

# **19. Workshop**

## **„Interdisziplinäre Methoden in der Informatik“**

**Arbeitstagung des  
Lehrstuhl Informatik I**

**21.-24.09.1999  
Hotel zur Post, Lüdinghausen**

**Forschungsbericht Nr. 729  
März 2000**



## Vorwort

Vom 21.-24. September 1999 fand im Hotel zur Post in Lüdinghausen der 19. Workshop „Interdisziplinäre Methoden in der Informatik“ statt. Diese traditionsreiche Veranstaltung bietet den Professoren, Mitarbeitern und Gästen meines Lehrstuhls alljährlich Gelegenheit zu einem umfassenden, von Terminzwängen unbelasteten wissenschaftlichen Erfahrungs- und Meinungsaustausch. Es freut mich besonders, daß die Vorträge intensive Diskussionen hervorbrachten. Ich bin überzeugt, daß hieraus fruchtbare Anregungen für die weitere Arbeit erwachsen.

Die Vorträge vermitteln ein recht umfassendes Bild von dem breiten Themenspektrum, das an meinem Lehrstuhl bearbeitet wird. Ein Themenschwerpunkt lag auch in diesem Jahr im Bereich „Computational Intelligence“. In weiteren Vorträgen wurden neben den „klassischen“ Themenstellungen des Lehrstuhls aus den Bereichen Entwurf mikroelektronischer Systeme und multimediale Informationssysteme auch Themen aus den Forschungsgebieten mobile Robotik, verteilte Automatisierungssysteme und medizinische Bildverarbeitung präsentiert.

Mit diesem Band werden zusammenfassende Artikel aus den Vorträgen einer interessierten Öffentlichkeit zugänglich gemacht. Wir hoffen, daß die Arbeiten das Interesse vieler Leser finden werden. Kritische Anmerkungen und Kommentare sind uns jederzeit willkommen. Leserinnen und Leser, die Punkte gemeinsamem Interesses feststellen, möchte ich ausdrücklich ermuntern, mit uns Kontakt aufzunehmen.

Dortmund, den 10. März 2000



Prof. Dr. Bernd Reusch



# Inhaltsverzeichnis

Stephan Lehmké:

Entscheidungsverfahren für das Erfüllbarkeitsproblem in der LUKASIEWICZschen Aussagenlogik.....	1
---	---

Huber Wagner:

Grundlagen der Fuzzy-Arithmetik.....	5
--------------------------------------	---

Bernd Reusch und Helmut Thiele:

Beziehungen zwischen Fuzzy Sets, Rough Sets und Flou Sets.....	9
--	---

Karl-Heinz Temme:

Das Projekt A1 im SFB 531: Ergebnisse und Ausblick.....	11
---	----

Tatiana Kiselova:

A Comparison of CADIAG-2 and MYCIN-like Systems.....	13
--	----

Gero Presser:

DEMPSTER-SHAFFER Evidenztheorie – Versuch einer anschaulichen Einführung.....	19
---	----

Sascha Dierkes:

Entscheidungsregeln bei variabler mehrfacher Zielsetzung.....	25
---	----

Claudio Moraga:

Neuro-unscharfe Modellierung kompensatorischer Systeme.....	27
---	----

Matthias Reuter:

Die Darstellung eines neuronalen Informationsvektorfeldes $\vec{A}(\vec{r}, t)$ als Oszillatorkette. (Die zweite Quantisierung der neuronalen Netze).....	31
--	----

Lars Hildebrand:

Eigenschaften asymmetrischer Mutationsoperatoren.....	43
---	----

Michael Bos:

Die Struktur eines Constraintgraphen.....	49
---	----

Thomas Dilling:	
Effiziente boolsche Maskenoperationen mit Hilfe des Multiscans.....	53
Kurt Liebermann:	
Von Cambio XT zum Analog Companion – Eine Software wird marktreif.....	59
Xinhua Xu:	
Robust Design of CAD System as Example of Redesign of CAMBIO System.....	61
Michael Wittner:	
Steuerung mobiler Roboter.....	67
Reimar Grasbon:	
Eine generische grafische Benutzerschnittstelle für automatisierbare vernetzte Räumlichkeiten.....	69
Gisbert Dittrich:	
Überlegungen zu einer Taxonomie für Hypermedia.....	75
Jörg Westbomke:	
Der Verweisbegriff in verteilten Hyperdokumenten – Begriffsbestimmung und Formalisierungsansätze.....	81
Norbert Jesse:	
Web-Auftritt mit Links? - Einige Anmerkungen - .....	87
Jens Hiltner:	
Wissensbasierte Segmentierung mit Hilfe aktiver Konturen.....	93
Eike Hagen Riedemann:	
Aspekte des Wissensmanagements.....	101
Wolfgang Hunscher:	
Datenhaltung und Backup in heterogenen Netzwerken.....	109

# Entscheidungsverfahren für das Erfüllbarkeitsproblem in der ŁUKASIEWICZschen Aussagenlogik

Stephan Lehmke

Tel: 0231 / 755 6434

Stephan.Lehmke@cs.uni-dortmund.de

## ZUSAMMENFASSUNG

In der zweiwertigen Logik besteht das einfachste Verfahren, die Erfüllbarkeit einer aussagenlogischen Formel festzustellen, darin, eine Wertetabelle aufzustellen, in der allen möglichen Belegungen der vorkommenden Aussagenvariablen jeweils der Wahrheitswert der Formel bei dieser Belegung zugeordnet wird.

In der endlichwertigen Logik ist dieses Verfahren ebenfalls anwendbar, in der unendlichwertigen Logik gewinnt man aber auf diese Weise a priori kein Entscheidungsverfahren.

Hier wird gezeigt, wie die Erfüllbarkeit einer aussagenlogischen Formel der unendlichwertigen ŁUKASIEWICZschen Logik trotzdem mittels einer Wertetabelle entschieden werden kann. Dazu wird einer aussagenlogischen Formel  $F$  eine natürliche Zahl  $n$  zugeordnet, so dass  $F$  in der unendlichwertigen ŁUKASIEWICZschen Logik erfüllbar ist genau dann, wenn  $F$  in der  $n$ -wertigen ŁUKASIEWICZschen Logik erfüllbar ist.

**STICHWÖRTER:** Schaltwerktheorie, Aussagenlogik, ŁUKASIEWICZsche Logik, Erfüllbarkeit, Wertetabelle

## 1 EINFÜHRUNG

Die hier dargestellten Ergebnisse sind überwiegend in [4, 5] zu finden. Diese scheinen aber international wenig bekannt zu sein und vor allem in ihrer Bedeutung für die mehrwertige Logik falsch eingeschätzt zu werden. Daher werden sie an dieser Stelle nochmals übersichtlich dargestellt und illustriert. Es wird insbesondere die Tatsache betont, dass und wie sich Entscheidungsfragen für die unendlichwertige Logik auf Entscheidungsfragen für die endlichwertige Logik reduzieren lassen.

In diesem Abschnitt werden zur Erinnerung Syntax und Semantik der verwendeten Aussagenlogik definiert und danach nochmals kurz auf die Fragestellung dieses Artikels sowie auf die Strategie zu deren Lösung eingegangen.

Die folgenden Abschnitte behandeln das für die Fragestellung zentrale Theorem von MCNAUGHTON und einige Folgerungen daraus sowie die sich daraus ergebenden Ergebnisse von MUNDICI zur Entscheidbarkeit des Erfüllbarkeitsproblems in der ŁUKASIEWICZschen Aussagenlogik. Einige Folgerungen, weiterführende und offene Fragestellungen runden die Darstellung ab.

## 1.1 SYNTAX AUSSAGENLOGISCHER FORMELN

Grundlage der Betrachtungen ist eine Menge  $\text{Frm}$  **aussagenlogischer Formeln**, die induktiv wie üblich definiert werden, basierend auf

1. einer Menge  $\text{PV}$  von **Aussagenvariablen**,
2. einer *unären* Verknüpfung  $\neg$  (**Negation**) und
3. einer *binären* Verknüpfung  $\rightarrow$  (**Implikation**).

### Definition 1.1 (Länge einer Formel)

$$\begin{aligned} \text{len}(p) &=_{\text{def}} 1 && (p \in \text{PV}) \\ \text{len}(\neg F) &=_{\text{def}} 1 + \text{len}(F) && (F \in \text{Frm}) \\ \text{len}(F \rightarrow G) &=_{\text{def}} 1 + \text{len}(F) + \text{len}(G) && (F, G \in \text{Frm}) \end{aligned}$$

## 1.2 SEMANTIK

Wir führen zunächst die unendlichwertige ŁUKASIEWICZsche Aussagenlogik ein, die auf der Verwendung des reellen Einheitsintervalls  $\langle 0, 1 \rangle$  als Menge aller Wahrheitswerte beruht. Eine Abbildung  $\alpha : \text{PV} \rightarrow \langle 0, 1 \rangle$  heißt **Belegung** der Aussagenvariablen.  $\mathfrak{A}$  sei die Menge aller Belegungen.

Die Semantik aussagenlogischer Formeln, hier im Sinne der ŁUKASIEWICZschen Logik [3], ist gegeben durch die **Wertfunktion**, die induktiv wie folgt definiert ist.

### Definition 1.2 (Wertfunktion)

$$\begin{aligned} \text{Val}(p, \alpha) &=_{\text{def}} \alpha(p) && (p \in \text{PV}) \\ \text{Val}(\neg F, \alpha) &=_{\text{def}} 1 - \text{Val}(F, \alpha) && (F \in \text{Frm}) \\ \text{Val}(F \rightarrow G, \alpha) &=_{\text{def}} \min(1, 1 - \text{Val}(F, \alpha) + \text{Val}(G, \alpha)) && (F, G \in \text{Frm}) \end{aligned}$$

### Beobachtung 1.1 (Koinzidenzlemma)

Der Wert  $\text{Val}(F, \alpha)$  hängt nur von der Belegung der in  $F$  vorkommenden Variablen ab. •

Wir können also, wenn  $m$  verschiedene Variablen in  $F \in \text{Frm}$  vorkommen, den Wertverlauf  $\text{Val}(F, \cdot)$  von  $F$  durch eine  $m$ -stellige Funktion  $\langle F \rangle : \langle 0, 1 \rangle^m \rightarrow \langle 0, 1 \rangle$  darstellen.

**Definition 1.3 (Allgemeingültigkeit; Erfüllbarkeit)**

- 1.  $F \in \text{Frm} \in \text{Frm}$  heißt **allgemeingültig** ( $\text{ag}F$ )  
 $=_{\text{def}}$  für alle  $\alpha : \text{PV} \rightarrow \langle 0, 1 \rangle$  gilt  $\text{Val}(F, \alpha) = 1$ .
- 2.  $F \in \text{Frm}$  heißt **erfüllbar** ( $\text{ef}F$ )  
 $=_{\text{def}}$  es gibt ein  $\alpha : \text{PV} \rightarrow \langle 0, 1 \rangle$  mit  $\text{Val}(F, \alpha) > 0$ .

Offenbar gilt  $\text{ef}F$  g.d.w.  $\langle F \rangle \neq 0$ .

**Beobachtung 1.2**

Es gilt  $\text{ag}F$  g.d.w. **nicht**  $\text{ef}\neg F$ .

Offenbar bleibt das oben gesagte ebenso gültig, wenn wir statt des (überabzählbar unendlichen) reellen Einheitsintervalls  $\langle 0, 1 \rangle$  eine *endliche* Menge von Wahrheitswerten verwenden.

Sei dazu  $n \in \mathbb{N}$  mit  $n > 1$  gegeben.

Zur Definition der  $n$ -wertigen ŁUKASIEWICZschen Logik legen wir die  $n$ -wertige Wahrheitswertemenge  $W_n$  wie folgt fest:

$$W_n =_{\text{def}} \left\{ 0, \frac{1}{n-1}, \dots, \frac{n-2}{n-1}, 1 \right\}$$

Eine  $n$ -wertige Belegung der Aussagenvariablen ist dann eine Abbildung  $\alpha : \text{PV} \rightarrow W_n$ . Alle weiteren Festlegungen und Aussagen dieses Abschnitts lassen sich übertragen, wenn man jeweils  $\langle 0, 1 \rangle$  durch  $W_n$  ersetzt.

Wir schreiben im folgenden  $\mathfrak{A}_n, \text{ef}_n$  etc., wenn die  $n$ -wertige Logik gemeint ist.

**1.3 FRAGESTELLUNG**

Die Grundfrage, der in diesem Artikel nachgegangen wird, ist:

Kann man  $\text{ef}F$  entscheiden?

Es ist darauf hinzuweisen, dass auf dem Workshop „Interdisziplinäre Methoden in der Informatik“ in vergangenen Jahren schon mehrfach über Entscheidungsverfahren für  $\text{ef}F$  berichtet wurde [8, 2]. Diese sind jedoch durch Rückgriff auf die Resolutionsregel schon sehr komplex und dienen in erster Linie der Hinführung auf die logische Programmierung.

Das aus der klassischen Schaltwerktheorie bekannte algorithmisch einfachste Verfahren zur Entscheidung der Erfüllbarkeit einer Formel, nämlich das Aufstellen einer Wertetabelle, in der allen möglichen Belegungen der vorkommenden Aussagenvariablen jeweils der Wahrheitswert der Formel bei dieser Belegung zugeordnet wird, ist zunächst offenbar nur in der *endlichwertigen* Logik anwendbar.

Hier wird die Methodik der Wertetabellen folgendermaßen zur Entscheidung von  $\text{ef}F$  anwendbar gemacht:

1. Bestimme ein  $n \in \mathbb{N}$  mit folgenden Eigenschaften:

- $n$  ist polynomiell in  $\text{len}(F)$  darstellbar, also  $n = 2^{\pi(\text{len}(F))}$  für ein Polynom  $\pi$  und
- $\text{ef}F$  g.d.w.  $\exists n' \leq n : \text{ef}_{n'}F$ .

2. Entscheide  $\exists n' \leq n : \text{ef}_{n'}F$  per Wertetabelle (exponentiell in  $\text{len}(F)$ ; nichtdet. polynomiell).

**2 MCNAUGHTON'S THEOREM**

**Definition 2.1 (MCNAUGHTON-Funktion [4])**

Eine Funktion  $f : \langle 0, 1 \rangle^m \rightarrow \langle 0, 1 \rangle$  heißt **MCNAUGHTON-Funktion**

- $=_{\text{def}}$
- 1.  $f$  ist **stetig** und
  - 2. es gibt
    - $k \in \mathbb{N}$  und
    - lineare Polynome  $\mu_1, \dots, \mu_k : \langle 0, 1 \rangle^m \rightarrow \langle 0, 1 \rangle$  mit ganzzahligen Koeffizienten
 so dass für jedes  $x \in \langle 0, 1 \rangle^m$  ein  $j \in \{1, \dots, k\}$  existiert mit  $f(x) = \mu_j(x)$ .

**Theorem 2.1 (MCNAUGHTON [4])**

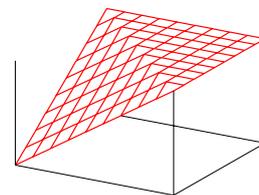
Die Menge aller  $\langle F \rangle$  für  $F \in \text{Frm}$  ist genau die Menge aller MCNAUGHTON-Funktionen.

**Beispiel 2.1**

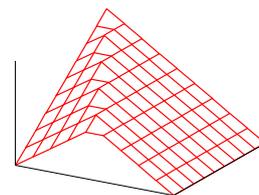
- $\langle p \rangle$ :   $\langle \neg p \rangle$ : 
- $\langle \neg p \rightarrow p \rangle (\equiv p \odot p)$ : 
- $\langle \neg((\neg(\neg p \rightarrow p) \rightarrow p) \rightarrow p) \rangle (\equiv (p \odot p) \wedge \neg p)$ : 

**Beispiel 2.2**

- $\langle \neg p \rightarrow q \rangle (\equiv p \odot q)$ :



- $\langle \neg((\neg(\neg p \rightarrow p) \rightarrow q) \rightarrow p) \rangle$ :



**Lemma 2.2 ([5])**

Seien  $F \in \text{Frm}$  mit  $\langle F \rangle : \langle 0, 1 \rangle^m \rightarrow \langle 0, 1 \rangle$  und  $x, y \in \langle 0, 1 \rangle^m$  gegeben.

Dann existiert im Punkt  $x$  die **Ableitung**  $\partial_u \langle F \rangle (x)$  von  $\langle F \rangle$  **in Richtung des Vektors**  $u =_{\text{def}} y - x$ , und es gilt

$$|\partial_u \langle F \rangle (x)| \leq |u| \cdot \text{len}(F).$$

( $|\cdot|$ : euklidische Norm)

**Beweis**

Vollständige Induktion über die Struktur von  $F$ . □

**Lemma 2.3 ([5])**

Seien  $F \in \text{Frm}$  mit  $\langle F \rangle : \langle 0, 1 \rangle^m \rightarrow \langle 0, 1 \rangle$  und ein **m-Simplex**  $S \subseteq \langle 0, 1 \rangle^m$  gegeben, so dass  $\langle F \rangle$  auf  $S$  mit

$$\mu(x_1, \dots, x_m) = c_0 + c_1 x_1 + \dots + c_m x_m$$

übereinstimmt.

Dann ist  $\mu$  durch  $S$  und  $\langle F \rangle$  eindeutig bestimmt, und

$$\max(|c_1|, \dots, |c_m|) \leq \text{len} F.$$

**Beweis**

$S$  ist 'echt'  $m$ -dimensional; Anwendung von **Lemma 2.2**. □

**Folgerung 2.4 (aus Definition 2.1 [4])**

Sei  $f : \langle 0, 1 \rangle^m \rightarrow \langle 0, 1 \rangle$  eine MCNAUGHTON-Funktion,  $k \in \mathbb{N}$  und  $\mu_1, \dots, \mu_k : \langle 0, 1 \rangle^m \rightarrow \langle 0, 1 \rangle$  die gemäß **Definition 2.1** existierenden linearen Polynome.

Dann existieren  $\ell \in \mathbb{N}$  und **m-dimensionale konvexe Polyeder**  $D_1, \dots, D_\ell$ , so dass

1.  $\langle 0, 1 \rangle^m = D_1 \cup \dots \cup D_\ell$
2. für  $i \neq j$  gilt  $D_i \cap D_j = \emptyset$   
oder  $D_i \cap D_j$  liegt im Rand von  $D_i$  und  $D_j$ .
3. für jedes  $i \in \{1, \dots, \ell\}$  existiert  $j \in \{1, \dots, k\}$ ,  
so dass  $f = \mu_j$  auf  $D_i$ .

**Beweis**

Einfache geometrische Argumentation. □

**Folgerung 2.5 (aus Definition 2.1 [5])**

Weiter sind die **Flächen** der Polyeder  $D_1, \dots, D_\ell$  gegeben durch lineare Gleichungen je einer der folgenden Formen:

- (1)  $\mu_i = \mu_j$
- (2)  $x_i = 0$
- (3)  $x_j = 1$

**3 ENTSCHEIDBARKEIT VON EF**

**Theorem 3.1 ([5])**

Sei  $F \in \text{Frm}$  mit  $\langle F \rangle : \langle 0, 1 \rangle^m \rightarrow \langle 0, 1 \rangle$ .

Dann existiert ein  $n \in \mathbb{N}$  mit  $n > 1$  und

$$(4) \quad n < 2^{4 \text{len}(F)^2}$$

mit  $\text{ef}_{n+1} F$  g.d.w.  $\text{ef} F$ .

**Beweis**

Die Richtung  $\text{ef}_{n+1} F \Rightarrow \text{ef} F$  ist trivial.

Es gelte  $\text{ef} F$ .

Zeige, dass  $n < 2^{4 \text{len}(F)^2}$  sowie  $a_1, \dots, a_m \in \mathbb{N}$  existieren mit  $a_i \leq n$  und

$$\langle F \rangle \left( \frac{a_1}{n}, \dots, \frac{a_m}{n} \right) > 0.$$

1. Wegen  $\text{ef} F$  und **Folgerung 2.4** existiert  $D_i$  mit  $\langle F \rangle (x) > 0$  für ein  $x \in D_i$ .
2. Da  $\langle F \rangle$  linear auf  $D_i$ , ist sogar  $\langle F \rangle (v) > 0$  an einem **Eckpunkt**  $v$  von  $D_i$ .
3. Für jedes  $j \in \{1, \dots, k\}$  sei

$$\mu_j(x_1, \dots, x_m) = c_{0j} + c_{1j} x_1 + \dots + c_{mj} x_m.$$

4. Aus **Lemma 2.3** folgt  $|c_{ij}| \leq \text{len}(F)$  für  $i \in \{1, \dots, m\}$ ,  $j \in \{1, \dots, k\}$ .
5.  $v$  ist Lösung eines **linearen Gleichungssystems** aus  $m$  Gleichungen der in **Folgerung 2.5** angegebenen Form.
6.  $v$  hat rationale Koordinaten, etwa  $v = \left( \frac{a_1}{n}, \dots, \frac{a_m}{n} \right)$ .
7. Wenn wir jede der  $m$  Gleichungen für  $v$  in der Form  $d_{i0} = d_{i1} x_1 + \dots + d_{im} x_m$  schreiben, gilt  $|d_{ij}| \leq 2 \text{len}(F)$ .
8.  $\Delta$  sei die Determinante dieses Gleichungssystems. O. B. d. A. gilt  $n = |\Delta|$ .
9. Mit  $m \leq \text{len}(F)$  und HADAMARD's Ungleichung folgt

$$n = |\Delta| \leq \left( 4m \text{len}(F)^2 \right)^{\frac{m}{2}} < 2^{4 \text{len}(F)^2} \quad \square$$

**4 FOLGERUNGEN; AUSBLICK**

**Corollar 4.1**

Für jedes  $F \in \text{Frm}$  ist  $\text{ef} F$  **nichtdeterministisch-polynomiell entscheidbar**.

**Beweis**

1. Rate (polyn.)  $n \in \mathbb{N}$  mit  $n < 2^{4 \text{len}(F)^2}$  sowie  $a_1, \dots, a_m \in \mathbb{N}$  mit  $a_i \leq n$ .
2. Prüfe (polyn.), ob  $\langle F \rangle \left( \frac{a_1}{n}, \dots, \frac{a_m}{n} \right) > 0$ . □

### Theorem 4.2 ([5])

Das Entscheidungsproblem für  $ef$  ist NP-Hart.

### Beweis

Siehe MUNDICI [5]. □

### Corollar 4.3 ([5])

Das Entscheidungsproblem für  $ef$  ist NP-vollständig.

### AUSBLICK

Aus den hier präsentierten Überlegungen und Ergebnissen ergeben sich die folgenden weiterführenden Fragestellungen:

1. In Folgerung 2.4 wird nur die *Existenz* der  $m$ -dimensionalen konvexen Polyeder  $D_1, \dots, D_\ell$  gezeigt. Könnte man diese Polyeder *konstruieren*, würde sich die Feststellung der Erfüllbarkeit von  $F$  (bisher: Aufzählen und Auswerten aller  $n$ -wertigen Wertetabellen bis  $n = 2^{4 \cdot \text{len}(F)^2}$ ) auf die Berechnung von  $\langle F \rangle(v)$  an allen *Eckpunkten* der  $D_i$  reduzieren.  
Man könnte die existierenden Resolutionsverfahren für die ŁUKASIEWICZsche Aussagenlogik, die auf dem Satz von MCNAUGHTON beruhen [6, 9], als Verfahren zur Konstruktion der  $D_1, \dots, D_\ell$  auffassen. Dies wird in den zitierten Veröffentlichungen jedoch nicht explizit gemacht.  
Es wäre interessant, nachzuprüfen, ob sich die  $D_1, \dots, D_\ell$  tatsächlich mittels dieser Verfahren konstruieren lassen.
2. Man kann den Satz von MCNAUGHTON als *schaltwerktheoretisches* Resultat über die Ausdruckskraft der ŁUKASIEWICZschen Aussagenlogik auffassen. Insgesamt muss man aber feststellen, dass die klassischen Fragestellungen der Schaltwerktheorie für die unendlichwertigen Logiken äußerst wenig untersucht sind.
3. Resultate für andere unendlichwertige Logiken, die mit den Sätzen von MCNAUGHTON und MUNDICI über die ŁUKASIEWICZsche Aussagenlogik vergleichbar wären, existieren zur Zeit nicht.

### LITERATUR

1. **Borkowski, L., Ed.:** Selected works of J. ŁUKASIEWICZ. North-Holland, Amsterdam, 1970.
2. **Lehmke, S.:** A resolution-based axiomatisation of ‘bold’ propositional fuzzy logic. In 18. Workshop „Interdisziplinäre Methoden in der Informatik“ — Arbeitstagung des Lehrstuhls Informatik I (Haus Nordhelle, Meinerzhagen-Valbert, 21.–24. Sept. 1998), Forschungsbericht Nr. 718, Fachbereich Informatik der Universität Dortmund, pp. 15–26.

3. **Łukasiewicz, J., and Tarski, A.:** Untersuchungen über den aussagenkalkül. *Comptes Rendus Séances Société des Sciences et Lettres Varsovie* 23 (1930), 30–50. Nachgedruckt (engl. Fassung) in [1] und [7].
4. **McNaughton, R.:** A theorem about infinite-valued sentential logic. *Journal of Symbolic Logic* 16, 1 (Mar. 1951), 1–13.
5. **Mundici, D.:** Satisfiability in many-valued sentential logic is NP-complete. *Theoretical Computer Science* 52 (1987), 145–153.
6. **Mundici, D., and Olivetti, N.:** Resolution and model building in the infinite-valued calculus of ŁUKASIEWICZ. *Theoretical Computer Science* 200, 1–2 (28 June 1998), 335–366.
7. **Tarski, A.:** *Logic, Semantics, Metamathematics — Papers from 1923 to 1938.* Clarendon Press, Oxford, 1956.
8. **Wagner, H.:** A new resolution calculus for the infinite-valued propositional logic of Łukasiewicz. In 17. Workshop „Interdisziplinäre Methoden in der Informatik“ — Arbeitstagung des Lehrstuhls Informatik I (Jugendburg Gemen, Borken, 8.–11. Sept. 1997), Forschungsbericht Nr. 682, Fachbereich Informatik der Universität Dortmund, pp. 109–122.
9. **Wagner, H.:** A new resolution calculus for the infinite-valued propositional logic of Łukasiewicz. Submitted to *Journal of Applied Nonclassical Logic* (to appear).

# Grundlagen der Fuzzy-Arithmetik

Hubert Wagner

Tel: 0231/755 6414

Wagner@ls1.cs.uni-dortmund.de

## ZUSAMMENFASSUNG

Für fuzzy natürliche Zahlen werden analog zur elementaren Arithmetik grundlegende Operatoren eingeführt, mit deren Hilfe sich fuzzy natürliche Zahlen einfach darstellen lassen. Für diese fuzzy natürlichen Zahlen werden grundlegende Eigenschaften gezeigt. Unter Verwendung der angegebenen Operatoren werden verschiedene fuzzy arithmetische Strukturen definiert und die Problematik des Nachweises der (Un-) Entscheidbarkeit der zugehörigen Theorien diskutiert.

### Stichwörter

Fuzzy arithmetische Operatoren und Strukturen, Entscheidbarkeit.

## 1 MOTIVATION

In vielen wissenschaftlichen Anwendungen werden für die Modellierung oder Berechnung numerische Größen verwendet, die nicht exakt bekannt sind, sondern nur als Näherungswerte oder über eine Intervallabschätzung vorliegen. Beispielsweise können Randbedingungen in linearen Optimierungsproblemen unter Verwendung solcher Näherungswerte formuliert sein. Berechnungen, die auf solchen nur unexakt vorliegenden Größen fußen, können dann aber recht problematisch sein. Zum Teil kann man sich hier mit Intervallarithmetik behelfen. Oft ist mit diesen Näherungswerten implizit eine Gewichtung von Werten in einem bestimmten Abschnitt um den Näherungswert verbunden (die leicht zu einer Gewichtung über dem vollen Grundbereich fortgesetzt werden kann). Wird diese Gewichtung explizit gemacht, so wird man zum Begriff der Fuzzy-Zahl und zu Berechnungsverfahren mit Fuzzy-Zahlen geführt. Nun sind zwar einige strukturelle Eigenschaften von solchen Fuzzy-Zahlen bekannt, formale Theorien von solchen Fuzzy-Zahlen sind bisher aber nicht untersucht worden. Im folgenden sollen einige logische Eigenschaften einfacher formaler Theorien der unscharfen natürlichen Zahlen (fortan wollen wir die Bezeichnung „fuzzy natürliche Zahlen“ verwenden) gezeigt werden.

## 2 GRUNDLAGEN UND FUZZY ARITHMETISCHE STRUKTUREN

Wir wollen zunächst den Begriff der fuzzy natürlichen Zahl als eine spezielle Fuzzy-Menge von natürlichen Zahlen definieren.

**Definition 1** Eine Abbildung  $f : \mathbb{N} \rightarrow [0, 1]$  heißt fuzzy natürliche Zahl genau dann, wenn gilt:

1. es gibt nur endlich viele  $k \in \mathbb{N}$  mit  $f(k) \neq 0$   
(d.h.  $f$  hat eine endliche Stützmenge)
2. Es gibt genau ein  $n \in \mathbb{N}$  mit  $f(n) = 1$ .
3. Für alle  $x, y \in \mathbb{N}$  mit  $x < y \leq n$  gilt  $f(x) \leq f(y)$ .
4. Für alle  $x, y \in \mathbb{N}$  mit  $n \leq x < y$  gilt  $f(y) \leq f(x)$ .

Eine unmittelbare Folgerung aus dieser Definition ist das

**Korollar 2** Eine fuzzy natürliche Zahl  $f$  ist eine konvexe, normale Fuzzy-Menge von natürlichen Zahlen mit endlicher Stützmenge.

