

**Erinnerung und Abruf aus dem Gedächtnis**  
Ein informationstheoretisches Modell kognitiver Prozesse

**Wilhelm Rödder, Friedhelm Kulmann**

**Diskussionsbeitrag Nr. 339**

**2003**

Diskussionsbeiträge des Fachbereichs  
Wirtschaftswissenschaft der FernUniversität in Hagen

Herausgegeben vom Dekan des Fachbereichs

## **Inhalt**

Kurzfassung.....	1
1. Einleitung.....	1
2. Kategoriale Strukturen in Informationsnetzen.....	4
2.1 Semantische Netze, ein Überblick.....	4
2.2 Die Struktur von Informationsnetzen.....	5
3. Konditionallogische und Informationstheoretische Grundlagen.....	7
3.1 Syntax und Semantik einer Konditionallogik.....	7
3.2 Syntax und Semantik einer Informationstheoretischen Konditionallogik.....	9
3.3 Aufbau und Veränderung von Informationsmaßen.....	11
4. Assoziation in Informationsnetzen.....	14
4.1 Der Netzaufbau durch Konditionale.....	14
4.2 Die Assoziierung geometrischer Figuren.....	15
4.3 Das konnektionistische Modell von McClelland .....	17
4.3.1 Entwicklung des Modells .....	17
4.3.2 Offene versus Geschlossene Attribute.....	20
4.3.3 Abrufe im Informationsnetz.....	23
4.4 Eine Taxonomie.....	26
5. Abruf und Denken.....	28
6. Zusammenfassung und Ausblick .....	31
Anhang.....	33
Literaturverzeichnis.....	36

# Erinnerung und Abruf aus dem Gedächtnis

Ein informationstheoretisches Modell kognitiver Prozesse

**Wilhelm Rödder**

**Friedhelm Kulmann**

FernUniversität in Hagen  
Fachbereich Wirtschaftswissenschaft,  
Lehrstuhl für BWL, insb. Operations Research,  
Postfach 9 40, 58084 Hagen  
[wilhelm.roedder@fernuni-hagen.de](mailto:wilhelm.roedder@fernuni-hagen.de)  
[friedhelm.kulmann@fernuni-hagen.de](mailto:friedhelm.kulmann@fernuni-hagen.de)

**Kurzfassung.** Die kognitive Psychologie beschäftigt sich u.a. mit der Frage nach Speicherung in und Abruf von Wissensinhalten aus dem Gedächtnis. Zur Beschreibung der Phänomene werden konnektionistische, propositionale und konzeptuelle Ansätze gemacht, die dann empirisch verifiziert werden. Die vorliegende Schrift lehnt sich an konnektionistische und propositionale Ansätze zur Beschreibung kategorialer Strukturen an, wählt jedoch dann ein Informationstheoretisches Netz zum Abruf von Begriffen mittels Stimuli. Ein Stimulus löst einen Informationsfluß durch das gesamte Netz aus, der seinerseits in jedem Begriff einen der semantischen Nähe zum Stimulus entsprechenden Abrufimpuls in der Einheit [bit] erzeugt. Die Leistungsfähigkeit der Methode wird an Taxonomien und an einem klassischen konnektionistischen Modell nachgewiesen. Ist der Abruf eines Begriffs erfolgt, wird seine logische oder wahrscheinlichkeitstheoretische Abhängigkeit vom Stimulus untersucht. Alle drei Formen kognitiver Prozesse, Abruf, logisches Ableiten und statistisches Auswerten sind in dem entwickelten Informationstheoretischen Netz gleichermaßen möglich.

## 1. Einleitung

Die Fragen nach Wahrnehmung und Aufmerksamkeit, nach Akquisition und Repräsentation sowie Behalten und Abruf von Bildern und Wissen, nach Problemlösungsmechanismen und vielem mehr sind Gegenstand der kognitiven Psychologie. Einen guten Überblick über Geschichte, Entwicklung und aktuellen Stand dieses Wissenschaftszweiges liefern – auch für den Laien verständlich – Werke wie [WES, 1994], [AND, 2001]. Zeitgleich begleitet werden die oft physiologischen und empirischen Untersuchungen zum tieferen Verständnis der Kognition durch Forschungen im Bereich der sogenannten Künstlichen Intelligenz. Hier werden entwickelte Modellvorstellungen zur Erklärung kognitiver Prozesse gleichermaßen auf ihre Verwendungsfähigkeit zur Imitation menschlichen Denkens im Computer hin untersucht; die Modelle werden erweitert, abgeändert, auf ihre Plausibilität hin getestet etc. Einen Versuch, die Vielzahl solcher Modelle zu beschreiben und zu werten, findet der Leser in [SOM, 1992].

In dieser Arbeit widmen wir uns einem Teilaspekt der kognitiven Psychologie, nämlich der Frage nach assoziativen Strukturen und dem Abruf von Wissen aus dem Gedächtnis.

Was fällt uns bei dem Stichwort Rechteck zuerst ein: Quadrat, Raute, Parallelogramm oder Trapez? In leicht abgewandelter Form beschäftigte kürzlich dieses Problem die ganze Nation im Nachgang zu einer Quiz-Show im deutschen Fernsehen. Wieso fällt uns (hoffentlich) zunächst das Parallelogramm oder das Trapez, nicht aber das Quadrat oder die Raute ein? Wieso assoziieren wir die erstgenannten geometrischen Figuren eher mit einem Rechteck als die letztgenannten?

Welche Eigenschaften verbinden wir mit dem Reizwort „Vogel“, oder welche Kategorie kommen uns beim Reizwort „fliegen“ in den Sinn?

Die alles bestimmende Frage lautet: Wie realisiert das (menschliche) Hirn die Repräsentation von Wissen und den assoziativen Prozeß, der Bilder ebenso wie Begriffe oder Aktionen zu gewissen Stimuli abrufft? Welche Modelle geben diese Vorgänge möglichst ergebniskonform wieder?

Für die (bedeutungsbezogene) Wissensrepräsentation dominieren in der Literatur propositionale und konzeptuelle Formen [COQ, 1969], [FRE, 1975], [NOR, 1975]. Aus diesen Formen entwickelten sich graphische oder schematische Modelle, die sich im Umkehrschluß auch in der Künstlichen Intelligenz wiederfinden. Ohne Anspruch auf Vollständigkeit nennen wir Propositionale Netze, Semantische Netze und Schemata.

In Propositionalen Netzen werden die Bedeutungsinhalte sprachlicher Sätze in ihre kleinsten Einheiten – Propositionen – zerlegt und ähnlich wie in der Prädikatenlogik durch Relationen oder Prädikate verbunden; Graphiken unterstützen diese Vorgehensweise [ANB, 1972], [CLA, 1983]. Semantische Netze gestatten die Speicherung konzeptuellen Wissens, in ihrer graphischen Form sehr gut geeignet zur Darstellung von Kategorien und Eigenschaften [COQ, 1969], [REI, 1991]. In der kognitiven Psychologie dienten und dienen sie vor allem zur Klärung der Frage nach der Abrufzeit und der Stärke der Assoziation von und zwischen Begriffen. Auch Schemata (Frames) legen kategoriales Wissen über Objekte in Form von Attributen und Ausprägungen und deren Vernetzungen fest [RUO, 1976], [BRT, 1981].

Während die genannten Repräsentationsformen also in erster Linie dazu dienen, die kognitive Plausibilität zu überprüfen, stellen wir uns in der vorliegenden Schrift die Aufgabe, den Abfrageimpuls auf Begriffe bei Nennung gewisser Stimuli in einem *informationstheoretischen Modell* abzubilden. Information ist hier durchaus im Shannonschen Sinn zu verstehen: Wie stark der Abruf eines Begriffes ausfällt, mißt sich in der informationstheoretischen Einheit [bit]. Damit wird der Abrufimpuls eines jeden Begriffes im kognitiven Umfeld des Stimulus konkret mathematisch berechenbar.

Die Semantik dieses informationstheoretischen Ansatzes ist die einer Hierarchie von Kategorien und deren Eigenschaften. Zur Strukturierung der Zusammenhänge wird ein Netzwerk

dienen, das sich an Semantische und Propositionale Netze anlehnt. Zur formalen Beschreibung der semantischen Strukturen bedienen wir uns der Konditionallogik und des Konzepts von Informationsmaßen. So informiert man das Modell über den Tatbestand „Vögel brüten“ durch das Konditional »NACHKOMMEN=brüten | VOGEL=ja« (lies brüten gegeben Vogel) und das Informationsmaß 0 [bit]. Hat das Modell dieses Wissen verinnerlicht, so weiß es „Vögel brüten mit Sicherheit!“, und jede zukünftige Mitteilung des Tatbestands, daß ein (bestimmter) Vogel brütet, ist nicht mehr informativ (0 [bit]). Ausgestattet mit solchen Informationshappen wird ein optimales Informationsmaß in der gesamten kategorialen Struktur errechnet, es modelliert gleichsam Wissen über die Domäne.

Fokussiert man nun auf eine Kategorie oder einen Kranz von Eigenschaften, so gestattet das Modell die Simulation der Ausbreitung dieses Fokusimpulses durch das gesamte Netz. An jeder beliebigen Stelle im Netz erhält man eine Reaktion in der informationstheoretischen Einheit [bit]. Das Ganze vollzieht sich in der Expertensystemshell SPIRIT [SPIRIT, 2002], die auch große Wissensdomänen abzubilden gestattet. Beispiele verdeutlichen eindrucksvoll die Leistungsfähigkeit des entwickelten Konzepts [KUL, 2002].

In Kapitel 2 wird die Darstellung kategorialer Strukturen in Semantischen Netzen wiederholt, wird die graphische Struktur eines Informationsnetzes erarbeitet und wird ein in der kognitiven Psychologie bekanntes taxonomisches Beispiel besprochen. Kapitel 3 vermittelt die konditionallogischen und informationstheoretischen Grundlagen. In Abschnitt 3.1 werden Syntax und Semantik der Konditionallogik über propositionalen Ausdrücken eingeführt, in Abschnitt 3.2 wird die Unsicherheit in Konditionalen und Konditionalmengen definiert, in 3.3 wird ein Verfahren zur Erzeugung eines optimalen Informationsmaßes geliefert und wird die Fokussierung auf gewisse Kategorien oder Eigenschaften mathematisch berechenbar gemacht. Kapitel 4 dient der Entwicklung der Grundidee des Assoziierens in Informationsnetzen (4.1) und zeigt die Leistungsfähigkeit dieses Konzepts für kleine bis mittelgroße Beispiele auf (4.2 – 4.4). Kapitel 5 versucht, eine erste Verbindung zwischen Abruf in assoziativen Strukturen und dem sich anschließenden logischen Denkprozeß aufzuzeigen. Kapitel 6 faßt zusammen und zeigt zukünftige Forschungsrichtungen auf.

## 2. Kategoriale Strukturen in Informationsnetzen

### 2.1 Semantische Netze, ein Überblick

Semantische Netze werden in zahlreichen Werken der kognitiven Psychologie und der Künstlichen Intelligenz beschrieben [QUI, 1966], [COQ, 1969], [REI, 1991]. Da die noch zu definierenden Informationsnetze Ähnlichkeiten mit Semantischen Netzen aufweisen, sollen deren Charakteristika kurz aufgezeigt werden. Da weiterhin kategoriale Strukturen in der einschlägigen Literatur anhand von Taxonomien verdeutlicht werden, soll das auch hier geschehen. In Kapitel 4 werden dann weiterführende Beispiele betrachtet.

Semantische Netze sind gerichtete azyklische Graphen mit zwei Knotentypen: den Kategorien und den Eigenschaften. Die Knoten werden durch gerichtete Kanten verbunden, wobei die Beschriftung an einer Kante den jeweiligen Kantentyp bezeichnet. Gerichtete Kanten des *is-a* Typs verbinden Unterkategorien mit Oberkategorien und gerichtete Kanten des *Fähigkeiten*-Typs eben mit Fähigkeiten der jeweiligen Kategorie. Hier meint *Fähigkeiten* durchaus sprachlich sehr unterschiedliche Dinge, wie z. B.: ist groß, kann schwimmen, schwimmt stromaufwärts zur Eiablage etc... Andere Relationen, wie z. B. *is-instant-of* oder *has-a* sind möglich [REI, 1991]. *is-instant-of* bedeutet „ist eine Instanz von“ und *has-a* heißt „hat“ oder „besitzt“. Ein einfaches Semantisches Netz zeigt Abbildung 1.

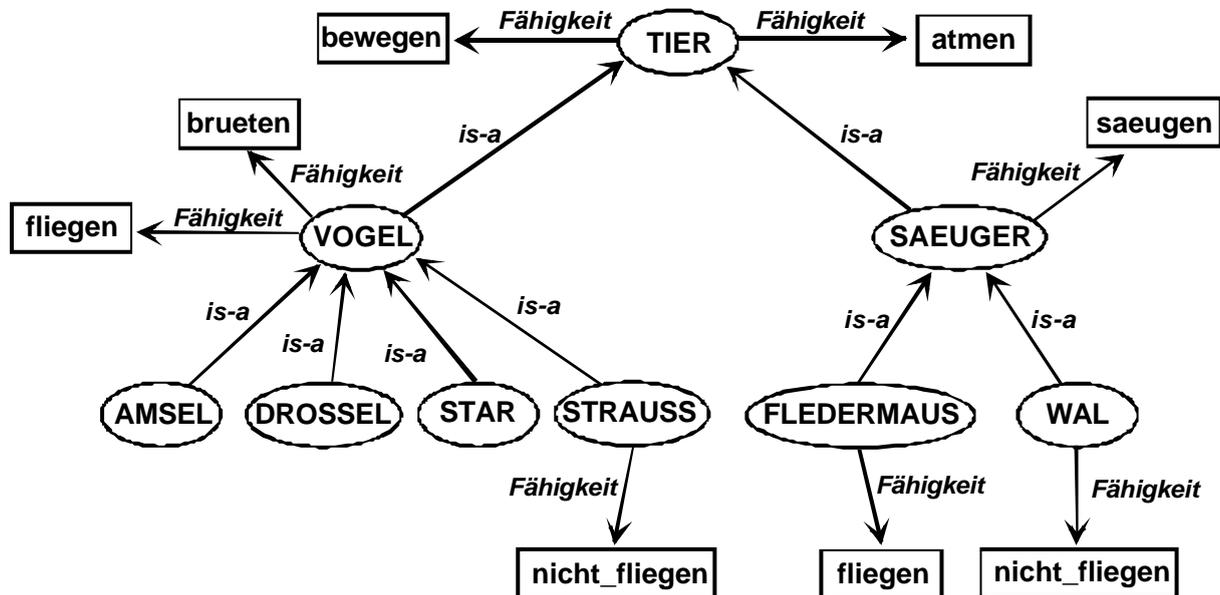


Abbildung 1 Ein Semantisches Netz

Bitte vollziehen Sie folgende Strukturmerkmale eines solchen Netzes nach:

Pfeile zwischen kreisförmigen Knoten sind *is-a*-Verbindungen, Pfeile zwischen kreisförmigen und rechteckigen Knoten sind *Fähigkeit*-Verbindungen.

