

## Expertensysteme

Von PETER NAEVE, Bielefeld

**Zusammenfassung:** Es werden die zwei grundsätzlichen Ansätze zur Konstruktion von Expertensystemen dargestellt, nämlich der extensionale und der intensionale Ansatz. Die Schwierigkeiten, die in dem jeweiligen Ansatz bei der Abbildung und Verarbeitung von Unsicherheit auftreten, haben dabei besonderes Gewicht. Die Skepsis des Autors bezüglich der „Existenz“ von Expertensystemen wird nicht verhehlt.

**Summary:** Two essential approaches to the problem of building an expert system are elaborated. The extensional or rule based approach seems to be more popular in Germany whereas the intensional approach should suite the statisticians more for it stresses the important role of distribution functions in modelling uncertainty. The author has a sceptical answer to the question if there ever would exist something that might be called an expert system

### Vorbemerkung

Obwohl der Vortrag unter dem Leitthema der Hauptsitzung steht: Computer und Statistik, wird der Computer keine direkte Rolle spielen. Daran ändert die auch von mir geteilte Ansicht nichts, daß Expertensysteme ohne Computer nicht existieren können – ein Computer ist aber nur notwendig und nicht hinreichend für die Existenz eines Expertensystems. Oder um ein Wort LICHTENBERGS abzuändern, nicht alles was auf einem Rechner als Expertensystem angeboten wird, ist eines. Einem Ausspruch des wohl zur Zeit nicht zitierfähigen Karl M. folgend, ist es die Absicht dieses Vortrages, die Welt der Expertensysteme erst einmal wieder auf die Füße zu stellen. Will sagen, es sollen die grundlegenden Probleme und die entsprechenden Konzepte zu ihrer Lösung dargestellt werden, ehe man sich mit einem dieser vermeintlich realen Expertensysteme auf einem realen Computer beschäftigt.

Es geht darum, in bezug auf Expertensysteme eine analoge Haltung zu der zu entwickeln, die sich in dem nachstehenden Zitat des leider zu früh verstorbenen Kollegen TOMAS HAVRÁNEK<sup>1</sup> findet:

‘Since in Czechoslovakia up to now there are no real parallel systems, I am grateful to my friend and colleague Petr Hájek for convince me of the usefulness of abstract thinking.’

Es sei aber bereits hier nicht verhehlt, daß der Verfasser die Meinung vom leider auch zu früh verstorbenen Kollegen BERND STREITBERG teilt, die in dessen Arbeit<sup>2</sup> „On the nonexistence of expert systems“ schon im Titel zum Ausdruck kommt.

„Statistik und Expertensysteme“ läßt zwei Interpretationen zu:

<sup>1</sup>HAVRÁNEK [1990]

<sup>2</sup>STREITBERG [1988]

- Ein Expertensystem für die „Erleichterung“ der Arbeit des Statistikers oder gar für die „Freisetzung“ des Statistikers
- Statistik als unverzichtbarer Bestandteil eines Expertensystems.

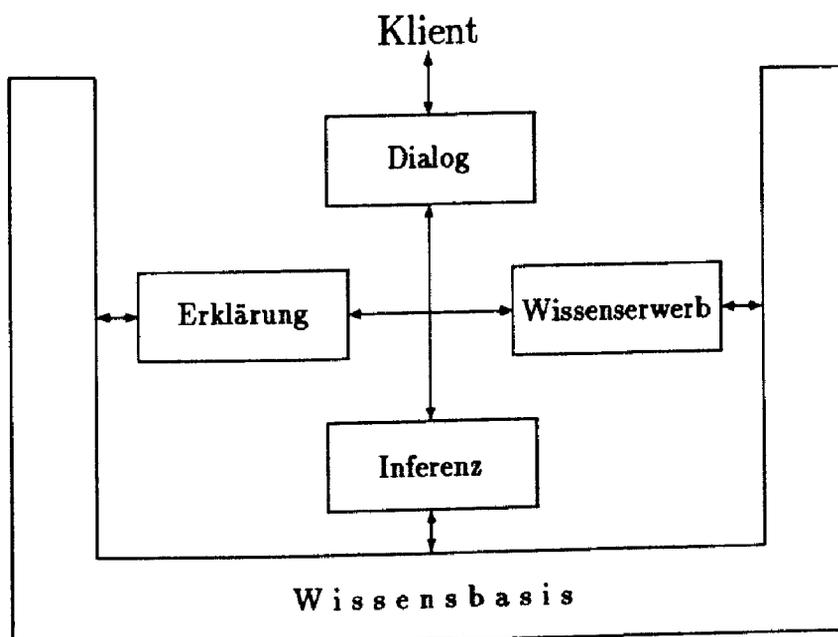
Diese Arbeit wird sich mit beiden Aspekten befassen. Das Schwergewicht wird dabei aber auf dem zweiten Punkt liegen.

Der Plan für die Abhandlung des Themas ist wie folgt:

1. Einleitung
2. Was ist ein Expertensystem?
  - Regelbasierte Systeme
  - Intensionale Systeme
3. Expertensysteme für Statistik
  - Das Projekt SETUP
  - Lehren
4. Statistik in regelbasierten Systemen
  - Das MYCIN-Paradigma
  - Dynamik und Wahrscheinlichkeit
5. Probabilistische Expertensysteme
  - Bedingte Unabhängigkeit und graphische Modelle
  - Das Beispiel
6. Ein unversöhnlicher Schluß

## I. Was ist ein Expertensystem?

Als Ende der 70er Anfang der 80er Jahre plötzlich alle begannen, von Expertensystemen zu sprechen oder sich solchen gegenüber sahen, war es auch selbstverständlich, daß man mit einem Bild wie dem folgenden die Essenz eines Expertensystems darstellen zu können meinte.



Diese fünf Komponenten wurden als notwendige Bestandteile eines Expertensystems angesehen. Ehrlicher sollte man sagen, es waren die fünf Probleme, die man erst einmal befriedigend lösen mußte, ehe man an die Konstruktion eines Expertensystems denken konnte. Denn schon damals klappte eine gewaltige Lücke zwischen marketingmäßig angekündigten und tatsächlich realisierten Ideen.

Der Leser mag daher den guten Rat annehmen: Was auch immer ihm als Expertensystem angeboten wird, es – oder besser sein „Erbauer“ – muß sich die Frage gefallen lassen, man sollte sie ihm auch nicht ersparen, wie er sich denn zu den fünf Problemkreisen verhalten hat.

- Wissensbasis: In einem bestimmten Representationsschema gespeichertes Wissen.
- Dialogkomponente: Für den (möglichst natürlichsprachlichen) Dialog zwischen Klient und System verantwortlich.
- Inferenzkomponente: Leitet die Antworten auf die Fragen des Klienten aus der Wissensbasis her.
- Erklärungskomponente: Erklärt, wie eine Antwort gefunden wurde.
- Wissenserwerbskomponente: Erweitert die Wissensbasis um zusätzliches Wissen, das zum Beispiel während eines Dialoges mit dem Klienten anfällt.

Nimmt man alles „Wissen“ aus dem Expertensystem, bleibt die sogenannte Expertensystemschale übrig. Von dieser wurde dann behauptet, sie sei leer. Das „Bauen“ eines Expertensystems reduzierte sich dann – natürlich sehr überspitzt gesagt – auf den Frankenstein-verdächtigen Vorgang des Ausgießens des Wissens aus dem Kopf des Experten in die leere Expertensystemschale. Leider stellte es sich nur allzubald heraus, daß die Vorstellung einer leeren Schale ein Irrtum war. Die Inferenzkomponenten enthielten in der Regel auch sogenanntes domain-spezifisches Wissen, das dann in dem neuen Anwendungsbereich zu Schwierigkeiten führte, weil die Inferenzstrategien des dortigen Experten nur schwer mit den eingebauten Strategien der Inferenzkomponente in Deckung zu bringen waren.

Die nächsten beiden Abschnitte dienen einer globalen Einteilung der Expertensysteme nach ihrer Art, wie sie grundsätzlich Wissen repräsentieren.

### A. Regelbasierte Systeme

Dem Beispiel PEARLS<sup>3</sup> folgend wollen wir Expertensysteme in extensionale und intensionale Systeme einteilen. Erstere sind vielleicht besser bekannt als sogenannte regelbasierte Systeme. Stellvertretend wollen wir das von der Firma NIXDORF (nun mit Siemens vereint) ver- und betriebene System TWAICE betrachten. Im Handbuch<sup>4</sup> findet sich die folgende „Definition“ für eine Regel in diesem auf PROLOG aufgesetztem System.