**Notation 3** Für eine fuzzy natürliche Zahl  $f$  mit  $f(n) = 1$  schreiben wir auch  $f_n$ .

Eine fuzzy natürliche Zahl  $f$  mit Stützmenge

$$D_f = \{n, n+1, \dots, m\}$$

werden wir auch in der folgenden Form notieren:

$$[f(n)/n, f(n+1)/n+1, \dots, f(m)/m].$$

Die Menge der fuzzy natürlichen Zahlen sei mit  $\mathbb{FN}$  bezeichnet.

**Definition 4** Die Addition  $(+): \mathbb{FN} \times \mathbb{FN} \rightarrow \mathbb{FN}$  von fuzzy natürlichen Zahlen  $f$  und  $g$  ist folgendermaßen festgelegt ( $D_f$  und  $D_g$  seien die Stützmenge von  $f$  und  $g$ ):

$f(+)g$  hat die Stützmenge

$$D_{f(+)} :=$$

$$\{x \in \mathbb{N} \mid \text{es ex. } y \in D_f, z \in D_g \text{ mit } x = y + z\}$$

(d.h. für  $x \notin D_{f(+)}$  ist  $(f(+)g)(x) = 0$ ).

Für  $x \in D_{f(+)}$  ist:

$$(f(+)g)(x) := \max$$

$$\{\min(f(y), g(z)) \mid y \in D_f, z \in D_g \text{ und } x = y + z\}.$$

Die beiden natürlichen Zahlen 0 und 1 können mit den fuzzy natürlichen Zahlen  $[1/0]$  und  $[1/1]$  identifiziert werden, so dass wir im folgenden diese Notation für  $[1/0]$  und  $[1/1]$  verwenden werden, wenn  $\mathbb{FN}$  als Kontext gegeben ist.

**Definition 5** Für reelle Zahlen  $a \in (0, 1)$  sei:

$$0_a := [1/0, a/1] \text{ und}$$

$$1_a := [a/0, 1/1]$$

Die fuzzy natürlichen Zahlen  $0_a$  und  $1_a$  seien als schwache 0 und schwache 1 bezeichnet.

**Beispiel 6**

1.  $0_{0.4} (+) 0_{0.6} = [1/0, 0.6/1, 0.4/2]$
2.  $1_{0.4} (+) 1_{0.6} = [0.4/0, 0.6/1, 1/1]$
3.  $[0.4/3, 0.7/4, 1/5, 0.3/6] (+) 0_{0.7} = [0.4/3, 0.7/4, 1/5, 0.7/6, 0.3/7]$
4.  $[0.4/3, 0.7/4, 1/5, 0.6/6] (+) 1_{0.5} = [0.4/3, 0.5/4, 0.7/5, 1/6, 0.6/7]$

Das folgende Lemma hält einige grundlegende Eigenschaften für fuzzy natürliche Zahlen fest.

**Lemma 7**

1. Die Additionsoperation für Fuzzy natürliche Zahlen ist assoziativ und kommutativ.
2. 0 ist das eindeutig bestimmte neutrale Element für die Addition.
3. Jede fuzzy natürliche Zahl lässt sich als endliche Summe von schwachen Nullen, schwachen Einsen und Einsen darstellen.

Um geeignete formale Theorien betrachten zu können, wollen wir einige weitere Relationen definieren.

**Definition 8** 1.  $g \leq f$  gdw. es ex.  $h \in \mathbb{FN}$  mit  $g (+) h = f$ .

2.  $f < g$  gdw.  $f \leq g$  und  $f \neq g$ .
3.  $f$  und  $g$  heißen vergleichbar (notiert durch  $f \lesseqgtr g$ ) gdw.  $f \leq g$  oder  $g \leq f$ .
4. Gilt nicht  $f \lesseqgtr g$ , so heißen  $f$  und  $g$  unvergleichbar (notiert durch  $f \not\lesseqgtr g$ )

**Lemma 9**

1.  $<$  ist eine strenge diskrete Halbordnung mit 0 als kleinstem Element.  
(d.h. es gilt für alle  $f \in \mathbb{FN}$ : nicht  $f < f$ ).
2. Zu jedem  $f \in \mathbb{FN}$  gibt es ein  $g \in \mathbb{FN}$  mit  $f < g$  und  $f (+) 1 \not\lesseqgtr g$ .
3. Zu  $f, g \in \mathbb{FN}$  gibt es immer ein kleinstes  $h \in \mathbb{FN}$  mit  $f \leq h$  und  $g \leq h$  und ein größtes  $k \in \mathbb{FN}$  mit  $k \leq f$  und  $k \leq g$ .
4. Für alle  $f, g_1, \dots, g_m \in \mathbb{FN}$ :  
gilt für alle  $i$  mit  $1 \leq i \leq m$   $f < g_i$ , dann gibt es ein  $h \in \mathbb{FN}$  mit  $f < h$  und  $h \not\lesseqgtr g_i$  ( $1 \leq i \leq m$ ).

Wir hatten weiter oben  $\leq$  und  $<$  für fuzzy natürliche Zahlen definiert. Die fuzzy natürlichen Zahlen sind nicht linear geordnet. Es gibt vielmehr überabzählbar viele Nachfolgerfunktionen:

$$+1, +0_a \text{ und } +1_a$$

für jedes  $a \in (0, 1)$ .

Es liegt nahe, modelltheoretische und entscheidungstheoretische Eigenschaften für einfache Theorien basierend auf den fuzzy natürlichen Zahlen zu untersuchen. Als Grundlage für solche Untersuchungen bieten sich z.B. die folgenden Strukturen an:

$$N_S := (\mathbb{FN}; \{+1\} \cup \{+0_a \mid a \in (0, 1) \cap \mathbb{Q}\} \cup \{+1_a \mid a \in (0, 1) \cap \mathbb{Q}\}; 0)$$

$$N_{<} := (\mathbb{FN}; <; 0) \text{ und } N_{<, \not\lesseqgtr} := (\mathbb{FN}; <, \not\lesseqgtr; 0)$$

$$N_{S, <, \not\lesseqgtr} := (\mathbb{FN}; <, \not\lesseqgtr; \{+1\} \cup \{+0_a \mid a \in (0, 1) \cap \mathbb{Q}\} \cup \{+1_a \mid a \in (0, 1) \cap \mathbb{Q}\}; 0)$$

und

$$N_+ := (\mathbb{FN}; +; 0, 1).$$

Es ist leicht zu sehen, dass  $N_{<}$  ein distributiver Verband mit kleinstem Element 0 und Atomen ist.

Unter den angegebenen Strukturen besteht besonderes Interesse an dem „fuzzy Pendant“ zur Presburger Arithmetik, d.h. der erststufigen Theorie der natürlichen Zahlen mit den Konstanten 0, 1 und der Addition als einziger Verknüpfungsoperation. Wir wollen dieses Pendant als fuzzy Presburger Arithmetik bezeichnen. Ein noch ausstehendes Ziel ist es, die Frage nach der Entscheidbarkeit dieser Theorie einer Klärung zuzuführen. Für den Einstieg in die Problematik wollen wir uns zunächst mit einer etwas einfacheren Theorie beschäftigen.

### 3 ZUR FRAGE DER ENTSCHEIDBARKEIT

Für den Nachweis der Entscheidbarkeit von Theorien existieren im wesentlichen 4 Standardtechniken. Dies sind

1. Nachweis der endlichen Modelleigenschaft
2. Methode der Interpretation in bereits als entscheidbar nachgewiesene Theorien
3. Ehrenfeucht-Spiele und schließlich noch
4. die Methode der Quantoren-Elimination.

Die endliche Modelleigenschaft kann für die erststufigen Theorien der oben angegebenen Strukturen sicherlich nicht gezeigt werden. Für das Verfahren der Interpretation stellt sich zunächst das Problem der Wahl einer geeigneten Theorie, in der die Interpretation erfolgen soll. Naheliegend sind hier die Theorien  $S2S$  und  $S\omega S$ , die monadischen Theorien der Bäume mit 2 bzw.  $\omega$  Nachfolgern, mit deren Hilfe Rabin die Entscheidbarkeit einer Vielzahl von Theorien zeigen konnte. Bei Wahl von  $S2S$  bzw.  $S\omega S$ , liefert die Interpretation, sofern sie möglich ist, zwar dann die Entscheidbarkeit, allerdings ohne eine weitergehende Analyse der auftretenden Formeln nur mit einer nicht elementar rekursiven Schranke. Aus diesem Grund bietet sich das Verfahren der Quantoren-Elimination an, das i.a. recht gute Komplexitätstheoretische Schranken für das Entscheidungsverfahren liefert.

Im folgenden soll die Methode der Quantoren-Elimination in ihrer Anwendung auf fuzzyarithmetische Theorien skizziert werden. Der Aufbau z.B. der fuzzy arithmetischen Theorie mit  $<$ -Relation  $N_{<,\leq} = (\mathbb{FN}; <, \leq; 0)$  erfolgt in der üblichen Weise.

Wir gehen von einer zur Struktur  $N_{<,\leq}$  passenden Signatur aus, wobei wir zur Vereinfachung für die Relationen dieselben Symbole benutzen. Aus dem Kontext wird hervorgehen, worauf wir uns dann jeweils beziehen. Wir legen weiter eine einsortige Prädikatenlogik mit Gleichheit zugrunde, wobei wir die folgenden sprachlichen Elemente verwenden:

- Objektvariablen  $x, y, x_0, y_0, x_1, y_1, \dots$  und
- die logischen Symbole  $\neg, \wedge, \vee, \rightarrow, \forall, \exists$ .

Die Menge  $Fm$  der Formeln wird dann in der üblichen Weise definiert. Für die Gültigkeitsrelation, die ebenfalls in der üblichen Weise eingeführt wird, verwenden wir das Symbol  $\models$ .  $A \models \alpha$  drückt aus, dass  $\alpha$  in der Struktur  $A$  allgemeingültig ist. Unter der Theorie  $TH(A)$  einer Struktur  $A$  verstehen wir schließlich die Menge der in der Struktur  $A$  allgemeingültigen Formeln.

Wir sind an der Frage der Entscheidbarkeit von  $TH(N_{<,\leq})$  interessiert. Für die Theorie

$$TH((\mathbb{N}; +1; 0))$$

ist bekannt, dass sie entscheidbar ist. Andererseits ist aber die Theorie der Klasse von Strukturen mit wenigstens einer zweistelligen Relation bereits unentscheidbar. Es ist daher nicht klar, welches Resultat für  $TH(N_{<,\leq})$  zu erwarten ist.

Die Idee, die dem Verfahren der Quantoren-Elimination zugrundeliegt, ist sehr einfach zu beschreiben:

1. Zunächst wird die Formel, deren Allgemeingültigkeit in der Struktur  $N_{<,\leq}$  gezeigt werden soll, in eine pränex Normalform transformiert.
2. Wegen der semantischen Äquivalenz von  $(\forall x)\alpha \equiv \neg(\exists x)\neg\alpha$  ersetzt man, mit dem innersten Quantor beginnend, anschließend jeden Allquantor der Gestalt  $(\forall x)$  durch  $\neg(\exists x)\neg\alpha$ .
3. Der quantorenfreie Kern wird dann in eine disjunktive Normalform überführt, so dass eine Formel der Gestalt  $\Pi(\exists x)\beta'$  mit einem Kern  $\beta'$  in disjunktiver Normalform resultiert.

4. Da für zwei Variablen  $x$  und  $y$  die Formel

$$x = y \vee x < y \vee y < x \vee x \leq y$$

allgemeingültig ist, können Negationen leicht eliminiert werden.

5. Aufgrund der semantischen Äquivalenz von

$$(\exists x)(\alpha \vee \beta) \equiv (\exists x)\alpha \vee (\exists x)\beta$$

wird der Existenzquantor  $(\exists x)$  auf die einzelnen Disjunktionen „verteilt“. Wegen

$$(\exists x)(\alpha \wedge \beta) \equiv (\exists x)\alpha \wedge \beta,$$

falls in  $\beta$   $x$  nicht vorkommt, kann darüberhinaus angenommen werden, dass in jedem Konjunktionsglied von  $(\exists x)\alpha$   $x$  vorkommt.

6. Kernstück ist dann die folgende Transformation:

Jedes aus dem vorigen Schritt resultierende Disjunktionsglied  $(\exists x)\alpha$ , in der  $\alpha$  dann eine Konjunktion von atomaren Formeln und Formeln der Gestalt  $(\exists x)V(x, y)$  ist, ist semantisch äquivalent in eine Formel zu überführen, die ebenfalls nur aus Konjunktionen und Disjunktionen von atomaren Formeln aufgebaut ist.

Die Schritte 3. - 6. sind dann solange zu wiederholen, bis sämtliche Existenzquantoren eliminiert sind.

Betrachten wir Punkt 6. im Falle der Theorie  $TH(N_{<,\leq})$ :

Hier zeigt sich, dass z.B. für Formeln  $(\exists x)\alpha$ , wobei in  $\alpha$  nur das Relationssymbol  $<$  vorkommt und  $x$  sowohl in der Gestalt  $x < u$  als auch in der Gestalt  $v < x$  auftritt, der Existenzquantor nicht eliminiert werden kann. Mit modelltheoretischen Methoden lässt sich leicht zeigen:

**Theorem 10** *Die Theorie  $TH(N_{<, \otimes})$  erlaubt keine Quantorenelimination.*

Die Frage nach der Entscheidbarkeit selbst dieser noch sehr einfachen fuzzy arithmetischen Theorie muss im Augenblick noch offen bleiben. Es bleibt zu untersuchen, ob mit etwas allgemeineren Eliminationsmengen als mit den quantorenfreien Formelmengen die Frage der Entscheidbarkeit für die Theorie  $TH(N_{<, \otimes})$  und eventuell auch für die anderen Theorien gelöst werden kann.

## LITERATUR

1. Hodges W., A shorter model theory, Cambridge University Press 1997
2. Kaufmann A., Gupta M., Introduction to fuzzy arithmetic, van Nostrand Reinhold Company 1987

# Beziehungen zwischen Fuzzy Sets, Rough Sets und Flou Sets

*Bernd Reusch und Helmut Thiele*

Tel: 0231/755 6152

Thiele@ls1.cs.uni-dortmund.de

Zur Beschreibung und Verarbeitung unscharfer bzw. unsicherer Informationen wurden in den letzten vier Jahrzehnten eine Reihe von Modifikationen und Verallgemeinerungen des klassischen (scharfen) von Georg CANTOR stammenden Mengenbegriffs entwickelt und untersucht.

An erster Stelle ist das Konzept einer Fuzzy Menge zu nennen, das 1965 von L.A. ZADEH eingeführt wurde und das seitdem umfassend theoretisch-mathematisch untersucht wird und vielseitige Anwendung erfährt.

Von Z. PAWLAK wurde 1981 der Begriff einer Rough Set eingeführt, der eine weitere (vom Begriff der Fuzzy Menge verschiedene) Möglichkeit bietet, unscharfe bzw. unsichere Informationen zu verarbeiten. Auch hier kann

man auf zahlreiche mathematische Untersuchungen und fruchtbare Anwendungen auf viele praktische Probleme (z.B. der medizinischen, bzw. technischen Diagnose) verweisen.

Weniger bekannt ist der Begriff einer Flou Set, der 1968 von Y. GENTILHOMME zur Präzisierung linguistischer Probleme eingeführt wurde.

In einer längeren Untersuchung, die unter dem Titel "On Interrelations between Fuzzy Sets, Rough Sets, and Flou Sets" demnächst in der "Reihe Computational Intelligence" des Sonderforschungsbereichs 531 erscheinen wird, werden interessante gegenseitige Beziehungen zwischen den genannten drei Konzepten aufgedeckt und dargestellt.



# Das Projekt A1 im SFB 531: Ergebnisse und Ausblick

*Karl-Heinz Temme*

Tel: 0231/755 6373

temme@ls1.informatik.uni-dortmund.de

## ZUSAMMENFASSUNG

Am Ende der ersten Förderperiode des Sonderforschungsbereichs 531 wird über die Ergebnisse des Projektes A1 berichtet und ein Ausblick auf die zweite Förderperiode gegeben.

**STICHWÖRTER:** Projektbericht

## 1 ERGEBNISSE

Leitgedanke bei der Durchführung des Projektes A1 war es, erste grundlegende Ansätze für eine funktionalanalytische Sichtweise der Interpretation von Inferenzmechanismen für Fuzzy-IF-THEN-Regelbasen zu schaffen. Ausgehend von den bekannten Prinzipien FATI und FITA haben wir deren extensionale und relationale Interpretation näher untersucht. Der Aspekt der Korrektheit (im Antrag noch "Selbstkonsistenz" genannt) spielte hierbei eine wichtige Rolle. Die funktionalanalytische Betrachtung alternativer Inferenzverfahren und deren Analyse wird zum Ende der jetzigen Förderperiode zu ersten Ergebnissen führen. Das Gleiche gilt für die Verkettung von Regelbasen und deren Interpretation. Parallel zu diesen Arbeiten haben wir logische Eigenschaften von Regelbasen untersucht. Ein tiefergehendes Verständnis der Begriffe Korrektheit, Vollständigkeit und Unabhängigkeit von Regeln und Regelbasen führte zu einer Fülle von detaillierten Fragestellungen, die von uns in der nächsten Förderperiode genauer untersucht werden.

Im folgenden werden Stichworte zu den einzelnen erzielten Resultaten gegeben, die im Detail in [1] nachzulesen sind.

Compositional Rule of Inference in Standardform

Interpretation einer Fuzzy-IF-THEN-Regel

Generalized Compositional Rule of Inference

Korrektheit (schwach / lokal / global)

FATI (First Aggregation Then Inference)

FITA (First Inference Then Aggregation)

Regelweise Korrektheit

Äquivalenz

Similarity-Based Inference

Verkettbarkeit von Regeln

Verkettbarkeit von Regelbasen

Resultat einer Verkettung

Verkettung im Mamdani-Fall

Modellbegriff für Fuzzy-IF-THEN-Regelbasen

Konzept der semantischen Folgerung

Widerspruchsfreiheit

Vollständigkeit

Unabhängigkeit

Fuzzy-Implikationsfunktionen

Axiomatische Darstellung bestimmter Klassen

Ein umfassender Überblick der erzielten Resultate, insbesondere bzgl. des Ansatzes der funktionalanalytischen Sichtweise, ist in [2] enthalten.

## 2 AUSBLICK

Als Fernziele des Projektes A1 wird eine systematisch aufgebaute Theorie der Fuzzy-IF-THEN-Regelbasen angestrebt. Darüberhinaus sollen, in enger Wechselwirkung mit den theoretischen Untersuchungen, die bisherigen Anwendungen zu Fuzzy-IF-THEN-Regelbasen exakt begründet, systematisiert und in allgemeine generalisierende Konzepte eingeordnet werden. Ferner wird angestrebt, neue Anwendungsgebiete für Fuzzy-IF-THEN-Regelbasen zu erschließen. Im einzelnen sollen folgende Themen bearbeitet werden [3].

### Semantik von Inferenzmodulen

Aufbau eines Fuzzy-Inferenzmechanismus im Sinne der Schaltwerktheorie durch Verschaltung von Fuzzy-Inferenzmodulen, z.B. Fuzzifizierer, Defuzzifizierer regelbasierte Inferenzmaschinen, linguistische Modifikatoren; Untersuchung der Semantik.

### Struktur von Inferenzmechanismen

Studium der funktionalen Gebilde, die durch Verknüpfung von Inferenzmodulen entstehen, und deren Einordnung in den auf der Funktionalanalysis basierenden Ansatz.

### Logische Eigenschaften

Eigenschaften von Regelbasen in Bezug auf Relevanz, Unabhängigkeit, Korrektheit und Vollständigkeit.

### Äquivalenz, Ähnlichkeit und Transformation

Optimierung und Bewertung von Regelbasen; Gütemaße; Testen von Regelbasen auf Äquivalenz; Transformationsverfahren.

### Rückkopplung und Speichereigenschaft

Definition von Fuzzy Feedback-Systemen mit wohldefinierten Speichereigenschaften; erste grundlegende Aussagen zu asymptotischem Verhalten und Stabilität solcher Systeme.

### Übertragung funktionalanalytischer Begriffe

Aufbau einer theoretischen Grundlage für Fuzzy Control bzgl. Stetigkeit und Vollstetigkeit, Eigenfunktionen und Eigenwerte, Fixpunkte, Linearität; Interpretierbare Anwendungen der Konzepte.

### 3 LITERATUR

1. **Sonderforschungsbereich 531:** Design und Management komplexer technischer Prozesse und Systeme mit Methoden der Computational Intelligence, Arbeits- und Ergebnisberichte 1997 - 1998 - 1999, Universität Dortmund, April 1999, S. 19-43
2. **Lehmke, S. and Reusch, B. and Temme, K.-H. and Thiele, H.:** On Interpreting Fuzzy IF-THEN Rule Bases by Concepts of Functional Analysis, Reihe CI 19/98, SFB 531, Universität Dortmund, Februar 1998
3. **Sonderforschungsbereich 531:** Design und Management komplexer technischer Prozesse und Systeme mit Methoden der Computational Intelligence, Finanzierungsantrag 2000 - 2001 - 2002, Universität Dortmund, April 1999, S. 43-78

# A Comparison of CADIAG-2 and MYCIN-like Systems

Tatiana Kiseliöva

CADIAG-2 and MYCIN-like systems are expert systems with numerous applications in medicine [2], [3]. CADIAG-2 [1] is a fuzzy expert system based on max–min inference, while MYCIN uses combining functions to calculate the global weights of suggested diagnoses.

Our aim is to show relations between CADIAG-2 and MYCIN-like systems.

Systems, like CADIAG-2 are subjected to a very similar criticism as that of MYCIN-like systems, but, on the other hand, may benefit from the (particullary) positive results of a (cautious) use of MYCIN-like systems.

## 1 CADIAG-2

**CADIAG-2** (Computer Assisted **DIAG**nosis) is a rule-based medical expert system designed for internal medicine. The rules are presented in *IF...THEN* form. An inferencing engine is based on statistical interpretations of relations as well as on a max-min composition of fuzzy relations.

### 1.1 MEDICAL ENTITIES IN CADIAG-2

Let  $\Pi = \{P_1, \dots, P_r\}$  be a set of patients,  $\Sigma = \{S_1, \dots, S_m\}$  be a set of symptoms,  $\Delta = \{D_1, \dots, D_n\}$  be a set of diseases.

CADIAG-2 considers the following classes of medical entities:

- symptoms, signs, test results, and findings ( $S_i$ ),
- diseases, diagnoses ( $D_i$ ),

and their combinations.

Each symptom (or diagnose) is described with the help of a fuzzy set  $S_i$  (or  $D_i$ ) that takes values from interval  $[0, 1]$  and indicates the degree to which the patient exhibits this symptom (or diagnose).

### 1.2 RELATIONS IN CADIAG-2

To represent *patient-symptoms* relationships symbol  $R_{PS} \subset \Pi \times \Sigma$  (or  $R(P_i, S_j)$ ) is used.

$R(P_i, S_j)$  is defined to be a degree in which it is true that the patient  $P_i$  has the symptom  $S_j$ . Stress here again, that this relation  $R(P_i, S_j)$  based on the definition of **fuzzy relations**.

Another kind of relations are  $R(S_i, D_j)$ , ( $R_{SD} \subset \Sigma \times \Delta$ ), relations between symptoms and diagnoses. They are based on **statistical interpretation** of relations.

Two binary relations  $R_{SD}^c, R_{SD}^o \subset \Sigma \times \Delta$  were introduced to express symptom-diseases relationships.

A *confirmation relation*  $R_{SD}^c$  represents so called the *strength of confirmation* ( $c$ ).

An *occurrence relation*  $R_{SD}^o$  represents so called the *frequency of occurrence* ( $o$ ).

The relationships between medical entities are given in the form of rules:

IF (antecedent) THEN (consequent) WITH ( $o, c$ )

#### Example 1.1

*IF (ultrasonic of pancreas is pathological) THEN  
(pancreatic cancer)  
WITH (0.75 ~ often, 0.25 ~ weak).*

Relations between medical entities are defined as conditional frequencies:

$$R^o(S_i, D_j) = F(S_i|D_j) = \frac{F(S_i \cap D_j)}{F(D_j)} \quad (1)$$

$$R^c(S_i, D_j) = F(D_j|S_i) = \frac{F(S_i \cap D_j)}{F(S_i)} \quad (2)$$

where

$F(S_i \cap D_j)$  absolute frequency of occurrence  $S_i$  and  $D_j$ ,

$F(D_j)$  absolute frequency of occurrence of  $D_j$ ,

$F(S_i)$  absolute frequency of occurrence of  $S_i$ ,

$F(S_i|D_j)$  conditional frequency of  $S_i$  given  $D_j$ ,

$F(D_j|S_i)$  conditional frequency of  $D_j$  given  $S_i$ .

The values  $R_{SD}^o$  and  $R_{SD}^c$  can be interpreted numerical and linguistically. A correspondence between them are shown in the table:

**Note:** The intervals in second and fifth rows in Fig. 1 show a possible disperse of numerical values.

Frequency of Occurrence $R_{SD}^o$			Strength of Confirmation $R_{SD}^c$		
Always	[1.00, 1.00]	1.00	Always	[1.00, 1.00]	1.0
Almost Always	[0.98, 0.99]	0.99	Almost Always	[0.98, 0.99]	0.99
Very Often	[0.83, 0.97]	0.90	Very Strong	[0.83, 0.97]	0.90
Often	[0.68, 0.82]	0.75	Strong	[0.68, 0.82]	0.75
Medium	[0.33, 0.67]	0.50	Medium	[0.33, 0.67]	0.50
Seldom	[0.18, 0.32]	0.25	Weak	[0.18, 0.32]	0.25
Very Seldom	[0.03, 0.17]	0.10	Very Weak	[0.03, 0.17]	0.10
Almost Never	[0.01, 0.02]	0.01	Almost Never	[0.01, 0.02]	0.01
Never	[0.00, 0.00]	0.00	Never	[0.00, 0.00]	0.00

Figure 1:

### 1.3 AN INFERENCE MECHANISM

$$R_{PD} = R_{PS} \circ R_{SD} \quad (3)$$

$$R(P_q, D_j) = \max_{S_i \in \Sigma} \min(R(P_q, S_i), R(S_i, D_j)) \quad (4)$$

Because of features of physicians' thinking and of distinguishing confirmation and occurrence relations, there are three types of inference rule/compositions:

1. confirmation (by present symptoms)  $R_{PD}^1 = R_{PS} \circ R_{SD}^c$ ,
2. exclusion (by present symptoms)  $R_{PD}^2 = R_{PS} \circ (1 - R_{SD}^c)$ ,
3. exclusion (by absent symptoms)  $R_{PD}^3 = (1 - R_{PS}) \circ R_{SD}^o$

All three inference rules/compositions are max – min compositions, i.e.

$$R^1(P_q, D_j) = \max_{S_i} \min(R(P_q, S_i), R^c(S_i, D_j)) \quad (5)$$

$$R^2(P_q, D_j) = \max_{S_i} \min(R(P_q, S_i), 1 - R^c(S_i, D_j)) \quad (6)$$

$$R^3(P_q, D_j) = \max_{S_i} \min(1 - R(P_q, S_i), R^o(S_i, D_j)) \quad (7)$$

Analogous rules are defined for

- symptom combination-disease ( $R_{PD}^4, R_{PD}^5, R_{PD}^6$ ),
- symptom-symptom ( $R_{PD}^7, R_{PD}^8, R_{PD}^9$ ),
- disease-disease relationships ( $R_{PD}^{10}, R_{PD}^{11}, R_{PD}^{12}$ ).

### 1.4 A DIAGNOSTIC PROCESS

The results of inference process (examined diagnoses) can be interpreted as:

1. confirmed,
2. executed,
3. possible diagnoses.

- A confirmed diagnose is established when

$$\begin{cases} R^1(P_q, D_j) = 1.00 \\ \text{or} \\ R^4(P_q, D_j) = 1.00 \end{cases}$$

- An excluded diagnose is established when

$$\begin{cases} R^2(P_q, D_j) = 1.00 \\ \text{or} \\ R^3(P_q, D_j) = 1.00 \\ \text{or} \\ R^5(P_q, D_j) = 1.00 \\ \text{or} \\ R^6(P_q, D_j) = 1.00 \end{cases}$$

- A possible diagnose is established

in other cases

The confirmed diagnoses and any remaining diagnoses should together explain any pathological symptom, indication, or lab test result of the patient.

Unexplained data (usually) indicates further diseases that should be investigated.

## 2 MYCIN-LIKE SYSTEMS

MYCIN-like systems are rule based knowledge systems with weighted rules

$$S \longrightarrow D (w)$$

where

$S$  is an elementary conjunction of symptoms,

$w$  is called ‘‘certainty factor’’ (CF).

These systems deal with *belief* via combining functions, and are based on a confirmation theory.

Let a rule base be a set  $\Theta$  of rules,

1.  $q$  be a mapping assigning (by an expert) to each symptom  $S_i$  its weights  $q(S_i)$ .

- Each elementary conjunction  $S$  is computed using truth functions over  $[-1, 1]$ :

$$NEG(x) = -x \quad CONJ(x, y) = \min(x, y)$$

- $W(S|q)$  is the weight of  $S$  given by questionnaire  $q$ .
- Each rule  $R : S \rightarrow D$  ( $w$ ) determines the contribution of  $R$  given  $q$  (denoted as  $W(R|q)$ ) defined as:

$$\begin{aligned} W(R|q) &= 0, & W(S|q) &\leq 0 \\ W(R|q) &= \min(W(S|q, w) & W(S|q, w) &\geq 0 \\ W(R|q) &= -\min(W(S|q, -w) & W(S|q) &> 0, w < 0 \end{aligned}$$

Previous items can be written in short form:

- $S_i \sim q(S_i)$
- $S = CONJ(S_1, \dots, S_n)$
- $S \sim W(S|q)$
- $R \sim W(R|q) \sim W(S|q), w$

A global weight of a diagnosis  $D$  given  $q$  ( $W(D|q)$ ) is computed using operation  $\oplus$  as the  $\oplus$ -sum of contributions of all rules ( $R^1, \dots, R^n$ ) whose consequent is  $D$  (rules leading to  $D$ ):

$$W_{\Theta}(D|q) = W(R^1|q) \oplus \dots \oplus W(R^n|q)$$

Summarising, a particular MYCIN-like system is fully determined by a set of rules and by a group of operation  $\oplus$ .