Eigenschaften von Oberkategorien vererben sich auf Unterkategorien, falls dem nicht explizit widersprochen wird. So können Vögel fliegen, wenn sie keine Strauße sind. Dieser im streng logischen Sinne unauflösbare Konflikt wird in Inferenznetzen anders gelöst werden müssen.

Semantische Netze dienen in der kognitiven Psychologie vor allem dazu, die Abrufgeschwindigkeit als Funktion „Semantischer Nähe“ zu modellieren und dies auch empirisch zu verifizieren [COQ, 1969]. Dabei läßt man zu, daß – trotz des oben beschriebenen Vererbungsgedankens – Eigenschaften zu Unterkategorien wiederholt werden, wenn sie beim Lernvorgang dort häufig beobachtet wurden. So mag der Abruf von „brüten“ auch bei „AMSEL“ nochmals direkt erfolgen. Mehr über Semantische Netze erfährt der Leser in [REI, 1991].

## 2.2 Die Struktur von Informationsnetzen

Die Syntax der Informationsnetze ist einfacher als die Semantischer Netze. Die jetzt einheitlichen Knoten repräsentieren Aussagen, die in der Wissensdomäne *wahr* oder *falsch* sein können. Kategorien und Eigenschaften behalten zwar ihre Bedeutung = Semantik bei, sind aber allesamt Propositionen: Vogel (sein), Amsel (sein), fliegen (können) sind, abgesehen von ihrem Bedeutungsinhalt, als logische Aussagen gleichartig. Eine präzise formallogische Einführung solcher Propositionen wird in Kapitel 3 gegeben. Impliziert im Gültigkeitsbereich des durch das Informationsnetz beschriebenen Modells eine Proposition eine andere, so wird das durch einen Pfeil gekennzeichnet. Bedeutungsinhaltliche Eigenschaften dienen neben der Charakterisierung von Kategorien auch und vor allem deren Differenzierung. Daß ein Säuger kein Vogel ist (und umgekehrt), „weiß“ das Netz nicht einfach durch die Namensgebung und den gezeichneten Graphen, sondern erst durch differenzierende Eigenschaften, wie etwa gebären, brüten.

Damit das funktioniert, müssen „gebären“ und „brüten“ als verschiedene Ausprägungen eines Attributs aufgefaßt werden: NACHKOMMEN=gebären/brüten; FLUGFÄHIGKEIT=fliegen/nicht\_fliegen. Gebiert ein Säuger, brütet ein Vogel und schließen gebären und brüten einander aus, so ist ein Säuger kein Vogel (und umgekehrt). Kategorien auf gleicher Ebene benötigen zu ihrer Unterscheidung stets differenzierende Eigenschaften, anderenfalls werden sie nicht als unterschiedliche Kategorien vom Informationsnetz erkannt.

Gelegentlich scheinen sich in der menschlichen Erinnerung jedoch auch Kategorien zu etablieren, die nicht oder kaum unterschieden werden; sie werden lediglich als Begriffe ohne differenzierende Merkmale memoriert. So mag der ornithologisch nicht allzu bewanderte Leser Amseln und Drosseln kennen, ohne jedoch spontan in der Lage zu sein, sie anhand von Merkmalen zu unterscheiden. In Abschnitt 4.4 wird ein taxonomisches Modell mit beiden Formen kategorialer Strukturen betrachtet.

Haben zwei Kategorien auf gleicher Ebene neben differenzierenden Merkmalen auch einen Kranz von gleichen Eigenschaften, so ist das Anlaß zu der Frage nach einer Oberkategorie. Atmen und bewegen sich sowohl Säuger als auch Vögel, so beschreiben diese Merkmale die Tiere und grenzen sie von Pflanzen ab.

Einerseits ist die Syntax von Informationsnetzen also einfacher als die von Semantischen Netzen, andererseits erfordert der Aufbau eines solchen Netzes große Aufmerksamkeit:

- Kategorien auf gleicher Ebene können nur durch verschiedene Ausprägungen ihrer Attribute differenziert werden.
- Logische Widersprüche wie „Vögel fliegen“, „Strauße sind Vögel“ und „Strauße fliegen nicht“ sind verboten. Das Merkmal fliegen darf nur solche Kategorien charakterisieren, die diese Eigenschaft wirklich haben. Dennoch wird das Informationsnetz bei der Nennung von „Vogel“ auch das „fliegen“ abrufen, was in Kapitel 4 genauer dargelegt wird.
- Tragen Kategorien gleicher Ebene identische Merkmale, so ist eine Oberkategorie einzurichten.

Die genannten Forderungen an ein Informationsnetz sind mit der in Kapitel 3 entwickelten Konditionalsprache realisierbar. Zur Verdeutlichung des bisher Gesagten geben wir in Abbildung 2 zu dem Semantischen Netz aus Abbildung 1 ein mögliches Informationsnetz an.

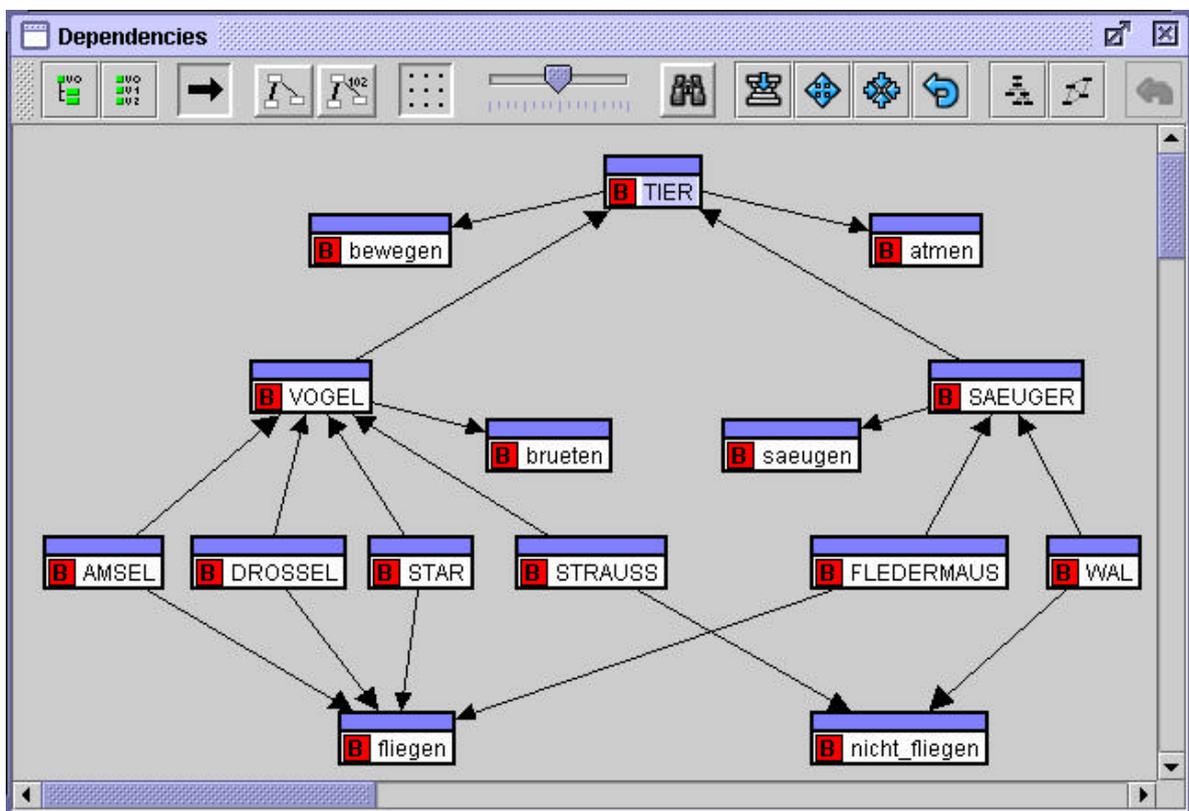


Abbildung 2 Informationsnetz zu Abbildung 1

Bisher wurden Informationsnetze nur hinsichtlich ihrer graphentheoretischen Struktur charakterisiert. Es wird im folgenden Kapitel zu klären sein, wie mit Hilfe einer Konditionalsprache eine solche Struktur erzeugt wird und wie mittels der gleichen Sprache der Abruf aus dem „Gedächtnis“ des Netzes realisiert werden kann. Die Namensgebung der Informationsnetze begründet sich schließlich aus der Tatsache, daß dem Netz ein Informationsmaß aufgeprägt ist, in dem die Assoziationsstärke berechenbar wird. Die Grundlagen zur Konditionalsprache und zur Informationstheorie, soweit sie hier gebraucht werden, sind Gegenstand des folgenden Kapitels.

### 3. Konditionallogische und Informatinstheoretische Grundlagen

#### 3.1 Syntax und Semantik einer Konditionallogik

Es sei  $L$  eine propositionale Sprache über einer endlichen Menge von endlichwertigen Attributen  $V = \{V_1, \dots, V_J\}$  mit Ausprägungen  $v_j$  von  $V_j$ . Als Attributenbezeichner werden oft Zeichenketten von mnemotechnischen Großbuchstaben verwendet, als Ausprägungsbezeichner häufig Kleinbuchstaben oder ggf. Zahlen. VOGEL=ja, GESCHLECHT=m, ALTER=40-49, FAMILIENSTAND=ledig sind typische Ausprägungszuweisungen zu Attributen. Ausdrücke der Form  $V_j=v_j$  heißen Literale; sie können bei einer bestimmten Interpretation von  $L$  wahr (t) oder falsch (f) sein. Literale werden durch die Verknüpfungszeichen  $\bar{\quad}$  (nicht),  $\wedge$  (und),  $\vee$  (oder) und Klammern bei Geltung entsprechender Syntaxregeln zu propositionalen Ausdrücken zusammengefaßt, die wiederum wahr oder falsch sein können. Solche Ausdrücke bezeichnen wir mit Großbuchstaben  $A, B, C, \dots$ . Die Juxtaposition  $AB$  steht für  $A \wedge B$ .  $A \subset B$  bedeutet  $A$  ist Implikant von  $B$ , d. h. für alle Interpretationen von  $L$  gilt: Ist  $A$  wahr, dann auch  $B$ . Vollständige oder einfache Konjunktionen von Literalen schreiben wir oft als einfache ungeordnete Tupel, wie z. B.  $v=v_1 \dots v_J$ .  $V$  ist die Menge aller Vollkonjunktionen und  $|V|$  ihre Kardinalität.

$|$  ist der binäre Konditionaloperator. Ausdrücke der Form  $B|A$  heißen Konditionale; sie gehören einer dreiwertigen Logik.  $B|A$  ist gleich t für  $B$  und  $A$  wahr, ist gleich f für  $B$  falsch und  $A$  wahr, und ist gleich u für  $A$  falsch. »FAMILIENSTAND=ledig | ALTER=40-49« ist ein Beispiel für ein einfaches Konditional. Die Menge aller  $B|A$  ist die Konditionalsprache  $L|L$ . Das Konditional  $B|A = B|t$ , welches also eine tautologische Prämisse hat, schreiben wir auch einfach als  $B$ ; die Sprache  $L$  ist in  $L|L$  eingebettet. Ein Konditional  $B|A$  heißt widersprüchlich, wenn für alle Interpretationen  $BA$  gleich f ist. In [CAL, 1991], [CAL, 2002] wird eine Konditionallogik entwickelt, die nun Elemente aus  $L|L$  wiederum mittels  $\bar{\quad}$  (nicht),  $\wedge$  (und),  $\vee$  (oder) und  $|$  (gegeben) verknüpft oder komponiert. D.h. es wird festgelegt, welchen der drei Wahrheitswerte solche Verknüpfungen als Funktion der verknüpften Elemente annehmen.

Diese Festlegung kann z. B. durch die Definition komponierter Konditionale gemäß folgender Gleichungen erfolgen:

- $(B|A) \wedge (D|C) = [(B \vee \bar{A})(D \vee \bar{C})] | A \vee C$
- $(B|A) \vee (D|C) = (AB \vee CD) | A \vee C$
- $(B|A) || (D|C) = B | ADC.$

Der Leser ist gebeten, sich die Gleichungen aufgrund von Beispielen plausibel zu machen [CAL, 1991] oder aber die umfassenden Ausführungen in [RKI, 2002] zu studieren.

Eine gültige Semantik über  $L|L$  ist nun eine solche Interpretation, die die Forderungen der Logik erfüllt. In [CAL, 2002] werden dann mehrere Ableitungsbegriffe untersucht; diese Untersuchungen sprengen den Rahmen der vorliegenden Schrift.

Im folgenden Abschnitt gehen wir einen anderen Weg als in [CAL, 1991], [CAL, 2002]. Wir bedienen uns zwar der Elemente von  $L|L$  als Kommunikationsinstrument, bauen dann aber eine *informationstheoretische Konditionallogik* auf. Eine informationstheoretische Semantik ist darin ein einer Axiomatik genügendes Informationsmaß. Der Ableitungsbegriff wird dann über die Gültigkeit=Wert eines Konditionals in einem Informationsmaß festgelegt. Dies ist Thema des folgenden Abschnitts.