<sup>3</sup>PEARL [1988]

<sup>4</sup>Nixdorf [ohne Jahresangabe]

```

RULE      <regelnummer> <regeltyp>
(
  TRIGGER <obj_1>.<attr_1>
        ...
        <obj_n>.<attr_n>)
IF        <Praemisse>
THEN      <Elementarkonklusion_1> <cf_1>
AND       <Elementarkonklusion_2> <cf_2>
...
AND       <Elementarkonklusion_n> <cf_n>
END

```

Es bedeuten

- <regelnummer>  
Nummer der Regel – mögliche Werte: PROLOG abhängig
- <regeltyp>  
Typ der Regel – mögliche Werte: BACKWARD, FORWARD, SELFREF
- <obj> bzw. <attr>  
Name des Objekts bzw. Attributs – mögliche Werte: Zeichenketten mit max. 60 Zeichen
- <cf>  
Konfidenz der (Elementar-)Konklusion – mögliche Werte: ganze Zahlen zwischen 0 und 1000
- <Praemisse>  
Die Prämisse einer Regel setzt sich aus Elementarprämissen zusammen, die durch AND und OR verknüpft werden können. Elementarprämissen können außerdem durch vorgestelltes NOT negiert werden.

Es gibt verschiedene Typen von Elementarprämissen. Die Einzelheiten interessieren für unsere Betrachtungen aber nicht.

Neben Regeln enthält die Wissensbasis noch in Form sogenannter <Objekt, Attribut, Wert>-Tripel gespeichertes Faktenwissen. Solches Faktenwissen fällt zum Beispiel im Verlauf eines Dialoges (einer sogenannten Konsultation) an und wird von der Wissenserwerbskomponente in der Wissensbasis abgelegt. Natürlich kann man mit der Wissenserwerbskomponente auch weitere Regeln in die Wissensbasis aufnehmen.

### B. Intensionale Systeme

Intensionale Systeme sollten eigentlich für jeden Statistiker die erste Wahl sein, wenn er sich denn schon mit Expertensystemen beschäftigen (muß) will. Setzen sie doch bei der Repräsentation des Wissens dort an, wo sich ein Statistiker zu Hause fühlt. Unser Wissen, besser unser Wissen über Unsicherheit, haben wir bisher erfolgreich mit dem Tupel (Zufallsvariablen, Verteilungsfunktion) modelliert. Und genau dort beginnt auch der intensionale Ansatz.

Betrachtet werden  $n$  Zufallsvariablen

$$X_1, \dots, X_n$$

und ihre gemeinsame Verteilung

$$F(X_1, \dots, X_n).$$

Alles was sich an Fragen aufdrängt, läßt sich dann auf die Betrachtung von Teilmengen dieser Zufallsvariablen zurückführen. Die Antworten werden mit Hilfe der Randverteilungen

$$F(X_1), \dots, F(X_n)$$

$$F(X_1, X_2), F(X_1, X_3), \dots, F(X_{n-1}, X_n)$$

...

oder der bedingten Verteilungen

$$F(X_1|X_2, \dots, X_n), \dots, F(X_n|X_1, \dots, X_{n-1})$$

$$F(X_1, X_2|X_3, \dots, X_n), \dots, F(X_{n-1}X_n|X_1, \dots, X_{n-2})$$

...

gefunden. In der Theorie ist der intensionale Ansatz sicher (für einen Statistiker) bestechend. Die Probleme liegen in der Aufstellung der  $n$ -dimensionalen Verteilungsfunktion –  $n$  ist in den Anwendungen sehr groß – und in der Manipulation der  $m$ -dimensionalen bedingten und Rand-Verteilungen.

## II. Expertensysteme für Statistik

In dem eingangs zitierten Paper von STREITBERG<sup>5</sup> liest man:

At scientific conferences on statistics, an ever growing number of papers on expert systems is presented. Unfortunately, merely proposals are usually announced. After several such presentations, at COMPSTAT 1986 in Rome, no one dared (or cared) anymore to ask the decisive question, that is, which part of these proposals had actually been implemented.

Um nicht in den Verdacht zu kommen, den vielen Ankündigungen jetzt einen zusammenfassenden Bericht über „the state of the art“ folgen zu lassen, ohne je so etwas wie eine „Realisation“ eines Expertensystems gesehen zu haben, soll in diesem Abschnitt über ein größeres Projekt berichtet werden, das gemeinsam von der Firma Nixdorf und der Universität Bielefeld durchgeführt wurde.

<sup>5</sup>STREITBERG [1988]

Allerdings kann auch ich nicht eine lauffähige Version vorweisen, die jeder-  
man zu Testzwecken anfordern könnte. Aber es ist in der Tat kein Bericht  
der Art „how I will do it“, er ist eher zu charakterisieren als „how we failed  
- better - why we failed“.

### A. Das Projekt SETUP

Als die Arbeit am Expertensystem SETUP geplant wurde, stand uns das  
folgende Ziel für die Kooperation vor Augen:

Ziel der gemeinsamen Arbeit ist die Entwicklung von einem Expertensy-  
stem zur Beratung über den Einsatz von Statistik-SW-Paketen. Das Exper-  
tensystem soll mit den Statistik-Paketen integriert sein, so daß die jeweiligen  
Steuerparameter, Daten und (Zwischen-)Ergebnisse des Statistik-Paketes vom  
Expertensystem jederzeit inspiziert und gesteuert werden können ...

Es handelt sich um eine Art doppelten Test. Aus der Sicht von

**Statistik:** Kann man dort Expertensysteme sinnvoll einsetzen oder wird das  
bereits durch Statistikpakete (man denke an SPSS in den Sozialwissen-  
schaften) angerichtete Unheil nur potenziert?

**TWAICE:** Kann diese Shell die Anforderungen aus der Statistik erfüllen?<sup>6</sup>

Im Pflichtenheft<sup>7</sup> wurden diese Ziele konkretisiert. Zuvor wurde dort der  
statistische Experte (genauer: seine statistische Expertise) beschrieben.

1. Statistische Expertise bedeutet die Fähigkeit, Modelle für die Beschrei-  
bung und Analyse von Problemen zu finden. Dies setzt vor allem voraus,  
daß im Dialog mit dem Klienten, d. h. dem Problemeigner, ein gemeinsa-  
mer Hintergrund aus Statistik und substanzwissenschaftlichem Problem-  
bereich aufgebaut wurde. Für den statistischen Hintergrund wird dabei  
auf die Methoden- und Modellkenntnisse des Statistikers sowie die sta-  
tistischen Vorkenntnisse des Klienten zurückgegriffen. Der Prozeß des  
Aufbaus gemeinsamen Hintergrundwissens im eigentlichen Problembe-  
reich speist sich aus den spezifischen Kenntnissen des Klienten und Er-  
fahrungswissen des statistischen Experten. Für diesen ist ein Denken in  
Analogien dabei eine wertvolle Hilfe.
2. Statistische Expertise bedeutet Methodenwissen, d. h. Wissen um Prä-  
missen, Algorithmik, Numerik und Datenein- bzw. Resultatsausgabe sta-  
tistischer Verfahren. Es geht dabei also neben dem „Wie macht man es“  
auch immer um das „Wann sollte (darf) man es machen“. Letzteres ist  
dabei nicht als beckmesserische Regelanwendung zu verstehen. Es be-  
deutet die Fähigkeit, die Auswirkung von Prämissenverletzungen auf die  
zulässige Resultatsinterpretation zu übertragen.