Assumption. The ordered set of weights  $[-1, 1]$  (or  $[0, 1]$  if desired) together with  $\oplus$  is an extended ordered Abelian group.

**Definition 2.1** An ordered Abelian group (OAG)  $G = (G, \oplus, \ominus, 0, \leq)$ , is a set  $G$  with an associative and commutative binary operation  $\oplus$ , with a neutral element  $0$  ( $x \oplus 0 = x$ ) with a unary operation of inverse  $\ominus$  ( $x \oplus (\ominus x) = 0$ ) and with linear ordering such that monotonicity holds ( $x \leq y \rightarrow x \oplus z \leq y \oplus z$ ).  $OAG^+$  is extended OAG with greatest element  $\top$  and least element  $\perp$  such that

$$\top \oplus x = \top$$

$$\ominus \top = \perp$$

$\top \oplus \perp$  is not defined.

**Example 2.1**  
OAG is

- $\mathbf{R} = (\mathbf{R}, +, -, 0, \leq)$ ,

$OAG^+$  is

- $\mathbf{R} = (\mathbf{R}, +, -, 0, \leq, \infty, -\infty)$
- $MC = ([-1, 1], \oplus_{MC}, -, 0, \leq)$

**Example 2.2** For MYCIN:

$$\begin{aligned} x \oplus_{MC} y &= x + y - xy, & x, y &\geq 0 \\ x \oplus_{MC} y &= x + y + xy, & x, y &\leq 0 \\ x \oplus_{MC} y &= \frac{x+y}{1-\min\{|x|, |y|\}}, & xy &\leq 0 \end{aligned}$$

**Note.**  $\oplus_{MC}$  of MC, restricted onto  $[0, 1]$  fulfils the conditions of  $S$ -norm, indeed,  $\oplus_{MC}$  defines  $S$ -norm.

### 3 PROBLEMS AND ADVANTAGES OF MYCIN AND CADIAG-2

- Positive.** Both systems often give acceptable results.
- Negative.** Both systems during the process of inference, get a number attached to a diagnosis. The supposive interpretation of this number as a belief on the presence  $D$  given the knowledge and data, is not obvious.

**Example 3.1**

$S_1$  gives weight  $x$  to  $D$ ,  
 $S_2$  gives weight  $y$  to  $D$ ,

what about the presence of both  $S_1$  and  $S_2$ ?

If weights are relative frequencies, then

$$CADIAG: R^c(D|S_1 \& S_2) = \max\{x, y\}$$

It means that CADIAG-2 does not pay attention to several independent rules confirming the same diagnosis with an equal weight.

$$MYCIN: W(D|S_1 \& S_2) = x \oplus y$$

One can have very similar rules whose contributions to the sum up to a very big weight.

- Positive.** Both systems share the property that they can never get certainty (value 1) from uncertain contributions.
- Negative.** In MYCIN-like systems a rule with a negative weight may diminish an effect of rule with a positive weight. This feature is absent in max – min inference of CADIAG-2.

Let us illustrate this on an example:

**Example 3.2**

$$\begin{aligned} \text{IF } R^c(S_1, D_1) = 0.7 \quad \text{and} \quad R(P_q, S_1) = 1 \\ R^c(S_2, D_2) = 0.7 \quad \text{and} \quad R(P_q, S_2) = 1 \\ R^c(S_3, D_2) = 0.7 \quad \text{and} \quad R(P_q, S_3) = 1 \end{aligned}$$

THEN

$$\begin{aligned} R(P_q, D_1) = 0.7 \\ R(P_q, D_2) = 0.7 \end{aligned}$$

For disease  $D_1$  symptom  $S_1$  is present, for disease  $D_2$  symptoms  $S_1$  and  $S_2$  are present, but the patient has both diseases with the same grade.

**Note.** In this case parameter “frequency of occurrence” is not considered.

If there are other conditions, for example,

$$\begin{aligned} R(P_q, S_1) = 0.9 \\ R(P_q, S_2) = 0.9 \\ R(P_q, S_3) = 0.7 \end{aligned}$$

the result is

$$\begin{aligned} R(P_q, D_1) = 0.7 \\ R(P_q, D_2) = 0.7 \end{aligned}$$

as well. But intuitively in this case  $R(P_q, D_j)$  should be a less value.

**4 CONORM-CADIAG-2**

1. One of the possible ways to avoid previously described problems is to generalise max – min inference to  $S$ -norm-min inference as followi:

$$R(P_q, D_j) = \bigvee_{S_i \in \Sigma} \min(R(P_q, S_i), R^c(S_i, D_j)) \quad (8)$$

where  $\bigvee$  is a non idempotent  $S$ -norm, e.g.  $\oplus_{MC}$ . In this case, in previous example:

$$R(P_q, D_2) = 0.91 > 0.7 \quad (9)$$

2. From theoretical point of view, a single symptom can be considered as a one-element combination of symptoms.

This modified CADIAG-2 further is called Conorm-CADIAG-2.

**5 EMBEDDING OF CADIAG INTO MYCIN-LIKE SYSTEMS**

**Definition 5.1** A rule base  $\Theta$  given by  $R^c(S, D)$  is a rule base  $\Theta$  of a MYCIN-like system with:

$$S \longrightarrow D (R^c(S_i, D_j))$$

A questionnaire  $q$  given by patient-symptom relation  $R_{PS}$  is a mapping  $q$ , assigning to each single symptom  $S_i$  its weight.

$$q(S_i) = R(P_k, S_i)$$

**Lemma 5.1** [2] Let  $R_{SD}^c$  be a confirmation relation and  $R_{PS}$  be a patient-symptom relation, let  $\bigvee$  be  $S$ -norm given by Abelian group operation  $\oplus$ . Further, let,  $\Theta$  be a rule base given by  $R_{SD}^c$  and  $q$  be a questionnaire given by  $R_{PS}$  for a patient  $P_k$ . Then

$$R^c(P_k, D_j) = W_{\Theta}(D_j|q)$$

i.e. conorm-CADIAG-2 with the  $S$  – norm  $\bigvee$  gives the same results for non excluded diagnoses of the patient  $P_k$  as a MYCIN-like system using the operation  $\oplus$  the rule base  $\Theta$  and the questionnaire  $q$ .

To extend this lemma to excluded diagnoses, let us introduce the following definition.

**Definition 5.2** A rule base  $\Theta$  given by  $R_{SD}^c$  and  $R_{SD}^o$  is a rule base  $\Theta$  of MYCIN-like systems with rules of the form

$$S_i \longrightarrow D_j (R^c(S_i, D_j))$$

$$\begin{aligned} \overline{S_i} \longrightarrow \overline{D_j}(1), \quad \text{if } R^c(S_i, D_j) = 0 \\ \overline{S_i} \longrightarrow \overline{D_j}(1), \quad \text{if } R^o(S_i, D_j) = 1 \end{aligned}$$

Thus, results inferred with rule-base  $\Theta$  given by  $R_{SD}^c$  and  $R_{SD}^o$  are interpreted as follows:

1.  $D_j$  is confirmed if  $W_{\Theta}(D_j|q) = 1$ ,
2.  $D_j$  is excluded if  $W_{\Theta}(\overline{D_j}|q) = 1$ ,
3. other diagnoses are possible with weight  $W_{\Theta}(D_j|q)$

**Theorem 5.1** [2] Let  $R_{SD}^c$  be a confirmation relation and  $R_{PS}$  be a patient-symptom relation, let  $\bigvee$  be the  $S$ -norm given by Abelian group operation  $\oplus$ . Further, let,  $\Theta$  be a rule base given by  $R_{SD}^c$  and  $q$  be a questionnaire given by  $R_{PS}$  for a patient  $P_k$ . Then Conorm-CADIAG-2 with the  $S$  – norm  $\bigvee$  gives the same results as a MYCIN-like system using the operation  $\oplus$  the rule base  $\Theta$  and the questionnaire  $q$ .

**6 INCLUDING NEGATIVE KNOWLEDGE INTO CADIAG-2**

CADIAG-2 can not decrease contribution of the rule(s) by another rule(s). To avoid this let us make the following generalisations:

- One allows any elementary conjunction  $S$  of symptoms as a symptom combination in  $R_{SD}$ ;  $\Psi$  will stand for the set of all elementary conjunctions of symptoms.
- CADIAG-2 is extended with a new symptom-disease relations: exclusion relation ( $R_{SD}^e \subset \Psi \times \Delta$ ). This value indicates the degree in which the present symptom combination excludes the diagnose  $D_j$  and

$$R_{SD}^e = 0 \text{ or } R_{SD}^c = 0$$

(it is impossible that symptom combination both confirms and excluded diagnosis). To define exclusion of  $D_j$  for  $P_q$ :

$$R^e(P_q, D_j) = \bigvee_{S_i \in \Psi} \min(R(P_q, S_i), R^e(S_i, D_j)) \quad (10)$$

To distinguish a total degree of the case  $c = e$  from  $c < e$  one admits also negative total degrees and represents exclusion as a negative confirmation. Thus, degrees are taken from  $[-1, 1]$ .

$$R^{tot}(P_q, D_j) = R^c(P_q, D_j) \oplus -R^e(P_q, D_j) \quad (11)$$

This generalisation of CADIAG-2 also embeds into a MYCIN-like system.

**Definition 6.1** A rule base  $\Theta$  given by  $R_{SD}^c$  and  $R_{SD}^e$  is a rule base  $\Theta$  of MYCIN-like systems with rules of the form

$$S_i \longrightarrow D_j(R^c(S_i, D_j))$$

$$S_i \longrightarrow \neg D_j(R^e(S_i, D_j))$$

And results are interpreted as follows.

1.  $D_j$  is confirmed if  $W_{\Theta}(D_j|q) = 1$
2.  $D_j$  is excluded if  $W_{\Theta}(D_j|q) = -1$
3. other diagnoses are possible with weight  $W_{\Theta}(D_j|q)$

**Theorem 6.1** [2] Let  $R_{SD}^c$  be a confirmation relation,  $R_{SD}^e$  be exclusion relation and  $R_{PS}$  be a patient-symptom relation, let  $\bigvee$  be the  $S$ -norm given by Abelian group operation  $\oplus$ . Further, let  $\Theta$  be a rule base given by  $R_{SD}^c$  and  $q$  be a questionnaire given by  $R_{PS}$  for a patient  $P_k$ .

Then Conorm-CADIAG-2 (processing also negative knowledge) with the  $S$ -norm  $\bigvee$  gives the same results as a MYCIN-like system using the operation  $\oplus$  the rule base  $\Theta$  and the questionnaire  $q$ .

## 7 GENERALISATION

1. A set of weights is  $[-1, 1]$ .
2. A rule base  $\Theta$ :

$$\begin{aligned} S &\longrightarrow D(w), 0 \leq w \\ S &\longrightarrow \neg D(v), v \leq 1 \end{aligned}$$

3.  $q, W(S|q), W(R|q)$  as defined in MYCIN.

4. The combination of rules is via any operation  $\oplus$  defined on  $[-1, 1]$ , whose properties are:

a)  $\oplus$  is a  $S$ -norm on  $[0, 1]$ ,

b)  $x \oplus y = -(-x \oplus -y)$  for  $x, y \in [-1, 0]$

c)

$$\begin{aligned} 1 \oplus -1 &\quad \text{is undefined} \\ 1 \oplus x = 1, &\quad x > -1 \\ 1 \oplus x = -1, &\quad x < 1 \end{aligned}$$

d) An equation  $x \oplus z = y$  has a solution  $z = y \ominus x, \forall x, y, -1 < x, y < 1$

5.  $W_{tot} = W_+(D|q) \oplus -W_-(D|q)$  where  $W_+(D|q)$  and  $W_-(D|q)$  are contributions of rules leading to  $D$  and  $\neg D$  correspondently.

## 8 CONCLUSIONS

- Relations between MYCIN-like systems and CADIAG-2 were considered.
- A weak point of each systems is that weights of rules are relative frequencies.
- If a max operation in max-min composition of CADIAG-2 is replaced by  $S$ -norm, then CADIAG-2 can be seen as a particular case of the corresponding MYCIN-like system.
- This remains true even if we extend the formalism of CADIAG-2 to deal with negative rules.

## REFERENCES

1. **Adlassnig, K.-P.:** Fuzzy set theory in medical diagnosis. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics SMC-16, 2 (1986).
2. **Hajek, P., Nguen, P. H., and Daniel, M.:** CADIAG-2 and MYCIN-like Systems. Artificial Intelligence in Medicine 9 (1997), 241-259.
3. **Kiseliova, T.:** Computational Intelligence in Medicine. Special Course of Lectures, Dortmund University, Informatik I, 1999.



# DEMPSTER-SHAFER Evidenztheorie – Versuch einer anschaulichen Einführung

Gero Presser

Tel: 0231/755 6309

Presser@ls1.cs.uni-dortmund.de

## ZUSAMMENFASSUNG

Die Dempster-Shafer Theorie (auch Evidenztheorie) ist eine quantitative Methode zur Modellierung nicht-perfekten Wissens. Sie ist eine Verallgemeinerung der klassischen Wahrscheinlichkeitstheorie dahingehend, dass auch *Ungewissheit*, also das Fehlen von Informationen, adäquat modelliert werden kann.

Wir geben eine kurze (und damit leider auch hochgradig unvollständige) Einführung in die Werkzeuge der Evidenztheorie. Die Darstellung dieser Werkzeuge ist derart ausgerichtet, dass ein klarer Vergleich mit den Methoden der Wahrscheinlichkeitstheorie möglich wird.

**STICHWÖRTER:** Dempster-Shafer Theorie, Evidenztheorie, Nicht-perfekte Informationen

## 1 MOTIVATION

### 1.1 ZIELSETZUNG DER EVIDENZTHEORIE

Die Dempster-Shafer Theorie – synonym dazu findet man auch die Bezeichnung Evidenztheorie – ist eine *Maßtheorie*, welche die formale Modellierung von nicht-perfekten Informationen erlaubt.

In diesem Kapitel werden wir zunächst an einem einführenden Beispiel demonstrieren, dass es durchaus verschiedene berechnete Ansätze zur Modellierung nicht-perfekter Informationen gibt. Nachfolgend klären wir dann, was genau wir unter dem Begriff „nicht-perfekte Informationen“ verstehen wollen.

Unser einführendes, mittlerweile klassisches Beispiel stammt aus einem einflussreichen Artikel von Lotfi Zadeh ([14]). Er betrachtet dabei die Aussagenfolge

*Hans hat zum Frühstück  $n$  Eier gegessen,  
 $n = 1, 2, \dots$*

und assoziiert mit dieser Aussagenfolge sowohl eine Wahrscheinlichkeitsverteilung  $\text{Pr}$  als auch eine Möglichkeitsverteilung  $\text{Poss}$ :

$n$	1	2	3	4	5	6	7
$\text{Pr}(n)$	0.1	0.8	0.1	0	0	0	0
$\text{Poss}(n)$	1	1	1	0.8	0.6	0.4	0.2

Dabei ist  $\text{Pr}(n)$  ein Maß für die *Wahrscheinlichkeit*, dass Hans  $n$  Eier zum Frühstück gegessen hat (etwa festgelegt aufgrund des „typischen“ Frühstücksverhaltens von Hans). Dahingegen misst  $\text{Poss}(n)$  die *Möglichkeit* – interpretiert als den Grad der Einfachheit – mit welcher Hans  $n$  Eier zum Frühstück gegessen haben könnte.

Wir wollen hier das Konzept einer *Möglichkeitsverteilung* nicht weiter diskutieren. Das Beispiel sollte lediglich demonstrieren, dass es durchaus verschiedene Maße gibt, welche verschiedene Aspekte unseres nicht-perfekten Wissens bezüglich einer Aussage (oder Aussagenfolge) formalisieren.

### 1.2 NICHT-PERFEKTE INFORMATIONEN

Gegeben sei ein beliebiges Entscheidungsobjekt  $\mathcal{S}$  und eine Information  $I$  (etwa eine Aussage). Philippe Smets unterscheidet in [12] zwischen

**Ungenauigkeit** (Imprecision) Die Information  $I$  ist zwar zutreffend, spezifiziert ein  $\mathcal{S}$  interessierendes Datum aber nicht genau genug: es bleiben mehrere Möglichkeiten für die Ausprägung dieses Datums.

**Unsicherheit** (Uncertainty) Ein  $\mathcal{S}$  interessierendes Datum wird durch die Information  $I$  zwar genau genug spezifiziert. Jedoch ist sich  $\mathcal{S}$  bezüglich der *Gültigkeit* dieser Spezifikation *nicht sicher*.

**Inkonsistenz** (Inconsistency) Die Information  $I$  ist widersprüchlich.

Smets bezeichnet eine Information  $I$  als *perfekt*, falls sie genau, konsistent und sicher ist; andernfalls nennt er *nicht-perfekt* (imperfect).

Wir illustrieren die verschiedenen Arten der Nicht-Perfektheit anhand je eines einfachen Beispiels:

- Die Information „Peter hat ein oder zwei Kinder“ ist *ungenau*: Es verbleiben mehrere Möglichkeiten (ein Kind, zwei Kinder).
- Die Information „Peter hat sehr wahrscheinlich 2 Kinder“ ist *unsicher*: Es besteht die Möglichkeit, dass Peter eine von 2 verschiedene Anzahl an Kindern hat.

- Die Information „Tweety ist ein Vogel. Alle Vögel können fliegen. Tweety kann nicht fliegen“ ist *inkonsistent*: Offenbar liegt ein Widerspruch vor.

Eine ähnliche Klassifikation nicht-perfekter Informationen findet man auch in der Betriebswirtschaftslehre: Insbesondere in der (betriebswirtschaftlichen) Entscheidungstheorie unterscheidet man zwischen den beiden folgenden Situationen:

**(Entscheiden unter) Ungewissheit** Dem Entscheider ist (nur) die Menge der möglichen Zustände bekannt. (Er weiss beispielsweise, dass eine Maschine entweder ausfällt oder aber korrekt funktioniert.)

**(Entscheiden unter) Risiko** Dem Entscheider ist die Menge der möglichen Zustände und zudem eine (subjektive) Wahrscheinlichkeitsverteilung auf eben dieser Zustandsmenge bekannt. (Beispielsweise könnte der Entscheider der Meinung sein, dass eine gewisse Maschine mit einer Wahrscheinlichkeit von  $p$  ausfällt und mit der Gegenwahrscheinlichkeit  $1 - p$  korrekt funktioniert.)

In der Situation „*Ungewissheit*“ verfügt der Entscheider also über *ungenau* Informationen (im SMETS'schen Sinne) und in der *Risiko*-Situation über *unsichere* Informationen.

Die Wahrscheinlichkeitstheorie ist maßgeschneidert für die Risiko-Situation; denn dort werden den Zuständen exakte (subjektive) Wahrscheinlichkeiten zugeordnet. Demgegenüber ist die Evidenztheorie eine Verallgemeinerung der Wahrscheinlichkeitstheorie, welche das *gesamte Spektrum* zwischen Ungewissheit und Risiko abdeckt.

### 1.3 WAHRSCHEINLICHKEITEN SIND KEIN „ALLHEILMITTEL“

Die Wahrscheinlichkeitstheorie ist die mit Abstand bekannteste Maßtheorie für den formalen Umgang mit nicht-perfekten Informationen. Der „Standardansatz“ besteht darin, auf der Menge der möglichen Ausprägungen eines fraglichen Datums eine Wahrscheinlichkeitsverteilung zu definieren, welche die verfügbaren Informationen repräsentiert. Allerdings führt dieser Standardansatz nicht notwendigerweise zu uneingeschränktem Erfolg.

Um dies zu demonstrieren, betrachten wir die folgende „*pathologische Lotterie*“: Zunächst wird eine (faire) Münze geworfen. Sollte diese Kopf anzeigen, so muss der Spieler 2 DM bezahlen – wir bezeichnen dies als Zustand A. Ist das Resultat des Münzwurfes dagegen Zahl, so gibt es zwei Möglichkeiten: Entweder der Spieler erhält 1 DM (Zustand B) oder aber er erhält 3 DM (Zustand C). Dem Spieler ist vollkommen unbekannt, *welcher* der Zustände B und C auftritt, er weiss lediglich, dass dies die beiden einzigen möglichen Zustände sind.

Zwecks Modellierung dieser Lotterie wählen wir das Universum  $\Theta = \{A, B, C\}$ . Ein Wahrscheinlichkeitsmaß  $\Pr$  auf dem Universum  $\Theta$  ist eine Abbildung  $\Pr : 2^\Theta \rightarrow [0, 1]$  derart, dass  $\Pr(\emptyset) = 0$ ,  $\Pr(\Theta) = 1$  und zudem die sogenannte *Additivität*

$$X \cap Y = \emptyset \implies \Pr(X \cup Y) = \Pr(X) + \Pr(Y)$$

gilt. Aufgrund der Additivität folgt unmittelbar

$$\Pr(X) = \sum_{x \in X} \Pr(\{x\}) =: p(x)$$

und folglich ist das Wahrscheinlichkeitsmaß  $\Pr$  bereits durch die Funktion  $p : \Theta \rightarrow [0, 1]$  eindeutig festgelegt. Diese Funktion  $p$  nennt man gelegentlich eine *Wahrscheinlichkeitszuordnung*.

Beim Standardansatz der wahrscheinlichkeitstheoretischen formalen Beschreibung nicht-perfekter Informationen versucht man, die vorliegende Information durch eine Wahrscheinlichkeitszuordnung (und die dadurch induzierte Wahrscheinlichkeitsverteilung) zu beschreiben; wir haben diesen Ansatz bereits in ZADEH's „Eierbeispiel“ gewissermaßen nebenbei kennengelernt.

In unserer „*pathologischen Lotterie*“ ist diese naive Anwendung der Wahrscheinlichkeitstheorie jedoch problematisch: Die Wahrscheinlichkeiten  $p(B)$  und  $p(C)$  sind unbekannt! Unser Wissen lässt sich zwar präzise beschreiben durch

$$p(A) = p(B) + p(C) = 0.5,$$

aber dies ist in gewissem Sinne „getrickst“: Hierdurch wird nicht *ein* Wahrscheinlichkeitsmaß  $\Pr$  spezifiziert, sondern vielmehr eine ganze *Menge* von Wahrscheinlichkeitsmaßen.

Wollen wir die Lotterie wirklich durch *eine* Wahrscheinlichkeitsverteilung  $\Pr$  beschreiben, so müssen die Werte  $p(B)$  und  $p(C)$  mehr oder weniger willkürlich festgelegt werden. Das sogenannte LAPLACE-Prinzip (auch: *Prinzip des unzureichenden Grundes*) besagt, dass, sofern keine anderslautenden Informationen vorhanden sind, alle Zustände als *gleichwahrscheinlich* anzunehmen sind (vergleiche hierzu etwa [9]). In unserem Beispiel führt dies zu  $p(B) = p(C) = 0.25$ . Allerdings ist die Anwendung des LAPLACE-Prinzips sehr problematisch – es lassen sich diverse schwerwiegende Paradoxien aus ihm ableiten.

Das Problem an unserer „*pathologischen Lotterie*“ ist die Mischung aus Ungewissheit und Risiko: Nimmt man an, dass der Münzwurf das Ergebnis Zahl zeigt, so liegt die prototypische Ungewissheits-Situation vor. Dagegen entspricht der isoliert betrachtete Münzwurf der prototypischen Risikosituation. Im Sinne der SMETS'schen Terminologie bedeutet dies, dass die vorliegende Information sowohl unsicher als auch ungenau ist.

Wir haben bereits angemerkt, dass sich unser konkretes Beispiel präzise durch eine Menge von Wahrscheinlichkeitsverteilungen beschreiben lässt. Genau diesen Ansatz formalisiert die Evidenztheorie.

## 2 EVIDENZTHEORIE

### 2.1 EINFÜHRUNG

Im folgenden unterstellen wir stets ein endliches Universum  $\Theta$ .<sup>1</sup>

Die zentrale Idee der Evidenztheorie ist, die Wahrscheinlichkeitsmasse nicht auf den *Elementen* des Universums zu verteilen – wie dies in der Wahrscheinlichkeitstheorie der Fall ist – sondern vielmehr auf den nichtleeren *Teilmengen* des Universums. Mit anderen Worten: die Wahrscheinlichkeitsmasse wird auf der Potenzmenge  $2^\Theta$  des Universums  $\Theta$  verteilt.

In der klassischen Wahrscheinlichkeitstheorie berechnet sich das Gewicht (die Wahrscheinlichkeit)  $\Pr(X)$  einer Menge  $X$  aufgrund der Additivität als

$$\Pr(X) = \sum_{x \in X} p(x);$$

folglich genügt die Wahrscheinlichkeitszuweisung  $p : \Theta \rightarrow [0, 1]$  zur eindeutigen Festlegung des Wahrscheinlichkeitsmaßes  $\Pr$ . Demgegenüber gilt in der Evidenztheorie nichts vergleichbares; die Zuweisung eines Gewichtes  $w \in [0, 1]$  an eine Menge  $X$  wird interpretiert als das

*Gewicht der Gründe, die genau für  $X$  sprechen*

und dieses Gewicht kann nicht weiter auf die Elemente von  $X$  aufgeteilt werden.

Im Beispiel der „pathologischen Lotterie“ würde man (im Sinne der Evidenztheorie) den Mengen  $\{A\}$  und  $\{B, C\}$  jeweils das Gewicht 0.5 zuweisen; die anderen Mengen ( $\emptyset$ ,  $\{B\}$ ,  $\{C\}$ ,  $\{A, B\}$ ,  $\{A, C\}$ ,  $\{A, B, C\}$ ) erhielten jeweils das Gewicht 0. Das der Menge  $\{B, C\}$  zugewiesene Gewicht kann nicht weiter auf die Elemente  $B$  und  $C$  aufgeteilt werden; es ist lediglich bekannt, dass diese beiden Elemente *zusammen* das Gewicht 0.5 erhalten müssen.

Durch die Möglichkeit, einer *mehrelementigen* Menge  $X$  ein positives Gewicht  $w$  zuzuweisen, ermöglicht die Evidenztheorie explizit die Behandlung von Ungewissheit: Wenn der Informationsstand keine weitere Aufteilung des Gewichtes  $w$  auf die Elemente von  $X$  erlaubt, so liegt bezüglich dieser (Elemente) Ungewissheit vor.

In der Wahrscheinlichkeitstheorie existiert *die* Wahrscheinlichkeit  $\Pr(X)$  einer Menge  $X$ ; sie berechnet sich

<sup>1</sup>In der Wahrscheinlichkeitstheorie bezeichnet man  $\Theta$  zumeist als *Menge der Elementarereignisse* (und verwendet traditionell das Symbol  $\Omega$ ). Dahingegen nennt man  $\Theta$  in der Evidenztheorie den *frame of discernment* (und verwendet hier tatsächlich das Symbol  $\Theta$ ).

als Summe der Elementwahrscheinlichkeiten. In der Evidenztheorie hingegen kann man nicht mehr von *der* Wahrscheinlichkeit einer Menge  $X$  sprechen – sobald Ungewissheit vorliegt, ist diese nicht mehr eindeutig bestimmt. Dafür kann man aber zwei andere Maße berechnen, welche den Kenntnisstand über „die Wahrscheinlichkeit“ der Menge  $X$  charakterisieren:

- Das *Zutrauen* (belief) in die Menge  $X$ ,  $\text{Bel}(X)$ , ist die Summe der Gewichte der Gründe, die **für  $X$  sprechen**.
- Die *Plausibilität* der Menge  $X$ ,  $\text{Pl}(X)$ , ist die Summe der Gewichte der Gründe, die **nicht gegen  $X$  sprechen**.

Man kann  $\text{Bel}(X)$  und  $\text{Pl}(X)$  auch als untere bzw. obere Grenze für „die Wahrscheinlichkeit“ der Menge  $X$  auffassen.

Die intuitive Vorstellung über die Bedeutung der beiden Maße ist sehr hilfreich für die folgenden, etwas formaleren Ausführungen.

### 2.2 MATHEMATISCHE GRUNDLAGEN

Eine Funktion, welche die Wahrscheinlichkeitsmasse auf der Potenzmenge  $2^\Theta$  verteilt, nennt man ein *basic probability assignment* (*bpa*). Formal ist ein bpa eine Funktion  $m : 2^\Theta \rightarrow [0, 1]$  mit  $m(\emptyset) = 0$  und

$$\sum_{X \subseteq \Theta} m(X) = 1.$$

Demgegenüber ist eine Wahrscheinlichkeitszuweisung eine Funktion  $p : \Theta \rightarrow [0, 1]$  mit  $\sum_{x \in \Theta} p(x) = 1$ .

Entscheidend ist die Interpretation: Der Wert  $m(X)$  gehört *genau* zu der Menge  $X$  und kann nicht näher auf die Elemente von  $X$  aufgeteilt werden. Offenbar kann man eine Wahrscheinlichkeitszuweisung als einen *Spezialfall* eines bpa's auffassen; hier werden ausschließlich den einelementigen Teilmengen von  $\Theta$  positive Gewichte zugewiesen.

Jedes bpa  $m$  induziert eine *Belief-* und eine *Plausibilitätsfunktion*

$$\text{Bel}, \text{Pl} : 2^\Theta \rightarrow [0, 1];$$

diese sind definiert durch

$$\text{Bel}(X) := \sum_{Y|Y \subseteq X} m(Y) \quad \text{und} \quad \text{Pl}(X) := \sum_{Y|X \cap Y \neq \emptyset} m(Y).$$

Entsprechend der intuitiven Vorstellung wird bei der Ermittlung des Funktionswertes  $\text{Bel}(X)$  über alle „Gründe“  $Y$  summiert, die für  $X$  sprechen (Teilmengen von  $X$  sind). Oder anders ausgedrückt: der Wert  $\text{Bel}(X)$  ist die Summe aller Gewichte, welche man *mindestens* der Menge  $X$  zuordnen kann. Entsprechendes gilt für  $\text{Pl}(X)$ .