Zuvor muß jedoch noch der Begriff eines Conditionalen Basis Systems (CBS) eingeführt werden. Ein CBS ist eine Menge vom Konditionalen, die in ihrer Gesamtheit die Bedingungsstruktur von ganz  $L|L$  repräsentieren; sie bilden eine Basis aller Konditionale. Für eine vertiefende Diskussion siehe [RKI, 2002], wo auch die folgenden Definitionen zu finden sind.

**Definition 1** (c-unabhängige und disjunkte Konditionale)

- i)  $B|A$  ist c-unabhängig von  $D|C$  genau dann, wenn  $(B|A) || (D|C) = B|A.$
- ii)  $B|A$  und  $D|C$  sind disjunkt genau dann, wenn  $ABCD$  für jede Interpretation gleich f ist.

**Definition 2** (Conditionales Basis System CBS)

Eine Menge  $S$  nicht widersprüchlicher Konditionale ist ein CBS, falls für jedes Paar  $B|C, D|C$  aus  $S$  eine der folgenden Aussagen zutrifft:

- $B|A$  ist c-unabhängig von  $D|C$

- $D|C$  ist c-unabhängig von  $B|A$
- $B|A$  und  $D|C$  sind disjunkt

und falls jede Vollkonjunktion  $v$  als Konjunktion c-unabhängiger Elemente aus  $S$  darstellbar ist.

Mit diesen Präliminarien sind wir nun in der Lage, eine informationstheoretische Konditionallogik aufzubauen.

### 3.2 Syntax und Semantik einer Informationstheoretischen Konditionallogik

Ein Konditional wie z. B. FAMILIENSTAND=ledig|ALTER=40-49 führt sofort zu der Überlegung, wieviel Information die Mitteilung, daß jemand aus der besagten Altersgruppe ledig ist, enthält. Wußte man vorher, daß *alle* 40-49 jährigen ledig sind, so ist die Mitteilung überhaupt nicht informativ. Hat man diese Antwort kaum erwartet, ist sie sehr informativ. Information ist hier durchaus als numerische Größe zu verstehen.

Die Autoren in [RKI, 2002] nennen nun ein Zahlensystem auf der Menge aller Konditionale aus  $L|L$  ein *Informationsmaß*, wenn es die Axiome A1-A4 erfüllt, Informationsmaße  $\mathfrak{t}$ -zeichnen wir mit  $im, in\dots$ .

$$A1 \quad im(B|A) \geq 0 \text{ für alle } B|A \in L|L$$

$$A2 \quad im(B|A) = 0 \text{ für } A \subset B$$

$$A3 \quad im((B|A) \wedge (D|C)) = im(B|A) + im(D|C), \text{ falls } B|A \text{ von } D|C \text{ c-unabhängig ist oder umgekehrt}$$

$$A4 \quad k^{-im\left(\bigvee_i B_i|A\right)} = \sum_i k^{-im(B_i|A)} \text{ für alle Mengen paarweise disjunkter } B_i \text{ und } k > 1 \text{ eine Konstante.}$$

Sie begründen diese Axiome ausführlich und zeigen dann:

$k = 2$  ist eine natürliche Wahl.

$im(A) = im(\bar{A})$  impliziert  $im(A) + im(\bar{A}) = 1$ . Diese Informationseinheit heißt [bit].

Aus  $A \subset B$  folgt  $im(A) \geq im(B)$ .

Jedem Maß  $im$  kann durch  $pm(B|A) = 2^{-im(B|A)}$  ein nichtnegatives, additives und normiertes Maß  $pm$ , also ein Wahrscheinlichkeitsmaß auf  $L|L$  zugeordnet werden.  $pm(B|A)$  ist die Wahrscheinlichkeit, daß für ein wahres  $A$  auch  $B$  wahr ist.

Mit dem bisher gesagten gibt es zu jedem Konditional  $B|A$  eine Zahl  $im(B|A)$ . Sie drückt die Unsicherheit darüber aus, ob bei wahren  $A$  auch  $B$  wahr ist. Ist diese Unsicherheit groß, ist ihre Reduktion bei Eintreten von  $B$  groß; es fließt viel Information zu. Ist diese Unsicherheit klein, ist ihre Reduktion bei Eintreten von  $B$  klein; es fließt wenig Information zu.

Nun gibt es ein Maß für die intrinsische Unsicherheit – und ihre Reduktion – in  $im$  auf der *Gesamtmenge aller* Konditionale  $L|L$ . Um Überlappungen und Doppelzählungen von Information zu vermeiden, mißt man diese intrinsische Unsicherheit auf den im letzten Abschnitt vorgestellten CBS.

**Definition 3** (Unsicherheit in  $im$ )

Es sei  $im$  ein Maß gemäß den Axiomen A1 bis A4 und  $pm(\cdot) = 2^{-im(\cdot)}$  das dazugehörige Wahrscheinlichkeitsmaß.  $S$  sei ein CBS. Dann ist

$$\sum_{B|A \in S} pm(BA) \cdot im(B|A) \tag{1}$$

die (erwartete) Unsicherheit in  $im$ .

Solch eine Definition ist nur dann sinnvoll, wenn der Zahlenwert in (1) von der Wahl eines bestimmten CBS unabhängig ist. Daß dies der Fall ist, zeigt folgender Satz 1 ([RKI, 2002]; Theorem 2).

**Satz 1** (Eindeutigkeit der Unsicherheit)

Die Unsicherheit in Formel (1) ist für jedes CBS gleich und stets gleich  $\sum_v pm(v) \cdot im(v)$ .

Die Unsicherheit in der Menge aller Vollkonjunktionen ist also gleich der in jedem beliebigen CBS. Es gibt mithin eine eindeutige erwartete Unsicherheit in jedem Maß  $im$ .

Bleibt noch die Frage, wie man  $im$  gewinnt und wie man es ggf. ändert – bei zufließender Information etwa. Bevor wir diese Frage im Folgeabschnitt aufgreifen, sei noch die erwartete Unsicherheitsänderung erwähnt. Sie beträgt

$$\sum_v pn(v) (im(v) - in(v)). \tag{2}$$

Ist, aus welchen Gründen auch immer, ein Übergang vom Informationsmaß  $im$  zu  $in$  erfolgt und ist  $pn$  das zu  $in$  gehörige Wahrscheinlichkeitsmaß, so ist (2) die entsprechende retrospektive mittlere Unsicherheitsänderung.

Ein spezielles Informationsmaß ist das maximaler Unsicherheit:

$$imax = \operatorname{argmax}_{in} \sum_v pn(v) \cdot in(v). \quad (3)$$

Bekanntlich sind in  $imax$  alle  $imax(v)$  gleich  $ld|V|$ . In  $imax$  ist die Unsicherheitsreduktion bei Eintreten irgendeines  $v$  stets gleich  $ld|V|$  [bit]. In  $imax$  liegt aufgrund der Gleichung (3) maximale erwartete Unsicherheit vor, und bei jeder zufließenden Information nimmt sie ab; Unsicherheitsreduktion ist Wissenserwerb, vgl. [ROD, 2003].

$$\sum pn(v)(imax(v) - in(v)) \quad (4)$$

mißt die mittlere Unsicherheit in  $in$  auf einer absoluten Skala. Ist sie 0, ist noch keinerlei Information zugeflossen. Ist sie hoch, ist viel Information zugeflossen und wird wenig weitere Unsicherheitsreduktion erwartet. (4) ist die relative Entropie zwischen  $in$  und  $imax$ .

Der nächste Abschnitt beschäftigt sich mit Fragen des Aufbaus und der Veränderung von Informationsmaßen.

### 3.3 Aufbau und Veränderung von Informationsmaßen

Ein Informationsmaß  $im$  ist ein Zahlenwerk auf der Menge  $L|L$  aller Konditionale, das den Axiomen A1-A4 genügen muß. Theoretisch könnte man es durch Vergabe aller  $im(v)$  unter Beachtung der Axiome festlegen, das ist jedoch aus mehreren Gründen nicht wünschenswert:

- Alle  $im(v)$  zu schätzen und dann die Axiome zu verifizieren, ist eine Sisyphosarbeit.
- $|V|$  ist schon bei kleinen Wissensdomänen gewaltig. Bei nur zwanzig binären Variablen  $V_j$  ist die Kardialität  $|V|$  bereits 1.048.576.
- Die vollständige Festlegung aller  $im(B|A)$  läßt keinen Freiraum für den angekündigten Ableitungsbegriff in der informationstheoretischen Konditionallogik.

Der letzte Punkt bedarf der Erläuterung. Sind beispielsweise  $im(B|A)=0$  und  $im(C|B)=0$ , so ist aufgrund der Axiome A3 und A4  $im(C|A)$  berechenbar und es hat ebenfalls den Wert 0, seine Festlegung wäre also redundant. Es ist ja gerade gewollt, das Informationsmaß von Konditionalen aus dem anderer Konditionale abzuleiten. In einer informationstheoretischen Konditionallogik hebt der Ableitungsbegriff eben gerade auf die Bestimmung eines Modells

$im^*$  bei gegebenen Konditionalen  $B_i|A_i, i = 1...I$ , mit fixierten Unsicherheiten ab. Hat man ein „vernünftiges“  $im^*$  gefunden, so ist für irgendein weiteres Konditional  $D|C$  der Zahlenwert  $im^*(D|C)$  aus den fixierten Unsicherheiten abgeleitet. Die Frage nach einem „vernünftigen“  $im^*$  lösen wir mit folgender Optimierungsaufgabe.

$$im^* = \underset{in}{\operatorname{argmin}} \sum_v pn(v) \cdot (imax(v) - in(v)) \quad (5)$$

u.d.N.  $in(B_i|A_i) = 0, \quad i = 1...I.$

Gesucht wird also das Informationsmaß  $im^*$ , welches

- die Forderungen „für alle  $i$  impliziert die Aussage  $A_i$  im informationstheoretischen Sinne die Aussage  $B_i$ “ erfüllt. In  $im^*$  ist die Gültigkeit von  $B_i$  bei bekannten  $A_i$  absolut uninformativ.  $B_i|A_i$  ist in  $im^*$  sicher.
- so wenig wie möglich von  $imax$  abweicht. Die Wahl von  $im^*$  folgt dem Vorsichtsprinzip. Unter Berücksichtigung der Restriktionen in (5) ist die Unsicherheit in  $imax$  so weit wie möglich zu bewahren. Die Adaption von  $imax$  an die Forderungen  $in(B_i|A_i) = 0, i = 1...I$ , soll informationstreu sein. Will heißen: Es soll nicht mehr Information in  $im^*$  hineinfließen als in den Restriktionen gefordert. Durch nichts belegte Unsicherheitsreduktion wird vermieden.

Die Aufgabe (5) findet in der Literatur anspruchsvolle axiomatische Begründungen [PAV, 1990], [SHJ, 1980], [KIS, 1998].

Zur Verdeutlichung der recht abstrakten Formeln in (5) seien nochmals folgende Beispiele erwähnt:  $im^*(\text{VOGEL}=\text{ja}|\text{AMSEL}=\text{ja})=0$ ,  $im^*(\text{brüten}|\text{VOGEL}=\text{ja})=0$  oder  $im^*(\text{nicht\_fliegen}|\text{STRAUß}=\text{ja})=0$  sind das informationslogische Pendant zu aussagelogischen Implikationen. Sind sie in  $im^*$  verinnerlicht, folgt aus z. B.  $\text{AMSEL}=\text{ja}$  stets  $\text{VOGEL}=\text{ja}$ .

Ist  $im^*$  mittels (5) bestimmt, so ist  $im^*$  der informationstheoretisch epistemische Zustand auf der Domäne. Im restlichen Teil dieses Abschnitts wird nun beschrieben, wie epistemische Zustände zur Messung von Abrufimpulsen dienen können. Diese Messung basiert auf zwei Berechnungsschritten:

- i) einer Adaption des epistemischen Zustands an einen temporären, situativen Fokus.
- ii) einer Messung des Abrufimpulses für in Frage kommende Zielaussagen.

Ad i) Zur Verdeutlichung mag der temporäre situative Fokus etwa sein: „Wenn ich nun sicher bin, daß etwas „brüten“ und „nicht\_fliegen“ kann“. Weder „brüten“ noch „nicht\_fliegen“ sind i.a. in  $im^*$  sicher, es gilt weder  $im^*(\text{brüten})=0$  noch  $im^*(\text{nicht\_fliegen})=0$ . Der epistemische

Zustand  $im^*$  ist an die neue Situation anzupassen. Das geschieht durch Lösung einer Optimierungsaufgabe. Es sei  $F_k, k = 1 \dots K$ , eine Menge informationstheoretischer Fokusse, die temporär absolute Gültigkeit bekommen sollen. Dann löst man

$$im^{**} = \underset{in}{\operatorname{argmin}} \sum_v pn(v) \cdot (im^*(v) - in(v)) \quad (6)$$

u.d.N.  $in(F_k) = 0, \quad k = 1 \dots K.$

$im^*$  wurde an die Fokusse angepaßt, sie sind in  $im^{**}$  gültig.

Ad ii) Die Zielaussagen mögen sein: WAL=ja, STRAUß=ja. Welche der beiden Aussagen erfährt einen höheren Abrufimpuls unter dem Fokus „brüten“ und „nicht\_fliegen“? Etwas allgemeiner wollen wir die Frage nach dem Abrufimpuls einer beliebigen Aussage  $H$  beantworten (und ihn dann mit dem anderer Aussagen vergleichen).

