms*. New York: Wiley.
- Nicholson, A.E. & Brady, J.M. (1994) Dynamic belief networks for discrete monitoring. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics* 24, 1593--1610.
- Pearl, J. (1988) *Probabilistic reasoning in intelligent systems: Networks of plausible inference*. San Mateo, CA: Morgan Kaufmann.
- Rich, E. (1979) User modeling via stereotypes. *Cognitive Science* 3, 329--354.
- Rich, E. (1989) Stereotypes and user modeling. In: A. Kobsa & W. Wahlster (eds.), *User models in dialog systems* (pp. 35--51). Berlin: Springer.
- Schäfer, R. & Weyrath, T. (1997) Assessing temporally variable user properties with dynamic Bayesian networks. In: A. Jameson, C. Paris & C. Tasso (eds.), *User modeling: Proceedings of the Sixth International Conference, UM97*. Wien: Springer Wien New York. Elektronisch verfügbar über <http://um.org>.
- Schegloff, E. A. & Sacks, H. (1973) Opening up closings. *Semiotica* 8, 289--327.
- Shachter, R.D. (1986) Evaluating influence diagrams. *Operations Research* 34, 871--882.
- Spies, M. (1993) *Unsicheres Wissen. Wahrscheinlichkeit, Fuzzy-Logik, neuronale Netze und menschliches Denken*. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag.
- Wahlster, W., Jameson, A., Ndiaye, A., Schäfer, R. & Weis, T. (1995) Ressourcenadaptive Dialogführung: Ein interdisziplinärer Forschungsansatz. *Künstliche Intelligenz* 9 (6), 17--21.
- Weis, T. (1997) Resource-adaptive action planning in a dialogue system for repair support. *Proceedings der 21. Deutschen Jahrestagung für Künstliche Intelligenz, Freiburg im Breisgau*. Informatik aktuell. Berlin: Springer.