Falls das bpa  $m$  zu einer Wahrscheinlichkeitszuordnung „entartet“ ist (Zuweisung von positiven Gewichten ausschließlich an einelementige Mengen), so gilt  $\text{Bel} = \text{Pl}$  und diese beiden Funktionen verhalten sich wie ein Wahrscheinlichkeitsmaß  $\text{Pr}$ .

Allgemein gilt, dass die Funktionen  $\text{Bel}$  und  $\text{Pl}$  unscharfe Maße sind. Dabei bezeichnet man eine Funktion  $g : 2^\Theta \rightarrow [0, 1]$  als ein *unscharfes Maß*, wenn folgendes gilt

**Randwerte**  $g(\emptyset) = 0$  und  $g(\Theta) = 1$ ,

**Monotonie**  $X \subseteq Y \implies g(X) \leq g(Y)$ .

Angesichts der intuitiven Vorstellung über die Bedeutung der Maßwerte  $\text{Bel}(X)$  und  $\text{Pl}(X)$  sollten diese Eigenschaften nicht überraschen.<sup>2</sup>

Eine besonders einfache Klasse von Belief-Funktionen sind die sogenannten *simple support functions*. Eine solche simple support function  $\text{Bel}_S$  mit Support  $S \subset \Theta$ ,  $S \neq \emptyset$  ist definiert durch ein bpa der folgenden Form:

$$m(X) = \begin{cases} q & \text{falls } X = S \\ 1 - q & \text{falls } X = \Theta \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

Mit Hilfe dieser Funktionen lässt sich *ein* Hinweis auf genau *eine* Menge übersichtlich modellieren. Der Wert  $q \in [0, 1]$  ist dabei je nach dem Vertrauen in den Hinweis auf  $S$  zu wählen; im Falle  $q = 1$  wird der Hinweis als vollkommen gesichert angesehen und im Fall  $q = 0$  wird er schlichtweg ignoriert.

Der entscheidende Vorteil von simple support functions liegt in ihrer Einfachheit; lediglich der Parameter  $q$  muss festgelegt werden. Allerdings interessiert letztlich, nachdem man viele einzelne Hinweise durch simple support functions modelliert hat, natürlich die *Kombination* dieser Einzelhinweise.

Zur Kombination mehrerer bpa's bedient man sich zu meist DEMPSTER's Regel. Als Zwischenschritt führen wir zunächst das *formale Produkt* zweier bpa's

$$m_1, m_2 : 2^\Theta \rightarrow [0, 1]$$

(über demselben Universum  $\Theta$ ) ein. Dieses ist definiert durch  $(m_1 \otimes m_2) : 2^\Theta \rightarrow [0, 1]$  mit

$$(m_1 \otimes m_2)(X) := \sum_{Y, Z | Y \cap Z = X} m_1(Y) m_2(Z).$$

Der Wert  $(m_1 \otimes m_2)(\emptyset)$  ist ein Maß für den *Konflikt* zwischen den bpa's  $m_1$  und  $m_2$ . Da dieser Wert von Null verschieden sein kann, ist  $m_1 \otimes m_2$  im allgemeinen *kein* bpa.

<sup>2</sup>Man kann – und tatsächlich wird das sogar meistens getan – die Evidenztheorie auch „andersrum“ aufbauen: Dann gelangt man, ausgehend von einem Belief-Maß  $\text{Bel}$ , zu dem bpa  $m$ . Dieser Weg „versteckt“ jedoch die Parallelen zur Wahrscheinlichkeitstheorie etwas stärker und ist zudem etwas „unbequemer“.

Die Kombination  $m$  der bpa's  $m_1$  und  $m_2$  ist definiert durch

$$m(X) := \frac{(m_1 \otimes m_2)(X)}{1 - (m_1 \otimes m_2)(\emptyset)}$$

für alle  $X \neq \emptyset$  und zudem  $m(\emptyset) = 0$ .<sup>3</sup> Dies ist im wesentlichen eine „Umnormierung“ von  $(m_1 \otimes m_2)$  derart, dass der Konflikt  $(m_1 \otimes m_2)(\emptyset)$  beseitigt wird.

Die Anwendung von DEMPSTER's Regel kann allerdings in einigen Fällen problematisch sein: Dies ist zum einen der Fall, wenn ein hoher Konflikt zwischen den bpa's  $m_1$  und  $m_2$  vorliegt. Zum anderen wird durch die Anwendung der Regel implizit unterstellt, dass die beteiligten bpa's *unabhängig* sind. Auf derartige Probleme können wir an dieser Stelle jedoch nicht näher eingehen.

### 2.3 EIN BEISPIEL

Das nachfolgende Beispiel entspricht sinngemäß SHAFER's „the burglary of the sweetshop“ (vgl. [11]). Bei einem Bankeinbruch wird einer der Bankangestellten ermordet. Die sofort eintreffende Polizei stellt bei ihren Ermittlungen folgendes fest:

- (1) Der Täter war vermutlich ein *Linkshänder* (denn auf den Kameraaufzeichnungen erkennt man, dass er die Waffe in der linken Hand gehalten hat),
- (2) Die Tat wurde wahrscheinlich von einem *Insider* begangen (denn der Täter scheint die genauen Gegebenheiten der Bank gekannt zu haben).

Wir wollen nun diese beiden Hinweise mit den Mitteln der Evidenztheorie modellieren. Dazu wählen wir als Universum die Menge

$$\Theta = \{LI, LO, RI, RO\},$$

wobei zum Beispiel  $LI$  für „Linkshänder und Insider“ steht. Offenbar lässt sich der erste Hinweis (Täter war Linkshänder) durch eine simple support function  $\text{Bel}_L$  mit support  $\{LI, LO\}$  modellieren; das Vertrauen in diesen Hinweis sei durch  $p$  bezeichnet. Analog bezeichnen wir das Vertrauen in den zweiten Hinweis mit  $q$  und erhalten eine simple support function  $\text{Bel}_I$  mit support  $\{LI, RI\}$ . Die beiden bpa's  $m_L$  und  $m_I$  sehen also wie folgt aus:

$$m_L(X) = \begin{cases} p & \text{falls } X = \{LI, LO\} \\ 1 - p & \text{falls } X = \Theta \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

und

$$m_I(X) = \begin{cases} q & \text{falls } X = \{LI, RI\} \\ 1 - q & \text{falls } X = \Theta \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

<sup>3</sup>Gilt  $(m_1 \otimes m_2)(\emptyset) = 1$ , so ist die Kombination der bpa's  $m_1$  und  $m_2$  undefiniert (da  $m_1$  und  $m_2$  widersprüchlich sind).

Die gesamte vorliegende Information ist nun durch die Kombination der beiden simple support functions gegeben und lässt sich mit Hilfe von DEMPSTER's Regel berechnen:

$$m(X) = \begin{cases} pq & \text{falls } X = \{LI\} \\ (1-p)q & \text{falls } X = \{LI, RI\} \\ p(1-q) & \text{falls } X = \{LI, LO\} \\ (1-p)(1-q) & \text{falls } X = \Theta \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

Wir beenden das Beispiel mit der Angabe einiger ausgewählter Werte der zugehörigen Maße Bel und Pl:

X	Bel(X)	Pl(X)
{LI}	pq	1
{LI, LO}	p	1
{LI, RI}	q	1
{LO}	0	1 - q
{RO}	0	(1 - p)(1 - q)

### 3 DISKUSSION

#### 3.1 HILFT DIE EVIDENZTHEORIE?

Die Evidenztheorie ist sicherlich keine „Wunderwaffe“, mit der man jeglichen Problemen bei der formalen Modellierung nicht-perfekter Informationen begegnen kann. Dennoch verbindet sie zwei wesentliche Kategorien der nicht-perfekten Informationen, nämlich die der *ungenauen* und die der *unsicheren* Informationen. Die Wahrscheinlichkeitstheorie ist ausschließlich geeignet, um unsichere Informationen adäquat zu modellieren. Demgegenüber lässt sich mit der Evidenztheorie das gesamte Spektrum zwischen Ungenauigkeit und Unsicherheit erfassen! Liegt diese Art der Nicht-Perfektheit vor, so ist die Evidenztheorie sicherlich das geeignete Mittel im Sinne einer verlustfreien Modellierung.

Die Evidenztheorie ist – wie auch die Wahrscheinlichkeitstheorie und die Möglichkeitstheorie – eine *quantitative* Methode zur Modellierung nicht-perfekter Informationen. Daher leidet auch die Evidenztheorie an einem gewissen „Standardproblem“ quantitativer Methoden welches sich durch die folgende Frage auf den Punkt bringen lässt:

„Wo kommen (all) die Quantitäten her?“

Im allgemeinen ist das Entscheidungsobjekt *nicht* in der Lage, einer gewissen Menge X die korrekte Quantität  $m(X)$  beliebig genau zuzuweisen; selbst wenn

$$m(X) = 0.312867207$$

in irgendeiner Form „korrekt“ ist, d.h. dem subjektiven Empfinden des Entscheidungsobjektes entspräche, wird es erhebliche Schwierigkeiten bereiten, diesen exakten Wert zu ermitteln. Denn es ist anzunehmen, dass der Entscheider selbst nur eine *vage* Vorstellung bezüglich des

Wertes  $m(X)$  hat; wir werden diesen Punkt an späterer Stelle noch einmal aufgreifen.

Ein weiteres Problem bei der Anwendung der Evidenztheorie ist die im Vergleich zur Wahrscheinlichkeitstheorie katastrophale Komplexität der Algorithmen. In der Wahrscheinlichkeitstheorie ist eine Wahrscheinlichkeitszuweisung auf dem Universum  $\Theta$  durch  $|\Theta|$  Werte charakterisiert; demgegenüber benötigt man für ein bpa i.a.  $2^{|\Theta|}$  Werte. Dieser exponentielle „Blow-Up“ findet (zumindest theoretisch) auch Einzug in die Laufzeit der Algorithmen!

#### 3.2 WAS IST AUS DEM ANSATZ GEWORDEN?

Die Evidenztheorie lässt sich an diversen Stellen als hilfreiches Werkzeug einsetzen. Es verwundert daher nicht, dass sie in vielen „ad hoc-Lösungen“ als Alternative zur Wahrscheinlichkeitstheorie Verwendung findet. In den Konferenzbänden [6] und [7] findet man eine Vielzahl solcher Anwendungen und die Beschreibung der jeweiligen maßgeschneiderten Lösungen.

Einen etwas allgemeineren, auf der Evidenztheorie basierenden Ansatz verfolgen JÜRGEN KOHLAS, ROLF HAENNI und NORBERT LEHMANN in [5]. Deren *probabilistisches Argumentations System* kann verstanden werden als ein *assumption-based truth maintenance system* (kurz ATMS, vgl. [1]), bei dem die *assumptions* mit Wahrscheinlichkeiten versehen werden. Zur Bewertung von Hypothesen findet dann die Evidenztheorie Verwendung; für jede Hypothese  $H$  lassen sich (u.a.) die Maßzahlen  $Bel(H)$  und  $Pl(H)$  berechnen.

Daneben existieren diverse *einzelne* Artikel, welche sich sehr speziellen Aspekten der Evidenztheorie widmen. So haben etwa eine Reihe von Autoren Approximationsalgorithmen vorgeschlagen, welche eine schnelle (aber approximative) Anwendung von DEMPSTER's Regel ermöglichen. Dennoch sind im Bereich der Evidenztheorie noch viele wichtige Fragen offen geblieben. Beispielsweise hat sich noch keine Verallgemeinerung auf nicht-endliche Universen durchsetzen können.

#### 3.3 ... UND WAS KÖNNTE NOCH WERDEN?

In einigen Artikeln (beispielsweise in [8]) wird darauf hingewiesen, dass sich die Evidenztheorie hervorragend zum Einsatz in der Entscheidungstheorie eignet. Dennoch findet man lediglich Andeutungen, es fehlt eine konsequente Verwirklichung dieser „angedachten“ Ideen.

In der klassischen Entscheidungstheorie modelliert man jede der zur Wahl stehenden Alternativen durch eine sogenannte *Lotterie*, was letztlich eine Wahrscheinlichkeitsverteilung ist. Das Entscheidungsproblem besteht dann in der Auswahl der aus Sicht des Entscheiders günstigsten Lotterie.

Dieser Ansatz basiert auf einem zweistufigen Verfahren: In der ersten Stufe werden die zur Auswahl stehenden Alternativen durch Lotterien *modelliert*, in der zweiten

Stufe wird aus diesen Lotterien die subjektiv beste *ausgewählt*.

Ein schwerwiegender Nachteil dieses Ansatzes entsteht durch die Verwendung von Wahrscheinlichkeitsverteilungen: Das Wissen über eine Alternative lässt sich nur soweit formalisieren wie dies durch *eine* Wahrscheinlichkeitsverteilung möglich ist. Wollte man etwa unsere „pathologische Lotterie“ als Alternative beschreiben, so müsste man die Wahrscheinlichkeiten  $p(B)$  und  $p(C)$  (letztlich) willkürlich festsetzen. Bereits in der ersten Stufe – der Modellbildung – kommt es also zu *vermeidbaren(!)* Verlusten.

Hier könnte die Evidenztheorie das geeignete Mittel sein, um diese unnötigen Verluste zu vermeiden. Selbstverständlich müssten dann allerdings auch die Entscheidungsregeln (in der zweiten Stufe) an Evidenz-Lotterien angepasst werden.

Tatsächlich hätte die Einführung von Evidenz-Lotterien aber noch wesentlich weitreichendere Vorteile. Denn mit ihrer Hilfe ließe sich auch das „Quantitätenproblem“ besser bewältigen: gewisse Probleme, die im Bereich der klassischen Wahrscheinlichkeitstheorie auftreten, könnten vermieden werden. Dieser Punkt ist allerdings leider viel zu komplex, um im Rahmen dieser kurzen Abhandlung auch nur annähernd nachvollziehbar diskutiert zu werden.

### 3.4 GESCHICHTE & LITERATUR

Die Geschichte der DEMPSTER-SHAFER Theorie geht zurück auf einige grundlegende Artikel von ARTHUR P. DEMPSTER, wovon vor allem der Artikel [2] aus dem Jahr 1967 hervorzuheben ist.

GLENN SHAFER, ein ehemaliger Schüler DEMPSTER's, hat die Ideen aufgegriffen und massiv weiterentwickelt. Insbesondere hat erst SHAFER eine komplette Theorie – eben die *Evidenztheorie* – aufgebaut und somit den Schritt weg von der Wahrscheinlichkeitstheorie gewagt. Sein Buch [11] ist wohl immer noch die verständlichste und umfassendste Einführung in die Evidenztheorie; leider ist es dennoch ausschließlich auf dem (umständlichen!) „antiquarischen Wege“ erhältlich.

Einige Detailfragen in der Evidenztheorie waren längere Zeit etwas umstritten, nicht zuletzt weil SHAFER selbst zwischen einer wahrscheinlichkeitstheoretischen und einer evidenztheoretischen Betrachtungsweise hin- und hergesprungen ist. Mittlerweile hat sich das von PHILIPPE SMETS formulierte „*Transferable Belief Model*“ gewissermaßen zur „Standardinterpretation“ der Evidenztheorie etabliert (vgl. [13]).

Neben den wenigen allgemeinen Einführungen in die Evidenztheorie (*wenige* ist wahrscheinlich sogar noch übertrieben!) existieren einige Sammelbände, welche sich ausschließlich neueren, die Evidenztheorie betreffenden Ergebnissen widmen. Stellvertretend erwähnen wir an dieser Stelle die beiden Bände [3] und [4].

Zuguterletzt sei noch darauf hingewiesen, dass der Evidenztheorie teilweise auch in Büchern zu allgemeineren Themen Kapitel gewidmet sind, so etwa in dem Buch [10] von JUDEA PEARL.

### LITERATUR

1. **de Kleer, J.:** An assumption-based tms. *Artificial Intelligence* 28 (1986), 127–162.
2. **Dempster, A. P.:** Upper and lower probabilities induced by a multivalued mapping. *Annals of Mathematical Statistics* 38, 2 (1967), 325–339.
3. **Guan, J. W., and Bell, D. A.:** *Evidence Theory and its Applications*, vol. 1. North Holland, Amsterdam, 1991.
4. **Guan, J. W., and Bell, D. A.:** *Evidence Theory and its Applications*, vol. 2. North Holland, Amsterdam, 1992.
5. **Haenni, R., Kohlas, J., and Lehmann, N.:** Probabilistic argumentation systems. Technical Report 99-9 (1999).
6. **Hunter, A., and Parsons, S., Eds.:** *Applications of Uncertainty Formalisms* (Berlin, 1998), Springer-Verlag.
7. **Hunter, A., and Parsons, S., Eds.:** *Symbolic and Quantitative Approaches to Reasoning and Uncertainty* (Berlin, 1999), Springer-Verlag.
8. **Kohlas, J., and Monney, P.-A.:** Theory of evidence. A survey of its mathematical foundations, applications and computational aspects. *ZOR – Mathematical Methods of Operations Research* 39 (1994), 35–68.
9. **Laux, H.:** *Entscheidungstheorie*, fourth ed. Springer-Verlag, Berlin, 1998.
10. **Pearl, J.:** *Probabilistic Reasoning in Expert Systems*. Morgan Kaufmann, San Francisco, CA, 1988.
11. **Shafer, G.:** *A Mathematical Theory of Evidence*. Princeton University Press, Princeton, NJ, 1976.
12. **Smets, P.:** Imperfect information: Imprecision and uncertainty. In *Uncertainty Management in Information Systems* (Boston, 1997), A. Motro and P. Smets, Eds., Kluwer Academic Publishers, pp. 225–254.
13. **Smets, P., and Kennes, R.:** The transferable belief model. *Artificial Intelligence* 66 (1994), 191–234.
14. **Zadeh, L. A.:** Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility. *Fuzzy Sets and Systems* 1 (1978), 3–28.

# Entscheidungsregeln bei variabler mehrfacher Zielsetzung

*Sascha Dierkes*

Dierkes@ls1.cs.uni-dortmund.de

Dieser Beitrag ist nicht schriftlich verfügbar. Wenden sie sich im Bedarfsfall bitte direkt an den Autor.



# Neuro-unscharfe Modellierung kompensatorischer Systeme

*Claudio Moraga*

Tel.: 0231/755 6333

moraga@cs.uni-dortmund.de

## ZUSAMMENFASSUNG

Es wird eine Umgebung für die evolutionäre Modellierung komplexer Systeme diskutiert. Unscharfe *wenn-dann*-Regeln werden aus Verhaltensbeispielen unter Verwendung neuronaler Netze extrahiert. Ein großer Wert auf die Interpretierbarkeit der Regeln wird gelegt.

**STICHWÖRTER:** Regelextraktion, unscharfe kompensatorische Systeme, neuronale Netze

## 1 EINLEITUNG

Unter einem *Modell* wird die Repräsentation relevanter Aspekte des Verhaltens eines Systems verstanden. Ein Modell soll den Menschen helfen, das System besser zu verstehen, und dessen Verhalten vorherzusagen und zu kontrollieren. Liegt die Betonung auf Vorhersage und Kontrolle, so handelt es sich um ein Identifikationsmodell, d.h. ein Modell, welches das Verhalten des Systems wiedergibt, ohne aber eine Erklärung über die Gründe des Verhaltens zu bieten. Liegt die Betonung auf Verstehen, dann ist ggf. ein regelbasiertes Modell die geeignetste Wahl. Im Falle von komplexen Systemen kann die Erzeugung eines analytischen Modells evtl. nicht möglich sein. Aus dem Bereich „Intelligente Systeme“ (engl. *Computational Intelligence*) sind Methoden bekannt, mit deren Hilfe ein Modell anhand von (ausreichenden, repräsentativen) Verhaltensbeispielen „gelernt“ werden kann. In den letzten 15 Jahren verwenden regelbasierte Modelle mehr und mehr den Formalismus der unscharfen Logik (engl. *fuzzy logic*) [32], um die Regeln auszudrücken. Diese Modelle genießen insbesondere bei der unscharfen Regelung und Steuerung eine sehr gute Akzeptanz (vgl. [14], [31], [26], [28], [8]). Ferner kann das „Lernen aus Beispielen“ unter Verwendung von neuronalen Netzen sehr effektiv durchgeführt werden. In diesem Kontext spricht man dann von *neuro-unscharfen Modellierungssystemen* (NUMS).

Hochwahrscheinlich ist das System ANFIS [15], [16] das bestbekannte NUMS, da es nun in Matlab integriert ist und eine sehr gute numerische Genauigkeit erreichen kann. Die von ANFIS erzeugten Regeln sind dadurch charakterisiert, dass die Prämissen mittels

differentierbarer t-Normen konjunktiv verknüpft sind. Der Entwickler soll aber *a priori* entscheiden, wieviele linguistische Terme die linguistischen Variablen besitzen sollen. Im Falle eines komplexen Systems hat der Entwickler meistens diese Information nicht. Das Problem kann mit Hilfe eines Gruppenbildungsverfahrens in der Vorverarbeitung bzw. eines globalen evolutionären Entwurfs [1], [11], [12], [13] des Eingangsteils von ANFIS entschärft werden. Wie oben erwähnt, findet diese Regelstruktur sehr gute Akzeptanz im Bereich der unscharfen Regelung und Steuerung. Es gibt jedoch andere Bereiche, wo eine andere Art von Verknüpfung erforderlich ist. Zum Beispiel sei die folgende Regel gegeben, um Bücher zu kaufen:

*„wenn der Autor berühmt ist und der Preis akzeptabel ist, dann soll das Buch gekauft werden“*

Angenommen, beide Prämissen haben einen Erfüllungsgrad von 0,7 und die gewählte t-Norm ist das Produkt, dann hätte die Konklusion das Gewicht 0,49. Es wird offensichtlich, dass dies keiner (starken) Empfehlung zum Kaufen des Buches entspricht. Falls der Autor einen Berühmtheitsgrad von 0,8 hat und der Preis gerade noch an der Akzeptanzgrenze liegt (0,5), dann würde die Konklusion ein Gewicht von 0,4 bekommen, das eine Ablehnung des Buches suggeriert. Dies ist bestimmt nicht die Art und Weise wie Menschen mit der obigen Regel umgehen würden. Statt der t-Normen sind hier Operatoren kompensatorischen Verhaltens erforderlich. Dafür sind *Aggregationsoperatoren* [7], [22], [23], [30], [34] geeignet. Auch wenn diese Operatoren schon gegen Ende der 70er Jahre eingeführt wurden, haben gerade in den letzten Jahren neue Aufmerksamkeit gewonnen [3], [27].

Abstrakt gesehen beginnt die Regelextraktion aus numerischen Verhaltensdaten mit einer unscharfen Partitionierung des Problemraumes. Dadurch werden unscharfe Blöcke erzeugt, die durch die Erfüllung bestimmter Bedingungen charakterisiert sind und mit einer Konklusion assoziiert werden. Dieses abstrakte Modell findet man beispielsweise auch bei der Mustererkennung. Es scheint also empfehlenswert, auf die Erfahrungen im Bereich der Mustererkennung zu achten, um ggf. eine bessere Regelextraktion erreichen

zu können. Die allgemeine Struktur eines Mustererkennungssystems umfaßt eine Vorverarbeitungsphase und eine Klassifikationsphase. Verschiedene Ziele werden in der Vorverarbeitung verfolgt: u.a. Filtern von Rauschen; statistische Analyse der Daten, um – beispielsweise – Ausreißer erkennen zu können; Extraktion relevanter charakterisierender Merkmale, um die Dimension sowie die Berechnungskomplexität des Erkennungsverfahrens in Grenzen halten zu können; sowie Bewertung alternativer Repräsentationen des Problems. Spektraltechniken (siehe z.B. [17], [21], [24]), und insbesondere Waveletstheorie [5], [6], [18] ermöglichen eine geeignete Umwandlung der Repräsentation eines Problems, um beispielsweise eine Kontrastverstärkung bei den Eingabedaten bzw. eine Merkmalsidentifikation mit verschiedenen Auflösungsgraden zu ermöglichen. Dies kann zur Verbesserung der Klassifikation deutlich beitragen. Für den Klassifikationsteil gibt es mehrere bekannte Methoden. Neuronale Netze haben u.a. gezeigt, dass sie für schwierige Klassifikationsaufgaben sehr gut geeignet sind [9].

Multiresolutionsanalyse suggeriert, dass Wavelets einen allgemeinen Rahmen für die formale Behandlung von Vorverarbeitungsproblemen anbieten. Die Vermutung liegt nahe, dass dies auch im Falle der Regelextraktion aus numerischen Verhaltensdaten gelten kann [25].

Die nachfolgende Umgebung wird für die Extraktion kompakter, interpretierbarer, unscharfer *wenn-dann* Regeln aus Verhaltensbeispielen vorgeschlagen (siehe Abbildung 1):

i) Der Umgebungskern besteht aus einem evolutionären Graph-Grammatik-basierten Synthesystem für neuronale Netze [11], [12]. Damit wird der Zwang nach einer *a priori* Vermutung bzgl. der Architektur eines noch zu entwickelnden neuronalen Netzes vermieden. Weiterhin erlaubt die evolutionäre Synthese eine sehr flexible Auswahl der Güte-Kriterien, die für die Berechnung der Fitnessfunktion zugrunde gelegt werden. Da die Synthese unter überwachtem Lernen durchgeführt wird, wird angenommen (bzw. vorausgesetzt), dass genug Verhaltensbeispiele verfügbar sind. Im Falle von Problemen aus der Realität kann jedoch nicht garantiert werden, dass diese Annahme gelten wird. Deswegen wird die Frage der evolutionären Synthese neuronaler Netze mit dünnbestzten Trainingsmengen besonders untersucht. Mit höchster Priorität werden Netze erzeugt, die eine sehr gute Generalisierung aufweisen aber gleichzeitig die kleinstmögliche Anzahl an Knoten bzw. Kanten benötigen (siehe unten). Die folgenden Aspekte eines neuronalen Netzes können evolutionär optimiert werden: Anzahl der Knoten, Anzahl und Lage der Kanten, Aktivierungsfunktion eines jeden Knotens, ggf. Parameter der Aktivierungsfunktion(en), Gewichte

der Kanten sowie Werteverchiebungsfaktor (*bias*) pro Knoten.

ii) Regelextraktionsschleife. Neue Regelextraktionsalgorithmen [2], [27] werden eingesetzt, um die Aktivität eines jeden Knotens eines neuronalen Netzes (mit sigmoider Aktivierungsfunktion) in eine unscharfe *wenn-dann*-Regel mit kompensatorischer Prämissenverknüpfung zu übersetzen. Jeder Knoten des Netzes führt also zu einer Regel (daher das o.a. Interesse für kleine Netze). Neue Algorithmen für die Regelextraktion müssen entwickelt werden, um Netze, die nicht-monotone, und insbesondere Wavelets-Aktivierungsfunktionen benutzen (siehe beispielsweise [4], [29], [33]), mit einbeziehen zu können. Ferner wird die Interpretierbarkeit der extrahierten Regeln bewertet. Diese Bewertung wird zum evolutionären Entwurfssystem zurückgeführt und bei der Fitnessberechnung berücksichtigt. Dadurch wird der Kern in der Lage sein, nicht nur Netze mit einer sehr guten Generalisierung zu erzeugen (numerische Robustheit), sondern auch Netze, die zu Regeln mit einem hohen Interpretationsgrad führen (Benutzerfreundlichkeit, Einsetzbarkeit). Es wird offensichtlich, dass eine automatische Bewertung der Interpretierbarkeit der Regeln angestrebt werden muß, um dies in das evolutionäre Entwurfssystem integrieren zu können. Dafür ist die Zusammenarbeit mit Wissensingenieuren, Modellierungsexperten, Kommunikationspsychologen sowie potentiellen Benutzern erforderlich. Unscharfe *wenn-dann*-Regeln sind durch ihre Nähe zu den natürlichen Sprachen und zum gesunden Menschenverstand gut bekannt. Daher sind sie geeignete Kandidaten, um die Interpretierbarkeitsanforderungen des Projektes gut zu erfüllen.

iii) In diesem Konzept stellt das neuronale Netz nicht nur ein regelnextrahierendes Mittel dar. Es ist auch ein dedizierter paralleler *Analogrechner*, der prinzipiell eine Echtzeit-Bewertung einer aktiven Regel durchführen kann. Dies ermöglicht das Anschließen einer Visualisierungskomponente, um die unscharfen Regeln in Echtzeit veranschaulichen zu können. Ohne Zweifel wird dies zur Verständlichkeit der Regeln gute Unterstützung leisten. Unabhängig davon sind noch zwei Darstellungsaspekte zu diskutieren. Eine „externe“ Darstellung in einer beschränkten natürlichen Sprache anhand von Schablonen wird zum Zweck der Protokollierung der Regeln erforderlich. Eine „interne“ Repräsentation in Form einer effizienten Datenstruktur soll die Abspeicherung, Bewertung und den Vergleich von Regeln (bzw. Regelbasen) unterstützen. Dafür werden z. Z. unscharfe Entscheidungsdiagramme entwickelt [25].