**Definition 4** (Abrufimpuls  $ruf$ )

Der Abrufimpuls auf die Aussage  $H$  unter dem Fokus (6) ist definiert als

$$ruf(H) = pm^{**}(H) \cdot (im^*(H) - im^{**}(H)) + pm^{**}(\overline{H}) \cdot (im^*(\overline{H}) - im^{**}(\overline{H})). \quad (7)$$

Hierbei ist  $\overline{H}$  die Verneinung von  $H$ , sind  $im^*$  und  $im^{**}$  epistemische Zustände vor und nach der Fokussierung und ist  $pm^{**}$  das dem  $im^{**}$  entsprechende Wahrscheinlichkeitsmaß. (7) ist die Relative Entropie zwischen  $im^*$  und  $im^{**}$ , sie mißt den Einfluß des Fokus auf die Zielaussage  $H$ . Wir hoffen, daß die Zielaussage STRAUß=ja einen höheren Impuls aus „brüten“ und „nicht\_fliegen“ erhält als etwa die Aussage WAL=ja. In Abschnitt 4.4 wird sich diese Hoffnung erfüllen.

Wie die erarbeiteten Konzepte nun auf Informationsnetze übertragen werden, ist Gegenstand des Kapitels 4.

## 4. Assoziation in Informationsnetzen

### 4.1 Der Netzaufbau durch Konditionale

Nach den Vorbereitungen in Abschnitt 3.3 erfolgt nun der Aufbau von Informationsnetzen durch Konditionale. Zunächst werden alle Kategorien und alle sie beschreibenden Eigenschaften festgelegt. Für jede Kategorie wird ein binäres Attribut  $KATEGORIE=ja/nein$  und für jede Eigenschaft das Attribut  $EIGENSCHAFT=aus_1/ \dots / aus_M$ , angelegt. Die Symbole  $aus_m$  stehen hier für konkrete Ausprägungen,  $M$  ist die jeweilige Anzahl von Ausprägungen der  $EIGENSCHAFT$ . Als Forderungen an das aufzubauende Informationsmaß sind in dieser Arbeit zugelassen

- $EIGENSCHAFT=aus|KATEGORIE=ja$  ist sicher (8)
- $KATEGORIE=ja|KATEGORIE=ja$  ist sicher.

Selbstverständlich könnten nach Kapitel 3 auch komplexere Konditionale formuliert werden, darauf wird jedoch zugunsten der Fälle (8) verzichtet; Prämissen und Konklusion von Konditionalen sind stets Literale.

Die Eigenschaften und Kategorien werden zu Knoten des Informationsnetzes und die durch die Richtung Prämisse  $\rightarrow$  Konklusion festgelegten Beziehungen werden im Graphen durch Pfeile visualisiert. Einen solchen Graphen zeigte bereits Abbildung 2 in Abschnitt 2.2. Aus technischen Gründen steht für „ja/nein“ in den folgenden Screenshots „1/0“.

Nun wird das Informationsmaß  $im^*$  nach (5) berechnet. In den graphischen Darstellungen wird nicht das gesamte Maß auf  $V$  angegeben, sondern die auf das Einheitsintervall normierten Zahlen  $pm^* = 2^{-im^*}$ , und zwar nur für Literale.

Wird auf eine bestimmte Situation fokussiert, so erfolgt dies durch „Anklicken“ des oder der gewünschten sicheren Literale. Der sich anschließende automatische Rechenprozeß liefert  $im^{**}$  gemäß (6). Auch hier wird wieder  $pm^{**} = 2^{-im^{**}}$  für alle Literale angezeigt. Alle diese Operationen werden in der Expertensystemshell SPIRIT realisiert und im folgenden Abschnitt anhand von Screenshots aufgezeigt.

Die Berechnung des Abrufimpulses gemäß (7) erfolgt zur Zeit noch außerhalb der Shell und wird für gewünschte Zielaussagen beigefügt. Alle beschriebenen Schritte des Assoziierungsprozesses werden nun an drei Beispielen vorgeführt.

## 4.2 Die Assoziierung geometrischer Figuren

Das bereits in der Einleitung erwähnte Beispiel der geometrischen Figuren Quadrat, Rechteck, Raute, Parallelogramm und Trapez wird hier wieder aufgegriffen. Alle Begriffe sind KATEGORIEN=ja (1)/nein (0), die in SPIRIT angelegt werden. Berücksichtigt werden nun in diesem kleinen Beispiel nur Relationen der Form *is-a*, die wir aufgrund unserer mathematischen Grundkenntnisse festlegen. Letztlich sind die Relationen natürlich durch Eigenschaften begründet, die aber hier nur implizite Anwendung finden. Die folgende Tabelle 1 gibt die sicheren Konditionale an und die anschließende Abbildung 3 die dazugehörige graphische Struktur.

Index	Rule text
0	RECHTECK   QUADRAT
1	TRAPEZ   QUADRAT
2	RAUTE   QUADRAT
3	PARALLELOGRAMM   QUADRAT
4	PARALLELOGRAMM   RECHTECK
5	TRAPEZ   RECHTECK
6	PARALLELOGRAMM   RAUTE
7	TRAPEZ   RAUTE
8	TRAPEZ   PARALLELOGRAMM

Tabelle 1 Ober-/Unterkategorien für geometrische Figuren

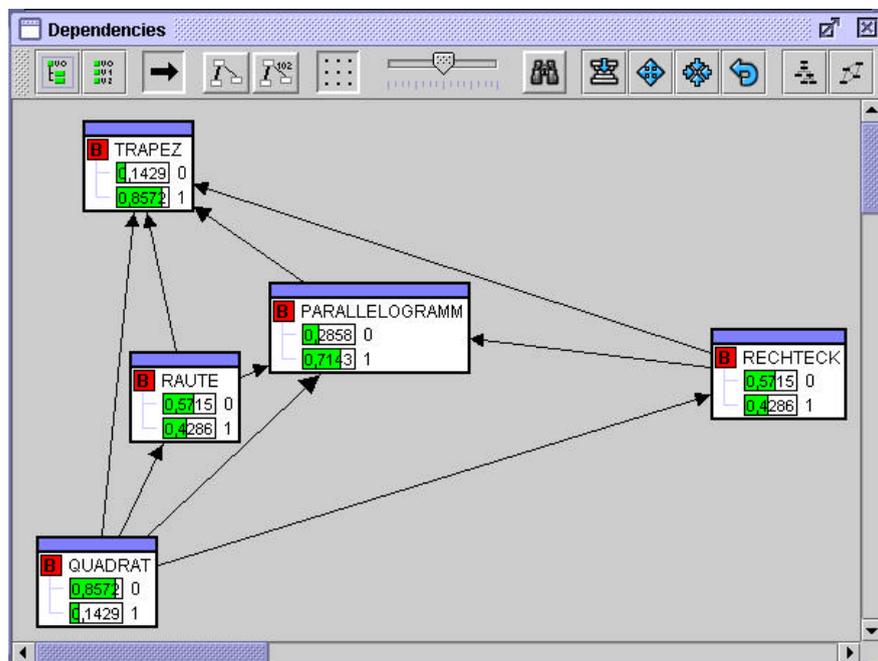


Abbildung 3 Graphische Struktur zu Tabelle 1

Abbildung 3 weist z. B. das Informationsmaß für QUADRAT=ja mit  $2.0807 = -ld .1429$  aus. Die anderen Zahlen in den Knoten lesen sich entsprechend.

Nun wird auf das Rechteck fokussiert und das Informationsmaß  $im^{**}$  nach Formel (6) berechnet. Abbildung 4 zeigt die Resultate.

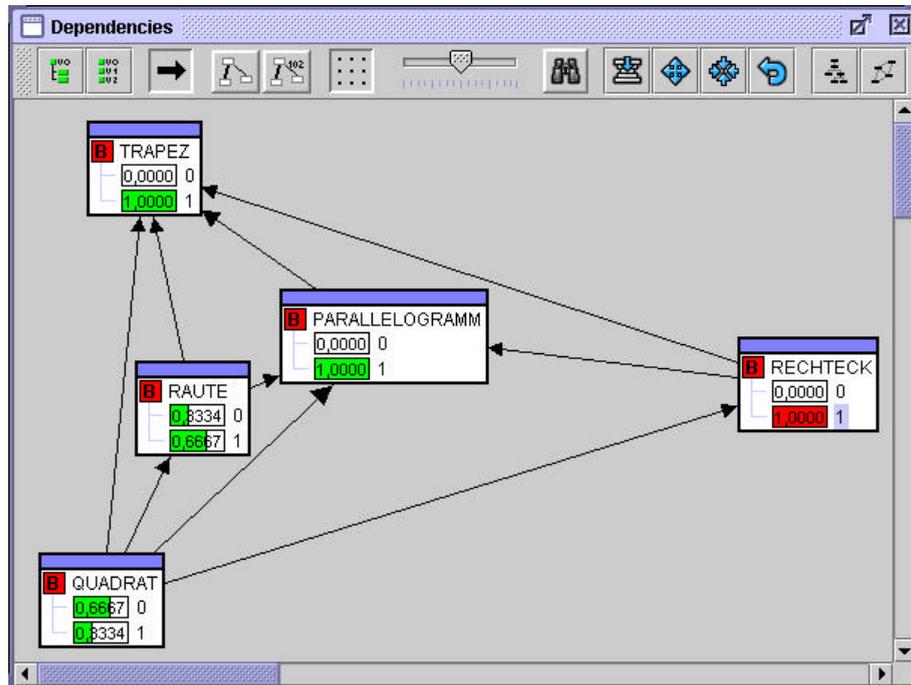


Abbildung 4 Fokussierung von RECHTECK=ja

Anschließend erfolgt die Berechnung der Abrufimpulse gemäß (7) in Abschnitt 3.3. Die Ergebnisse finden sich in Tabelle 2.

Figur	Quadrat	Rechteck	Raute	Parallelogramm	Trapez
<i>ruf</i>	.1658	-	.1658	.4854	.2224
Rang	3	-	3	1	2

Tabelle 2 Abrufimpulse und Ränge zu geometrischen Figuren.

Das Ergebnis spiegelt wider, was aufgrund der kategorialen Struktur erwartet wurde: Quadrat und Raute werden mit dem geringsten Impuls abgerufen – sie haben teils speziellere und teils andere Eigenschaften als das Rechteck; Parallelogramm und Trapez werden mit höheren Impulsen abgerufen – sie sind Verallgemeinerungen von Rechtecken. Das Parallelogramm hat schließlich die größte semantische Nähe zum Rechteck.

Das Beispiel des folgenden Abschnitts ist komplexer und zeigt die Leistungsfähigkeit der vorgestellten Assoziierungstheorie deutlicher als das der geometrischen Figuren.

## 4.3 Das konnektionistische Modell von McClelland

### 4.3.1 Entwicklung des Modells

McClelland [MCL, 1981] entwickelte ein Modell der Wissensverarbeitung in konnektionistischen Netzen. In solchen Netzen suchte er dann Abrufimpulse nach Fokussierung auf Eigenschaften oder Kategorien abzuleiten. Die Ableitung erfolgte *argumentativ* und nicht *rechnerisch*. In diesem Abschnitt wird das von dem genannten Autor studierte Beispiel mittels des informationstheoretischen Ansatzes behandelt.

Die folgende Tabelle liefert das Modell. Es enthält 18 Kategorien, nämlich die Personen. Also sind, anders als in Semantischen Netzen, ART, LANCE oder RICK nicht etwa Instanzen oder Objekte, sondern – wenn auch sehr spezielle – Kategorien. Ihre Eigenschaften sind die Attribute:

- ALTER=20-29/.../90-99
- SCHULE=mittel/ober/college
- FAMILIE=ledig/verheiratet/geschieden
- BERUFUNG=buchmacher/dealer/einbrecher
- BANDE=jets/sharks.

Jede Kategorie hat mithin 5 Eigenschaften mit den aufgeführten Ausprägungen. Wie man sieht, kommen die Herren aus einem recht zweifelhaften Milieu, wo die Berufung durchaus diskriminantes Merkmal ist.

Name	Altersstufe	Schulbildung	Familienstand	Berufung
Jets				
Art	40-49	Mittelschule	ledig	Dealer
A1	30-39	Mittelschule	verheiratet	Einbrecher
Sam	20-29	College	verheiratet	Buchmacher
Clyde	40-49	Mittelschule	ledig	Buchmacher
Mike	30-39	Mittelschule	ledig	Buchmacher
Jim	20-29	Oberschule	geschieden	Einbrecher
Greg	20-29	Mittelschule	Verheiratet	Einbrecher
Ralph	30-39	Mittelschule	ledig	Dealer
Lance	20-29	Mittelschule	ledig	Einbrecher
Sharks				
Phil	30-39	College	verheiratet	Dealer
Ike	30-39	Mittelschule	verheiratet	Einbrecher
Nick	30-39	College	ledig	Buchmacher
Don	40-49	Oberschule	ledig	Dealer
Ned	30-39	Oberschule	verheiratet	Buchmacher
Karl	50-59	Oberschule	geschieden	Dealer
Ken	20-29	Mittelschule	verheiratet	Dealer
Earl	90-99	Oberschule	verheiratet	Einbrecher
Rick	30-39	Oberschule	geschieden	Einbrecher

Tabelle 3 Jets, Sharks und ihre Eigenschaften

Die Zuweisung der Eigenschaften zu Kategorien erfolgt nun wieder mittels informationstheoretischer Konditionale, wie z. B.

ALTER=20-29|LANCE=ja ist sicher oder  
 BERUFUNG=dealer|PHIL=ja ist sicher (9)

Wie der Leser sofort nachvollzieht, werden zur Beschreibung der gesamten Information in Tabelle 90 Konditionale benötigt. Der folgende Zusammenhangsgraph zeigt die Vielschichtigkeit der Abhängigkeiten.