<sup>6</sup>NAEVE / METZING [1987]

<sup>7</sup>NAEVE / STEINECKER [1987]

3. Statistische Expertise bedeutet aber bei der Anwendung von Computern auch immer statistische Software-Expertise. Jedes Software-Paket stellt nicht nur eine Sammlung von statistischen Verfahren dar, sondern enthält auch immer bereits (wenn auch nicht explizit formuliert) bestimmte Modellbildungsstrategien. Statistische Software-Expertise steht also für die sich in der jeweiligen Software konkretisierte Ausprägung der beiden vorstehenden Interpretationen von statistischer Expertise.  
Hinzu kommt noch EDV-Expertise, die notwendig ist, um die spezielle statistische Software in der jeweiligen Hard- und Softwareumgebung benutzen zu können. Dies bedeutet insbesondere die Fähigkeit, in Fehler-situationen die Verantwortlichkeit von (d. h. Zuordnung zu) Benutzer, Hardware, Betriebssystem und statistischem Paket klären zu können.
4. Statistische Expertise bedeutet die Fähigkeit, Daten beschreiben zu können. Dies setzt das Konzept eines abstrakten Datenmodells voraus. Dieses abstrakte Datenmodell wird vom Experten in der jeweiligen Problemsituation durch Auffüllen mit adäquaten Werten in den problemrelevanten Teilen zu einem konkreten Datenmodell umgeformt. Der Zusammenhang zwischen abstraktem Datenmodell und konkretem Datenmodell ist vergleichbar dem Zusammenhang zwischen Schema und Subschema in einem Datenbankmodell.
5. Statistische Expertise bedeutet aber immer didaktische Expertise. Der Klient soll sein Problem am Ende der Konsultation besser durchschauen und mehr von Statistik wissen als zu Beginn. Ein guter Statistiker wird in der Regel mehr Fragen stellen helfen und (hoffentlich) auch beantworten als die, mit denen der Klient zu ihm kam. So wird im Idealfall in einer Konsultation nicht nur das augenblickliche Problem gelöst, sondern auch eine ganze Reihe zukünftiger Probleme zumindest in Ansätzen.

Dann gelangte man zu den folgenden Teilzielen:

- i) Prototypische Implementierung von Beispielen statistischer Expertise der Typen 1 – 4.
  - Zu Typ 1:** Unterstützung der Modellierung durch Anpassung der vorhandenen Daten an (inhaltliche) Modellvorstellungen durch Transformation der Daten. Hat z. B. das Problem etwas mit Längen und Gewichten zu tun, so ergibt sich oft ein einfacheres Modell (das auch gut inhaltlich interpretierbar ist), wenn man eine kubische Transformation anwendet. Pufferwirkungen chemischer Substanzen lassen sich als Transformationen mittels zum Pufferstoff umgekehrt proportionaler Gewichte abbilden usw. Die Modellierung soll auch durch Empfehlungen zum weiteren Vorgehen unterstützt werden, wie z. B. eine Residualanalyse zur Modellevaluation, die wiederum in eine Transformationsempfehlung münden kann.
  - Zu Typ 2:** Koppelung von Modell, Daten und Methoden. Hierzu gehört die Möglichkeit einer datengesteuerten Überwachung der Transformation.

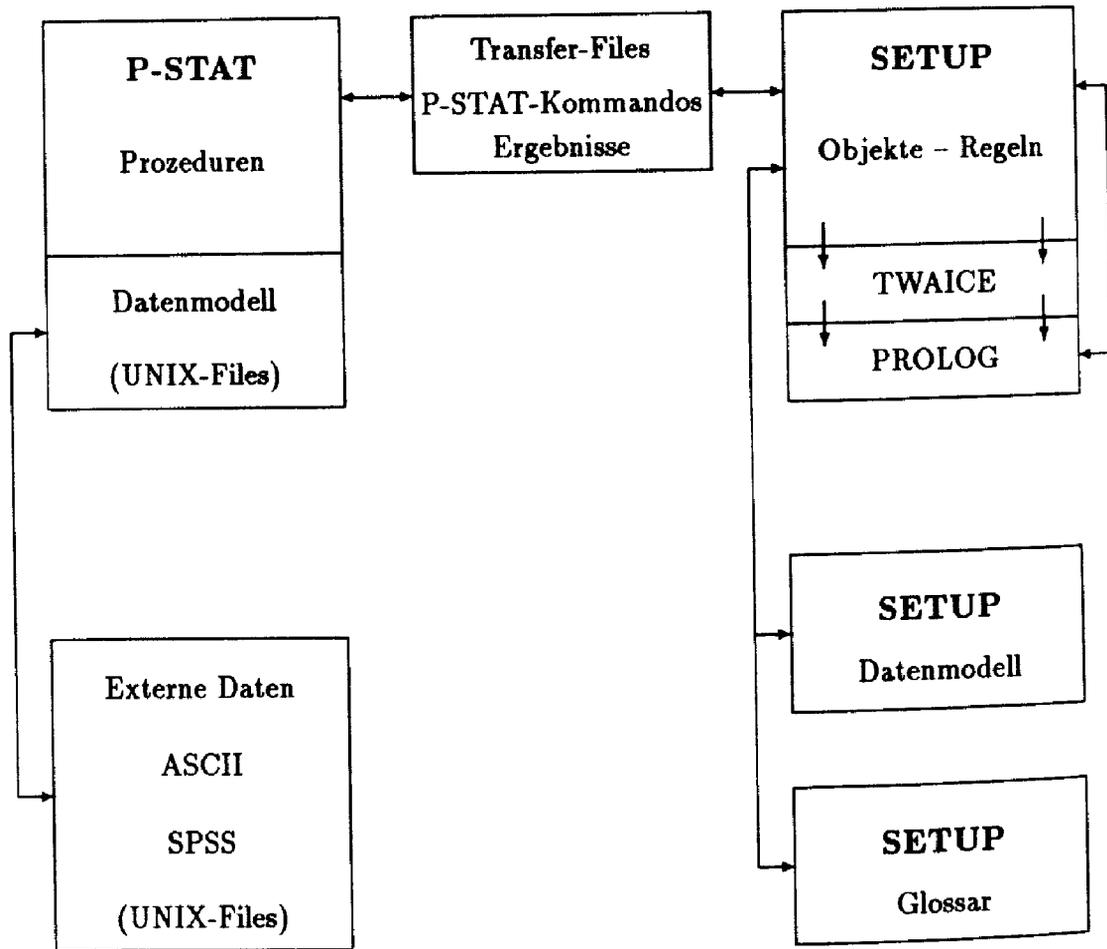
Z. B. ist der Wertebereich der Daten so, daß auch 0 bzw. negative Zahlen auftreten können, ist eine logarithmische Transformation nicht angebracht; ist die Metrik nur ordinal, so sind auf der Normalverteilung basierende Methoden wenig geeignet usw.

**Zu Typ 3:** Auswahlunterstützung von P-STAT-Komponenten und Parameterempfehlung aufgrund der Datensituation. Gedacht ist an eine Liste kontextabhängiger geeigneter Methoden, die jeweils durch Modell- und Datensituation bestimmt wird und dem Expertensystem und dem Benutzer zur Auswahl zur Verfügung steht.

**Zu Typ 4:** Umsetzung des abstrakten Datenmodells. Die im abstrakten Datenmodell zusammengefaßten Angaben (Attribute) zu einer statistischen Variablen lassen sich zu einigen Gruppen zusammenfassen.

- ii) Einschleusungsmöglichkeit von Daten in die P-STAT-Welt, in der die eigentlichen statistischen Berechnungen (number crunching) stattfinden, während das Interpretieren und Schließen in dem in TWAICE eingebetteten Expertensystem passiert. Der Benutzer soll bei der Anlegung von P-STAT-Files, wenn die Daten extern sind (ASCII-Files, SPSS-Files u. ä.) oder aber von SETUP generiert wurden (Transformationen, Ergebnisdaten), unterstützt werden.
- iii) Koppelung TWAICE - P-STAT, d. h. Synchronisation des Dialogs Benutzer - TWAICE und Benutzer - P-STAT sowie Transfer von Daten (Parameter, Ergebnisse) zwischen der TWAICE-Welt und der P-STAT-Welt.
- iv) Errichtung eines Glossars, das
  - a) Begriffe erklärt
  - b) eine Analysephilosophie vermittelt.
 In dieser Komponente wird auch teilweise statistische Expertise vom Typ 5 eingeschlossen sein.
- v) Implementierung einer „Mitschaumöglichkeit“ für Graphiken. Graphische Ausgabe ist für viele statistische Pakete eine wichtige Form für die Ergebnisdarstellung. Damit entsteht aber sofort das Problem, wie sieht SETUP die Graphik, die den Klienten von P-STAT geliefert wurde? Anders als der statistische Experte kann ja das elektronische „Abbild“ SETUP nicht direkt auf die Graphik schauen. (Übrigens ist hier auch ein Teilproblem des in iii) erwähnten Synchronisationsproblems angesprochen: Gewisse Teile des Dialogs „Benutzer - P-STAT“ müssen immer wieder reproduziert werden können, z. B. die bewußte Graphik.)

Dies führte zu folgender Architektur aus der sich schon ablesen läßt, daß es - eine nicht nur damals gültige Aussage - erhebliche „Programmierprobleme“ zu lösen gilt.