Der evolutionäre Entwurf interpretierbarer neuronaler Netze wird ein rechenintensives Vorhaben sein, so dass lange Entwurfszeiten zu erwarten sind. Anderer-

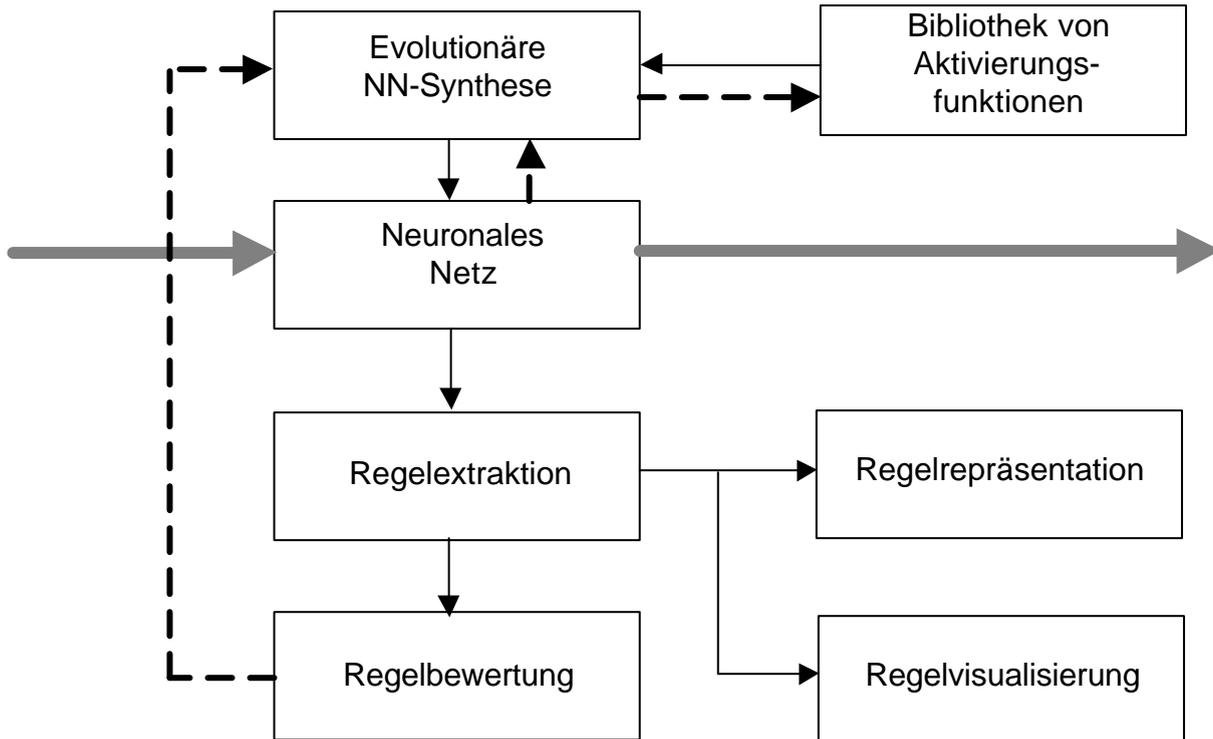


Abbildung 1: Blockdiagramm des evolutionären System zur Extraktion unscharfer Regeln unter Verwendung neuronaler Netze

seits ist das Verfahren zur Parallelisierung gut geeignet, wobei eine Anpassung an die Menge der vorhandenen Prozessoren leicht realisierbar ist. Eine ähnliche Situation ist bei der parallelen Bewertung unscharfer *wenn-dann*-Regeln festgestellt worden [19], [20].

Falls keine Einschränkungen bei der Architektur der neuronalen Netze gemacht werden, werden die entsprechenden Regelbasen möglicherweise verkettete Regeln aufweisen. Falls weiterhin der evolutionäre Entwurf von neuronalen Netzen auch eine knotenweise evolutionäre Bestimmung der Aktivierungsfunktion zuläßt, dann werden die dazugehörigen Regeln ggf. verschiedene unscharfe Verknüpfungen verwenden. Konflikative Ziele machen sich also bemerkbar: die Kompaktheit der Regelbasen einerseits und die Kompliziertheit der Regeln andererseits. Eine gute Methode zur Optimierung unter konfliktiven Zielen ist jedoch bekannt [10] und wird in der vorgeschlagenen Umgebung berücksichtigt.

## 2 LITERATUR

1. **Balakrishnan, K. and Honavar, V.:** Evolutionary Design of Neural Architectures. A preliminary Taxonomy and Guide to Literature. Research Report CS TR #95-01, Dept. Computer Science, University of Iowa, (1995)
2. **Benítez, J.M., Castro, J.L. and Requena, I.:** Are artificial neural networks black boxes? *IEEE Transactions on Neural Networks* **8**, 1156-1163, (1997)
3. **Bouchon-Menier B. (Ed.):** "Aggregation and Fusion of Imperfect Information", Physica Verlag, Heidelberg, (1998)
4. **Chen, Z., Feng, T.J. and Meng, Q.C.:** The application of Wavelet Neural Network in Time Series Prediction and System Modeling based on Multiresolution Learning. *Proc. IEEE Int'l Conf. on Systems, Man and Cybernetics*. IEEE-CS-Press, (1999)
5. **Daubechies, I.:** Orthonormal bases of compactly supported wavelets. *Comm. on Pure and Applied Math.*, **91**, 909-996, (1989)

6. **Daubechies I.**: The wavelet transform, time-frequency localization and signal analysis. *IEEE Trans. Information Theory*, **38**, 961-1005, (1990)
7. **Dombi, J.**: Basic concepts for a theory of evaluation. The aggregative operator. *European Jr. Operation Research* **10**, 282-293, (1981)
8. **Dubois, D., Prade, H. and Yager, R.** (Eds.): *"Fuzzy Sets for Intelligent Systems"*. Morgan Kaufmann, San Mateo, CA, (1993)
9. **Han, J. and Moraga, C.**: Classification with neural networks in the Fourier domain. **1<sup>st</sup>. Prize** of the International Classification Contest organized by the EUFIT'96 Conference, Aachen, (1996)
10. **Felix, R.**: *"Entscheidungen bei qualitativen Zielen"*. Dissertation, Fachbereich Informatik, Universität Dortmund, (1991)
11. **Heider, R.**: *"Evolutionäre Synthese neuronaler Netze unter Verwendung von Graph-Grammatiken"*. Shaker Verlag, Aachen, (1997)
12. **Heider, R. and Moraga C.**: Evolutionary synthesis of neural networks based on graph grammars. *Proc. Int'l Panel Conf. on Soft and Intelligent Computing* 119-126, Tech. Univ. Budapest, Hungary, ISBN 963 420 510 0, (1996)
13. **Heider, R., Moraga, C. and Meyer zu Bexten, E.**: Evolutionary synthesis of neural nets. A critical analysis of the evaluation of nets for the prediction of reduced vessels. In: *"Soft Computing with Industrial Applications"* (F. Pierrot, M. Fathi and M. Jamshidi, Eds.), 307-312, TSI-Press, Albuquerque NM, (1996)
14. **Holmblad, L.P. and Ostergaard, J.J.**: Control of a cement kiln by fuzzy logic. In: *"Fuzzy Information and Decision Processes"* (M.M. Gupta and E. Sánchez. Eds.), 338-399. North-Holland, Amsterdam, (1982)
15. **Jang, J.S.R.**: ANFIS: Adaptive network based fuzzy inference system. *IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics* **23**, (3), 665-685, (1993)
16. **Jang, J.S.R. and Sun, C.T.**: Neuro-fuzzy modeling and control. *Proceedings IEEE* **83**, (3), 378-406, (1995)
17. **Karpovsky, M.G.**: *"Spectral Techniques and Fault Detection"*. Academic Press, NY, (1985)
18. **Mallat, S.G.**: A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation. *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, **7**, 674-693, (1989)
19. **Moraga, C. et al.**: Parallel architectures to compute fuzzy inferences based on the Goedel implication. *Memorias XX Conferencia Latinoamericana de Informática* 681-690. Editorial Limusa S.A. de C.V., Grupo Noriega Editores, Atizapán de Zaragoza, México, (1994)
20. **Moraga, C. et al.**: Parallel Processing of Fuzzy Inferences. *Proc. 24th. Int'l Symposium on Multiple-valued Logic*, 134-140. IEEE-CS-Press, (1994)
21. **Moraga, C. and Salinas, L.**: On Hilbert and Chrestenson Transforms on finite Abelian Groups II. *Scientia 2-A (Mathematical Sciences)*, 87-99, (1988)
22. **Ovchinnikov, S.**: An analytic characterization of some aggregation operators. *Int'l Jr. of Intelligent Systems* **13**, 59-68, (1998)
23. **Silvert, W.**: Symmetric Summation: A Class of Operations on Fuzzy Sets. *IEEE Trans. Systems, Man and Cybernetics*, **9**, (10), 657-660, (1979)
24. **Stankovic, R.S., Stojic, M.R. and Stankovic, M.S.**: *"Recent Developments on Abstract Harmonic Analysis with Applications in Signal Processing"*. IP Nauka, Belgrade, Yugoslavia, (1996)
25. **Strehl, K., Moraga, C., Temme, K.-H. and Stankovic R.S.**: Fuzzy Decision Diagrams for the representation, analysis and optimization of rule bases. Research Report 725, Department of Computer Science, University of Dortmund, (1999)
26. **Takagi, T., Sugeno, M.**: Fuzzy Identification of systems and its application to modelling and control. *IEEE Trans. SMC* **15**, 116.132, (1985)
27. **Temme, K.-H., Heider, R. and Moraga, C.**: Generalized neural networks for fuzzy modeling. *Proceedings Int'l Joint Conference of Estylf-Eusflat*, 469-472, Palma De Mallorca, Spain, (1999)
28. **Terano, T., Asai, K. and Sugeno M.**: *"Fuzzy Systems Theory and Applications"*. Academic Press, N.Y., (1992)
29. **Thuillard, M.**: Fuzzy-Wavelets: Theory and Applications. *Proc. Sixth European Congress on Intelligent Techniques and Soft Computing (EUFIT'98)*, 2-1149, Mainz Verlag, (1998)
30. **Yager, R. and Rybalov A.**: Uninorm aggregation operators. *Fuzzy Sets and Systems* **80**, 111-120, (1996)
31. **Yasunobu, S., Miyamoto, S. and Ihara, H.**: Fuzzy control for an automatic train operation system. *Proc. 4<sup>th</sup> Int'l Conference on Control in Transportation Systems*, 33-39. Baden-Baden, Germany, (1983)
32. **Zadeh, L.A.**: Fuzzy sets. *Information and Control* **8**, 338-353, (1965)
33. **Zhang, Q. and Benveniste, A.**: Wavelet Network, *IEEE Trans. Neural Network*, **3**, 889-894, (1992)
34. **Zimmermann, H.J. and Zysno, P.**: Decision and evaluations by hierarchical aggregation of information. *Fuzzy Sets and Systems* **10**, 243-260, (1983)

# Die Darstellung eines neuronalen Informationsvektorfeldes $\vec{A}(\vec{r}, t)$ als Oszillatorkette. (Die zweite Quantisierung der neuronalen Netze)

Matthias Reuter

Tel: 0231 755 6341

[Reuter@ls1.cs.uni.dortmund.de](mailto:Reuter@ls1.cs.uni.dortmund.de)

## ZUSAMMENFASSUNG

In der vorliegenden Arbeit wird gezeigt, daß es mit Hilfe des mathematischen Fundus der sog. zweiten Quantisierung dynamischer Systeme aus der Quantenmechanik gelingt, neuronale Netze als n-dimensionale Oszillatorketten zu beschreiben.

Als Konsequenz dieses mathematischen Modells ergibt sich, daß die heute verwendeten Modelle der neuronalen Netze dahingehend überdacht werden müssen, daß ihr Klassifikationsverhalten nicht mehr durch ihre sog. Outputneuronen repräsentiert wird, sondern die Gesamtaktivitätsstruktur des jeweiligen neuronalen Netzes das Klassifikationsverhalten repräsentiert.

**STICHWÖRTER:** Quantisierungsverfahren neuronaler Netze, Oszillatorgleichungen, zweite Quantisierung

## 1 EINLEITUNG

Die Beschreibung des Agierens der neuronalen Netze mittels der quantenmechanischen Aktivitätsfunktion  $\Psi_i(\vec{q}, t)$  [1] vermag zwar ein Bild über ein neues mathematisches Modell dieser unscharfen Klassifikatoren zu vermitteln, doch existiert immer noch der „Schönheitsfehler“, daß die Aktivitätsfunktion  $\Psi_i(\vec{q}, t)$  einer komplexen Funktion entspricht und damit nicht direkt observierbar erscheint. Um dieses Manko zu beseitigen, sollen in dieser Arbeit die quantenmechanischen Betrachtungen weiter vorangetrieben werden, indem die so. **zweite Quantisierung** des Modells der neuronalen Netze einführt wird.

Ausgangspunkt dieser Betrachtungen ist, daß die quantenmechanischen Überlegungen es nahe legen, ein neuronales Netz als eine n-dimensionale Oszillatorkette im physikalischem Konfigurations-

raum zu betrachten, wobei n gerade die Anzahl aller Freiheitsgrade der M Neuronen des vorliegenden neuronalen Netzes beschreibt. Das gleichzeitige Agieren dieser Oszillatoren definieren dann ein Vektorpotential  $\vec{A}(\vec{r}, t)$  oder Informationsvektorfeld  $I_m$ , wobei, gemäß des Kontextansatzes: „Träger-Muster-Bedeutung“, der Struktur dieses Informationsfeldes  $I_m$  gerade ein Klassifikationskonzept zugeordnet wird.

Der Zustand des Informationsfeldes  $I_m$  zu einem Zeitpunkt t wird hierbei von der Form der Transformationsmatrix, welche die Struktur des neuronalen Netzes spezifiziert, und der Form des momentanen (Signal-) Eingangsvektors  $\vec{E}_i(t)$ , welcher das neuronale Netz zu einem Klassifikationsakt „nötigt“, geprägt werden.

Dabei erscheint es nur logisch, daß die Einspeisung eines zu klassifizierenden Vektors  $\vec{E}_i(t)$  eine Veränderung der neuronalen Oszillatoren bewirkt, welche im Zusammenwirken eine komplexe Netzaktivitätsfunktion  $\Psi_i(\vec{q}, t)$ , bzw. die Form des observablen reellwertigen Informationsvektorfeldes  $I_m$  mit seinem Vektorpotential  $\vec{A}(\vec{r}, t)$  erzeugen.

Indes muß man an Hand der mathematischen Verfahren der zweiten Quantisierung zeigen, daß man zu einer logischen Beschreibung des Verhaltens der neuronalen Netze in ihrem quantenmechanischen Bild gelangt. Dies soll auf den nächsten Seiten dieser Arbeit geschehen.

## 2 DIE THEORIE DER NEURONALEN OSZILLATORKETTEN

Ausgangspunkt der Überlegungen zur zweiten Quantisierung der neuronalen Netze ist, daß man die momentanen reellwertigen Zustände der verschiedenen Freiheitsgrade des dynamischen

Systems „neuronales Netz“ entweder als Eigenschwingungen der diese Freiheitsgrade repräsentierenden Oszillatoren ansieht oder über die Anzahl von kleinstmöglichen Informationseinheiten, der sog. UR's (der Phononen des neuronalen Netzes), die im Klassifikationsakt aus den einzelnen Neuronen fließen, beschreibt. In beiden Fällen kann man dabei als Initiator des Klassifikationsergebnisses (des Zustandes des jeweiligen Freiheitsgrades des Netzes) ein Klassifikationspotential  $E_p$  des jeweiligen Freiheitsgrades definieren, daß je nach relativer Position des zu klassifizierenden Eingabemusters  $\vec{E}_i(t)$  zu dem das Netz spezifizierenden Repräsentanten  $RP_{\text{Netz}}$  die Oszillationsschwingungsform, bzw. die Anzahl der UR's bestimmt. Gemäß diesem Modell kann man sich daher das Klassifikationspotential als ein gefülltes Behältnis vorstellen, bei dem direkt über dem Repräsentanten  $RP_{\text{Netz}}$  die intensivsten Oszillationen bzw. die meisten Lagen von UR's existieren.

Da gemäß des Materie-Teilchen-Dualismus wir die UR's und die Oszillationen gleichsetzen können, wollen wir im Folgenden, um auf quantenmechanische Betrachtungsweisen zurückgreifen zu können, folgende Annahmen bzgl. der Struktur der UR's voraussetzen:

- Die UR's seien sog. streng neutrale Teilchen (d. h. ihre Antiteilchen seien identisch mit ihnen selbst),
- Die UR's entsprechen ihrer Natur nach den Bosonen, d.h. haben einen ganzzahligen Spin,

Bezüglich der Struktur des Informationsfeldes  $I_{nn}$  wollen wir die folgenden Annahmen machen:

- $\vec{A}(\vec{r},t)$  sei das Vektorpotential eines freien, zweikomponentigen Informationsfeldes des Informationsfeldes  $I_{nn}$
- Die beiden Komponenten des Vektorpotentials  $\vec{A}(\vec{r},t)$ ,  $\vec{E}(\vec{r},t)$  und  $\vec{H}(\vec{r},t)$  stehen in folgender Relation zu  $\vec{A}(\vec{r},t)$ :

$$\vec{E}(\vec{r},t) = -\dot{\vec{A}}(\vec{r},t) + \vec{\nabla}j(\vec{r})$$

$$\vec{H} = \text{rot } \vec{A}(\vec{r},t)$$

wobei  $j(\vec{r})$  einem eventuell vorhandenen skalarem Feld entspricht.

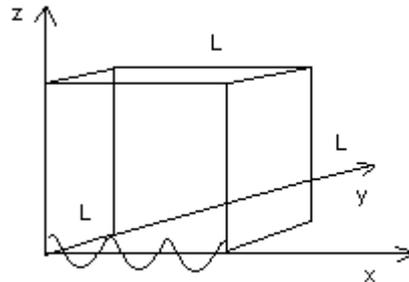
- Für die Zeitabhängigkeit von  $\vec{A}(\vec{r},t)$  und  $j(\vec{r})$  gilt:

$$\nabla^2 \vec{A} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{A}}{\partial t^2} = -\frac{4\pi}{c} \vec{j}$$

$$\nabla^2 j - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 j}{\partial t^2} = -\frac{4\pi}{c} j$$

wobei wir aus Übersichtlichkeitsgründen die Variablen  $\vec{r}$  und  $t$  weggelassen haben und von einem orthogonalen Bezugssystem ausgegangen sind.

Natürlich erinnern uns diese Gleichungen an die elektromagnetischen Felder und so haben wir uns als erstes Gedanken darüber zu machen, warum wir dieses Analogon suchen, bzw. was die beiden Komponenten  $\vec{E}(\vec{r},t)$  und  $\vec{H}(\vec{r},t)$  zu bedeuten haben. Wir eruieren dieses Modell indem wir uns darüber im klaren werden, daß  $\vec{A}(\vec{r},t)$  sicherlich einer Observablen entspricht und  $\vec{E}(\vec{r},t)$  auf der selben Koordinatenachse wie  $\vec{A}(\vec{r},t)$  liegt, während  $\vec{H}(\vec{r},t)$  senkrecht auf  $\vec{E}(\vec{r},t)$  und  $\vec{A}(\vec{r},t)$  steht.



Zur weiteren Modellevaluation wollen wir uns den Lösungsraum aller möglichen  $\vec{A}(\vec{r},t)$ , die den letzten zeitabhängigen Differentialgleichungen genügen anschauen, d. h. uns den Randbedingungen aller  $\vec{A}(\vec{r},t)$  zuwenden. Die Möglichkeit einer Beschreibung der  $\vec{A}(\vec{r},t)$  durch eine Fourieranalyse im Auge habend, fordern wir daher, daß die  $\vec{A}(\vec{r},t)$  einer Periodizität auf den Wänden eines z. B. 3-dreidimensionalen Würfels (der der Dimensionalität unseres Netzes entsprechen soll) genügen soll, wie in der nächsten Abbildung gezeigt.

Desweiteren nehmen wir an, daß in Moment des Klassifikationsaktes das Vektorfeld  $\vec{A}(\vec{r}, t)$  keine Quellen und Senken haben soll, also gilt

$$\text{div } \vec{A}(\vec{r}, t) = 0$$

was durchaus legitim ist, da sich die Anzahl der im Potential  $E_p$  befindlichen UR's durchaus als konstant angesehen werden kann, d.h. wir nur die momentan aktuelle Anzahl der UR's sehen können, woraus folgt, daß das Vektorfeld als Resultat der sich ändernden Potentiale an sich keine Quellen und Senken aufweisen wird.

Aus unserer Würfelbedingung folgt dann

$$\begin{aligned} \vec{A}(L, y, z, t) &= \vec{A}(0, y, z, t) \\ \vec{A}(x, l, z, t) &= \vec{A}(x, 0, z, t) \\ \vec{A}(x, y, L, t) &= \vec{A}(x, y, 0, t) \end{aligned}$$

Separieren wir diese durch den Ansatz

$$\vec{A}(x, y, z, t) = \vec{A}(x, y, z) e^{i\omega t} = N_k \vec{e}_{\vec{k}, s} e^{i\vec{k}\vec{r}} = \vec{A}_{\vec{k}, s}(\vec{r}, t) \quad \text{mit } s = 1, 2$$

wobei die  $N_k$  später noch festzulegenden Normierungskonstanten entsprechen.

Jetzt ist aber unsere Divergenzbedingung nur dann erfüllt, wenn, der Vektor  $\vec{k}$  senkrecht auf der durch die  $\vec{e}_{\vec{k}, s}$  aufgespannten Ebene, in der selbstverständlich auch  $\vec{A}(\vec{r}, t)$ ,  $\vec{H}(\vec{r}, t)$  und  $\vec{E}(\vec{r}, t)$  liegen müssen, steht.

Um den Zusammenhang zwischen den Feldern  $\vec{H}(\vec{r}, t)$  und  $\vec{E}(\vec{r}, t)$  und den beiden sog. Polarisationsvektoren  $\vec{e}_{\vec{k}, s}$  herstellen zu können

$$\vec{A}(\vec{r}, t) = \sum_{\substack{\vec{k} \\ k_r > 0}} \sum_{s=1,2} \left( \vec{a}_{\vec{k}, s}(t) \vec{A}_{\vec{k}, s}(\vec{r}) + \vec{a}_{\vec{k}, s}^*(t) \vec{A}_{\vec{k}, s}^*(\vec{r}) \right) = \sum_{\substack{\vec{k} \\ k_r > 0}} \sum_{s=1,2} N_k \vec{e}_{\vec{k}, s} \left( \vec{a}_{\vec{k}, s}(t) e^{i\vec{k}\vec{r}} + \vec{a}_{\vec{k}, s}^*(t) e^{-i\vec{k}\vec{r}} \right)$$

Durch die Vorgaben der Vektoren  $\vec{a}_{\vec{k}, s}$  ist das Feld in dem betrachteten Volumen dann vollständig bestimmt und man kann diese Größen als diskreten Satz klassischer „Feldvariablen“ ansehen.

Wenn wir dieses Feld nun quantisieren wollen, so müssen diese Variablen dergestalt transformieren, daß die daraus resultierenden Feldgleichungen den kanonischen Gleichungen, sprich den Hamiltongleichungen der klassischen Mechanik, analog sind. Dies erreicht man, in dem man setzt

$$\vec{A}(x, y, z, t) = \vec{A}(x, y, z) e^{i\omega t}$$

so ergibt sich

$$\nabla^2 \vec{A} - \frac{\omega^2}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{A}}{\partial t^2} = 0$$

Um die Divergenzbedingung

$$\text{div } \vec{A}(\vec{r}, t) = \vec{\nabla} \vec{A}(\vec{r}, t) = 0$$

zu erfüllen, müssen wir den Ausdruck  $\frac{\omega^2}{c^2}$  uminterpretieren und tun dies, in dem wir die Größe

$$\vec{k} = \frac{\vec{\omega}}{c}$$

den sog. Wellenvektor  $\vec{k}$  als Quotienten des Kreisfrequenzvektors  $\vec{\omega}$  und des Wellengeschwindigkeitsvektors  $c$  einführen, woraus dann folgt

wollen wir nun o. B. d. A. fordern, daß die  $\vec{e}_{\vec{k}, s}$  ebenfalls senkrecht aufeinanderstehen.

Gemäß unseren Würfelrandbedingungen gilt dann für den Vektor  $\vec{k}$

$$\vec{k} = \frac{2\mathbf{p}}{L} (n_1, n_2, n_3), \quad n_1, n_2, n_3 \in Z$$

was natürlich auch einer Quantisierung unseres Konzeptraumes entspricht.

Für unser Vektorfeld können wir dann die folgende Fourierentwicklung schreiben

$$\begin{aligned} \vec{Q}_{\vec{k}, s} &= \frac{1}{\sqrt{4\mathbf{p}}} (\vec{a}_{\vec{k}, s} + \vec{a}_{\vec{k}, s}^*) \\ \vec{P}_{\vec{k}, s} &= \frac{-i\omega}{\sqrt{4\mathbf{p}}} (\vec{a}_{\vec{k}, s} - \vec{a}_{\vec{k}, s}^*) = \dot{\vec{Q}}_{\vec{k}, s} \end{aligned}$$

wobei diese offenbar reel sind und damit echten Observablen entsprechen, da die komplexen

Zeitfaktoren  $e^{i\mathbf{w}_k t}$  in den Amplituden  $\vec{a}_{\vec{k}s}$  absorbiert sind.

Durch diese Transformation ist aber noch etwas viel „wunderbares“ und in der Literatur bisher fast nicht beachtetes passiert: Die oben angegebenen Vektoren spezifizieren jetzt nämlich gerade den Phasenraumpunkt, welcher die Welle zu den angegebenen Variablen spezifiziert oder etwas

$$\begin{aligned}\vec{A}(\vec{r}, t) &= \sum_{\vec{k}} \sum_{s=1,2} \left( \vec{a}_{\vec{k}s}(t) \vec{A}_{\vec{k}s}(\vec{r}) + \vec{a}_{\vec{k}s}^*(t) \vec{A}_{\vec{k}s}^*(\vec{r}) \right) = \sum_{\vec{k}} \sum_{s=1,1} N_k \vec{e}_{\vec{k}s} \left( \vec{a}_{\vec{k}s}(t) e^{i\vec{k}\vec{r}} + \vec{a}_{\vec{k}s}^*(t) e^{-i\vec{k}\vec{r}} \right) = \\ &= \sum_{\vec{k}} \sum_{s=1,2} N_k \vec{e}_{\vec{k}s} \left( \vec{a}_{\vec{k}s}(t) (\cos(\vec{k}\vec{r}) + i \sin(\vec{k}\vec{r})) + \vec{a}_{\vec{k}s}^*(t) (\cos(\vec{k}\vec{r}) - i \sin(\vec{k}\vec{r})) \right) = \\ &= \sum_{\vec{k}} \sum_{s=1,2} N_k \vec{e}_{\vec{k}s} \left( (\vec{a}_{\vec{k}s}(t) + \vec{a}_{\vec{k}s}^*(t)) \cos(\vec{k}\vec{r}) + i (\vec{a}_{\vec{k}s}(t) - \vec{a}_{\vec{k}s}^*(t)) \sin(\vec{k}\vec{r}) \right) = \\ &= \sum_{\vec{k}} \sum_{s=1,2} N_k \vec{e}_{\vec{k}s} \left( \frac{\sqrt{4\mathbf{p}}}{\sqrt{4\mathbf{p}}} (\vec{a}_{\vec{k}s}(t) + \vec{a}_{\vec{k}s}^*(t)) \cos(\vec{k}\vec{r}) + \frac{i\sqrt{4\mathbf{p}\mathbf{w}}}{\sqrt{4\mathbf{p}\mathbf{w}}} (\vec{a}_{\vec{k}s}(t) - \vec{a}_{\vec{k}s}^*(t)) \sin(\vec{k}\vec{r}) \right) = \\ &= \sum_{\vec{k}} \sum_{s=1,2} N_k \vec{e}_{\vec{k}s} \sqrt{4\mathbf{p}} \left( \vec{Q}_{\vec{k}s}(\cos(\vec{k}\vec{r})) - \frac{1}{\mathbf{w}} \vec{P}_{\vec{k}s}(\sin(\vec{k}\vec{r})) \right)\end{aligned}$$

Zur Bestimmung der Hamiltonfunktion H greifen wir auf die Formel der Energie des elektromagnetischen Feldes zurück, für die gilt

$$H = \frac{1}{8\mathbf{p}} \int d\vec{r} (\vec{E}^2 + \vec{H}^2) = \frac{1}{8\mathbf{p}} \int d\vec{r} \left( \frac{1}{c^2} \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \frac{\partial \vec{A}^*}{\partial t} + (\vec{\nabla}_x \vec{A}) (\vec{\nabla}_x \vec{A}^*) \right)$$

und ersetzen die Ausdrücke  $\vec{H}(\vec{r}, t)$  und  $\vec{E}(\vec{r}, t)$  mit Hilfe des eben evaluierten Ausdrucks für  $\vec{A}(\vec{r}, t)$ . Nach Integration erhält man dann den Ausdruck

$$H = \frac{1}{2} \sum_{\vec{k}} \left( \vec{P}_{\vec{k}}^2 + \mathbf{w}^2 \vec{Q}_{\vec{k}}^2 \right)$$

Wie gesagt, jeder Vektor  $\vec{P}_{\vec{k}}$  und  $\vec{Q}_{\vec{k}}$  steht senkrecht auf dem Wellenzahlvektor  $\vec{k}$ , d.h. jeder Vektor hat zwei unabhängige Komponenten und die Richtung dieser Vektoren bestimmt die Polarisationsrichtung der betreffenden Welle. Bezeichnen wir die Komponenten der Vektoren  $\vec{P}_{\vec{k}}$  und  $\vec{Q}_{\vec{k}}$ , mit  $Q_{\vec{k}s}$  bzw.  $P_{\vec{k}s}$  ( $s = 1, 2$ ), so ergibt sich für die Hamiltonfunktion die Form

$$H = \frac{1}{2} \sum_{\vec{k}, s} \left( \vec{P}_{\vec{k}s}^2 + \mathbf{w}^2 \vec{Q}_{\vec{k}s}^2 \right)$$

woraus folgt, daß die Hamiltonfunktion in eine Summe voneinander unabhängiger Terme zerfällt, wobei jeder Summand eine fortschreitende Welle

bildlicher gesprochen, senkrecht zu jeder Welle steht deren Phasenraumrepräsentation, deren Normalenvektor gerade der Wellenvektor  $\vec{k}$  ist.