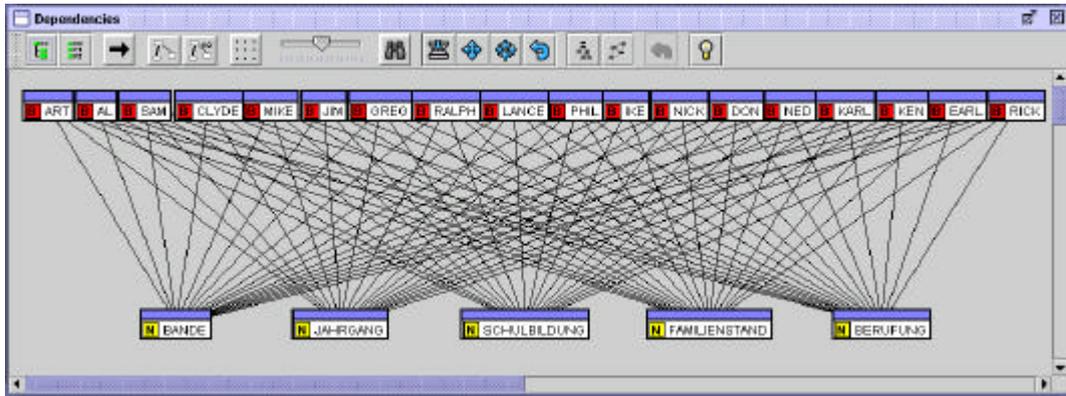


Abbildung 5 Graph zum Modell von McClelland

In [AND, 2001] wird nun vorgeschlagen, in diesem Modell verschiedene Informationen abzurufen. Die entsprechenden Abrufe wiederholen wir zunächst verbal, formulieren auf argumentativer Ebene vermutete Abrufergebnisse und stellen dann, nach dem Einschub 4.3.2, in Abschnitt 4.3.3 Abrufimpulse des informationstheoretischen Ansatzes in tabellarischer Form vor.

Abruf 1 Fokussierung auf LANCE; Abruf von Eigenschaften.

Es sollten genau die LANCE zugewiesenen Eigenschaften abgerufen werden.

Abruf 2 Fokussierung auf die Eigenschaften BANDE=sharks, ALTER=20-29; Abruf von Kategorien.

Da KEN der einzige Shark dieser Altersgruppe ist, sollte er auch abgerufen werden.

Abruf 3 Fokussierung auf BANDE=sharks, ALTER=20-29, FAMILIE=verheiratet, BERUFUNG=buchmacher; Abruf von Kategorien.

Wie man der Tabelle entnimmt, gibt es keine Person mit den genannten Eigenschaften. Jedoch kommen SAM, KEN und NED dem Eigenschaftsmuster am nächsten; sie sollten abgerufen werden. Dieser Analogieschluß ist schon recht anspruchsvoll.

Abruf 4 Fokussierung auf BANDE=jets, Abruf von Eigenschaften.

Die Frage, was uns denn bei den Jets so alles einfällt (Generalisierung), ruft Eigenschaften durch Eigenschaften ab. Die Assoziation ist ebenfalls, wie schon bei Abruf 3, recht komplex. Die Antwort kann nur über die Kategorien erfolgen. Wir vermuten: Bei den Jets fallen uns die

Merkmale Mittelschüler, ledig und 20-29 ein. Dabei orientieren wir uns an den Häufigkeiten der Merkmale gemäß Tabelle 3. Ob das zutrifft, werden die weiteren Untersuchungen zeigen.

Abruf 5 Löschen der Berufung von LANCE; Fokussierung auf LANCE; Abruf seiner Berufung.

Abruf 5 stellt die Königsform der Assoziierung dar. Hier wird durch Analogien von einer Kategorie auf eine nicht ausgewiesene Eigenschaft geschlossen. Bitte vollziehen Sie in Tabelle 3 nach, daß Lance zu der Gruppe der ledigen Jets mit Mittelschulabschluß gehört. Die sind aber vornehmlich Buchmacher. Also könnte Lance auch Buchmacher sein. (Dem Schluß, wie er in [AND, 2001] gefolgert wird, daß nämlich LANCE ein EINBRECHER sei, kann hier nicht gefolgt werden. Studieren Sie bitte nochmals Tabelle 3. Bei dem Schluß in [AND, 2001] ist wohl eher der Wunsch der Vater des Gedankens gewesen.)

Sämtliche Abrufe werden in Abschnitt 4.3.3 wiederholt, und in tabellarischer Form werden die Abrufimpulse in [bit] angegeben. Dann folgt jeweils eine Interpretation der Ergebnisse. Zuvor muß jedoch die Frage „offener“ und „geschlossener“ Attribute behandelt werden.

#### **4.3.2 Offene versus Geschlossene Attribute**

In Abschnitt 2.2 entwickelten wir den Gedanken, daß zur Unterscheidung von Kategorien differenzierende Eigenschaften benannt werden müssen. Diese Aussage ist natürlich richtig, muß jedoch nun angesichts der verschiedenen Aufgaben, die wir einem Informationsnetz übertragen, ein wenig relativiert werden. Das konnektionistische Modell von McClelland, und zwar insbesondere der Abruf 4 des letzten Abschnitts, eignet sich gut zu einer tieferen Diskussion dieser Problematik.

Fokussiert man auf BANDE=jets und wünscht einen generalisierenden Abruf aller Eigenschaften, so sollte man schon etwas präziser bei dieser Anfrage sein:

- Wünscht man die Berechnung der bedingten Wahrscheinlichkeiten der Ausprägungen der Attribute                   oder
- wünscht man den Abrufimpuls?

Machen Sie sich bitte klar, daß mit den 90 sicheren Konditionalen der Form (9) im vorigen Abschnitt *und* der Vergabe der Wahrscheinlichkeiten von je 1/18 auf alle – aufgrund ihrer Merkmalsprofile disjunkten – Personen die gesamte Kontingenztafel über den Attributen

ART, AL, ... RICK

ALTER=20-29/.../90-99

SCHULE=mittel/ober/college

FAMILIE=ledig/verheiratet/geschieden

BERUFUNG=buchmacher/dealer/einbrecher

BANDE=jets/sharks

festgelegt ist. Alle (bedingten) Wahrscheinlichkeiten entsprechen somit (bedingten) Häufigkeiten in Tabelle 3.

So ist z. B. die bedingte Wahrscheinlichkeit von ALTER=20-29 | BANDE=sharks mit 4/9 größer als die 3/9 von ALTER=30-39 | BANDE=sharks.

Solche Berechnungen sind aufgrund der Tatsache möglich, daß alle Attribute disjunkte und vollständige Ausprägungen haben, deren Randwahrscheinlichkeiten sich zu 1 addieren. Solche Attribute nennen wir *geschlossen*. Geschlossene Attribute dienen der Berechnung statistischer oder probabilistischer Kennzahlen.

Geschlossene Attribute sind auch dann notwendig, wenn sie Trennungszwecken dienen. Ihre probabilistischen Belegungen lassen dann formallogische Schlüsse zu. Sind z. B. »säugen | Säuger« und »brüten | VOGEL« jeweils sicher, sind säugen, brüten zwei einander ausschließende aber vollständige Ausprägungen des Attributs FORTPFLANZUNG, so gilt in jedem Wahrscheinlichkeitsmaß  $pm$

$$pm(\text{SÄUGER})=1 \quad \Rightarrow \quad pm(\text{säugen})=1 \Rightarrow$$

$$pm(\text{brüten})=0 \quad \Rightarrow \quad pm(\text{VOGEL})=0.$$

Analog schließt man, daß ein Vogel kein Säuger sein kann. Sichere probabilistische Belegungen auf den Merkmalsräumen, die ja den informationstheoretischen äquivalent sind, gestatten logisches Schließen. Vergleiche auch die Anmerkungen in Abschnitt 2.2.

Völlig anders ist die Situation bei der Berechnung von Abrufimpulsen in Informationsnetzen. Hier wird bewußt auf disjunkte und erschöpfende Ausprägungen der Attribute verzichtet. Bitte greifen Sie diesen Gedanken beim Abruf 4 im nächsten Abschnitt wieder auf, folgen Sie jedoch auch den Ausführungen in folgendem Beispiel.

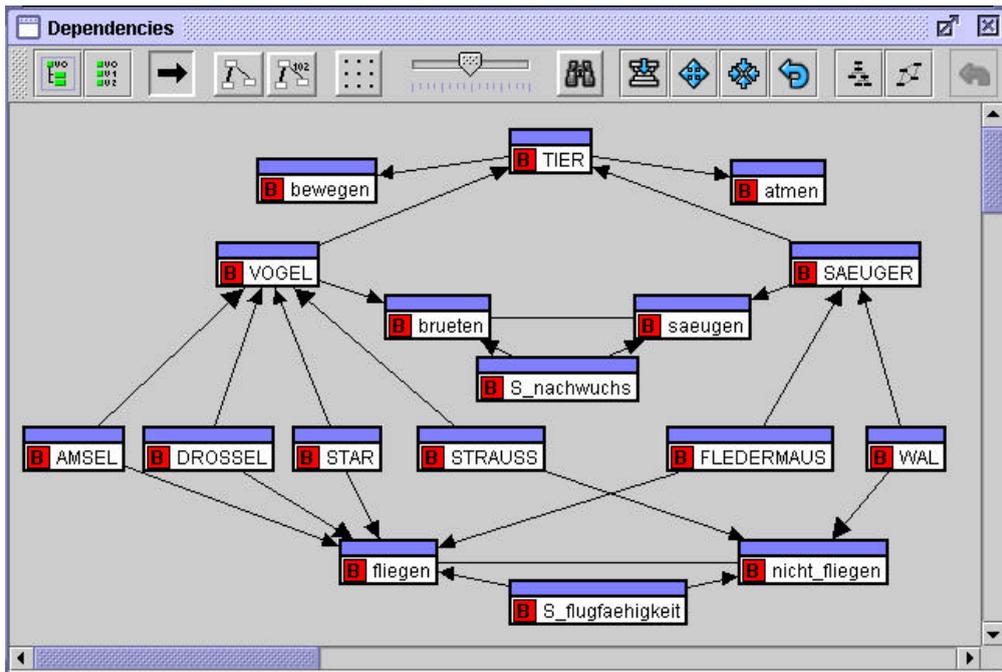


Abbildung 6 Schalter sowie geöffnetes und geschlossenes Attribut

Das Informationsnetz in Abbildung 6 zeigt bekannte Zusammenhänge auf; das Attribut FLUGFÄHIGKEIT=fliegen/nicht\_fliegen wurde geöffnet. Technisch geschieht das mittels einer Aufspaltung in zwei Attribute FLIEGEN und NICHT\_FLIEGEN, die mittels eines Schalters S ge- bzw. entkoppelt werden können.

FLUGFÄHIGKEIT=fliegen/nicht\_fliegen

FLIEGEN=ja (1)/nein (0)    NICHT\_FLIEGEN=ja (1)/nein (0)

Die neuen Attribute FLIEGEN und NICHT\_FLIEGEN können nun bei geöffnetem Schalter unabhängig voneinander im Netz agieren. Beide können einen Abrufimpuls bei Fokussierung auf den VOGEL erhalten – was ja auch wegen der mangelnden Flugfähigkeit von Straußen erwünscht ist. Bei geschlossenem Schalter sind fliegen und nicht\_fliegen wieder exklusive und erschöpfende Ausprägungen des Attributs FLUGFÄHIGKEIT.

Je nach Aufgabe im Netz werden Attribute geschlossen oder geöffnet. Beide Funktionen, die wahrscheinlichkeitstheoretisch-statistische und die informationstheoretische, können im Informationsnetz wahrgenommen werden. Wenn nichts anderes gesagt, werden *Abrufimpulse* in den folgenden Abschnitten dieser Arbeit bei geöffneten Attributen vorgenommen.

### 4.3.3 Abrufe im Informationsnetz

Nach den Bemerkungen in Abschnitt 4.3.2 greifen wir die Fragestellungen in dem Bandenbeispiel wieder auf. Es werden nun bei geöffneten Attributen die Abrufimpulse in [bit] berechnet. Wir folgen dabei der bereits in Abschnitt 4.3.1 verwendeten Abrufnumerierung. Die Menge aller sicheren Konditionale sowie das zu Abbildung 5 gehörige informationstheoretische Netz mit den in Abschnitt 4.3.2 erläuterten Schaltern sind wegen ihrer Umfänge im Anhang beigelegt. Die Modellierung der Schalter ersieht der Leser unmittelbar. Mit 120 Konditionalen ist das Modell schon recht umfangreich geworden.

Abruf 1 Nach Fokussierung auf LANCE hat man die Impulswerte aus Tabelle 4.

ALTER	SCHULE	FAMILIE	BERUF	BANDE
<u>20–29</u> .1318	<u>mittelschule</u> .0614	<u>ledig</u> .0910	<u>buchmacher</u> .0136	<u>jets</u> .0651
<u>30–39</u> .0225	<u>oberschule</u> .0100	<u>verheiratet</u> .0266	<u>dealer</u> .0150	<u>sharks</u> .0177
<u>40–49</u> .0073	<u>college</u> .0060	<u>geschieden</u> .0050	<u>einbrecher</u> .0885	-
<u>50–53</u> .0004	-	-	-	-
<u>90–99</u> .0006	-	-	-	-

Tabelle 4 Fokussierung auf LANCE, Abrufimpulse in [bit]

Das Informationsnetz hat alle Ausprägungen richtig abgerufen, sie sind grau unterlegt.

Auch Abruf 4 fragt nach Ausprägungen, wenn auch generalisierend nach Merkmalen der Jets. Die zugehörige Tabelle hat einen ähnlichen Aufbau wie Tabelle 4. Wir geben sie als nächstes an und interpretieren sie dann.