Wichtige Bausteine von SETUP sind:

- Transfer-file-templates
  - P-STAT-Kommandos
  - P-STAT-Ergebnisse
 Bearbeiter: UNIX, PROLOG
- Glossar-System
  - Texthaltung
  - Indexsystem (Inhaltsverzeichnis)
  - Erweiterungswunschsammlung
 Bearbeiter: UNIX, PROLOG, TWAICE
- Datenmodell
  - Verwaltung über Inhaltsverzeichnis
  - Editiermöglichkeit
  - Konsistenzprüfung
 Bearbeiter: UNIX, PROLOG, TWAICE
- Replay-Komponente

- Verwaltung des letzten P-STAT-Ergebnisses  
 Bearbeiter: PROLOG, TWAICE

### B. Lehren

Im vorigen Abschnitt war zur Zielsetzung formuliert worden: „Es handelt sich um eine Art doppelten Test. Aus der Sicht von

**Statistik:** Kann man dort Expertensysteme sinnvoll einsetzen oder wird das bereits durch Statistikpakete (man denke an SPSS in den Sozialwissenschaften) angerichtete Unheil nur noch potenziert?

**TWAICE:** Kann diese Shell die Anforderungen aus der Statistik erfüllen?“

Ehe die in den vorstehenden Abschnitten enthaltenen Antworten noch einmal zusammenfassend kommentiert und gewürdigt werden, sei aber noch auf folgenden (nicht unwichtigen) Punkt hingewiesen.

Das System SETUP wurde auf einem Rechner HP 9000/300 mit Hilfe (kommerziell) verfügbarer, allgemein zugänglicher Software (TWAICE, IFPROLOG, P-STAT) unter dem Betriebssystem UNIX realisiert – also keine spezielle Umgebung, keine Laborsituation, sondern 'hic Rhodos hic salta'. Damit unterscheidet es sich schon deutlich von den meisten anderen auf Tagungen stolz präsentierten Systemen. Und wie der Abschnitt A zeigt: Es läuft!

Verglichen mit manch einem der erwähnten Produkte, läuft da auch schon eine ganze Menge (gemessen in Regeln usw.) zusammen. Man kann nach SETUP sagen, die Koppelung von TWAICE mit einem anderen (nicht auf TWAICE hin entwickelten) Software-Produkt ist nicht nur auf dem Papier möglich.

Was hat sich nun aus statistischer Sicht ergeben? Ohne jegliche Einschränkung läßt sich sagen, daß der statistische Experte ungemein bei dem Prozeß der Expertensystemerstellung profitiert. Die in den Expertensystem-Shell implementierten KI-Ideen und -Prinzipien sind hervorragende Katalysatoren für einen sonst oft nicht durchgeführten Prozeß der Selbstreflexion.

Es zeigt sich aber auch, daß statistische Expertise mehr ist, als sich im Umgang mit Regeln und Objekten abbilden läßt. Aber auch das, was sich mit diesen Werkzeugen erfassen ließe, wird zur Zeit nicht in ausreichendem Maße unterstützt. Dies trifft nicht nur auf TWAICE zu, sondern liegt wohl an dem grundlegenden EMYCIN-Paradigma. Für die Inferenzkomponente ist dies an anderer Stelle<sup>8</sup> näher ausgeführt.

Im Verlauf der Erstellung von SETUP gelangte man aber auch aus statistischer Sicht zu neuen Bewertungskriterien vorhandener Software. Hier seien nur angeführt die fehlenden 'Cognostics'<sup>9</sup>; dieser Punkt wurde wohl nur durch die Erklärungskomponente des Expertensystems deutlich. Kurz gesagt: Die

<sup>8</sup>WESTERHOFF / NAEVE [1988]

<sup>9</sup>Dieser Begriff ist von TUKEY [1982] geprägt worden: „A cognostics is a diagnostic to be interpreted by a computer rather than by a human“.

statistische Software enthält dem Benutzer im Prinzip vorhandene Information vor. Auch das Wesen der Interaktivität läßt sich wohl nur vor dem Hintergrund der 'strikten Zielgerichtetheit' von TWAICE 2.5 erkennen.

Was läßt sich über das Ergebnis aus TWAICE-Sicht sagen? Daß die Koppelung zweier nicht füreinander geschaffener Software-Produkte gelang, spricht bei allen folgenden Kritikpunkten auch für TWAICE. Die vielen 'technischen' Probleme, die im Verlauf der Arbeit an SETUP auftraten und von denen hier einige ausführlicher diskutiert wurden, sind aber Hinweis genug, daß das Werkzeug TWAICE nicht flexibel und mächtig genug ist, um mit den Problemen fertig zu werden, die sich aus dem - aus der Sicht einer Expertensystem-Shell wohl auch berechtigten - Führungsanspruch ergeben. TWAICE ist nicht so omnipotent wie es sein sollte. In der schon erwähnten Arbeit<sup>10</sup> sind Anforderungen und ihr Nicht-Einlösen in TWAICE 2.5 detaillierter beschrieben.

Notwendig sind auch weitere Schnittstellen, z. B. zu Datenbanken - wobei auch die Datenhaltung von Statistikpaketen den Rang einer einfachen Datenbank beanspruchen kann.

Das Problem TWAICE und Graphik soll hier nicht vertieft werden. Aus SETUP-Sicht liegt die Hauptschwierigkeit in dem Problem des 'Anschauens' von Graphik durch Benutzer *und* SETUP. Diese Problematik kann nicht allein TWAICE angelastet werden. Wie an verschiedenen Stellen ausgeführt wurde, muß den Produzenten von Graphik die Bereitstellung von Graphik-Cognostics aufgetragen werden.

Allerdings könnte man die Benutzeroberfläche von SETUP (Ankündigungen, Fragen, Hilfen) bestimmt verbessern, wenn es von TWAICE aus eine Schnittstelle zu dieser Device-unabhängigen Graphik gäbe.

Faßt man das Ergebnis von einer höheren Warte ins Auge, so läßt sich doch wohl sagen, daß die Koppelung von TWAICE und P-STAT mehr brachte als die Addition der Teile versprach, wenn auch unter den gegebenen Verhältnissen kein auf Produktion (täglichen Einsatz) ausgelegtes System möglich war.

Welche Lehre kann man für zukünftige Entwicklungen ziehen?

Soll man die Expertensystem-Shells mit immer mehr Möglichkeiten und Fähigkeiten (Schnittstellen, 'Programmierbarkeit' usw.) ausstatten, damit die Shells mit jedem beliebigen bereits vorhandenen Paket zusammenarbeiten können? Oder soll man jeweils - etwas gegen den bisherigen Anspruch der Shells - eine dedizierte Shell für das fragliche Paket bauen?

Faßt man die Kritik weiter und wendet sie nicht nur gegen den letzten in den Markt Eingetretenen, nämlich TWAICE, sondern auch gegen die Alteingesessenen, hier P-STAT, dann dürfte aus der Sicht eines Statistikers die Frage ganz anders beantwortet werden. Wie an anderer Stelle<sup>11</sup> ausgeführt, benötigt der Statistiker eine (computergestützte) statistische Umgebung. Weder P-STAT noch SETUP erfüllen diesen Anspruch.

<sup>10</sup>WESTERHOFF / NAEVE [1988]

<sup>11</sup>NAEVE [1986]

Gesucht ist eine Umgebung, in der (in herkömmlicher Terminologie) neue Basisstrukturen und Operationen zur Verfügung stehen. So wie uns 'integer', 'integer array' und Operationen wie '+' oder 'len' usw. heute vertraute Komponenten sind, benötigen wir Strukturen zur Wissensrepräsentation und zugehörige Operationen (z. B. backward chaining). Aber diese neuen Elemente müssen in einer Umgebung zusammen mit allen anderen bewährten Strukturen und Operationen bereitgestellt werden.

Natürlich ist dies noch Wunschtraum. Vergleicht man aber ein statistisches System wie S mit P-STAT, so gibt dies Mut, diesen Traum zu träumen. Er läßt sich erfüllen.

### Allgemeine Erkenntnisse zu Shells

TWAICE war bekanntlich eine sogenannte Expertensystem-Shell. Als solche war auch sie nicht frei von den folgenden nicht gerne offengelegten Defekten.

Die Shells sind genau betrachtet doch nicht leer. Im allgemeinen kommt den Shells die Bezeichnung 'hybrides System' zu, d. h. sie unterstützen

- verschiedene Formen der Wissensrepräsentation
- verschiedene Formen der Inferenz.