Als nächstes rechnen wir die neue Darstellungsform unseres Informationsvektorfeldes  $\vec{A}(\vec{r}, t)$  aus, indem wir die obigen Transformationsgleichungen einsetzen und erhalten dann den realen Ausdruck

mit einem bestimmten Wellenzahlvektor und einer bestimmten Polarisation entspricht und die Gestalt der zugehörigen Hamiltonfunktion gerade einen eindimensionalen Oszillator beschreibt. Das heißt aber, daß wir mit unserem Ansatz das Informationsfeld gerade nach Oszillatoren entwickelt haben.

Wir quantisieren unser Modell jetzt in der schon beschriebenen Art und Weise, indem wir die verallgemeinerten Koordinaten  $\vec{Q}_{\vec{k}}$  und die verallgemeinerten Impulse  $P_{\vec{k}s}$  jetzt in Operatoren, die der Vertauschungsregel

$$\hat{P}_{\vec{k}s} \hat{Q}_{\vec{k}s} - \hat{Q}_{\vec{k}s} \hat{P}_{\vec{k}s} = -i$$

genügen, überführen. Mit diesen Größen werden natürlich auch das Potential  $\vec{A}(\vec{r}, t)$ , die Feldstärken  $\vec{H}(\vec{r}, t)$  und  $\vec{E}(\vec{r}, t)$  und die Hamiltonfunktion H zu Operatoren, wobei die Form der Hamiltonfunktion sich aber, wie man durch nachrechnen leicht zeigen kann, nicht ändern wird. Das heißt für den Hamiltonoperator gilt im quantenmechanischem Bild analog

$$\hat{H} = \frac{1}{2} \sum_{\vec{k}, s} \left( \hat{p}_{\vec{k}s}^2 + \mathbf{w}^2 \hat{Q}_{\vec{k}s}^2 \right)$$

Die Bestimmung des Eigenwertspektrums von  $\hat{H}$  erfordert keine besonderen Rechnungen, da sie auf das bekannte Problem der Energieniveaus linearer Oszillatoren zurückgeführt werden kann, so daß man sofort für die Energieniveaus des Informationsfeldes aufschreiben kann

$$E = \sum_{\vec{k}, s} \left( N_{\vec{k}s} + \frac{1}{2} \right) \mathbf{w}$$

wobei die  $N_{\vec{k}s}$  ganzen Zahlen entsprechen. Dieses Ergebnis legt es nahe, die Matrixelemente für die Operatoren  $\hat{Q}_{\vec{k}s}$  zu untersuchen, um die möglichen

$$\langle N_{\vec{k}s} | \hat{Q}_{\vec{k}s} | N_{\vec{k}s} - 1 \rangle = \langle N_{\vec{k}s} - 1 | \hat{Q}_{\vec{k}s} | N_{\vec{k}s} \rangle = \sqrt{\frac{N_{\vec{k}s}}{2\mathbf{w}}}$$

bzw. wegen  $\hat{P}_{\vec{k}s} = \dot{\hat{Q}}_{\vec{k}s}$  und unserer Betrachtungen der infinitesimalen Drehungen und ihrer Darstellungen als Exponentialfunktionen

$$\langle N_{\vec{k}s} | \hat{P}_{\vec{k}s} | N_{\vec{k}s} - 1 \rangle = \langle N_{\vec{k}s} - 1 | \hat{P}_{\vec{k}s} | N_{\vec{k}s} \rangle = \pm i\mathbf{w} \sqrt{\frac{N_{\vec{k}s}}{2\mathbf{w}}}$$

Diese Formeln erinnern uns natürlich wegen der auftretenden Wurzel irgendwie an einen vektoriellen Zusammenhang, da wir ja einen euklidischen Raum zu Grunde gelegt hatten, weshalb wir, basierend auf unseren Herleitungen zur Beschreibung des Informationsfeldes  $I_{\text{nn}}$ , folgende Operatoren einführen wollen

$$\hat{c}_{\vec{k}s} = \frac{1}{\sqrt{2\mathbf{w}}} \left( \mathbf{w} \hat{Q}_{\vec{k}s} + i \hat{P}_{\vec{k}s} \right)$$

Übergänge von einem Oszillatorzustand zu einem anderen zu eruieren. Dies ist an dieser Stelle eine ganz entscheidende Frage für uns, da das Spektrum dieser Übergänge sicherlich den möglichen Phasenraumfluß unserer verallgemeinerten Koordinaten umreißen wird. (Wir erinnern uns, daß jeder Oszillator in der Ebene der Feldstärken  $\vec{H}(\vec{r}, t)$  und  $\vec{E}(\vec{r}, t)$  und damit auch in der Ebene der entsprechenden Operatoren, ja seinen entsprechenden Phasenraum „mitrüg“.)

Nun gilt für einen harmonischen Oszillator in seinem quantenmechanischem Bild

$$\hat{c}_{\vec{k}s}^* = \frac{1}{\sqrt{2\mathbf{w}}} \left( \mathbf{w} \hat{Q}_{\vec{k}s} - i \hat{P}_{\vec{k}s} \right)$$

Da

$$\frac{1}{\sqrt{2\mathbf{w}}} = \frac{1}{\sqrt{4\mathbf{p}}} \sqrt{\frac{2\mathbf{p}}{\mathbf{w}}}$$

gelangt man zu unseren „alten“ Vektoren  $\vec{P}_{\vec{k}}$  und  $\vec{Q}_{\vec{k}}$  indem man diese einfach mit dem Faktor  $\sqrt{\frac{2\mathbf{p}}{\mathbf{w}}}$  multipliziert, da gilt

$$\begin{aligned} \vec{Q}_{\vec{k}s} &= \frac{1}{\sqrt{4\mathbf{p}}} (\vec{a}_{\vec{k}s} + \vec{a}_{\vec{k}s}^*) = \frac{1}{\sqrt{4\mathbf{p}}} \left( \left( \frac{1}{\sqrt{2\mathbf{w}}} \mathbf{w} \hat{Q}_{\vec{k}s} + \frac{1}{\sqrt{2\mathbf{w}}} i \hat{P}_{\vec{k}s} \right) + \left( \frac{1}{\sqrt{2\mathbf{w}}} \mathbf{w} \hat{Q}_{\vec{k}s} - \frac{1}{\sqrt{2\mathbf{w}}} i \hat{P}_{\vec{k}s} \right) \right) = \\ &= \sqrt{\frac{2\mathbf{p}}{8\mathbf{p}\mathbf{w}^2}} 2\mathbf{w} \hat{Q}_{\vec{k}s} = \sqrt{\frac{1}{4\mathbf{w}^2}} 2\mathbf{w} \hat{Q}_{\vec{k}s} = \vec{Q}_{\vec{k}s} \\ \vec{P}_{\vec{k}s} &= \frac{-i\mathbf{w}}{\sqrt{4\mathbf{p}}} (\vec{a}_{\vec{k}s} - \vec{a}_{\vec{k}s}^*) = \dot{\vec{Q}}_{\vec{k}s} = \frac{-i\mathbf{w}}{\sqrt{4\mathbf{p}}} \left( \left( \frac{1}{\sqrt{2\mathbf{w}}} \mathbf{w} \hat{Q}_{\vec{k}s} + \frac{1}{\sqrt{2\mathbf{w}}} i \hat{P}_{\vec{k}s} \right) - \left( \frac{1}{\sqrt{2\mathbf{w}}} \mathbf{w} \hat{Q}_{\vec{k}s} - \frac{1}{\sqrt{2\mathbf{w}}} i \hat{P}_{\vec{k}s} \right) \right) = \\ &= \sqrt{\frac{2\mathbf{p}}{8\mathbf{p}\mathbf{w}^2}} - 2i\mathbf{w} \hat{P}_{\vec{k}s} = \sqrt{\frac{1}{4\mathbf{w}^2}} 2\mathbf{w} \hat{P}_{\vec{k}s} = \vec{P}_{\vec{k}s} \end{aligned}$$

Mit Hilfe der Matrixelemente der Operatoren  $c_{\vec{k}s}$  und  $c_{\vec{k}s}^*$  ist es dann möglich, die benachbarten Eigenfunktionen einer Eigenfunktion eines

Oszillatorzustandes zu ermitteln, wobei sich die Eigenwerte gemäß der uns schon bekannten Gleichungen

$$\begin{aligned}\langle N_{\vec{k}s}^- | \hat{c}_{\vec{k}s}^* | N_{\vec{k}s}^- - 1 \rangle &= \langle N_{\vec{k}s}^- - 1 | \hat{c}_{\vec{k}s}^- | N_{\vec{k}s}^- \rangle = \sqrt{N_{\vec{k}s}^-} \\ \langle N_{\vec{k}s}^- + 1 | \hat{c}_{\vec{k}s}^* | N_{\vec{k}s}^- \rangle &= \langle N_{\vec{k}s}^- | \hat{c}_{\vec{k}s}^- | N_{\vec{k}s}^- + 1 \rangle = \sqrt{N_{\vec{k}s}^- + 1}\end{aligned}$$

oder etwas anders ausgedrückt

$$\begin{aligned}\hat{c}_{\vec{k}s}^- | N_{\vec{k}s}^- \rangle &= \sqrt{N_{\vec{k}s}^-} | N_{\vec{k}s}^- - 1 \rangle \\ \hat{c}_{\vec{k}s}^* | N_{\vec{k}s}^- \rangle &= \sqrt{N_{\vec{k}s}^- + 1} | N_{\vec{k}s}^- + 1 \rangle\end{aligned}$$

berechnen.

Man könnte nun meinen, daß wir mit der eingeführten Transformation nur unseren Phasenraum anders parametrisiert haben, doch sieht man leicht, daß wir es durch die resultierende Form der Matrixelemente geschafft haben, daß nur Übergänge der Form

$$N_{\vec{k}s}^- \rightarrow N_{\vec{k}s}^- \pm 1$$

existieren. Diese Tatsache ist äußerst wichtig, da so gewährleistet wird, daß keine „Sprünge“ im Flußverhalten unserer systembeschreibenden Trajektorien im Phasenraum auftreten können.

Aus unserem Formalismus folgt nun, daß der Operator  $c_{\vec{k}s}$  quasi ein UR aus dem Klassifikationspotential entfernt (oder die observierbare Lage der UR's um eine Einheit verschiebt) bzw. das (observierte) Vektorpotential  $\vec{A}(\vec{r}, t)$  um eine „Anregungseinheit“ (und zwar gerade um die Kleinstmögliche!) absenkt, weshalb

$$\hat{c}_{\vec{k}s}^- \hat{c}_{\vec{k}s}^* | N_{\vec{k}s}^- \rangle = \sqrt{N_{\vec{k}s}^- + 1} \hat{c}_{\vec{k}s}^- | N_{\vec{k}s}^- + 1 \rangle = N_{\vec{k}s}^- + 1 | N_{\vec{k}s}^- \rangle$$

Dies ist auch der Grund, weshalb für den Kommutator von  $c_{\vec{k}s}$  und  $c_{\vec{k}s}^*$  gilt

$$[\hat{c}_{\vec{k}s}^-, \hat{c}_{\vec{k}s}^*]_- = [\hat{c}_{\vec{k}s}^- \hat{c}_{\vec{k}s}^* - \hat{c}_{\vec{k}s}^* \hat{c}_{\vec{k}s}^-] = 1$$

was gleichbedeutend mit der Tatsache ist, daß wir die beiden Operatoren nicht gleichzeitig messen können.

$$\vec{A}(\vec{r}, t) = \sum_{\vec{k}} \sum_{\substack{s=1,2 \\ k_r > 0}} \left( \vec{a}_{\vec{k}s}^-(t) \vec{A}_{\vec{k}s}^-(\vec{r}) + \vec{a}_{\vec{k}s}^*(t) \vec{A}_{\vec{k}s}^*(\vec{r}) \right) = \sum_{\vec{k}} \sum_{\substack{s=1,2 \\ k_r > 0}} N_{\vec{k}} \vec{e}_{\vec{k}s} \left( \vec{a}_{\vec{k}s}^-(t) e^{i\vec{k}\vec{r}} + \vec{a}_{\vec{k}s}^*(t) e^{-i\vec{k}\vec{r}} \right)$$

man ihn auch als Vernichtungsoperator bezeichnet, während der Operator  $c_{\vec{k}s}^*$  ein UR zu dem Klassifikationspotential hinzufügt bzw. das Vektorpotential  $\vec{A}(\vec{r}, t)$  um eine „Anregungseinheit“ (und zwar gerade um die Kleinstmögliche!) aufstockt, weshalb man ihn auch als Erzeugungsoperator bezeichnet.

Führen wir eine Vernichtung und eine sich unmittelbar anschließende Erzeugung einer Informationseinheit aus, so erhalten wir einen Ausdruck der Form

$$\hat{c}_{\vec{k}s}^* \hat{c}_{\vec{k}s}^- | N_{\vec{k}s}^- \rangle = \sqrt{N_{\vec{k}s}^-} \hat{c}_{\vec{k}s}^* | N_{\vec{k}s}^- - 1 \rangle = N_{\vec{k}s}^- | N_{\vec{k}s}^- \rangle$$

Da diese Operation uns die Anzahl der Oszillator vorhandenen UR's evaluiert, bezeichnet man den Operator

$$\hat{c}_{\vec{k}s}^* \hat{c}_{\vec{k}s}^- = \hat{N}_{\vec{k}s}^-$$

auch als „Nummern-“, oder „Anzahloperator“.

Es ist nun eine Eigenart quantenmechanischer Systeme, daß die Ausführung der Operatoren nicht egal ist, was wir z. B. sehen, wenn wir zuerst ein UR erzeugen und es danach gleich wieder vernichten, da dann gilt

Wie wir nun sahen entsprechen die Operatoren  $c_{\vec{k}s}$  und  $c_{\vec{k}s}^*$  (Wahrscheinlichkeits-) Amplituden für unser Vektorpotential  $\vec{A}(\vec{r}, t)$ , weshalb wir deren Ausdrücke in unsere Ursprungsformel

einsetzen wollen, in dem wir die Vektoren  $\vec{a}_{\vec{k}s}$  und  $\vec{a}^*_{\vec{k}s}$  durch die Operatoren  $\hat{c}_{\vec{k}s}$  und  $\hat{c}^*_{\vec{k}s}$  ersetzen. Dabei setzen wir für den Wellenanteil

$$\vec{A}_{\vec{k}s} = \sqrt{4\mathbf{p}} \frac{\vec{e}_{\vec{k}s}}{\sqrt{2\mathbf{w}}} e^{i\vec{k}\vec{r}}$$

und erhalten dann

$$\begin{aligned} \vec{A}(\vec{r}, t) &= \sum_{\vec{k}} \sum_{s=1,2} \left( \vec{a}_{\vec{k}s}(t) \vec{A}_{\vec{k}s}(\vec{r}) + \vec{a}^*_{\vec{k}s}(t) \vec{A}^*_{\vec{k}s}(\vec{r}) \right) = \frac{\sqrt{4\mathbf{p}}}{\sqrt{2\mathbf{w}}} \vec{e}_s \sum_{\vec{k}} \sum_{s=1,2} \left( \hat{c}_{\vec{k}s}(t) e^{i\vec{k}\vec{r}} + \hat{c}^*_{\vec{k}s}(t) e^{-i\vec{k}\vec{r}} \right) = \\ &= \sum_{\vec{k}} \sum_{s=1,2} \frac{\sqrt{4\mathbf{p}}}{2\mathbf{w}} \vec{e}_s \left( (\mathbf{w}\hat{Q}_{\vec{k}} + iP_{\vec{k}}) \cos(\vec{k}\vec{r}) + i \sin(\vec{k}\vec{r}) \right) + (\mathbf{w}\hat{Q}_{\vec{k}} - iP_{\vec{k}}) \left( \cos(\vec{k}\vec{r}) - i \sin(\vec{k}\vec{r}) \right) = \\ &= \sum_{\vec{k}} \sum_{s=1,2} \frac{\sqrt{4\mathbf{p}}}{2\mathbf{w}} \vec{e}_s \left( \mathbf{w}\hat{Q}_{\vec{k}} \cos(\vec{k}\vec{r}) + \mathbf{w}\hat{Q}_{\vec{k}} i \sin(\vec{k}\vec{r}) + iP_{\vec{k}} \cos(\vec{k}\vec{r}) - P_{\vec{k}} \sin(\vec{k}\vec{r}) + \right. \\ &\quad \left. \mathbf{w}\hat{Q}_{\vec{k}} \cos(\vec{k}\vec{r}) - \mathbf{w}\hat{Q}_{\vec{k}} i \sin(\vec{k}\vec{r}) - iP_{\vec{k}} \cos(\vec{k}\vec{r}) - P_{\vec{k}} \sin(\vec{k}\vec{r}) \right) = \\ &= \sum_{\vec{k}} \sum_{s=1,2} \frac{\sqrt{4\mathbf{p}}}{2\mathbf{w}} \vec{e}_s \left( 2\mathbf{w}(\hat{Q}_{\vec{k}} \cos(\vec{k}\vec{r}) - P_{\vec{k}} \sin(\vec{k}\vec{r})) \right) = \\ &= \sum_{\vec{k}} \sum_{s=1,2} \sqrt{4\mathbf{p}} \vec{e}_s \left( \hat{Q}_{\vec{k}} \cos(\vec{k}\vec{r}) - \frac{1}{\mathbf{w}} P_{\vec{k}} \sin(\vec{k}\vec{r}) \right) \end{aligned}$$

Wie wir sehen, hat sich unsere reelle Form des Vektorpotentials  $\vec{A}(\vec{r}, t)$  durch die Quantisierung nicht geändert und dies ist ein äußerst wichtiges Ergebnis.

$$\vec{H}(\vec{r}, t) = \sum_{\vec{k}, s} (c_{\vec{k}s} \vec{H}_{\vec{k}s} + c^*_{\vec{k}s} \vec{H}^*_{\vec{k}s})$$

mit

$$\vec{E}_{\vec{k}s} = i\mathbf{w}\vec{A}_{\vec{k}s} \quad \vec{H}_{\vec{k}s} = \vec{n}x\vec{E}_{\vec{k}s},$$

Analog erhalten wir für unser Feld  $\vec{E}(\vec{r}, t)$  und  $\vec{H}(\vec{r}, t)$

$$\text{mit: } \vec{n} = \frac{\vec{k}}{\mathbf{w}}$$

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \sum_{\vec{k}, s} (c_{\vec{k}s} \vec{E}_{\vec{k}s} + c^*_{\vec{k}s} \vec{E}^*_{\vec{k}s})$$

Für den Hamiltonoperator erhält man dann

$$\hat{H}(\hat{Q}, \hat{P}) = \frac{1}{2} \sum_{\vec{k}, s} \hbar \mathbf{w}_{\vec{k}} \left( \hat{c}_{\vec{k}s} c^*_{\vec{k}s} + c^*_{\vec{k}s} c_{\vec{k}s} \right) = \frac{1}{2} \sum_{\vec{k}, s} \hbar \mathbf{w}_{\vec{k}} \left[ \hat{c}_{\vec{k}s}, c^*_{\vec{k}s} \right]_+ = \frac{1}{2} \sum_{\vec{k}, s} \hbar \mathbf{w}_{\vec{k}} \left( \hat{c}_{\vec{k}s} c^*_{\vec{k}s} + \frac{1}{2} \right)$$

wobei der Quantisierungsfaktor  $\hbar$  durch die Wahl eines geeigneten Normierungsfaktors aus unseren Würfelnebenbedingungen resultiert.

Also wird für den Zustandsvektor eines Klassifikators gelten

$$|\dots, n_{\vec{k}s}, \dots, n_{\vec{k}'s'}, \dots\rangle = |\dots\rangle \dots |n_{\vec{k}s}\rangle \dots |n_{\vec{k}'s'}\rangle \dots$$

Wie wir sehen, zerfällt der Hamiltonoperator in die einzelnen Summanden über die Normalschwingungen des Informationsfeldes, woraus folgt, daß der Zustandsvektor dieses Feldes (und damit das eigentliche Klassifikationsergebnis) faktorisierbar (separierbar) in Normalmoden sein muß.

ebenso werden natürlich die Operatoren jeweils nur auf die faktorisierten Vektoren wirken, d.h., es wird jeweils gelten

$$\begin{aligned} \hat{c}_{\vec{k}s} |\dots, n_{\vec{k}s}, \dots, n_{\vec{k}'s'}, \dots\rangle &= \sqrt{n_{\vec{k}s}} |\dots\rangle \dots |n_{\vec{k}s} - 1\rangle \dots |n_{\vec{k}'s'}\rangle \dots \\ \hat{c}^*_{\vec{k}s} |\dots, n_{\vec{k}s}, \dots, n_{\vec{k}'s'}, \dots\rangle &= \sqrt{n_{\vec{k}s} + 1} |\dots\rangle \dots |n_{\vec{k}s} + 1\rangle \dots |n_{\vec{k}'s'}\rangle \dots \end{aligned}$$

$$\hat{H} | \dots, n_{\vec{k}s}^-, \dots, n_{\vec{k}'s'}^-, \dots \rangle = \sum_{\vec{k}'s'} \hbar \mathbf{w}_{\vec{k}'} \left( c_{\vec{k}s}^* c_{\vec{k}s} + \frac{1}{2} \right) \dots | n_{\vec{k}s}^- + 1 \rangle \dots | n_{\vec{k}'s'}^- \rangle \dots$$

$$\sum_{\vec{k}'s'} \hbar \mathbf{w}_{\vec{k}'} \left( n_{\vec{k}s}^- + \frac{1}{2} \right) \dots | n_{\vec{k}s}^- + 1 \rangle \dots | n_{\vec{k}'s'}^- \rangle \dots = E | \dots \rangle \dots | n_{\vec{k}s}^- + 1 \rangle \dots | n_{\vec{k}'s'}^- \rangle \dots$$

Für unsere folgenden Überlegungen brauchen wir noch den Impulsoperator des Informationsfeldes, welcher „klassisch“ durch den Ausdruck

$$\vec{p} = \int d^3r \frac{\vec{E} \times \vec{H}}{4\pi c}$$

definiert ist. Setzen wir in diesen Ausdruck die quantisierten Größen für die Felder  $\vec{E}$  und  $\vec{H}$  ein, so erhalten wir den Ausdruck

$$\vec{A}(\vec{r}, t) = \frac{\sqrt{4\mathbf{p}}}{\sqrt{2\mathbf{w}}} \sum_{\vec{k}} \sum_{s=1,2} \vec{e}_s \left( \hat{c}_{\vec{k}s}^-(t) e^{i(\vec{k}\vec{r}-Et)} + \hat{c}_{\vec{k}s}^{*-}(t) e^{-i(\vec{k}\vec{r}-Et)} \right) =$$

$$\frac{\sqrt{4\mathbf{p}}}{\sqrt{2\mathbf{w}}} \sum_{\vec{k}} \sum_{s=1,2} \vec{e}_s \left( \hat{c}_{\vec{k}s}^-(t) e^{i(\vec{k}\vec{r}-(E_i-E_f)t)} + \hat{c}_{\vec{k}s}^{*-}(t) e^{-i(\vec{k}\vec{r}-(E_i-E_f)t)} \right)$$

$$\sum_{\vec{k}} \sum_{s=1,2} \sqrt{4\mathbf{p}} \vec{e}_s \left( \hat{Q}_{\vec{k}} \cos(\vec{k}\vec{r} - (E_i - E_f)t) - \frac{1}{\mathbf{w}} \hat{P}_{\vec{k}} \sin(\vec{k}\vec{r} - (E_i - E_f)t) \right)$$

für einen zeitlichen Übergang vom Energieniveau  $i \rightarrow f$ .

Bevor wir unsere Ergebnisse versuchen graphisch darzustellen, rechnen wir noch die Vektoren  $\vec{E}(\vec{r}, \vec{e}_{\vec{k}s}^-, t)$  und  $\vec{H}(\vec{r}, \vec{e}_{\vec{k}s}^-, t)$  aus und erhalten

$$\vec{E}(\vec{r}, \vec{e}_{\vec{k}s}^-, t) = \frac{\sqrt{4\mathbf{p}}}{\sqrt{2\mathbf{w}}} \sum_{\vec{k}} \sum_{s=1,2} \left( \vec{e}_{\vec{k}s}^- \left( c_{\vec{k}s}^-(t) i\mathbf{w} e^{i(\vec{k}\vec{r}-Et)} + c_{\vec{k}s}^{*-}(t) i\mathbf{w} e^{-i(\vec{k}\vec{r}-Et)} \right) \right) =$$

$$\frac{\sqrt{4\mathbf{p}}}{2\mathbf{w}} \sum_{\vec{k}} \sum_{s=1,2} \left( \vec{e}_{\vec{k}s}^- \left( (\hat{Q}\mathbf{w} + i\hat{P}) i\mathbf{w} \cos(\vec{k}\vec{r} - Et) - \mathbf{w} \sin(\vec{k}\vec{r} - Et) \right) + (\hat{Q}\mathbf{w} - i\hat{P}) \left( -i\mathbf{w} \cos(\vec{k}\vec{r} - Et) - \sin(\vec{k}\vec{r} - Et) \right) \right) =$$

$$\frac{\sqrt{4\mathbf{p}}}{2\mathbf{w}} \sum_{\vec{k}} \sum_{s=1,2} \vec{e}_{\vec{k}s}^- \left( -2\mathbf{w}^2 \hat{Q} \sin(\vec{k}\vec{r} - Et) - 2\mathbf{w} \hat{P} \cos(\vec{k}\vec{r} - Et) \right) =$$

$$- \sqrt{4\mathbf{p}} \sum_{\vec{k}} \sum_{s=1,2} \vec{e}_{\vec{k}s}^- \left( \mathbf{w} \hat{Q} \sin(\vec{k}\vec{r} - Et) + \hat{P} \cos(\vec{k}\vec{r} - Et) \right)$$

bzw.

$$\vec{H}(\vec{r}, \vec{e}_{\vec{k}s}^-, t) = -\sqrt{4\mathbf{p}} \sum_{\vec{k}} \sum_{s=1,2} \vec{e}_{\vec{k}s}^- \left( \left( \mathbf{w} \hat{Q} \sin(\vec{k}\vec{r} - Et) + \hat{P} \cos(\vec{k}\vec{r} - Et) \right) \times \frac{\vec{k}}{\mathbf{w}} \right) =$$

$$- \sqrt{4\mathbf{p}} \sum_{\vec{k}} \sum_{s=1,2} \vec{e}_{\vec{k}s}^- \left( \left( \hat{Q} \sin(\vec{k}\vec{r} - Et) + \frac{1}{\mathbf{w}} \hat{P} \cos(\vec{k}\vec{r} - Et) \right) \times \vec{k} \right)$$

Wie wir aus diesen Formeln ersehen können, tauchen in all unseren Feldvariablen jetzt nur noch

reelle und damit observierbare Größen auf, doch bleibt zu bemerken, daß durch diese „angenehme

Raumreduzierung“ natürlich die Anzahl der Freiheitsgrade des Informationsfeldes gegenüber denen komplexer Felder um die Hälfte reduziert ist.

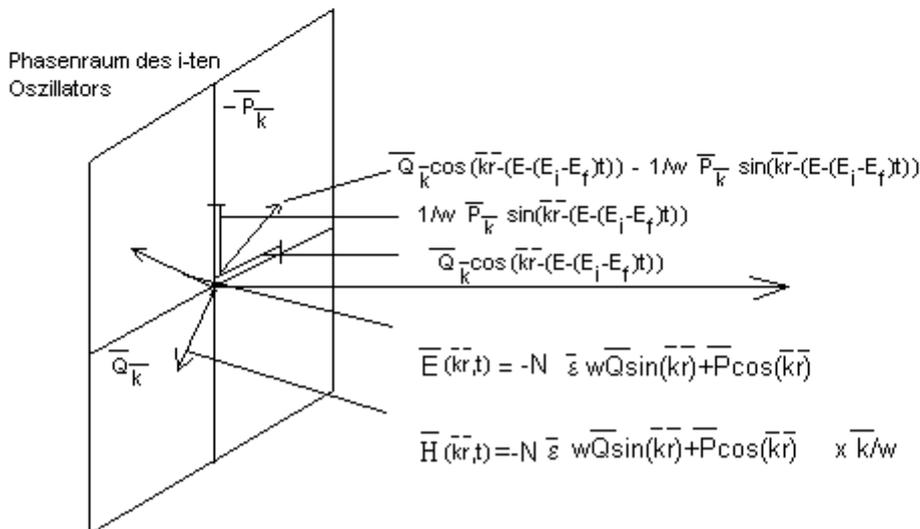
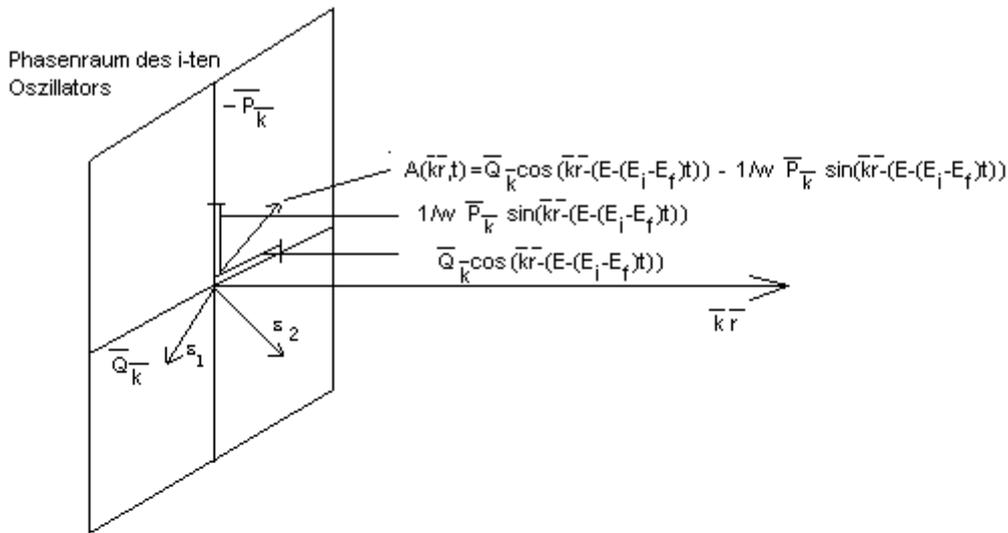
Bemerkung:

Zudem fehlen in unseren bisherigen Betrachtungen natürlich noch die Semidefinitätskonstante  $\hbar$  und die Gesamtenergie  $E_K$ , die aber für unsere Betrachtungen an dieser Stelle erst einmal von untergeordneter Bedeutung sind.