ALTER	SCHULE	FAMILIE	BERUF
<u>20–29</u> .0028	<u>mittelschule</u> .0063	<u>ledig</u> .0039	<u>buchmacher</u> .0020
<u>30–39</u> .0034	<u>oberschule</u> .0007	<u>verheiratet</u> .0031	<u>dealer</u> .0020
40–49 .0009	<u>college</u> .0011	<u>geschieden</u> .0004	<u>einbrecher</u> .0032
<u>50–53</u> .0000	-	-	-
<u>90–99</u> .0001	-	-	-

Tabelle 5 Generalisierende Eigenschaften der Jets, Abrufimpulse in [bit]

In Tabelle 5 sind die stärksten Ausprägungen einer jeden Kategorie wieder grau unterlegt. Wir finden bestätigt, was wir vermuteten: Unter den Jets fällt uns SCHULE= mittelschule, FAMILIE=ledig, BERUF=einbrecher ein. Lediglich bei der Altersfrage ist das System unentschieden: Es vergibt die größten Impulse an die Altersgruppen 20-29 und 30-39, mit einem leicht stärkeren Hinweis auf die letztere. Hier wird der kritische Leser zunächst protestieren, sind doch die relativen Häufigkeiten der Altersgruppen anders verteilt. 4/9 der Jets sind 20-29 und 3/9 sind 30-39, siehe Tabelle 3 in Abschnitt 4.3.1. Nun haben wir aber nicht nach relativen Häufigkeiten, sondern nach Abrufimpulsen gefragt. So wird am stärksten die Mittelschule (.0063 [bit]) abgerufen und dann der Familienstand ledig (.0039 [bit]). In beiden Gruppen dominieren die 30-39 jährigen, siehe wiederum Tabelle 3. Sie fallen uns zunächst ein, dann erst die 20-29 jährigen. Wollte man bedingte Häufigkeit modellieren, wäre dies in der vorgestellten Konditionalsprache keine Schwierigkeit [RKI, 1996]; vergleiche auch die Anmerkungen in Abschnitt 4.3.2. Sie würden dann auch richtig abgefragt werden. Das menschliche Hirn verfügt offensichtlich sowohl über informationstheoretische Abrufmechanismen als auch über statistisches und logisches Wissen; beides ist nicht miteinander zu verwechseln. Auch in SPIRIT können diese Aspekte im gleichen Modell verarbeitet werden. Erste Überlegungen hierzu stellen wir in Kapitel 5 vor.

Bei Abruf 2 und Abruf 3 werden jeweils KATEGORIEN, hier Personen abgerufen. Im ersten Fall aufgrund der Information, daß jemand zu den Sharks gehört und zwischen 20 und 29 Jahre alt ist, im zweiten Fall aufgrund des Ausprägungskatalogs sharks, 20-29, verheiratet, buchmacher. Die Ergebnisse werden in Tabelle festgehalten und anschließend kommentiert.

	ART	AL	SAM	CLYDE	MIKE	JIM	GREG	RALPH	LANCE
Abruf 2	.0016	.0025	.0058	.0015	.0020	.0056	.0070	.0020	.0066
Abruf 3	.0037	.0057	.0191	.0084	.0106	.0079	.0115	.0044	.0100

	PHIL	IKE	NICK	DON	NED	KARL	KEN	EARL	RICK
Abruf 2	.0030	.0037	.0028	.0025	.0030	.0014	.0093	.0018	.0029
Abruf 3	.0073	.0073	.0116	.0049	.0146	.0022	.0141	.0034	.0047

Tabelle 6 Impulse in [bit] zu den Abrufen 2 und 3

Wieder bestätigt sich die Leistungsfähigkeit des informationstheoretischen Abrufkonzepts. Bei Abruf 2 hat KEN den höchsten Impuls und bei Abruf 3 entsprechen die drei Herren SAM, NED, KEN dem vorgegebenen Profil am besten.

Es verbleibt die Vorstellung der Ergebnisse zu Abruf 5, wo nach dem Beruf von LANCE mittels Vergleichs ähnlicher Profile der Personen gefragt wird. Die folgende Tabelle liefert die Resultate.

buchmacher	dealer	einbrecher
.0500	.0256	.0086

Tabelle 7 Assoziative Berufsbestimmung von LANCE, Abrufimpulse in [bit]

Wie bereits argumentativ erarbeitet wurde, ist LANCE wohl Buchmacher, folgt man seinem sonstigen Eigenschaftsprofil.

## 4.4 Eine Taxonomie

Taxonomien dienen stets als Beispiele für kategoriale Strukturen, insbesondere in Semantischen Netzen dargestellt. Abbildung 1 zeigt ein solches und Abbildung 2 das entsprechende Informationsnetz. Abbildung 6 demonstrierte einen Schalter zum Öffnen und Schließen des Attributs gemäß den Ausführungen in Abschnitt 4.3.2.

Bitte rekapitulieren Sie nochmals:

- Auch der biologische Laie kann
  - Aufgrund des diskriminanten Merkmalspaares brüten/säugen Vögel und Säuger voneinander abgrenzen
  - Wale und Fledermäuse einerseits sowie Strauße und fliegende Vögel andererseits voneinander abgrenzen, falls das diskriminante Merkmalspaar fliegen/nicht\_fliegen zur Verfügung steht.
- Der Nicht-Ornithologe kennt zwar Amseln, Drosseln und Stare, weiß sie jedoch nicht zu unterscheiden; hier fehlen differenzierende Merkmale.

Das Informationsnetz der Abbildung 2 wird durch Öffnen der Schalter S-flugfähigkeit und S-nachwuchs auf die Berechnung von Abrufimpulsen vorbereitet, siehe Abbildung 7.

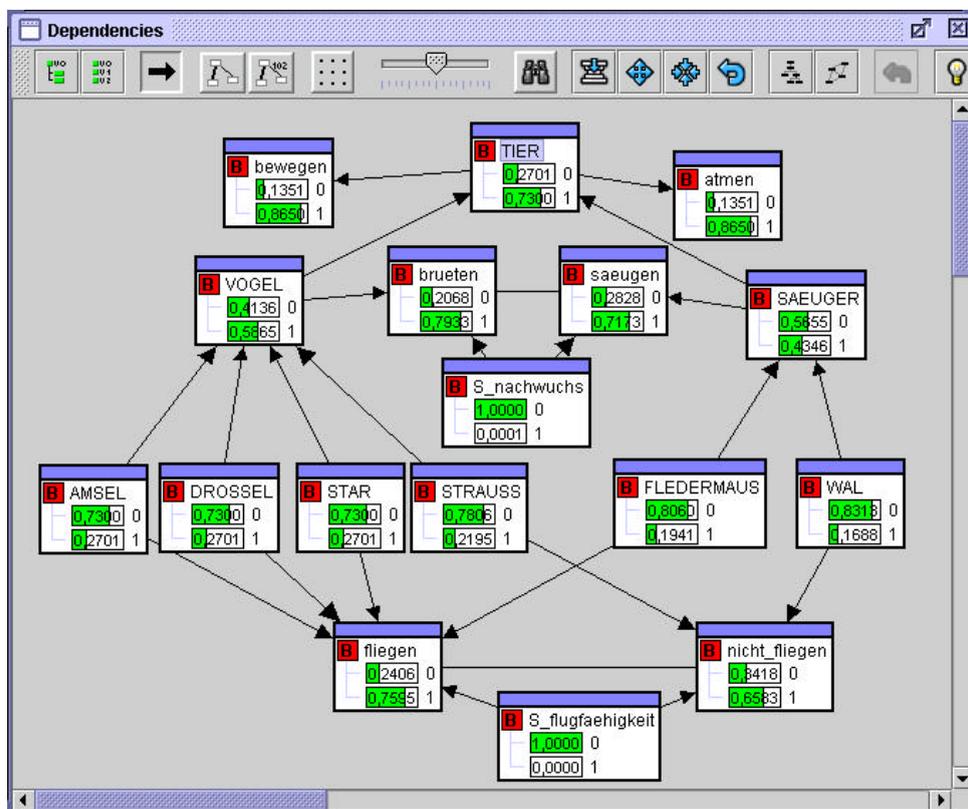


Abbildung 7 Taxonomie bei geöffneten Schaltern

Bei geöffneten Schaltern „weiß“ das Netz nicht, daß Vögel keine Säuger sind. Die Wahrscheinlichkeit  $pm^*(\text{SÄUGER} | \text{VOGEL}) = .6115$  ist ungleich null! Ebensovienig kann das Netz zwischen fliegenden Vögeln und Straußen noch zwischen fliegenden und nichtfliegenden Säugern unterscheiden. In diesem Zustand dient das Netz nicht zur statistisch-logischen Auswertung, sondern zur Impulsmessung.

Zunächst wird der Stimulus Vogel ins Netz geschickt. Die folgende Tabelle zeigt Impulse und Ränge für alle Attribute.

#### Kategorien

TIER	SÄUGER	VOGEL	WAL	FEDERN	STRAUß	AMSEL	DROSSEL	STAR
.454	.091	-	.027	.037	.089	.119	.119	.119
1	3	-	6	5	4	2	2	2

#### Eigenschaften

atmen	bewegen	brüten	säugen	fliegen	n_fliegen
.209	.209	.334	.030	.129	.027
2	2	1	4	3	5

Tabelle 8 Abrufimpulse in [bit] und Ränge zum Stimulus VOGEL

Gemäß der Abrufanzahlen kommt uns beim Stimulus VOGEL zunächst TIER, dann die Vogelarten AMSEL, DROSSEL, STAR, dann SÄUGER und dann erst der STRAUß in den Sinn. Bei den Eigenschaften sind es brüten, atmen, sich bewegen und dann fliegen. Beachtenswert ist jedoch, daß „fliegen“ einen leicht höheren Impuls erhält als selbst Amsel, Drossel oder Star!! Bestätigen Sie dieses Ergebnis aus Ihrer Erfahrung heraus!

Als nächstes betrachte man den Stimulus brüten und nicht\_fliegen. Wie schon Tabelle 8 werden wiederum die Impulse und Ränge mitgeteilt.

## Kategorien

TIER	SÄUGER	VOGEL	WAL	FEDERN	STRAUß	AMSEL	DROSSEL	STAR
.093	.053	.149	.060	.020	.119	.034	.034	.034
3	5	1	4	7	2	6	6	6

## Eigenschaften

atmen	bewegen	brüten	säugen	fliegen	n_fliegen
.041	.041	-	.017	.033	-
1	1	-	3	2	-

Tabelle 9 Abrufimpulse in [bit] und Ränge zum Stimulus n\_fliegen, brüten

Erwartungsgemäß hat der Strauß einen hohen und haben die Fledermaus und der Wal niedrige Impulse. Die übrigen Interpretationen überlassen wir dem Leser.

## 5. Abruf und Denken

An mehreren Stellen der vorliegenden Arbeit klang bereits an, daß in einem Informationsnetz sowohl Abrufimpulse als auch logische Denkprozesse realisiert werden können. Man vergleiche hierzu insbesondere die Ausführungen in Abschnitt 4.3.2 über offene und geschlossene Attribute. In diesem Kapitel soll das Verständnis für den Zusammenhang vertieft werden. Für jedes der Beispiele in den Abschnitten 4.2 *Die Assoziation geometrischer Figuren*, 4.3 *Das konnektionistische Modell von McClelland* und 4.4 *Eine Taxonomie* soll aufgezeigt werden, wie der Abruf und der sich anschließende logische Denkprozeß zusammenspielen.

Zunächst also zu den geometrischen Figuren. In der Abbildung 3 des Abschnitts 4.2 wurde das zum Modell gehörige Informationsnetz mit dem Informationsmaß auf den Knoten gezeigt. Das Anklicken von RECHTECK rief Abrufimpulse in der Reihenfolge PARALLELOGRAMM, TRAPEZ, QUADRAT, RAUTE hervor; man vergleiche hierzu Tabelle 2. Will man nun wissen, ob denn ein RECHTECK wirklich eine der vier genannten Figuren ist, muß man von der informationstheoretischen auf die probabilistische Interpretation des Netzes umschalten:

$pm^*(\text{PARALLELOGRAMM} \mid \text{RECHTECK}) = pm^*(\text{TRAPEZ} \mid \text{RECHTECK})=1,$

$pm^*(\text{QUADRAT} \mid \text{RECHTECK}) = 1/3, pm^*(\text{RAUTE} \mid \text{RECHTECK})= 2/3.$

Rechtecke sind – sicher – Parallelogramme und Trapeze. Daß die beiden übrigen Folgerungen falsch sind, weiß das Modell nicht, es müßte um weiteres Wissen angereichert werden. Natürlich sind hier die als sicher geltenden Zusammenhänge zwischen Rechtecken, Parallelogrammen und Trapezen lediglich die Wiederholung abgelegten Wissens; dennoch konnte der Unterschied zwischen Abruf und logischem Folgern gut herausgearbeitet werden. Besser noch wird das bei dem konnektionistischen Modell nach McClelland möglich sein.

Wie bereits in Abschnitt 4.3.2 ausgeführt, kann mit 90 sicheren Konditionalen und der Vergabe der Wahrscheinlichkeiten von je 1/18 auf alle Personen die gesamte Kontingenztafel über den Attributen fixiert werden; lesen Sie dort nochmals nach. Jetzt können einige Abrufe, wie sie in 4.3.3 informationstheoretisch realisiert wurden, durch eine probabilistische „Nachlese“ ergänzt werden, andere nicht.

Abruf 1 Natürlich werden die abgerufenen Eigenschaften von LANCE gemäß Tabelle 4 mit Sicherheit bestätigt, sie wurden ja als sichere Konditionale angelegt.

Abruf 4 Überprüft man die Eigenschaften in der Reihenfolge ihrer Abrufimpulse gemäß Tabelle 5, so ergibt sich: 78% der Jets sind Mittelschüler, 56% ledig, 44% Einbrecher. Lediglich bei den Altersgruppen erfolgt der höhere Impuls auf die leicht unterrepräsentierten 30-39 jährigen. Man vergleiche dazu die Ausführungen im Nachgang zu Tabelle 5.

Abruf 2 Der Abrufimpuls hat den richtigen Weg gewiesen: »KEN | (sharks  $\wedge$  20-29)« ist ein sicheres Konditional.

Abruf 3 Die höchsten Abrufimpulse waren für SAM, NED und KEN verzeichnet. Die entsprechenden bedingten Wahrscheinlichkeiten sind nicht berechenbar! Hier ist der informationstheoretische Abruf einer probabilistischen Analyse überlegen. Seine assoziative Fähigkeit ersetzt ein willkürliches Abwägen, welche der geforderten Eigenschaften sharks, 20-29, verheiratet, buchmacher denn nun weniger stringent seien; sind sie gemeinsam ja nicht erfüllbar.