Damit entsteht aber das Problem des Metawissens. Wie geht das System damit um, d. h.

- wie wählt es zwischen verschiedenen Inferenzmethoden aus, z. B. erst forward, dann backward, immer zuerst Tiefe, dann Breite usw.?
- welche Einflußmöglichkeiten hat die Wissensrepräsentation: frame versus production rule?

Das Paradigma der Expertensystem-Shell ist nicht offengelegt – geschweige denn offen für Modifikation durch den Benutzer.

Über Details des Projekts (mehr von seinen Schwierigkeiten) ein statistisches Expertensystem auf der Basis einer verfügbaren Shell und mit verfügbarer Statistiksoftware zu erstellen, wird vom Verfasser an anderer Stelle<sup>12</sup> berichtet.

### III. Statistik in regelbasierten Systemen

Die Abbildung des Wissens in Form von z. B. Regeln und <Objekt, Attribut, Wert>-Tripeln ist nun aber nur ein erster Schritt auf dem Wege zu einem Expertensystem. Es gilt noch der Tatsache Rechnung zu tragen, daß unser Wissen in der Regel nicht nur von der Form ist: *wenn es regnet, ist die Straße naß*, sondern daß wir viel öfter über Wissen der Art: *wenn die Daten nicht symmetrisch sind, kann es mit einem t-Test Schwierigkeiten geben* verfügen.

Expertensysteme müssen daher auch in Situationen von Unsicherheit noch zu Schlüssen kommen, die dann natürlich nicht in Form apodiktischer Wahrheiten einher kommen dürfen, sondern die ihnen unvermeidlich noch anhaftende Unsicherheit mit transportieren.

<sup>12</sup>NAEVE [1986]

Es galt daher, einen Weg zu finden, um Unsicherheit zu modellieren. Die Anhänger eines regelbasierten Ansatzes für die Modellierung eines Expertensystems waren sich in dem Urteil, daß klassische Statistik und Wahrscheinlichkeitsrechnung nicht angemessen für die benötigte Abbildung und Manipulation von Unsicherheit in Expertensystemen sei, einig, nicht aber in der Frage, wie denn die geeignete Alternative aussehen sollte. Als Folge wurde der künftige Expertensystembauer mit einer Fülle<sup>13</sup> von Vorschlägen überhäuft, so daß er – wie immer wieder zu beobachten war – oft gar keine Unsicherheit in seinem Endprodukt abbildete.

Hier soll es bei diesem Hinweis bleiben. Exemplarisch wird im nächsten Abschnitt die MYCIN-Lösung für die Modellierung von Unsicherheit durch sogenannte „certainty factors“ dargestellt.

### A. Das MYCIN Paradigma

Die bereits vorgestellte Expertensystemschaale TWAICE gehört zu der Familie von Schalen, die aus MYCIN hervorgegangen sind. Dort wie auch hier wird die Unsicherheit (oder besser Sicherheit) mit Hilfe des sogenannten „certainty factor“ modelliert. Bei TWAICE können diese Faktoren Werte zwischen 0 und 1000 (Sicherheit) annehmen. Man kann Fakten und Regeln mit einem „certainty factor“ belegen.

Beim Ziehen von Schlüssen werden Fakten und Regeln benutzt, um neue Fakten zu generieren. Es entsteht dabei dann das Problem, welchen Werte dem „certainty factor“ des neuen Faktus zugewiesen werden soll. TWAICE kennt die nachstehenden Regeln:

(FAKT n) P<sub>1</sub> (cf<sub>1</sub>)

(FAKT m) P<sub>2</sub> (cf<sub>2</sub>)

P<sub>3</sub> = P<sub>1</sub> AND P<sub>2</sub>

P<sub>3</sub> (cf<sub>3</sub>)

P<sub>4</sub> = P<sub>1</sub> OR P<sub>2</sub>

P<sub>4</sub> (cf<sub>4</sub>)

Ist eine Prämisse als Konjunktion zweier (Teil)Prämissen mit bekannten Faktoren schreibbar, dann berechnet sich ihr Faktor gemäß

$$cf_3 = \min(cf_1, cf_2).$$

Ist dagegen eine Prämisse als Disjunktion zweier (Teil)-Prämissen darstellbar,

<sup>13</sup>Einen Eindruck vermittelt das 2. Kapitel von NEAPOLITANO [1990] oder die Arbeit von SPIEGELHALTER [1986]

so ergibt sich ihr Faktor aus denen der Teile zu

$$cf_4 = \max(cf_1, cf_2).$$

Wie gesagt, auch Regeln können mit einem „certainty factor“ versehen sein. Dieser wird dann an die Konklusion der Regel – den abgeleiteten Fakt weiter gegeben. Es kann nun sein, daß eine weitere Regel auch diesen Fakt etabliert. Die Situation ist in dem nachstehenden Code dargestellt:

```
IF P_1 THEN K (cf_1)
```

```
(FAKT n) K (cf_1)
```

```
IF P_2 THEN K (cf_2)
```

```
(FAKT n) K (cf_3)
```

Dann führt das bei dem Fakt zu einer Veränderung des „certainty factors“ nach folgender Formel (Kumulation):

$$cf_3 = \frac{cf_1 + (1000 - cf_1) * cf_2}{1000}$$

Wird eine mit einem „certainty factor“ versehene Regel in der Prämisse durch einen mit einem „certainty factor“ versehenen Fakt ausgelöst, – der nachstehende Code gibt ein Beispiel – so wird sicher der „certainty factor“ der Konklusion dieser doppelten Unsicherheit Rechnung tragen müsse.

```
(FAKT n) P (cf_1)
```

```
IF P THEN K (cf_2)
```

```
(FAKT m) K (cf_3)
```

Dies geschieht durch eine Gewichtung der Werte gemäß folgender Formel:

$$cf_3 = \frac{cf(\text{Prämisse}) * cf(\text{Konklusion})}{1000}$$

### B. Dynamik und Wahrscheinlichkeit

Die vorgestellte Lösung, Unsicherheit mit Hilfe von „certainty factors“ zu modellieren, ist nur auf den ersten Blick überzeugend. Die Mängel treten auf, wenn man die Dynamik der jeweiligen Anwendungen mit berücksichtigen will.

Damit soll insbesondere der (in der Praxis) nur allzu häufige Fall gemeint sein, daß im Verlauf der Untersuchung durch neue Erkenntnisse sich der „Wert“ der Unsicherheit – in welcher Form auch immer gemessen – eines Faktus verändert. Die im vorgehenden Abschnitt angegebene Formel für die „Kumulation“ von Unsicherheit

$$cf_3 = \frac{cf_1 + (1000 - cf_1) * cf_2}{1000}$$

regelt nur den Fall einer monotonen Veränderung, die Sicherheit nimmt zu. Der Fall, daß durch neuere Erkenntnisse sich der „uncertainty factor“ eines schon abgeleiteten – durch die Konklusion einer Regel oder die Befragung des Klienten – Faktus verringert, wird in den dem MYCIN-Paradigma anhängenden Expertensystemen in der Art des Herrn Korf gelöst<sup>14</sup>, er wird ausgeschlossen. Begründet ist dies durch die Furcht<sup>15</sup>, Inkonsistenzen in der Wissensbasis zu erhalten.

Aber auch die Vorschläge, die sich dem Problem stellen, kommen nur durch eine Reihe von ungerechtfertigten ad hoc Annahmen zu einer Lösung des als „probability propagation“ bekannten Problems. Nähere Einzelheiten kann man den bereits zitierten Arbeiten von SPIEGELHALTER<sup>16</sup> und vor allem NEAPOLITANO<sup>17</sup> entnehmen.

Ob die hier kurz geschilderte Problematik Schuld daran ist, daß man so selten einen Prototypen eines regelbasierten Expertensystems findet? Der Verfasser vermutet es. Bei seinem eigenen Projekt<sup>18</sup> wurde der Mechanismus der „uncertainty factors“ bewußt ausgeschaltet, da es um die Erprobung und Untersuchung der übrigen Bestandteile ging. Schon dabei wurde es mehr als deutlich, daß diese Art von Vorgehensweise (Expertensystemschale) für die Statistik keine Entlastung, sondern eine Belastung darstellt.