Zudem scheint jetzt klar, daß sowohl die Phasenraumvariablen als auch die Feldgrößen in der selben Ebene, sprich senkrecht zur Ausbreitungsrichtung der Informationswelle, liegen. Daraus folgt, daß es uns gelungen ist, ein die Informationswelle begleitendes und sie vollständig beschreibendes Dreibein zu definieren, dessen Basisfläche durch den Phasenraum aufgespannt wird und dessen Normalenvektor gerade der die Informationswellenausbreitung beschreibende Wellenzahlvektor  $\vec{k}$  (multipliziert mit einem Normierungsfaktor) ist.

Die örtliche und zeitliche Form des die Informationswelle erzeugenden Vektorpotentials  $\vec{A}(\vec{r}, t)$  ist dabei durch die Phasenraumkonfigurationen der die einzelnen Normalmoden erzeugenden Oszillatoren gegeben, weshalb das Vektorpotential  $\vec{A}(\vec{r}, t)$  natürlich auch in der von den Vektoren  $\vec{E}(\vec{r}, \vec{e}_{kS}, t)$  und  $\vec{H}(\vec{r}, \vec{e}_{kS}, t)$  aufgespannten Ebene liegen muß.

In den beiden folgenden Abbildungen sind die eben besprochenen Zusammenhänge noch einmal graphisch verifiziert. Es ist dabei zu beachten, daß jeweils nur eine Komponente, sprich jeweils nur eine Oszillatorkonfiguration visualisiert wurde.



Was vor allem auffällt ist, daß die Feldvektoren  $\vec{E}(\vec{r}, \vec{e}_{\vec{k}S}, t)$  und  $\vec{H}(\vec{r}, \vec{e}_{\vec{k}S}, t)$  im Phasenraum um den Faktor  $\frac{\mathbf{p}}{2}$  relativ zum Vektorpotential  $\vec{A}(\vec{r}, t)$  „gedreht“ erscheinen, was uns automatisch auf die Diskussion führt, welche Bedeutung die beiden Feldvektoren  $\vec{E}(\vec{r}, \vec{e}_{\vec{k}S}, t)$  und  $\vec{H}(\vec{r}, \vec{e}_{\vec{k}S}, t)$  denn nun eigentlich haben. Wir hatten ja eine erste Deutung bereits früher [Reu 1] bei der Diskussion über den Definitionsbereich des Führungsfeldes  $\Psi(\vec{q}, t)$  versucht, wo wir feststellten, daß man eine Phasenverschiebung um den Faktor  $\frac{\mathbf{p}}{2}$  u.a. als die sich negierenden Konzeptwahrscheinlichkeiten auffassen kann, wenn man jeweils die Quadrate der trigonometrischen Ausdrücke betrachtet. Hier liegt aber gerade das heute ungelöste Problem, daß man wieder auf ein nicht observierbares Führungsfeld zurückgreifen muß, daß erst durch seine Quadrierung zu einer Wahrscheinlichkeitsaussage führt.

Ein möglicher Ausweg wird uns andererseits durch unsere Potential- und Oszillatortheorie gegeben, indem wir das Führungsfeld  $\Psi(\vec{q}, t)$  als die Größe betrachten, die die mögliche Ausbreitungsrichtung der Oszillatorkette (bzw. derer Schwerpunkte) beschreibt und der Ausdruck  $|\Psi(\vec{q}, t)|^2$  die Wahrscheinlichkeit dafür angibt, den jeweiligen Oszillator in dem Volumenelement  $\int_{-\infty}^{\infty} dV$  zu finden. Daraus würden sich ergeben, daß eine Klassifikator nicht nur in seinem Klassifikationsverhalten, sondern auch in seiner möglichen Struktur als quantisiert betrachtet werden muß.

Wir wollen aber auch noch einen etwas anderen Ansatz verfolgen und erinnern uns dazu als erstes daran, daß, da für den Wellenvektor als Repräsentant des Energieflusses der Informationswelle galt

$$\vec{k} = \vec{E} \times \vec{B}$$

für den Pointingvektor des Informationsfeldes (in Anlehnung an die Elektrodynamik) gilt

$$\vec{S} = \frac{c}{8\mathbf{p}} \frac{\vec{k}}{|\vec{k}|} = \frac{c}{8\mathbf{p}} \frac{\vec{E} \times \vec{B}}{|\vec{k}|}$$

Nun wird in unserem Informationsfeld aber der Vektor  $\vec{k}$ , so lange wir an dem Informationsfeldzustand nichts ändern, sich ebenfalls nicht

zeitlich ändern und stellt damit eine Konstante der Bewegung dar. Im Gegensatz dazu wird sich aber das Feld  $\vec{E}(t)$  und das Feld  $\vec{H}(t)$  sehr wohl mit der Zeit ändern, wobei diese Änderungen gerade so geartet sind, daß die durch sie aufgespannte Fläche, repräsentiert durch  $\vec{k}$ , konstant bleibt. Wir haben es hier also mit einer Abbildung eines dynamischen Systems (durch die Vektoren  $\vec{E}(t)$  und  $\vec{H}(t)$ ) auf einen statischen (Informations-) Vektor  $\vec{k}$  zu tun.

Um diesen Vorgang noch besser deuten zu können, erinnern wir uns an Hand der Elektrodynamik daran, daß aus unserer Form der Wellenanteile  $\vec{A}_{\vec{k}S}$

$$\vec{A}_{\vec{k}S} = \sqrt{4\mathbf{p}} \frac{\vec{e}_{\vec{k}S}}{\sqrt{2\mathbf{w}}} e^{i\vec{k}\vec{r}}$$

unmittelbar folgt, daß folgende Transformationen gelten

$$\frac{\partial}{\partial t} \rightarrow -i\mathbf{w} \quad \frac{\partial}{\partial t}^* \rightarrow i\mathbf{w}$$

was uns auf die Gleichungen

$$\frac{\partial}{\partial \vec{r}}^* = \vec{\nabla} \rightarrow -i\vec{k} = -i \frac{\mathbf{w}}{c} \vec{n}$$

bzw.

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} = i\vec{k} \times \vec{E} = i \frac{\mathbf{w}}{c} \vec{H} = \vec{k} \times \vec{E} = \frac{\mathbf{w}}{c} \vec{H}$$

führt. Wir sehen also, daß, da diese Gleichungen (bis auf ein Vorzeichen) auch bei der Vertauschung von  $\vec{E}(t)$  und  $\vec{H}(t)$  gelten und da der Vektor  $\vec{k}$

$$\vec{k} \times \vec{A} = \frac{\mathbf{w}}{c} \vec{H}$$

konstant ist, die „Energie“ unserer dynamischen Anteile des Informationsfeldes vom Feld  $\vec{E}(t)$  jeweils in das Feld  $\vec{H}(t)$  übertragen werden.

Wir verlassen jetzt die klassische Elektrodynamik und wenden uns wieder unseren Phasenraumbetrachtungen zu. Gemäß unserem „Negationsmodell“ wollen wir im Folgenden voraussetzen, daß das Feld  $\vec{E}(t)$  aus „UR-“ Informationsträgern und das Feld  $\vec{H}(t)$  aus „UR“-Informationsträgern besteht, wobei die Letzteren gerade die „Anti-Informationseinheiten“ der UR-Teilchen darstellen. Wir können dann für die Informationsladungsdichten schreiben

$$\begin{aligned}\mathbf{r}_{UR} &= \mathbf{r}_{UR} \# \cos(\vec{k}\vec{r} - Et) + \mathbf{r}_{UR} \# \sin(\vec{k}\vec{r} - Et) \\ \mathbf{r}_{UR'} &= -\mathbf{r}_{UR} \# \sin(\vec{k}\vec{r} - Et) + \mathbf{r}_{UR} \# \cos(\vec{k}\vec{r} - Et)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\vec{H}(\vec{r}, \mathbf{e}_{\vec{k}s}, t) &= -\sum_{\substack{\vec{k} \\ \vec{k}_r < 0}} \sum_{s=1,2} \mathbf{e}_{\vec{k}s} \left( \hat{H}' \sin(\vec{k}\vec{r} - Et) + \hat{H}' \cos(\vec{k}\vec{r} - Et) \right) \\ \vec{E}(\vec{r}, \mathbf{e}_{\vec{k}s}, t) &= \sum_{\substack{\vec{k} \\ \vec{k}_r < 0}} \sum_{s=1,2} \mathbf{e}_{\vec{k}s} \left( \hat{E}' \cos(\vec{k}\vec{r} - Et) + \hat{E}' \sin(\vec{k}\vec{r} - Et) \right)\end{aligned}$$

Diese dualen Transformationen lassen die quadratischen Formen  $\vec{E} \times \vec{H}$  invariant und es folgt, daß es weitestgehend eine Frage der Konvention ist, wie man die Ladungsträger UR und UR' den

einzelnen Feldern zuordnet bzw. ob man definiert, daß beide Ladungsträger gleicher Natur sind.

Natürlich erinnern uns diese Gleichungen fatal an unsere Phasenraumbetrachtungen, bei denen ja galt

$$\begin{aligned}\vec{Q}_{\vec{k}s} &= \frac{1}{\sqrt{4\mathbf{p}}} (\vec{a}_{\vec{k}s} + \vec{a}_{\vec{k}s}^*) \\ \vec{P}_{\vec{k}s} &= \frac{-i\mathbf{w}}{\sqrt{4\mathbf{p}}} (\vec{a}_{\vec{k}s} - \vec{a}_{\vec{k}s}^*) = \dot{\vec{Q}}_{\vec{k}s}\end{aligned}$$

und

$$\begin{aligned}\vec{E}(\vec{r}, \mathbf{e}_{\vec{k}s}, t) &= -\sqrt{4\mathbf{p}} \sum_{\substack{\vec{k} \\ \vec{k}_r < 0}} \sum_{s=1,2} \mathbf{e}_{\vec{k}s} \left( \mathbf{w} \hat{Q} \sin(\vec{k}\vec{r} - Et) + \hat{Q} \cos(\vec{k}\vec{r} - Et) \right) \\ \vec{H}(\vec{r}, \mathbf{e}_{\vec{k}s}, t) &= -\sqrt{4\mathbf{p}} \left[ \sum_{\substack{\vec{k} \\ \vec{k}_r < 0}} \sum_{s=1,2} \mathbf{e}_{\vec{k}s} \left( \mathbf{w} \hat{Q} \cos(\vec{k}\vec{r} - Et) + \hat{Q} \sin(\vec{k}\vec{r} - Et) \right) \right] \times \vec{k}\end{aligned}$$

wobei man mit der Einführung des Vierervektors

$$\vec{R} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ t \end{pmatrix} \text{ und der Bedingung } c=1, \text{ aus der ja}$$

resultiert, daß kein Unterschied mehr zwischen der Orts- und Zeitableitung existiert, die Gleichheit beider Ausdrücke sofort sieht.

Das heißt aber, daß das Feld  $\vec{H}(t)$  sich gerade als das „Impulsfeld“ unseres Ortsfeldes  $\vec{E}(t)$  darstellt und das eine zeitliche Änderung des Ortsfeldes immer durch eine Veränderung des Impulsfeldes  $\vec{H}(t)$  gekennzeichnet ist. Dies ist sicherlich sehr unanschaulich, jedoch kann man auch eine andere Interpretation des Orts- und Impulscharakters annehmen, indem man die Vektor-Felder  $\vec{H}(t)$  und  $\vec{E}(t)$  als zwei Kräfte oder Potentiale betrachtet, die, bedingt durch eine gewisse Unschärfe, sich nach dem Prinzip der virtuellen Verrückungen auf einem Gleichgewichtszustand, der durch  $\vec{k}$  beschrieben wird, halten.

Damit ist es uns aber gelungen, das Agieren der neuronalen Netze durch die quantenmechanischen Prinzipien der zweiten Quantisierung zu beschreiben. Aus dieser Beschreibung folgt allerdings unmittelbar, daß sich das Klassifikationsverhalten der neuronalen Netze in der Aktivitätsstruktur der Gesamtstruktur widerspiegeln wird und die momentan gebräuchliche Netzkonstruktionen mit einer speziellen Out-Put-Neuronenschicht eine Simplifizierung der Beschreibung des Agierens der Netze sind.

Ähnlich wie bei der Beschreibung der wet-nets, führen unsere Überlegungen zu einer neuen Struktur der Beschreibung des Agierens der neuronalen Netze, nämlich auf die Trias. „Träger-Muster Bedeutung.“

### 3 Literatur

1. **Reuter, M.:** Die potentialorientierte Beschreibung der neuronalen Netze, Clausthal, 1999
2. **Dawes, R.L.:** Inferential Reasoning Through Soliton Properties of Quantum

Neurodynamics, IEEE International  
Conference on System, Man and Cybernetics,  
Vol. 2 Chicago, II, 1992, ISBN 0-7803-0720-  
8/92

3. **Joos, G.:** Quantenmechanik, Akademische  
Verlagsgesellschaft, Wiesbaden, 1980, ISBN  
3-400-00013-2

4. **Messia, A.:** Quantenmechanik, Walter de  
Gruyter, Berlin, 1976, ISBN 3-11-003686-X

5. **Prigogine, I.:** Vom Sein zum Werden, Piper,  
München, 1977, ISBN 3-492-02488-2

# Eigenschaften asymmetrischer Mutationsoperatoren

*Lars Hildebrand*

Tel: 0231/755 6375

hildebrand@ls1.cs.uni-dortmund.de

## ZUSAMMENFASSUNG

Asymmetrische Mutationsoperatoren sind, in Kombination mit Evolutionsstrategien, in der Lage bei Optimierungsvorgängen einzelne Koordinatenrichtungen zu bevorzugen. Grundlage für die asymmetrischen Mutationsoperatoren sind asymmetrische Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen. Zwei mögliche Realisierungen dieser Dichtefunktionen werden in diesem Beitrag vorgestellt. Für beide Realisierungen werden grundlegende Eigenschaften, wie Verteilungsfunktion, inverse Verteilungsfunktion, Erwartungswert und Varianz hergeleitet.

**STICHWÖRTER:** Evolutionsstrategien, gerichtete Mutation, asymmetrische Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion

## 1 EINLEITUNG

Evolutionsstrategien sind ein Teilbereich der evolutionären Algorithmen. Evolutionäre Algorithmen versuchen die Grundideen der natürlichen Evolution nachzubilden, um Optimierprobleme lösen zu können. Bei diesen Grundideen handelt es sich um Selektion, Mutation und Rekombination. Mutation und Rekombination ermöglichen es, aus einer Menge möglicher Lösungen des Optimierproblems, neue mögliche Lösungen zu erzeugen, die sich von ihren Vorgänger unterscheiden. Die Selektion bewertet die neuen, möglichen Lösungen und erlaubt es einigen ihre Informationen in die nächste Generation zu übertragen. Diese Folge von Neuerzeugen und Aus-sortieren wiederholt sich, bis das Optimierproblem in ausreichender Güte gelöst ist [1,3].

Mutation und Rekombination sind die Operatoren, die neue Lösungen erzeugen. Speziell bei den Evolutionsstrategien hat der Mutationsoperator eine besondere Bedeutung, da Selbstanpassungsmechanismen in der Lage sind, den Mutationsoperator an die Zielfunktion anzupassen. Alle zur Zeit bekannten Mutationsoperatoren basieren auf symmetrischen Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen. Daraus folgt, daß diese Operatoren nicht in der Lage sind einzelne Koordinatenrichtungen zu bevorzugen. Es existiert eine Vielzahl von Problemen, die die Vermutung aufkommen läßt, daß es durchaus sinnvoll ist eine Koordinatenrichtung bevorzugt zu untersuchen. Aus diesen Gründen werden in diesem Beitrag zwei mögliche Realisierungen eines gerichteten, also asymmetrischen,

sebstadaptationsfähigen Mutationsoperators vorgestellt.

## 2 ASYMMETRISCHE WAHRSCHEINLICHKEITSDICHTEFUNKTIONEN

Bereits in [2] wurden die grundlegenden Anforderungen an eine asymmetrische Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion beschrieben. Sie seien an dieser Stelle kurz wiederholt:

1. Modus an der Stelle  $x = 0$

Analog zur Forderung der klassischen Mutationsoperatoren, daß kleine Änderungen häufiger auftreten sollen als große, soll der Modus (häufigster Wert) an der Stelle  $x = 0$  liegen. Da es sich bei dem asymmetrischen Mutationsoperator  $\phi(x;c)$  nicht um eine Mutation auf Basis der Normalverteilung handelt, kann für diese Forderung nicht der Erwartungswert herangezogen werden.

2. symmetrisch für  $c = 0$

Der Verlauf der Funktion  $\phi(x;c)$  soll für  $c = 0$  symmetrisch zur  $y$ -Achse sein. Dies bedeutet, daß die Wahrscheinlichkeit für einen positiven Wert identisch ist mit der Wahrscheinlichkeit, daß ein negativer Wert erzeugt wird. Zusätzlich gilt, daß die Wahrscheinlichkeit für einen **konkreten** Wert  $x$  identisch ist mit der Wahrscheinlichkeit, daß der Wert  $-x$  erzeugt wird.

3. rechtsschief für  $c > 0$

Für Parameter  $c > 0$  soll die Wahrscheinlichkeit für Werte auf der positiven Halbachse ( $x > 0$ ) zunehmen. Das Maß der Steigerung soll proportional mit dem Betrag des Parameters  $c$  steigen.

4. linksschief für  $c < 0$

Analog zu dem o. a. Fall soll die Wahrscheinlichkeit für Werte auf der negativen Halbachse ( $x < 0$ ) zunehmen. Das Maß der Steigerung soll ebenfalls proportional mit dem Betrag des Parameters  $c$  steigen.

Zusätzlich zu diesen Forderungen, die problembezogen aufgestellt sind, gibt es weitere Forderungen, die sich daraus ableiten lassen, daß es sich bei der gesuchten

Funktion  $\phi(x;c)$  um eine Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion handeln muß.

Ausgehend von einer beliebigen Wahrscheinlichkeitsverteilung  $\Phi(x)$  muß gelten:

$$\begin{aligned} \forall x \in \mathfrak{R}: 0 \leq \Phi(x) \leq 1 \\ \lim_{x \rightarrow \infty} \Phi(x) = 1 \\ \lim_{x \rightarrow -\infty} \Phi(x) = 0 \\ \forall x_1 \in \mathfrak{R}, x_2 \in \mathfrak{R}, x_1 < x_2: \Phi(x_1) \leq \Phi(x_2) \end{aligned}$$

Für eine beliebige Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion  $\phi(x;c)$  muß gelten:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \phi(x;c) dx = 1$$

### 2.1 DICHTEFUNKTION $\xi_1(x;\sigma,c)$

Bereits in [2] wurde eine mögliche Realisierung für eine asymmetrische Dichtefunktion hergeleitet:

Eine rechtsschiefe Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion  $\xi_1(x;\sigma,c)$ , deren Asymmetrie sich über einen Parameter  $c \geq 0$  und deren Breite sich durch einen Parameter  $\sigma > 0$  einstellen läßt ist wie folgt definiert:

$$\xi_1(x;\sigma,c) = \begin{cases} \frac{2}{\sqrt{\pi\sigma}(1+\sqrt{1+c})} e^{-\frac{x^2}{\sigma}} & \text{für } x < 0 \\ \frac{2}{\sqrt{\pi\sigma}(1+\sqrt{1+c})} e^{-\frac{x^2}{\sigma(1+c)}} & \text{für } x \geq 0 \end{cases}$$

In der Abbildung 1 ist der Verlauf der Dichtefunktion  $\xi_1(x;\sigma,c)$  graphisch dargestellt.

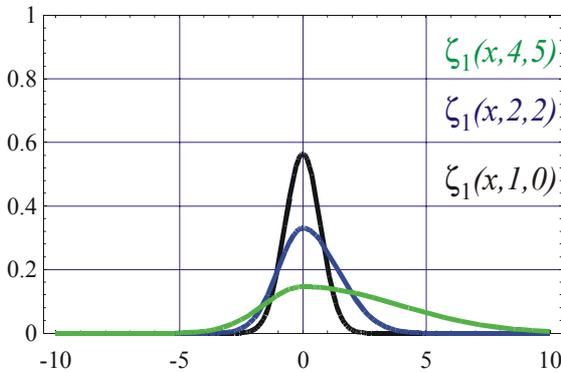


Abbildung 1: Asym. Dichtefunktion  $\xi_1(x;\sigma,c)$

### 2.2 DICHTEFUNKTION $\xi_2(x;\sigma,c)$

Die Dichtefunktion  $\xi_2(x;\sigma,c)$  folgt den gleichen Forderungen, wie die Funktion  $\xi_1(x;\sigma,c)$ . Im Unterschied zu  $\xi_1(x;\sigma,c)$  geht bei der Funktion  $\xi_2(x;\sigma,c)$  der Parameter  $c \geq 0$  jedoch quadratisch in die Funktion ein. Bei dem späteren Vergleich beider Funktionen wird deutlich, daß dies zu einem veränderten Verhalten des zugehörigen Mutationsoperators führt.

$$\xi_2(x;\sigma,c) = \begin{cases} \frac{\sqrt{2}}{\sigma\sqrt{\pi}(2+c)} e^{-\left(\frac{x}{\sigma}\right)^2} & \text{für } x < 0 \\ \frac{\sqrt{2}}{\sigma\sqrt{\pi}(2+c)} e^{-\left(\frac{x}{\sigma(1+c)}\right)^2} & \text{für } x \geq 0 \end{cases}$$

In der Abbildung 2 ist der Verlauf der Dichtefunktion

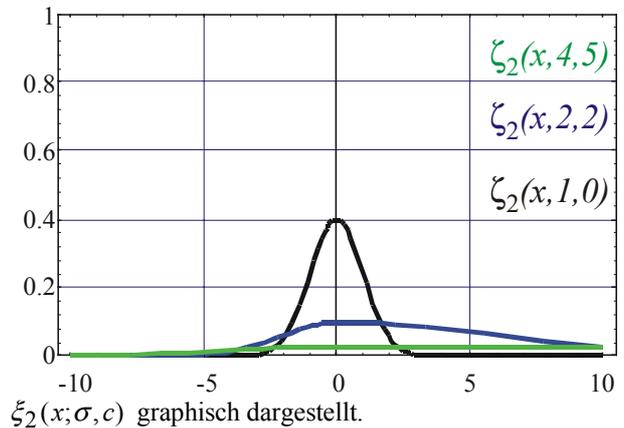


Abbildung 2: Asym. Dichtefunktion  $\xi_2(x;\sigma,c)$

Es läßt sich auch für  $\xi_2(x;\sigma,c)$  zeigen, daß die Fläche unter der Gesamtkurve  $\xi_2(x;\sigma,c)$  für beliebige  $c \geq 0$  tatsächlich 1 ergibt:

$$\begin{aligned} \int_{-\infty}^{\infty} \xi_2(x;c,\sigma) dx &= \int_{-\infty}^0 \xi_2(x;c,\sigma) dx + \int_0^{\infty} \xi_2(x;c,\sigma) dx \\ &= \int_{-\infty}^0 \frac{\sqrt{2}}{\sigma\sqrt{\pi}(2+c)} e^{-\left(\frac{x}{\sigma}\right)^2} dx \\ &\quad + \int_0^{\infty} \frac{\sqrt{2}}{\sigma\sqrt{\pi}(2+c)} e^{-\left(\frac{x}{\sigma(1+c)}\right)^2} dx \\ &= \frac{1}{2+c} + \frac{1+c}{2+c} \\ &= 1 \end{aligned}$$

### 3 EIGENSCHAFTEN DER FUNKTIONEN $\xi_1(x; \sigma, c)$ UND $\xi_2(x; \sigma, c)$

Zu den wichtigen Eigenschaften von Zufallszahlen zählen neben der Dichtefunktion die Verteilungsfunktion, der Erwartungswert und die Varianz. Das verwendete Verfahren zur Erzeugung von Zufallszahlen, die durch eine beliebige Dichtefunktion definiert sind, benötigt zusätzlich die inverse Verteilungsfunktion. Für die Funktion  $\xi_1(x; \sigma, c)$  werden diese Eigenschaften detailliert hergeleitet. Für die Funktion  $\xi_2(x; \sigma, c)$  werden nur die Endresultate angegeben.

#### 3.1 VERTEILUNGSFUNKTION $\Xi_1(x; \sigma, c)$

Für die Verteilungsfunktion  $\Phi_X(x)$  einer Zufallszahl  $X$  bei gegebener Dichtefunktion  $\varphi(t)$  gilt:

$$\Phi(x) = P(X < x) = \int_{-\infty}^x \varphi(t) dt$$

Da die Funktion  $\xi_1(x; \sigma, c)$  abschnittsweise definiert ist, gilt auch für  $\Xi_1(x; \sigma, c)$  eine abschnittsweise Definition:

$$\Xi_1(x; \sigma, c) = \begin{cases} \int_{-\infty}^x \frac{2}{\sqrt{\pi\sigma}(1+\sqrt{1+c})} e^{-\frac{t^2}{\sigma}} dt & \text{für } x < 0 \\ 0 + \int_0^x \frac{2}{\sqrt{\pi\sigma}(1+\sqrt{1+c})} e^{-\frac{t^2}{\sigma(1+c)}} dt & \text{für } x \geq 0 \end{cases}$$

Da

$$\int_{-\infty}^0 \frac{2}{\sqrt{\pi\sigma}(1+\sqrt{1+c})} e^{-\frac{t^2}{\sigma}} dt = \frac{1}{1+\sqrt{1+c}}$$

gilt, und durch Verwendung der Gauß'schen Fehlerfunktion,

$$\text{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt$$

läßt sich der Ausdruck für  $\Xi_1(x; \sigma, c)$  folgendermaßen

vereinfachen:

$$\Xi_1(x; \sigma, c) = \begin{cases} \frac{1 - \text{erf}\left(\frac{-x}{\sqrt{\sigma}}\right)}{1 + \sqrt{1+c}} & \text{für } x < 0 \\ \frac{1 + \left[ \sqrt{1+c} \text{erf}\left(\frac{x}{\sqrt{\sigma(1+c)}}\right) \right]}{1 + \sqrt{1+c}} & \text{für } x \geq 0 \end{cases}$$

#### 3.2 INVERSE VERTEILUNGSFUNKTION $\Xi_1^{-1}(x; \sigma, c)$

Der verwendete Zufallszahlengenerator benötigt die inverse Verteilungsfunktion  $\Phi_X^{-1}(y)$  einer Zufallszahl  $X$  [4]. Der Abschnittswechsel erfolgt bei der inversen Funktion an dem Funktionswert, den die nicht inverse Funktion an der Stelle  $x = 0$  besitzt. Es gilt:

$$\Xi_1(0; \sigma, c) = \frac{1}{1 + \sqrt{1+c}}$$

Für die Verteilungsfunktion  $\Xi_1(x; \sigma, c)$  gilt hier:

$$\Xi_1^{-1}(x; \sigma, c) = \begin{cases} \sqrt{\sigma} \text{erf}^{-1}\left(y\sqrt{1+c} + y - 1\right) & \text{für } y < \frac{1}{1 + \sqrt{1+c}} \\ \sqrt{\sigma(1+c)} \text{erf}^{-1}\left(\frac{y\sqrt{1+c} + y - 1}{\sqrt{1+c}}\right) & \text{für } y \geq \frac{1}{1 + \sqrt{1+c}} \end{cases}$$

wobei  $\text{erf}^{-1}(y)$  die inverse Gauß'sche Fehlerfunktion ist.