Abruf 5 Ist LANCE nicht als Einbrecher bekannt, weist der Abrufimpuls zielsicher den Buchmacher als seinen vermuteten Beruf aus. Die mit SPIRIT errechneten bedingten Wahrscheinlichkeiten sind

$pm^*(\text{dealer} \mid \text{LANCE})= pm^*(\text{einbrecher} \mid \text{LANCE})= pm^*(\text{buchmacher} \mid \text{LANCE})=1/3.$

Man beachte, daß durch das fehlende Konditional »einbrecher | LANCE« nun die Kontingenztafel nicht mehr vollständig bestimmt ist; die obigen bedingten Wahrscheinlichkeiten  $pm^*$  sind Schätzungen nach dem Prinzip der Informationstreue. Man vergleiche die Ausführungen

runen im Anschluß an Gleichung (5) und die dort zitierten Arbeiten [SHJ, 1980], [PAV, 1990], [KIS, 1998]. Eine klassische Berechnung der geforderten bedingten Wahrscheinlichkeiten ist ohne Lösung der Aufgabe (5) nicht möglich! Zudem ist der Impuls auf den Buchmacher aussagekräftiger als die – für alle Berufungen gleichen – Wahrscheinlichkeiten. Auch hier schlägt die assoziative Kraft des Abrufs die statistisch/logische Analyse.

Zuletzt werden die Abrufimpulse aus Abschnitt 4.4 um logische Folgerungen für die *Taxonomie* ergänzt. Waren im Informationsnetz die Schalter S-flugfähigkeit und S-nachwuchs bisher geöffnet, so werden sie jetzt geschlossen. Lesen Sie nochmals in Abschnitt 4.3.2 nach.

Wiederum wird der Stimulus VOGEL durchs Netz geschickt, hat jedoch jetzt völlig andere Implikationen als in 4.4. Wir zählen einige Folgerungen auf; der Leser ist eingeladen, sie der Abbildung 8 zu entnehmen.

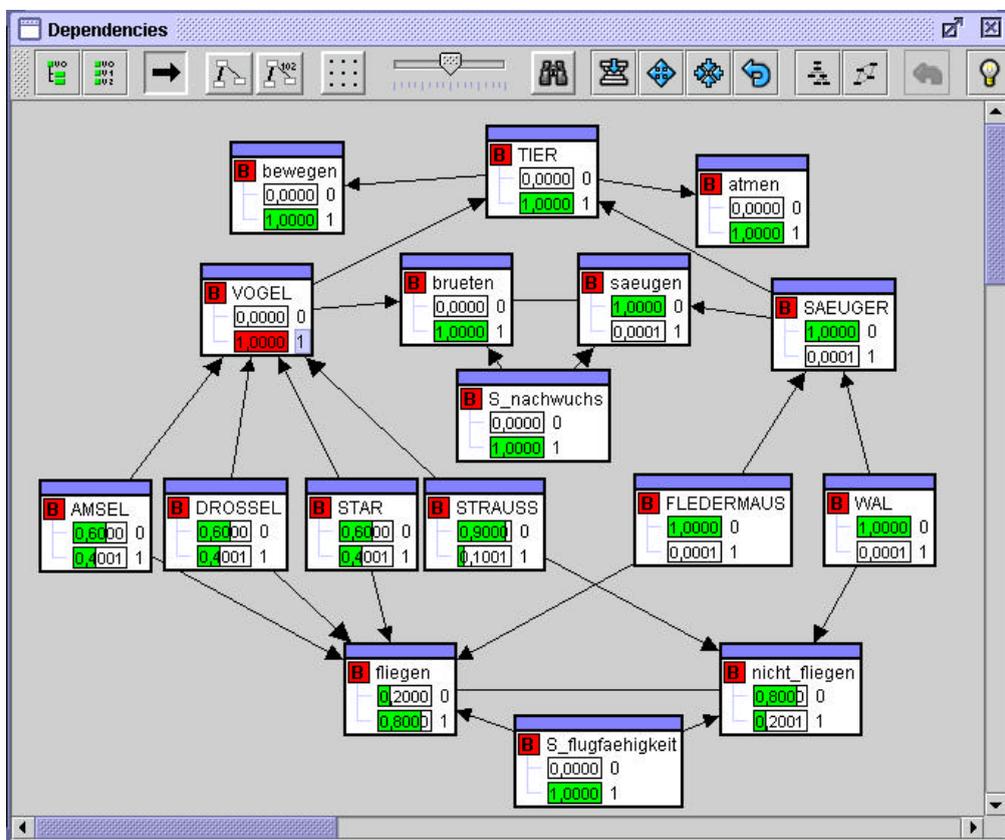


Abbildung 8 Wahrscheinlichkeiten im Netz unter der Bedingung VOGEL=ja

Ein Vogel ist ein Tier, atmet, bewegt sich, brütet, ist kein Säuger und mithin auch kein Wal und keine Fledermaus. Alle übrigen Wahrscheinlichkeiten im Netz sind vage. So ist beispielsweise die Wahrscheinlichkeit von .8000, daß ein Vogel fliegt, nur scheinbar gewiß. Sie würde zur Gewißheit, falls man Informationen über %-Anteile der Vogelarten mitgeteilt hätte etc.. Ungewißheit und ihre Reduktion durch vom System aktiv nachgefragte Zusatzinformation ist Gegenstand von [REU, 2002].

Nun geben wir den Stimulus WAL ins Netz. Aufgezählt werden wieder einige Folgerungen, die sie der Abbildung 9 entnehmen wollen.

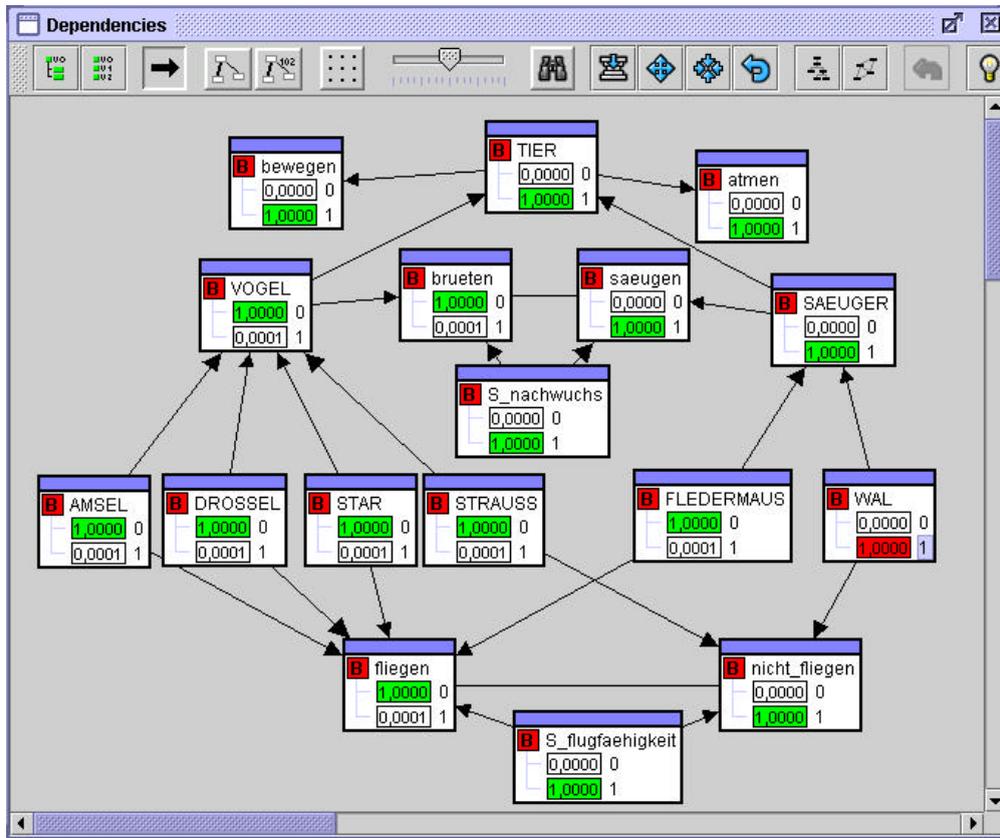


Abbildung 9 Wahrscheinlichkeiten im Netz unter der Bedingung WAL=ja

Wale sind Säuger und damit Tiere, atmen und bewegen sich, säugen aber brüten nicht, können daher keine Vögel und in Folge keine Strauße, Amseln, Drosseln oder Stare sein. Über das Attribut FLUGFÄHIGKEIT schließt man auch Fledermäuse aus. Nur aufgrund der kategorialen Struktur im Netz wird jede der betrachteten Propositionen entweder wahr oder falsch.

## 6. Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Schrift wurde ein Informationstheoretisches Netz zur Beschreibung kategorialer Strukturen entwickelt. Der Aufbau eines solchen Netzes geschieht mittels der Sprache von Konditionalen über propositionalen Ausdrücken und mittels der Erzeugung eines optimalen Informationsmaßes. Damit entsteht eine informationstheoretische Logik, die es gestattet, die Gültigkeit von Konditionalen aus der anderer Konditionale abzuleiten. Ausgerüstet mit solch einem Netz kann man nun Stimuli als situative, temporäre Annahmen erzeugen und ihre Wirkung=Impuls auf Kategorien oder Eigenschaften abrufen. Die Größe des Impulses ist ein Maß semantischer Nähe. Alle durchgerechneten Beispiele, wie Taxonomien und ein konnektionistisches Modell von McClelland zeigen die Leistungsfähigkeit des entwickelten Konzepts auf. Ein eigenes Kapitel (Kapitel 5) wird darauf verwandt, den Unterschied

zwischen Abruf- und Denkprozessen herauszuarbeiten: Ist ein Begriff mittels eines Stimulus abgerufen, muß im Nachgang noch über die logische oder statistische Abhängigkeit befunden werden. Das geht nicht immer; insofern ist der informationstheoretische Abruf oft einer b-gisch/statistischen Analyse überlegen.

Die für die Beispiele notwendigen Berechnungen wurden teils in der Expertensystemshell SPIRIT durchgeführt, teils aber in Excel nachgearbeitet. War SPIRIT ursprünglich für das logische Ableiten von Aussagen aus Aussagen unter Wahrung des MaxEnt-Inferenzprinzips angelegt [ROM, 1996], kann das Programm jetzt auch – bis auf einige Zusatzrechnungen – für Abrufe in kategorialen Strukturen verwendet werden. Vorgesehen ist eine Funktionserweiterung der Shell dahingehend, daß nun gleichermaßen Abruf- und Inferenzprozesse realisierbar sind.

## Anhang

Index	P präscr	Rule text
0	1	VERZIGER   ART
1	1	MS   ART
2	1	LEDIG   ART
3	1	DEALER   ART
4	1	JETS   ART
5	1	DREISSIGER   AL
6	1	MS   AL
7	1	VERH   AL
8	1	EINBRECHER   AL
9	1	JETS   AL
10	1	ZWANZIGER   SAM
11	1	COLLEGE   SAM
12	1	VERH   SAM
13	1	BUCHMACHER   SAM
14	1	JETS   SAM
15	1	VERZIGER   CLYDE
16	1	MS   CLYDE
17	1	LEDIG   CLYDE
18	1	BUCHMACHER   CLYDE
19	1	JETS   CLYDE
20	1	DREISSIGER   MIKE
21	1	MS   MIKE
22	1	LEDIG   MIKE
23	1	BUCHMACHER   MIKE
24	1	JETS   MIKE
25	1	ZWANZIGER   JIM
26	1	OS   JIM
27	1	GESCH   JIM
28	1	EINBRECHER   JIM
29	1	JETS   JIM
30	1	ZWANZIGER   GREG
31	1	MS   GREG
32	1	VERH   GREG
33	1	EINBRECHER   GREG
34	1	JETS   GREG
35	1	DREISSIGER   RALPH
36	1	MS   RALPH
37	1	LEDIG   RALPH
38	1	DEALER   RALPH
39	1	JETS   RALPH
40	1	ZWANZIGER   LANCE
41	1	MS   LANCE
42	1	LEDIG   LANCE
43	1	EINBRECHER   LANCE
44	1	JETS   LANCE
45	1	DREISSIGER   PHIL
46	1	COLLEGE   PHIL
47	1	VERH   PHIL
48	1	DEALER   PHIL
49	1	SHARKS   PHIL
50	1	DREISSIGER   IKE
51	1	MS   IKE
52	1	VERH   IKE
53	1	EINBRECHER   IKE
54	1	SHARKS   IKE
55	1	DREISSIGER   NICK
56	1	COLLEGE   NICK
57	1	LEDIG   NICK
58	1	BUCHMACHER   NICK
59	1	SHARKS   NICK