#### IV. Probabilistische Expertensysteme

In dieser Sektion soll ein etwas genauerer Blick auf die sogenannten intensionalen Systeme geworfen werden. Der Verfasser hat den Eindruck, daß dieser Ansatz in Deutschland nicht sonderlich bekannt ist. Dies ist verwunderlich, da doch, wie bereits erwähnt, die intensionalen Systeme dort ansetzen, wo auch für jeden Statistiker die Modellierung beginnt, nämlich bei der  $n$ -dimensionalen Verteilungsfunktion. Übrigens gibt es auch mindestens eine sehr entwickelte Expertensystemschale mit dem System HUGIN<sup>19</sup>. Wahrscheinlich hat die starke Betonung Bayesianischer Ansätze die Verbreitung des intensionalen Ansatzes in einer statistischen Provinz verhindert, in der nur wenig Bayesianer zu leben scheinen.

In einem ersten Abschnitt soll kurz auf die zwei wesentlichen Grundlagen intensionaler Expertensysteme eingegangen werden. Es sind dies das Konzept der bedingten Unabhängigkeit und die Möglichkeit, eine Beziehung zwischen  $n$ -dimensionalen Verteilungsfunktionen und Graphen herzustellen.

<sup>14</sup> Daß nicht sein kann, was nicht sein darf.

<sup>15</sup> Böseartig könnte man auch sagen, das Unvermögen technisch eine inkonsistente Wissensbasis zu verwalten.

<sup>16</sup> SPIEGELHALTER [1986]

<sup>17</sup> NEAPOLITANO [1990]

<sup>18</sup> Siehe vorstehende Sektion.

<sup>19</sup> ANDERSEN u. a. [1989]

### A. Bedingte Unabhängigkeit und graphische Modelle

Sind  $X$  und  $Y$  zwei Zufallsvariablen, so gehört die nachstehende „Definition“ der Unabhängigkeit von  $X$  und  $Y$ , symbolisch bezeichnet als  $X \perp\!\!\!\perp Y$  zum Repertoire eines jeden Statistikers

$$\begin{array}{ll} p(x, y) = p(x)p(y) & p(x, y) = a(x)b(y) \\ p(x|y) = p(x) & p(x|y) = a(x) \end{array}$$

Die in jeder Zeile rechts stehende Schreibweise erscheint auf den ersten Blick ungewöhnlich, wird sich aber in der Folge als sinnvoll erweisen. Bekannt ist natürlich auch die in symbolischer Form notierte Regel  $X \perp\!\!\!\perp Y = Y \perp\!\!\!\perp X$ .

Nicht so im allgemeinen Fokus – obwohl jedem sofort einleuchtend – ist das Konzept der bedingten Unabhängigkeit, das symbolisch als  $X \perp\!\!\!\perp Y | Z$  bezeichnet werden soll.

$$\begin{array}{ll} p(x, y|z) = p(x|z)p(y|z) & p(x, y|z) = a(x, z)b(y, z) \\ p(x|y, z) = p(x|z) & p(x|y, z) = a(x, z) \end{array}$$

Auch hier gilt wiederum, das für die spätere Anwendung des Konzeptes die jeweils rechts stehenden Formeln sehr nützlich sind<sup>20</sup>. Die Gültigkeit der folgenden Regel liegt auf der Hand  $X \perp\!\!\!\perp Y | Z = Y \perp\!\!\!\perp X | Z$ .

In einer Arbeit<sup>21</sup> von DAWID wird die Bedeutung des Konzeptes der bedingten Unabhängigkeit für das Verständnis einer Vielzahl von statistischen Ansätzen und Methoden gezeigt. Wie sich zeigte, eignet sich dies Konzept aber auch, um  $n$ -dimensionale Verteilungsfunktionen für die Anwendung in Expertensystemen zu erschließen.

Doch zuvor soll eine anderes Fragenpaar diskutiert werden. Läßt sich eine Beziehung zwischen Graphen und Verteilungsfunktionen herstellen? Kurz gesagt, gilt

$$F(X_1, \dots, X_n) \implies \text{Graph}$$

und

$$F(X_1, \dots, X_n) \Leftarrow \text{Graph}$$

Läßt sich also die Struktur – zu ihrer Beschreibung kann auch das Konzept bedingter Unabhängigkeit mit herangezogen werden – einer  $n$ -dimensionalen Verteilungsfunktion in Form eines Graphen darstellen? Die „Antwort“ auf beide Fragen wird in den sogenannten DAG (directed acyclic graph) gefunden. Die Einzelheiten und Einschränkungen sollen hier nicht diskutiert werden. Man findet sie in dem Buch von PEARL<sup>22</sup> oder dem von NEAPOLITANO<sup>23</sup>.

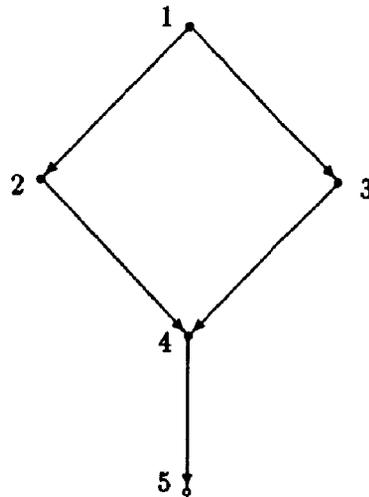
<sup>20</sup>Sie lassen zu, daß man nicht in jedem Stadium der Berechnungen auf einer Interpretation als Wahrscheinlichkeiten bestehen muß.

<sup>21</sup>DAWID [1979]

<sup>22</sup>PEARL [1988]

<sup>23</sup>NEAPOLITANO [1990]

Das nachstehende Beispiel soll helfen, das Konzept der bedingten Unabhängigkeit im Graphen wiederzufinden. Dargestellt ist ein DAG, die Zeiger geben die Richtungen an.



Identifiziert man jetzt die (eventuell  $m$ -dimensionalen) Zufallsvariablen mit den Knoten des Graphen wie folgt,  $X = \{2\}$ ,  $Y = \{3\}$ ,  $Z = \{1\}$ , so hat man  $X \perp\!\!\!\perp Y \mid Z$ . Dies ist, was man an Hand des Graphen auch vermutet hätte, während die sich für die Setzung  $X = \{2\}$ ,  $Y = \{3\}$ ,  $Z = \{1, 5\}$  ergebende Aussage, daß  $\neg(X \perp\!\!\!\perp Y \mid Z)$ , nicht unmittelbar einleuchtet. Wie in aller Ausführlichkeit bei PEARL nachzulesen ist, interpretiert man die bedingte Unabhängigkeit zweckmäßig mit der sogenannten  $d$ -Separation im DAG. Diese verlangt in unserem Fall, daß es keinen Pfad (Kantenzüge ohne Berücksichtigung der Richtung) zwischen  $X$  und  $Y$  gibt, auf dem Knoten liegen, die nicht zu  $Z$  gehören und in die alle Richtungen der diesen Knoten berührenden Kanten zeigen. Der Pfad  $2 \rightarrow 4 \leftarrow 3$  ist aber gerade von dieser Form. Man kann dies auch anders ausdrücken. Kennt man  $Z$ , d. h.  $\{1, 5\}$ , dann ist durch die Kenntnis von  $\{5\}$  auch dessen Grund  $\{4\}$  festgelegt und damit auch das Paar  $\{2, 3\}$ .

### B. Das Beispiel

Nachstehend sei zur Illustration des Vorgehens bei der Gestaltung und Verwendung intensionaler Expertensysteme das in der Literatur immer wieder strapazierte ASIA-Beispiel gezeigt.

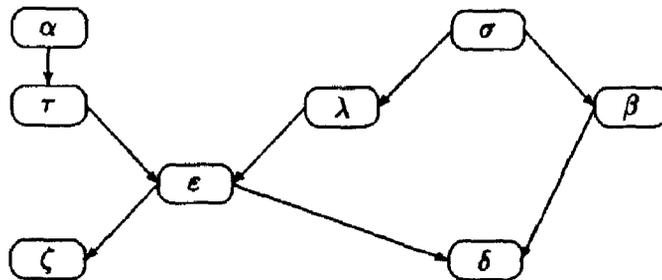
Zitieren wir dazu aus Spiegelhalter [1988].

...we shall consider a small piece of fictitious qualitative medical 'knowledge':

Shortness-of-breath (dyspnoea) may be due to tuberculosis, lung cancer or bronchitis, or none of them, or more than one of them. A recent visit to Asia increases the chances of tuberculosis, while smoking is known to be a risk factor for both lung cancer and bronchitis. The results of a single chest X-ray do not discriminate

between lung cancer and tuberculosis, as neither does the presence or absence of dyspnoea.