Tabelle 10 Konditionale zum Modell von McClelland

Index	P prescr	Rule text
60	1	VIERZIGER   DON
61	1	OS   DON
62	1	LEDIG   DON
63	1	DEALER   DON
64	1	SHARKS   DON
65	1	DREISSIGER   NED
66	1	OS   NED
67	1	VERH   NED
68	1	BUCHMACHER   NED
69	1	SHARKS   NED
70	1	FUENFZIGER   KARL
71	1	OS   KARL
72	1	GESCH   KARL
73	1	DEALER   KARL
74	1	SHARKS   KARL
75	1	ZWANZIGER   KEN
76	1	MS   KEN
77	1	VERH   KEN
78	1	DEALER   KEN
79	1	SHARKS   KEN
80	1	NEUNZIGER   EARL
81	1	OS   EARL
82	1	VERH   EARL
83	1	EINBRECHER   EARL
84	1	SHARKS   EARL
85	1	DREISSIGER   RICK
86	1	OS   RICK
87	1	GESCH   RICK
88	1	EINBRECHER   RICK
89	1	SHARKS   RICK
90	0	(FUENFZIGER $\wedge$ NEUNZIGER)   S1_JAHRE
91	0	(VIERZIGER $\wedge$ NEUNZIGER)   S1_JAHRE
92	0	(VIERZIGER $\wedge$ FUENFZIGER)   S1_JAHRE
93	0	(DREISSIGER $\wedge$ NEUNZIGER)   S1_JAHRE
94	0	(DREISSIGER $\wedge$ FUENFZIGER)   S1_JAHRE
95	0	(DREISSIGER $\wedge$ VIERZIGER)   S1_JAHRE
96	0	(ZWANZIGER $\wedge$ NEUNZIGER)   S1_JAHRE
97	0	(ZWANZIGER $\wedge$ FUENFZIGER)   S1_JAHRE
98	0	(ZWANZIGER $\wedge$ VIERZIGER)   S1_JAHRE
99	0	(ZWANZIGER $\wedge$ DREISSIGER)   S1_JAHRE
100	1	(ZWANZIGER $\vee$ DREISSIGER $\vee$ VIERZIGER $\vee$ FUENFZIGER $\vee$ NEUNZIGER)   S1_JAHRE
101	0	(COLLEGE $\wedge$ OS)   S2_SCHULE
102	0	(MS $\wedge$ OS)   S2_SCHULE
103	0	(MS $\wedge$ COLLEGE)   S2_SCHULE
104	1	(MS $\vee$ COLLEGE $\vee$ OS)   S2_SCHULE
105	0	(VERH $\wedge$ GESCH)   S3_STAND
106	0	(LEDIG $\wedge$ GESCH)   S3_STAND
107	0	(LEDIG $\wedge$ VERH)   S3_STAND
108	1	(LEDIG $\vee$ VERH $\vee$ GESCH)   S3_STAND
109	0	(EINBRECHER $\wedge$ BUCHMACHER)   S4_BERUF
110	0	(DEALER $\wedge$ BUCHMACHER)   S4_BERUF
111	0	(DEALER $\wedge$ EINBRECHER)   S4_BERUF
112	1	(DEALER $\vee$ EINBRECHER $\vee$ BUCHMACHER)   S4_BERUF
113	0	(JETS $\wedge$ SHARKS)   S5_BANDE
114	1	(JETS $\vee$ SHARKS)   S5_BANDE
115	0	S1_JAHRE
116	0	S2_SCHULE
117	0	S3_STAND
118	0	S4_BERUF
119	0	S5_BANDE

Tabelle 10 Konditionale zum Modell von McClelland (Fortsetzung)

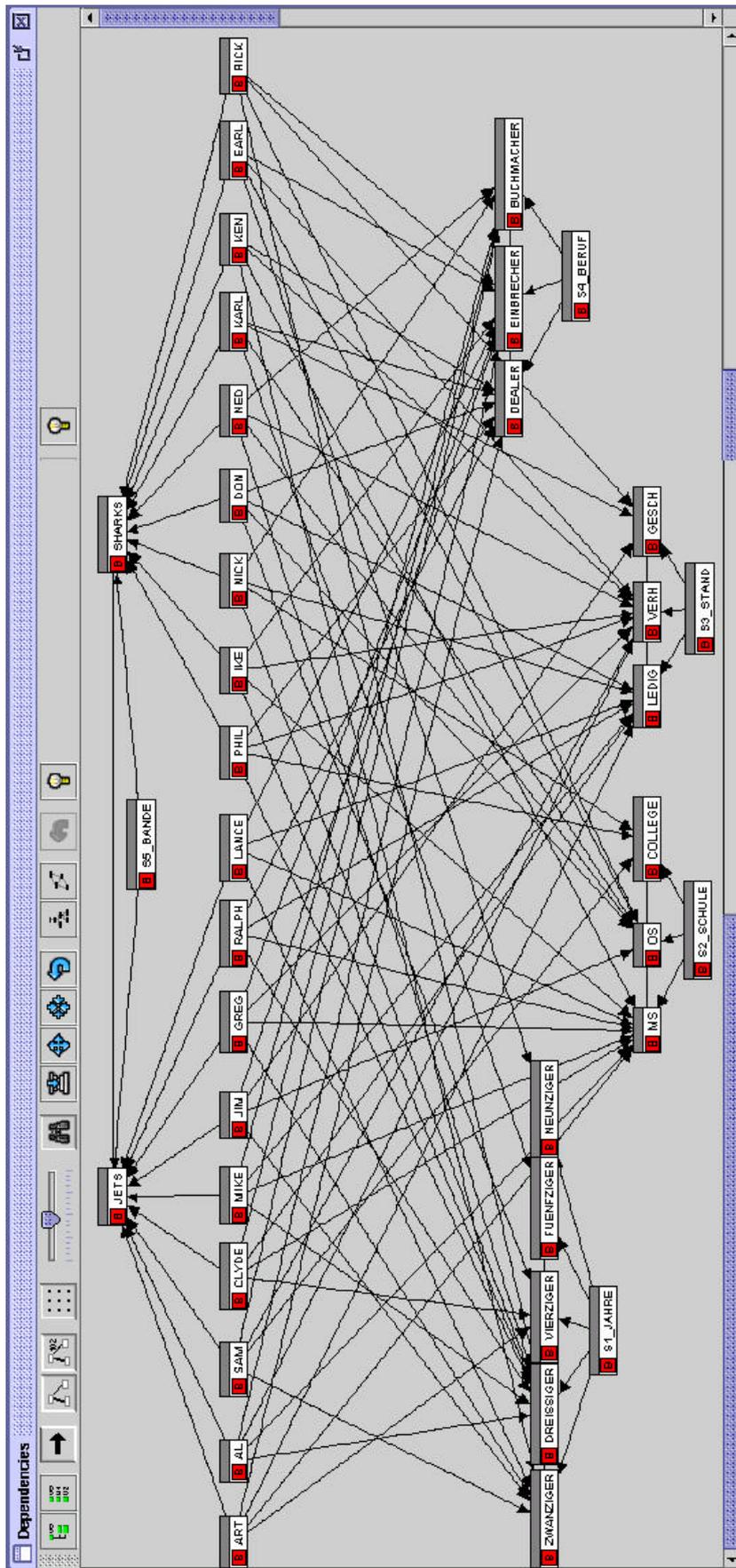


Abbildung 9 Informationstheoretisches Netz zum Modell von McClelland

## Literaturverzeichnis

- [ANB, 1972] J. R. Anderson und G. H. Bower: *Configural properties in sentence memory*, Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior, 11, 594-605, (1972).
- [AND, 2001] John R. Anderson: *Kognitive Psychologie*, Spektrum, Akademischer Verlag, Berlin, 3, (2001).
- [BRT, 1981] W. F. Brewer und J. C. Treyens: *Role of schemata in memory for places*, Cognitive Psychology, 13, 207-230, (1981).
- [CAL, 1991] P. G. Calabrese: *Deduction and inference using conditional logic and probability*, in: I.R. Goodman, M. M. Gupta, H. T. Nguyen, G. S. Rogers (Eds.): *Conditional Logic in Expert Systems*, Elsevier Science, Amsterdam, 71-100, (1991).
- [CAL, 2002] P. G. Calabrese: *Reflections on logic and probability in the context of conditionals*, Proceedings of the Workshop on Conditionals, Information and Inference, Hagen, Germany, pp. 27-45, (2002).
- [CLA, 1983] E. V. Clark: *Meanings and concepts*, In P. H. Mussen (Hrsg.), *Handbook of Child Psychology*, New York, Wiley, (1983).
- [COQ, 1969] A. M. Collins und M. R. Quillian: *Retrieval time from semantic memory*, Journal of Verbal Learning of the Royal Society, London B, 302, 283-294, (1983).
- [FRE, 1975] C. H. Frederiksen: *Representing logical and semantic structure of knowledge acquired from discourse*, Cognitive Psychology, 7, 371-458, (1975).
- [KIS, 1998] G. Kern-Isberner: *Characterising the principle of minimum cross-entropy within a conditional-logic framework*, Artificial Intelligence, Vol. 98, 169-208, (1998).
- [KUL, 2002] F. Kulmann: *Wissen und Information in konditionalen Modellen – Zur Entscheidungsvorbereitung im Anfrage- und Auftragsmanagement*, Deutscher Universitäts-Verlag, Wiesbaden, (2002)
- [MCL, 1981] J. L. McClelland: *Retrieving general and specific information from stored knowledge of specifics*, Proceedings of the third Annual Conference of the Cognitive Science Society, Berkley CA, 170-172 (1981).

- [NOR, 1975] D. A. Norman und D. E. Rumelhart: *Explorations in cognition*, New York: W. H. Freeman, (1975).
- [PAV, 1990] J. B. Paris und A. Vencovská: *A note on the inevitability of maximum entropy*, International Journal of Approximate Reasoning, 14, 183-223, (1990).
- [QUI, 1966] M. R. Quillian: *Semantic memory*, Cambridge, MA: Bolt, Beranak and Newman, (1966).
- [REI, 1991] U. Reimer: *Einführung in die Wissensrepräsentation*, Leitfäden der angewandten Informatik, B. G. Teubner, Stuttgart, (1991).
- [REU, 2002] E. Reucher: *Modellbildung bei Unsicherheit und Ungewißheit in konditionalen Strukturen*, Logos Verlag, Berlin, (2002).
- [RKI, 1996] W. Rödder und G. Kern-Isberner: *Representation and extraction of information by probabilistic Logic*, Information Systems 21 (8), 637-652, (1996).
- [RKI, 2002] W. Rödder und G. Kern-Isberner: *From information to probability: an axiomatic approach*, International Journal of Intelligent Systems, 18 (4), 383-403, (2002).
- [ROD, 2000] W. Rödder: *Conditional logic and the principle of entropy*, Artificial Intelligence 117, 83-106. (2000).
- [ROD, 2003] W. Rödder: *On the measurability of knowledge acquisition and query processing*, International Journal of Approximate Reasoning 33 (2), 203-218, (2003).
- [ROM, 1996] W. Rödder und C.-H. Meyer: *Coherent knowledge processing at maximum entropy by SPIRIT*, Proceedings 12<sup>th</sup> Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence, 117, 83-106, (1996).
- [RUO, 1976] D. E. Rumelhart und A. Ortony: *The representation of knowledge in memory*, In R. C. Anderson, R. J. Spiro & W. E. Montague (Hrsg.), Semantic factors in cognition, Hillsdale, NJ: Erlbaum, (1976).
- [SHJ, 1980] J. E. Shore und R. W. Johnson: *Axiomatic derivation of the principle of maximum entropy and the principle of minimum cross entropy*, IEEE Trans. Information Theory, 26 (1), 26-37, (1980).

- [SOM, 1992] L. Sombé: *Schließen bei unsicherem Wissen in der Künstlichen Intelligenz*, Vieweg, Braunschweig, Wiesbaden (1992).
- [SPIRIT, 2002] SPIRIT-Version 3.1, <http://www.xspirit.de>, (2002).
- [WES, 1994] Michael G. Wessells: *Kognitive Psychologie*, Harper & Row, Publishers, New York, 3, (1994).

Die Diskussionspapiere ab Nr. 183 (1992) bis heute, können Sie im Internet unter <http://fernuni-hagen.de/FBWIWI/> einsehen und zum Teil downloaden.  
 Die **Titel** der Diskussionspapiere von Nr 1 (1975) bis 182 (1991) können bei Bedarf im Fachbereich Wirtschaftswissenschaft angefordert werden: FernUniversität, z. Hd. Frau Huber oder Frau Mette, Postfach 940, 58084 Hagen .  
**Die Diskussionspapiere selber erhalten Sie nur in den Bibliotheken.**

Nr	Jahr	Titel	Autor/en
322	2001	Spreading Currency Crises: The Role of Economic Interdependence	Berger, Wolfram Wagner, Helmut
323	2002	Planung des Fahrzeugumschlags in einem Seehafen-Automobilterminal mittels eines Multi-Agenten-Systems	Fischer, Torsten Gehring, Hermann
324	2002	A parallel tabu search algorithm for solving the container loading problem	Bortfeldt, Andreas Gehring, Hermann Mack, Daniel
325	2002	Die Wahrheit entscheidungstheoretischer Maximen zur Lösung von Individualkonflikten - Unsicherheitssituationen -	Mus, Gerold
326	2002	Zur Abbildungsgenauigkeit des Gini-Koeffizienten bei relativer wirtschaftlicher Konzentration	Steinrücke, Martin
327	2002	Entscheidungsunterstützung bilateraler Verhandlungen über Auftragsproduktionen - eine Analyse aus Anbietersicht	Steinrücke, Martin
328	2002	Die Relevanz von Marktzinssätzen für die Investitionsbeurteilung – zugleich eine Einordnung der Diskussion um die Marktzinsmethode	Terstege, Udo
329	2002	Evaluating representatives, parliament-like, and cabinet-like representative bodies with application to German parliament elections 2002	Tangian, Andranik S.
330	2002	Konzernabschluss und Ausschüttungsregelung im Konzern. Ein Beitrag zur Frage der Eignung des Konzernabschlusses als Ausschüttungsbemessungsinstrument	Hinz, Michael
331	2002	Theoretische Grundlagen der Gründungsfinanzierung	Bitz, Michael
332	2003	Historical background of the mathematical theory of democracy	Tangian, Andranik S.
333	2003	MCDM-applications of the mathematical theory of democracy: choosing travel destinations, preventing traffic jams, and predicting stock exchange trends	Tangian, Andranik S.
334	2003	Sprachregelungen für Kundenkontaktmitarbeiter – Möglichkeiten und Grenzen	Fließ, Sabine Möller, Sabine Momma, Sabine Beate
335	2003	A Non-cooperative Foundation of Core-Stability in Positive Externality NTU-Coalition Games	Finus, Michael Rundshagen, Bianca
336	2003	Combinatorial and Probabilistic Investigation of Arrow's paradox	Tangian, Andranik

337	2003	A Grouping Genetic Algorithm for the Pickup and Delivery Problem with Time Windows	Pankratz, Giselher
338	2003	Planen, Lernen, Optimieren: Beiträge zu Logistik und E-Learning. Festschrift zum 60 Geburtstag von Hermann Gehring	Bortfeldt, Andreas Fischer, Torsten Homberger, Jörg Pankratz, Giselher Strangmeier, Reinhard
339	2003	Erinnerung und Abruf aus dem Gedächtnis Ein informationstheoretisches Modell kognitiver Prozesse	Rödder, Wilhelm Kulmann, Friedhelm