Dieses qualitatives können wir in Form des nachstehenden Graphen abbilden. Wie im vorigen Abschnitt ausgeführt, läßt sich zu dem Graphen dann eine entsprechende Verteilungsfunktion finden, deren Struktur mit der hier gegebenen Information verträglich ist und in der wir die noch fehlende quantitativen Informationen (die Wahrscheinlichkeiten) speichern können.

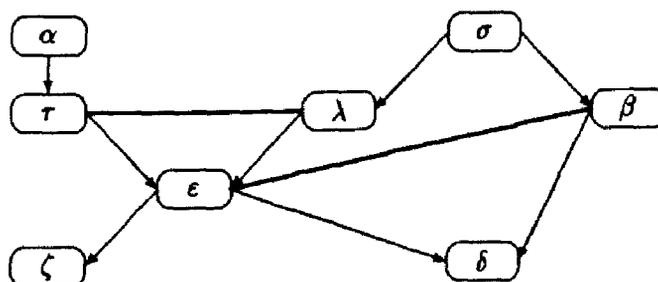


ASIA: causal network

Dabei bedeutet:

- $\alpha$  Recent visit to Asia?
- $\tau$  Tuberculosis?
- $\epsilon$  Either tuberculosis or lung cancer?
- $\delta$  Dyspnoea?
- $\sigma$  Smoker?
- $\lambda$  Lung cancer?
- $\beta$  Bronchitis?
- $\zeta$  Positive X-ray?

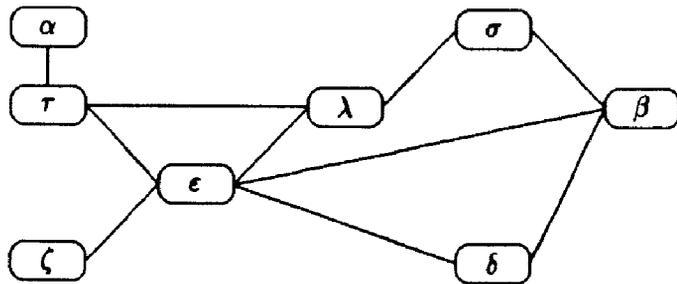
Für die notwendigen Berechnungen von Wahrscheinlichkeiten in diesem Graphen sind nun eine Reihe von Erweiterungen und Veränderungen an dem Graphen erforderlich. Man kann zeigen<sup>24</sup>, daß dadurch nicht die durch das causal belief network induzierte Struktur und Werte der  $n$ -dimensionalen Verteilung beeinträchtigt werden. Zuerst „moralisiert“ man den Graphen, indem man alle direkten Vorgänger eines Knoten (die Eltern) verbindet, soweit dies nicht schon im Ausgangsgraphen der Fall ist. Im Beispiel sind die entsprechenden Kanten verstärkt dargestellt.



ASIA: moralized causal network

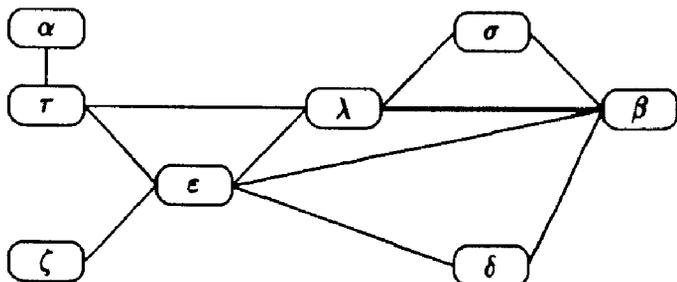
<sup>24</sup>Z. B. SPIEGELHALTER [1988]

Als nächstes läßt man alle Richtungen der Kanten weg.



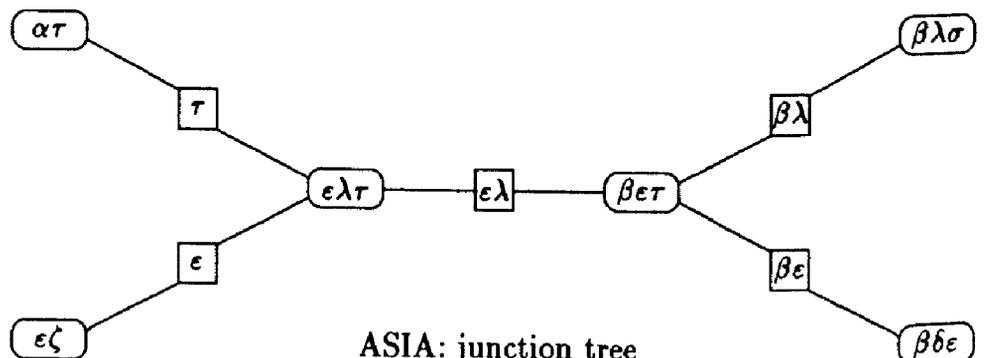
ASIA: undirected network

Nun wird der Graph trianguliert. Im Beispiel sind die durch diesen Prozeß eingeführten Kanten wiederum verstärkt dargestellt.



ASIA: triangulated network

Damit ist der Ausgangsgraph in eine Form überführt, in der es möglich ist, quantitative Information, z. B. der Patient war mit Sicherheit kürzlich in Asien einzuführen und zu verarbeiten. Dabei steht „verarbeiten“ für den bereits erwähnten Prozeß des „probability propagation“. Es stellt sich nun heraus, daß man diese Verarbeitung in einer gewissen Weise „lokal“ durchführen kann. Dafür sind die sogenannten „cliques“ von Bedeutung. Darunter versteht man Mengen von Knoten mit der Eigenschaft, daß von jedem Knoten der Menge zu jedem anderen Mitglieds-knoten ein Pfad der Länge eins existiert. Man erkennt, daß beispielsweise  $\{\alpha, \tau\}$  eine „clique“ bilden, aber auch  $\{\epsilon, \lambda, \tau\}$ . Aus dem letzten Beispiel wird deutlich, daß ein Knoten zu mehr als einer „clique“ gehören darf. Die Menge der Knoten, die zwei „cliques“ angehören, bilden den sogenannten „separator“. In obigem Beispiel ist das die Menge  $\{\tau\}$ . Es erweist sich als zweckmäßig, die „cliques“ und „separators“ in Form des sogenannten „junction tree“ darzustellen. Nachstehend werden „cliques“ durch Ovale und „separators“ durch Rechtecke dargestellt.



ASIA: junction tree

Die Berechnungen erfolgen jetzt in diesem Baum mit Hilfe der sogenannten Potentiale  $a_C$  und  $b_S$ , die auf den „cliques“ und „separators“ definiert sind. Für die „Dichte“ der  $n$ -dimensionalen Verteilung gilt dann die Darstellung:

$$f(x) = \frac{\prod_{C \in \mathcal{C}} a_C(x_C)}{\prod_{S \in \mathcal{S}} b_S(x_S)}$$

Dabei wird nicht in jedem Berechnungsschritt vorausgesetzt, daß auf eins normiert wurde. Randverteilungen ergeben sich dann durch

$$f_A = \sum_{U \setminus A} f.$$

Die Aufgabe „probability propagation“ wird durch die folgenden zwei Schritte zur Neuberechnung der Potentiale geleistet. Hier gezeigt für zwei „cliques“  $C_1$  und  $C_2$ , die durch den „separator“  $S_0$  getrennt sind.

$$b_{S_0}^* = \sum_{C_1 \setminus S_0} a_{C_1}$$

$$a_{C_2}^* = a_{C_2} \times \lambda_{S_0}$$

Dabei ist  $\lambda_{S_0}$  gegeben durch:

$$\lambda_{S_0}(x_{S_0}) = \begin{cases} b_{S_0}^*(x_{S_0})/b_{S_0}(x_{S_0}) & b_{S_0}(x_{S_0}) > 0 \\ 0 & b_{S_0}(x_{S_0}) = 0 \end{cases}$$

Nachstehend ist die Berechnung an dem schon bekanntem Beispiel  $\{\alpha, \tau\}$ ,  $\{\varepsilon, \lambda, \tau\}$  und  $\{\tau\}$ . Dabei ist unterstellt, daß jede Variable zwei Ausprägungen –  $\alpha = a$  bzw.  $\alpha = \bar{a}$  usw. – annehmen kann. Das Potential auf der „clique“  $\{\alpha, \tau\}$  sei wie folgt:

	$t$	$\bar{t}$
$a$	0.0005	0.0095
$\bar{a}$	0.0099	0.9801

Das Anfangspotential auf dem „separator“  $\{\tau\}$  wird zu Beginn identisch eingesetzt. Nachstehend wird in der Form vorher – nachher das Potential für  $\{\varepsilon, \lambda, \tau\}$  und  $\{\tau\}$  gezeigt.

	$t$	$\bar{t}$		$t$	$\bar{t}$
	1.0000	1.0000		0.0104	0.9896

	$t$	$\bar{t}$		$t$	$\bar{t}$			
$e$	$l$	1.0000	1.0000	$e$	$l$	0.0104	0.9896	
		$\bar{l}$	1.0000	0.0000		$\bar{l}$	0.0104	0.0000
$\bar{e}$	$l$	0.0000	0.0000	$\bar{e}$	$l$	0.0000	0.0000	
		$\bar{l}$	0.0000	1.0000		$\bar{l}$	0.0000	0.9896

Bei der Steuerung der Berechnung kommt es darauf an, daß die Informationen zwischen allen „cliques“ ausgetauscht werden. Es gibt verschieden Steuerungsstrategien. Nachstehend werden die Bearbeitungssequenzen für zwei gezeigt.

ASIA: Vollständig aktives Palindrom-Schema:

$$\alpha\tau \rightarrow \epsilon\lambda\tau, \quad \beta\lambda\sigma \rightarrow \beta\epsilon\lambda, \quad \beta\delta\epsilon \rightarrow \beta\epsilon\lambda, \quad \epsilon\zeta \rightarrow \epsilon\lambda\tau, \quad \epsilon\lambda\tau \rightarrow \beta\epsilon\lambda,$$

$$\beta\epsilon\lambda \rightarrow \epsilon\lambda\tau, \quad \epsilon\lambda\tau \rightarrow \epsilon\zeta, \quad \beta\epsilon\lambda \rightarrow \beta\delta\epsilon, \quad \beta\epsilon\lambda \rightarrow \beta\lambda\sigma, \quad \epsilon\lambda\tau \rightarrow \alpha\tau.$$

ASIA: Paralleles vollständig aktives Schema:

$$(1) \quad \alpha\tau \rightarrow \epsilon\lambda\tau, \quad \epsilon\zeta \rightarrow \epsilon\lambda\tau, \quad \beta\delta\epsilon \rightarrow \beta\epsilon\lambda, \quad \beta\lambda\sigma \rightarrow \beta\epsilon\lambda.$$

$$(2) \quad \epsilon\lambda\tau \rightarrow \beta\epsilon\lambda, \quad \beta\epsilon\lambda \rightarrow \epsilon\lambda\tau.$$

$$(3) \quad \epsilon\lambda\tau \rightarrow \epsilon\zeta, \quad \epsilon\lambda\tau \rightarrow \alpha\tau, \quad \beta\epsilon\lambda \rightarrow \beta\delta\epsilon, \quad \beta\epsilon\lambda \rightarrow \beta\lambda\sigma.$$

Bei dem letzten Schema können die Sequenzen (1), (2), (3) parallel ausgeführt werden.

Die in Deutschland nicht so verbreitete Zunft der „intensionalen Expertensystembauer“ beschäftigt sich zur Zeit vorrangig mit folgenden offenen Fragen:

- Organisation der lokalen Berechnungen.
- Parallelisierung der Berechnungen.
- Andere Propagationmethoden als die Summenfortpflanzung.
- Andere Darstellungs- und Konstruktionsmethoden für kausale Netzwerke.

Man sieht, es sind nicht nur für den Statistiker interessante Probleme in diesem Ansatz verborgen, der Informatiker ist gleichermaßen gefordert.

## V. Ein unversöhnlicher Schluß

Die größte Gefahr, die der statistischen Kultur zur Zeit durch sogenannte statistische Expertensysteme droht, läßt sich an einer Definition des Begriffes 'intelligent' festmachen. Im Merriam-Webster [1983] kann man lesen: intelligent ... 3. able to perform computer functions ...

Die Gefahr heißt Reduktionismus. Statistische Expertise ist das, was sich in einem Expertensystem abbilden läßt. Das was beim 'Hineingießen' in eine Shell vorbeiläuft, ist eben keine statistische Expertise.

Arbeitet man sich mit dieser Vorstellung im Hinterkopf durch den Berg von Veröffentlichungen über Expertensysteme – trotz größten Fleißes nur unvollständig zu leisten –, so gelangt man als erstes zu der Erkenntnis, daß das ganze Gebiet durch eine ungeheuer schwammige Begrifflichkeit gekennzeichnet ist. Diese nebelt durch ihre Blumigkeit die eben erwähnte Gefahr der Reduktion ein, wer sich aber nicht berauschen läßt, findet Blüten wie die folgende

„Wir wollen eine Maschine ... genau dann als Expertensystem bezeichnen, wenn sie Funktionen, die für einen Experten spezifisch sind, übernehmen kann. ... Unter (spezifischen) Funktionen ... verstehen wir diejenigen Tätigkeiten, die, außer von Expertensystemen, nur von Experten übernommen werden können.“

So ist der Schritt, alles und jedes als Expertensystem zu bezeichnen, nur noch eine Kleinigkeit. Dann fällt es auch nicht mehr schwer, Streitbergs These zu widerlegen.

### Literatur

- ANDERSEN, S. K. / OLESEN, K. G. / JENSEN, F. V. / JENSEN, F. (1989): HUGIN – A shell for building Bayesian belief universes for expert systems; Proceedings of the 11th international joint conference on artificial intelligence.
- DAWID, A. P. (1979): Conditional independence in statistical theory; JRSS Ser. B.
- DAWID, A. P. (1992): Applications of a general propagation algorithm for probabilistic expert systems; Statistics and Computing, Vol 2.
- GALE, W. A. (1986, ed.): Artificial intelligence & statistics; Addison-Wesley, Reading.
- HAND, D. J. (1984): Statistical expert system design; The Statistician, Vol 33.
- HAVRÁNEK, T. (1990): On model search methods; in: COMPSTAT Proceedings in Computational Statistics 1990, Momirović, K. / Mildner, V. (eds.).
- HOOKE, R. (1980): Getting people to use statistics properly; The American Statistician, Vol 34 No. 1.
- NAEVE, P. (1986): Programming languages and opportunities they offer to the statistical community; Proceedings of the 1st World Congress of the Bernoulli Society, Y. V. Prohorov, V. V. Sazonov, Tashkent.
- NAEVE, P. / METZING, D. (1987): Anwendung von TWAICE in der Statistik; in: Proceedings Anwenderforum Expertensysteme, A. B. Cremers / D.-H. Becks (eds.), Wuppertal.
- NAEVE, P. / STEINECKER, J. (1987): SETUP – Statistisches Expertensystem mit TWAICE und P-STAT; Diskussionspapier Nr. 172/1987 der Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Bielefeld.
- NAEVE, P. / STEINECKER, J. / SCHWAN, H. (1988): How SETUP was set up; Diskussionspapier Nr. 183/1988 der Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Universität Bielefeld.
- NEAPOLITAN, E. (1990): Probabilistic reasoning in expert systems; J. Wiley and Sons, New York.
- NIXDORF COMPUTER: TWAICE Referenzhandbuch
- PEARL, J. (1988): Probabilistic inference in intelligent systems; Morgan Kaufmann, San Mateo.
- SPIEGELHALTER, D. J. (1986): A statistical view of uncertainty in expert systems; in: Artificial intelligence & statistics, W. A. Gale (ed.), Addison-Wesley, Reading.
- SPIEGELHALTER, D. J. / DAWID, A. P. / LAURITZEN, S. L. / COWELL, R. G. (1992): Bayesian analysis in expert systems; Department of Mathematics and Computer Science, R 92-2006, The University of Aalborg.

- STREITBERG, B. (1988): On the nonexistence of expert systems – Critical remarks on artificial intelligence in statistics; *Statistical Software Newsletter*, Vol 14 No. 2.
- TUKEY, J. W. (1982): Another look at the future; *Proc. of the 14th Symposium on the Interface of Computer Science and Statistics*, New York.
- WEBSTER (1983): *Webster's Ninth New Collegiate Dictionary*; Merriam-Webster Inc., Springfield.
- WESTERHOFF, T. / NAEVE, P. (1988): On inference process; in: *COMPSTAT Proceedings in Computational Statistics 1988*, Edwards, D. / Raun, N. E. (eds.).

Prof. Dr. Peter Naeve  
Fakultät für Wirtschaftswissenschaften  
Universität Bielefeld

Universitätsstraße  
W-4800 Bielefeld 1