#### 3.3 ERWARTUNGSWERT $E_{\Xi_1}$

Der Erwartungswert einer kontinuierlichen Zufallszahl, deren Verteilungsfunktion  $\Phi$  und Dichtefunktion  $\varphi$  gegeben ist, läßt sich bestimmen durch:

$$E_{\Phi} = \int_{-\infty}^{\infty} x \varphi(x) dx$$

Da die hier verwendeten Dichtefunktionen abschnittsweise definiert sind, wird folgende abkürzende Schreibweise für Teilerwartungswerte eingeführt:

$$E_{\Phi} \Big|_a^b = \int_a^b x \varphi(x) dx$$

Mit dieser Definition und der Additivität von Integralen

gilt:

$$E_{\Phi} = E_{\Phi}|_{-\infty}^{\infty} = E_{\Phi}|_{-\infty}^0 + E_{\Phi}|_0^{\infty}.$$

Angewandt auf eine nach  $\Xi_1(x; \sigma, c)$  verteilte Zufallszahl gilt dann:

$$\begin{aligned} E_{\Xi_1} &= E_{\Xi_1}|_{-\infty}^{\infty} = E_{\Xi_1}|_{-\infty}^0 + E_{\Xi_1}|_0^{\infty} \\ &= \int_{-\infty}^0 x \xi_1(x; \sigma, c) dx + \int_0^{\infty} x \xi_1(x; \sigma, c) dx \\ &= \int_{-\infty}^0 x \frac{2}{\sqrt{\pi\sigma(1+\sqrt{1+c})}} e^{-\frac{x^2}{\sigma}} dx \\ &\quad + \int_0^{\infty} x \frac{2}{\sqrt{\pi\sigma(1+\sqrt{1+c})}} e^{-\frac{x^2}{\sigma(1+c)}} dx \\ &= -\frac{\sqrt{\sigma}}{\sqrt{\pi(1+\sqrt{1+c})}} + \frac{(1+c)\sqrt{\sigma}}{\sqrt{\pi(1+\sqrt{1+c})}} \\ &= \frac{c\sqrt{\sigma}}{\sqrt{\pi(1+\sqrt{1+c})}} \end{aligned}$$

### 3.4 VARIANZ $V_{\Xi_1}$

Die Varianz einer kontinuierlichen Zufallszahl, deren Verteilungsfunktion  $\Phi$  und Dichtefunktion  $\varphi$  gegeben ist, lässt sich bestimmen durch:

$$V_{\Phi} = E_{\Phi^2} - E_{\Phi}^2$$

Hierbei gilt:

$$E_{\Phi^2} = \int_{-\infty}^{\infty} x^2 \varphi(x) dx$$

und

$$E_{\Phi}^2 = \left( \int_{-\infty}^{\infty} x \varphi(x) dx \right)^2$$

Angewandt auf die abschnittsweise definierte Verteilungsfunktion  $\Xi_1(x; \sigma, c)$  gilt:

$$\begin{aligned} V_{\Xi_1} &= E_{\Xi_1^2}|_{-\infty}^0 + E_{\Xi_1^2}|_0^{\infty} - \\ &\quad \left[ E_{\Xi_1}^2|_{-\infty}^0 + E_{\Xi_1}^2|_0^{\infty} + 2E_{\Xi_1}|_{-\infty}^0 E_{\Xi_1}|_0^{\infty} \right] \end{aligned}$$

Durch Einsetzen der Definitionen folgt daraus:

$$\begin{aligned} V_{\Xi_1} &= \int_{-\infty}^0 x^2 \xi_1(x; \sigma, c) dx + \int_0^{\infty} x^2 \xi_1(x; \sigma, c) dx - \\ &\quad \left[ \left( \int_{-\infty}^0 x \xi_1(x; \sigma, c) dx \right)^2 + \left( \int_0^{\infty} x \xi_1(x; \sigma, c) dx \right)^2 \right. \\ &\quad \left. + 2 \int_{-\infty}^0 x \xi_1(x; \sigma, c) dx \int_0^{\infty} x \xi_1(x; \sigma, c) dx \right] \\ &= \frac{\sigma}{2(1+\sqrt{1+c})} + \frac{\sigma(1+c)^{3/2}}{2(1+\sqrt{1+c})} - \\ &\quad \left[ \frac{\sigma}{\pi(1+\sqrt{1+c})^2} + \frac{\sigma(1+c)^2}{\pi(1+\sqrt{1+c})^2} - 2 \frac{\sigma(1+c)}{\pi(1+\sqrt{1+c})^2} \right] \\ &= \sigma \frac{(2+c)(\pi-2) - \sqrt{1+c}(\pi-4)}{2\pi} \end{aligned}$$

### 3.5 VERTEILUNGSFUNKTION $\Xi_2(x; \sigma, c)$

Da auch die Funktion  $\xi_2(x; \sigma, c)$  abschnittsweise definiert ist, gilt auch für  $\Xi_2(x; \sigma, c)$  eine abschnittsweise Definition:

$$\Xi_2(x; \sigma, c) = \begin{cases} \frac{1 - \operatorname{erf}\left(\frac{-x}{\sigma\sqrt{2}}\right)}{2+c} & \text{für } x < 0 \\ \frac{1 + \left[ (1+c) \operatorname{erf}\left(\frac{x}{\sigma(1+c)\sqrt{2}}\right) \right]}{2+c} & \text{für } x \geq 0 \end{cases}$$

### 3.6 INVERSE VERTEILUNGSFUNKTION

$$\Xi_2^{-1}(x; \sigma, c)$$

Es gilt:

$$\Xi_2(0; \sigma, c) = \frac{1}{2+c}$$

Für die Verteilungsfunktion  $\Xi_2(x; \sigma, c)$  gilt hier:

$$\Xi_2^{-1}(x; \sigma, c) = \begin{cases} \sigma\sqrt{2} \operatorname{erf}^{-1}(cy + 2y - 1) & \text{für } y < \frac{1}{2+c} \\ \sigma(1+c)\sqrt{2} \operatorname{erf}^{-1}\left(\frac{cy + 2y - 1}{1+c}\right) & \text{für } y \geq \frac{1}{2+c} \end{cases}$$

### 3.7 ERWARTUNGSWERT $E_{\Xi_2}$

Angewandt auf eine nach  $\Xi_2(x; \sigma, c)$  verteilte Zufallszahl gilt:

$$E_{\Xi_2} = c\sigma\sqrt{\frac{2}{\pi}}$$

### 3.8 VARIANZ $V_{\Xi_2}$

Angewandt auf eine nach  $\Xi_2(x; \sigma, c)$  verteilte Zufallszahl gilt:

$$V_{\Xi_2} = \sigma^2 \left( (1 + c + c^2) - \frac{2c^2}{\pi} \right)$$

## 4 ASYMMETRISCHE MUTATIONSOPERATOREN

Nach  $\Xi_1(x; \sigma, c)$  und  $\Xi_2(x; \sigma, c)$  verteilte Zufallszahlen lassen sich nun einsetzen, um die Mutation bei Evolutionsstrategien zu realisieren. Für die Definition der klassischen Mutationsoperatoren sei an dieser Stelle auf [1] und [2] verwiesen. Analog zu den Beispielen die in diesen Beiträgen gegeben werden, soll auch für die asymmetrischen Mutationsoperatoren ein 2-dimensionales Beispiel gegeben werden, das die Ausprägung des Mutationsraums darstellt.

Erfolgt eine Mutation, die auf die Verteilungen  $\Xi_1(x; \sigma, c)$  und  $\Xi_2(x; \sigma, c)$  aufbaut, existieren zwei Möglichkeiten zur Selbstadaptation:

1. Steuerung der Schrittweite

Mit dem Parameter  $\sigma$  läßt sich analog zu den klassischen Mutationsoperatoren die Schrittweite koordinatenrichtungsunabhängig einstellen.

2. Steuerung der Richtung

Durch Einsatz des Parameters  $c$  läßt sich eine Koordinatenrichtung bevorzugen. Für positive  $c$  gilt dann, mit steigendem Wert für  $c$  nimmt der Anteil an positiven, erzeugten Zufallszahlen zu. Dies gilt analog für negative  $c$ , bei denen der Anteil an negativen, erzeugten Zufallszahlen zunimmt.

Die Anteile sind hier durch

$$\Xi_1(0; \sigma, c) = \frac{1}{1 + \sqrt{1 + c}}$$

und

$$\Xi_2(0; \sigma, c) = \frac{1}{2 + c}$$

gegeben. Sie sind bei beiden Verteilungen unabhängig von der gewählten Schrittweite  $\sigma$ .

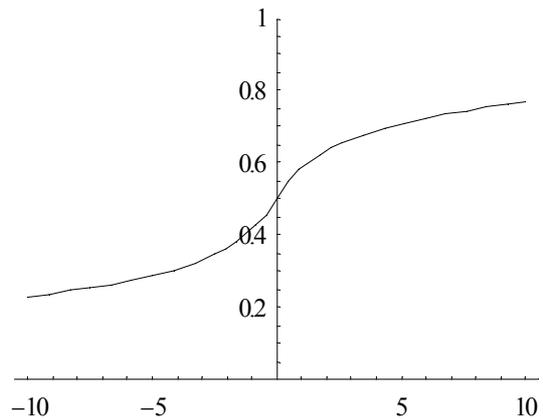


Abbildung 3: Verhältnis von positiven und negativen Zufallszahlen, in Abhängigkeit von  $c$  für  $\Xi_1$

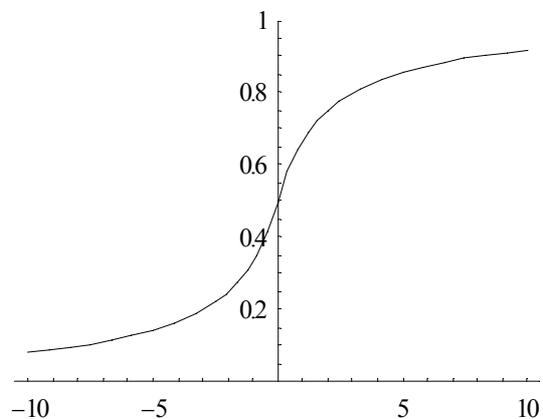


Abbildung 4: Verhältnis von positiven und negativen Zufallszahlen, in Abhängigkeit von  $c$  für  $\Xi_2$

Die Abbildungen 5 und 6 zeigen den Mutationsraum für  $\sigma = 1$  und  $c \in [-10, 10]$ .

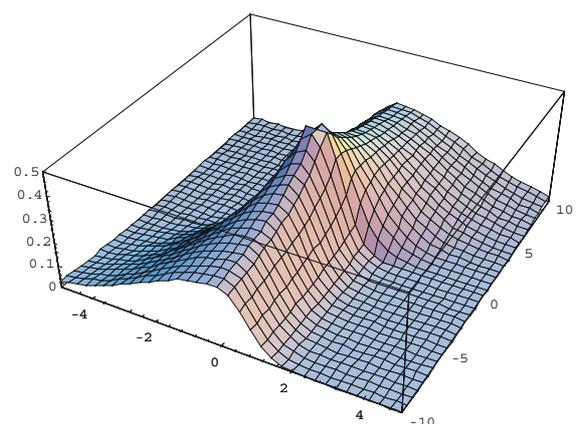


Abbildung 5: Mutationsraum  $\xi_1$

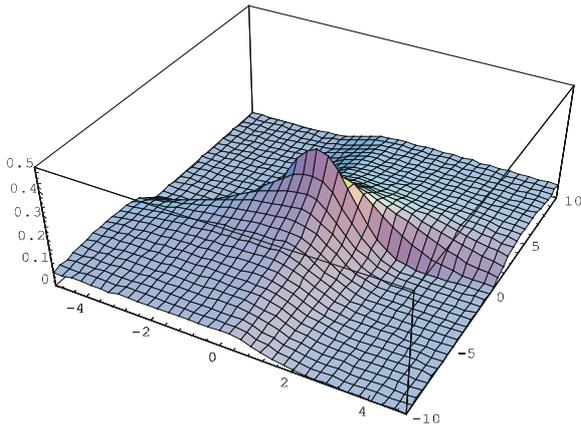


Abbildung 6: Mutationsraum  $\xi_2$

Die Charakteristik von  $\Xi_1$  wird deutlich, betrachtet man ein Konturdiagramm, bei dem Funktionswerte durch Grauschattierungen dargestellt werden (Abbildungen 7 und 8):

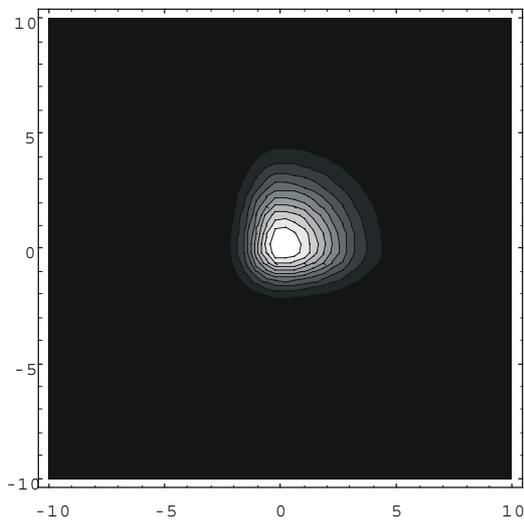


Abbildung 7: Konturdiagramm für  $\xi_1$

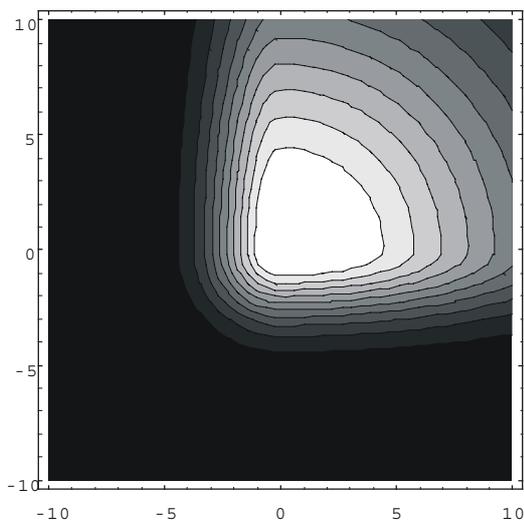


Abbildung 8: Konturdiagramm für  $\xi_2$

Bei beiden Konturdiagrammen ist  $\sigma_{1,2} = 1$  und  $c_{1,2} = 3$  gewählt. Das Konturdiagramm zeigt die Wahrscheinlichkeit, daß ein Nachkomme an der Stelle  $x, y$  erzeugt wird. Es ist deutlich zu erkennen, daß identische Parameter für  $\sigma$  und  $c$  zu unterschiedlichem Verhalten des zugehörigen Mutationsoperators führen. Auf  $\Xi_1(x; \sigma, c)$  aufbauende Mutationsoperatoren haben die Tendenz lokal zu arbeiten, da die Streuung über den gesamten Suchraum gering ist, und ein Großteil der erzeugten Nachkommen sich in der Nähe des Elternteils (Koordinatenursprung) befinden. Die Mutationsoperatoren, die auf  $\Xi_2(x; \sigma, c)$  basieren, streuen stärker und sich damit in der Lage globaler zu suchen. Diese Tendenz muß sich allerdings auch in der Praxis bemerkbar machen, da eine Selbstanpassung des Parameters  $c$  diese Tendenzen aufheben kann. Solche Untersuchungen sind zur Zeit nicht durchgeführt.

## 5 ZUSAMMENFASSUNG

Die in den vorhergehenden Kapiteln aufgezeigten Resultate zeigen, daß es möglich ist asymmetrische Mutationsoperatoren zu realisieren. Die notwendigen asymmetrischen Verteilungsfunktionen lassen sich erzeugen. Gleichzeitig wird deutlich, daß unterschiedliche asymmetrische Verteilungsfunktionen existieren, die sich in ihren Eigenschaften durchaus unterscheiden. Das nächste Ziel ist daher eine Untersuchung, wie sich diese Operatoren auf einzelne Problemklassen auswirken.

## 6 LITERATUR

1. **Hildebrand, Lars:** Schiefe - Ein Ansatz zur Erweiterung von Evolutionsstrategien um gerichtete Mutation. Universität Dortmund, Forschungsbericht Nr. 639, Januar 1997.
2. **Hildebrand, Lars:** Evolutionsstrategien: Ein Vergleich von gerichteter und ungerichteter Mutation. Universität Dortmund, Forschungsbericht Nr. ???, September 1999.
3. **Schwefel, H.-P:** Evolution and Optimum Seeking. John Wiley & Sons, New York, 1994.
4. **Law, Averill M.; Kelton, W. David:** Simulation Modeling & Analysis. McGraw-Hill International Editions, Industrial Engineering Series, New York, 1991.

# Die Struktur eines Constraintgraphen

Michael Bos

Tel: 0231 / 755 6342

Michael.Bos@cs.uni-dortmund.de

## ZUSAMMENFASSUNG

Ausgehend von der speziellen Struktur eines Constraintgraphen im VLSI Layoutentwurf wird eine Verbesserung der Polygonflächenminimierungsheuristik von Ladage und Lodde vorgestellt.

**STICHWÖRTER:** Layoutentwurf, 1-d Kompaktierung, Flächenminimierung, Lineare Programmierung, Graphentheorie, Constraintgraphen

## 1 EINFÜHRUNG

Die Anpassung bestehender Layouts mikroelektronischer Schaltungen an neue Technologieregeln wird als *Kompaktierung* bezeichnet. Ziel ist es, ausgehend von einem vorgegebenen Layout (Polygone in der Ebene) und einer Beschreibung der Zieltechnologie (neue Mindestweiten-/abstände zwischen den Geometrieobjekten) ein neues, schaltungstechnisch äquivalentes Layout zu generieren, welches den neuen Technologieregeln genügt und möglichst wenig Fläche verbraucht, siehe Abbildung 1. Die resultierende höhere Integrationsdichte führt in der Produktion nicht nur zu einer größeren Anzahl Chips pro Waver, sondern auch zu einer höheren Ausbeute.

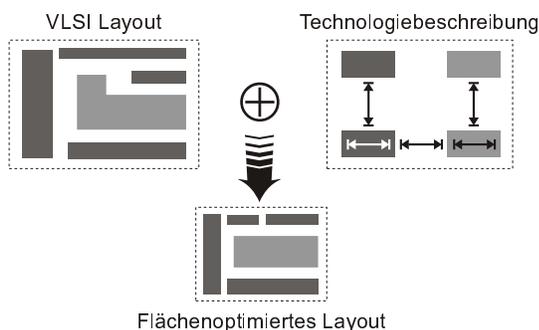


Abbildung 1: Aufgabe der Kompaktierung

Das Kompaktierungsproblem ist NP-hart (siehe etwa [3]). Da in der Praxis zudem riesige Datenmengen verarbeitet werden müssen, wurde das ursprünglich 2 dimensionale Problem in zwei 1 dimensionale Optimierungsschritte aufgeteilt. In jedem Optimierungsschritt dürfen die Layoutobjekte entweder nur horizontal oder nur vertikal verändert/verschoben werden. Im folgenden wird eine Verschiebung in vertikaler Richtung vorausgesetzt.

## 2 CONSTRAINTGRAPH-KOMPAKTIERUNG

Ziel des 1-dimensionalen Kompaktierungsschrittes ist die Minimierung der Zellhöhe ohne Berücksichtigung der Konsequenzen dieser Platzierung auf die noch erreichbare minimale Zellbreite, d.h. die nach zwei orthogonalen 1 dimensional Kompaktierungsschritten erreichte Lösung ist im allgemeinen suboptimal verglichen mit der einer echten 2-d Kompaktierung.

Ein Ansatz zur Lösung des 1-d Kompaktierungsproblems wurde bereits 1984 von Schiele [5] vorgestellt (siehe Abbildung 2):

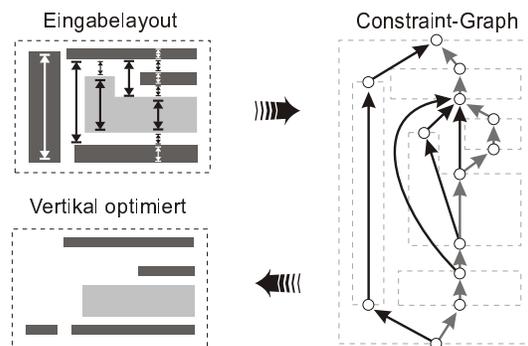


Abbildung 2: 1-d Kompaktierung mit Constraintgraphen

Das Problem der Minimierung der Zellhöhe wird auf die Berechnung eines Längsten Pfades in einem einfachen, gerichteten und kantengewichteten Graphen  $G = (V, E)$  zurückgeführt: Jedem nicht-vertikalen Segment eines Layout-Polygons wird ein Knoten im Graph zugewiesen; müssen zwei Segmente einen Abstand zueinander einhalten (Weitenregel, Abstandsregel), so führt eine gerichtete Graphkante vom Knoten des unteren Segmentes zum Knoten des oberen Segmentes, wobei das Gewicht der Kante den Wert der Abstandsregel repräsentiert. Zusätzlich werden noch zwei Knoten (Quelle und Senke) hinzugefügt, die die imaginäre Unterkante und Oberkante der Bounding-Box des Layouts darstellen. Die unter Berücksichtigung der neuen Technologieregeln minimal mögliche Zellhöhe entspricht dann der Länge des Längsten Weges vom Quellknoten zum Senkenknoten. Dieser Weg wird als *Kritischer Pfad* bezeichnet (hellere Kanten in Abbildung 2 rechts).

Um eine bezüglich der Zieltechnologie gültige Positionierung aller Segmente bestimmen zu können, weist man jedem Knoten  $v_i$  seine *Knotenhöhe*  $h_i$  zu. Die Höhe eines

Knotens entspricht dann der y-Position seines zugehörigen Segmentes im Ziellayout. Der so entstandene Graph wird *Constraint-Graph* genannt. Jeder Kante  $(v_i, v_j) \in E$  mit Gewicht  $c_{i,j}$  entspricht dann eine Ungleichung

$$h_i + c_{i,j} \leq h_j$$

bezüglich der Knotenhöhen. Eine gültige Lösung dieses Ungleichungssystems kann mit dem *Single Source Longest Path Algorithmus*<sup>1</sup> von Dijkstra gefunden werden, der zu jedem Knoten die Länge des Längsten Weges zur Quelle berechnet.

### 3 KREISE

Die Interpretation als Constraintgraph bietet die zusätzliche Möglichkeit, *rückwärtsgerichtete* Kanten einzuführen, d.h. solche, die von einem höhergelegenen Segment zu einem tiefergelegenen Segment zurückführen. Solche Kanten entsprechen *Maximalwertregeln* gemäß folgender Äquivalenz:

$$h_i + c_{i,j} \leq h_j \wedge h_j + c_{j,i} \leq h_i \Leftrightarrow c_{i,j} \leq h_j - h_i \leq -c_{j,i}$$

Ein Constraintgraph ist also kein DAG (Directed Acyclic Graph), sondern ein (allgemeiner) gerichteter Graph mit Quelle und Senke, der auch Kreise enthalten kann. Bezeichnet man mit *Kreissumme* die Summe aller Kantengewichte in einem einfachen Kreis, so lassen sich folgende Aussagen treffen:

- Enthält der Constraintgraph einen Kreis mit positiver Kreissumme, so ist das zugehörige Ungleichungssystem unlösbar. Positive Kreise können mit dem Algorithmus von Danzig/Blattner/Rao gefunden werden, siehe [5].
- Ein Nullkreis (Kreis mit Kreissumme 0) stellt eine *Fixierung* aller am Kreis beteiligten Knoten zueinander dar. Das Problem kann dann reduziert werden, indem alle am Kreis beteiligten Knoten (Variablen) durch einen neuen Knoten (eine Variable, mit jeweils verschiedenen Konstanten als Offset) ersetzt werden.
- Negative Kreise beinhalten *Spielraum* für die Positionierung der am Kreis beteiligten Knoten untereinander.

Das Lösbarkeitskriterium läßt sich einfach verifizieren, indem man alle am Kreis beteiligten Ungleichungen aufaddiert:

<sup>1</sup>Der Originalalgorithmus von Dijkstra löst das *Single Source Shortest Path Problem*. Durch Negierung der Kantengewichte kann auch das *Single Source Longest Path Problem* gelöst werden.

$$(1) \left. \begin{array}{l} h_1 + c_1 \leq h_2 \\ h_2 + c_2 \leq h_3 \\ \vdots \\ h_n + c_n \leq h_1 \end{array} \right\} \text{ lösbar} \Leftrightarrow \sum_{i=1}^n c_i \leq 0$$

Verwandelt man zudem durch die Einführung von Slackvariablen  $s_i \geq 0$  alle Ungleichungen in Gleichungen und addiert wieder auf, so erkennt man die Bedeutung von Nullkreisen:

$$(2) \left. \begin{array}{l} h_1 + c_1 + s_1 = h_2 \\ h_2 + c_2 + s_2 = h_3 \\ \vdots \\ h_n + c_n + s_n = h_1 \end{array} \right\} \text{ lösbar} \\ \Rightarrow \left( \sum_{i=1}^n c_i = 0 \Leftrightarrow \forall i : s_i = 0 \right)$$

Nach dem Entfernen von Overconstraints (Positive Kreise) und der Reduktion von Nullkreisen verbleibt ein Constraintgraph, dessen Kreise sämtlich negativ sind. Durch Kontraposition von (2) erhält man

$$\sum_{i=1}^n c_i < 0 \Leftrightarrow \exists i : s_i > 0$$

d.h. in jedem Kreis ist mindestens eine Ungleichung sogar strikt erfüllt!

### 4 IDENTITÄTSGRAPH

Jeder schlichte Constraintgraph  $G = (V, E, c)$  mit  $V = \{v_1, \dots, v_n\}$ ,  $E \subseteq V \times V$  und Kantengewichtungsfunktion  $c : E \mapsto \mathfrak{R}$ , dessen Kreissummen alle negativ sind, besitzt zu jeder gültigen Lösung  $h : V \mapsto \mathfrak{R}$  seines Ungleichungssystems den folgenden *Identitätsgraphen I* als *kreislosen* Teilgraphen:

$$I = (V, E_I, c|_{E_I}) \\ E_I = \{(v_i, v_j) \in E \mid h_i + c_{i,j} = h_j\}$$

Der Identitätsgraph enthält diejenigen Kanten des Ursprungsgraphen, deren Slackwerte bezüglich der gegebenen Lösung  $h$  verschwinden. Der Identitätsgraph ist regelmässig nicht schwach zusammenhängend!

### 5 FLÄCHENMINIMIERUNG

Die von einem Längsten Pfad Algorithmus berechnete Lösung ist zwar zellhöhenoptimal, für die Positionierung der Knoten ausserhalb des *Kritischen Pfades* besteht aber im Allgemeinen noch Spielraum für weitere Optimierungsziele: Die Minimierung des Gesamtflächenverbrauches aller Polygone! Großflächige Polygone erhöhen

die elektrische Kapazität des zugehörigen Netzes und beschränken somit die maximal mögliche Taktfrequenz. Im Beispiel von Abbildung 3 kann der schwarze Kontakt zusammen mit der hellen Leiterbahn nach oben verschoben werden, ohne die elektrische Funktionalität zu ändern.

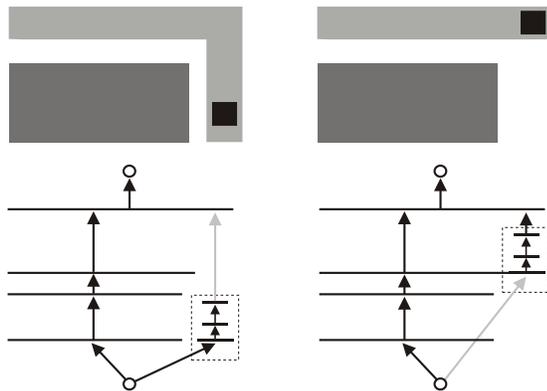


Abbildung 3: Polygonflächenminimierung durch Gruppenverschiebung

In [2] und [1] wurde eine auf Gruppenbildung basierende schnelle Heuristik zur Flächenminimierung einer durch einen Längsten Pfad Algorithmus erzeugten Initiallösung vorgestellt. Sie basiert darauf, daß die initiale Lösung dadurch gekennzeichnet ist, daß jeder Knoten so tief wie möglich plaziert worden ist. Eine Verbesserung kann also nur durch Verschieben von Knoten oder Knotengruppen nach oben erzielt werden.

Für jeden Knoten des Graphen wird folgender Optimierungsschritt ausgeführt: Der Knoten wird als Saatknoten einer Gruppe angesehen. Bringt die Verschiebung der Knotengruppe nach oben eine Verbesserung des Flächenverbrauches, wird sie nach oben geschoben. Wird die Gruppe von einem oberhalb liegenden Knoten aufgehalten, wird dieser Knoten mit in die Gruppe aufgenommen. Das Verfahren bricht ab, sobald die weitere Verschiebung der Gruppe keinen Vorteil mehr bringt und alle Knoten einmal als Saatknoten betrachtet worden sind. Die optimale Lösung wird nicht gefunden, wenn mehrere durch verschiedene Saatknoten erzeugte Gruppen gleichzeitig verschoben werden müssen, um eine weitere Verbesserung zu erzielen.

Zur Bewertung der Flächenänderung bei Verschiebung eines Segments wird jedem Knoten  $v_i$  sein *Knotengewicht*  $g_i$  zugeordnet, welches die Änderung der Fläche des Polygons bei Verschiebung des Segmentes um eine Einheit nach oben angibt. Knoten mit negativem Gewicht sollten also möglichst weit oben, Knoten mit positivem Gewicht möglichst weit unten positioniert werden.

Im folgenden wird gezeigt, wie durch einen (selten notwendigen) Nachverarbeitungsschritt auch solche Gruppen gefunden werden, die keine *Baumstruktur* besitzen (d.h. aus mehr als einem Saatknoten entstanden sind), bei Verschiebung nach oben aber eine Verbesserung des

Flächenverbrauches bringen würden. Solche Gruppen können mit der Originalheuristik nicht gefunden werden.

## 6 DER ALGORITHMUS VON PICARD

Sei  $G = (V, E, c, g)$  ein einfacher gerichteter Constraintgraph mit Kantengewichtungsfunktion  $c : E \mapsto \mathfrak{R}$  und Knotengewichtungsfunktion  $g : V \mapsto \mathfrak{R}$ ,  $h : V \mapsto \mathfrak{R}$  eine gültige Lösung des zugehörigen Ungleichungssystems sowie  $I$  der zugehörige Identitätsgraph.

Sei  $succ : V \mapsto \wp(V)$  mit  $succ(v) := \{w \in V : (v, w) \in E\}$  die Menge der *Nachfolgerknoten* von  $v$ .

### Definition 1 (Maximale Hülle)

$H \subseteq V$  heißt eine Hülle von  $G$ , wenn  $\forall v \in H : succ(v) \subseteq H$  (kurz:  $succ(H) \subseteq H$ ). Für jede Hülle  $H$  von  $G$  ist  $\sum_{v \in H} g(v)$  das Gewicht von  $H$ . Eine Hülle  $H$  heißt Maximale Hülle, wenn  $G$  keine Hülle mit größerem Gewicht besitzt.

In [4] wird ein Verfahren beschrieben, das die Maximale Hülle eines gerichteten und knotengewichteten Graphen  $G$  bestimmt. Wendet man dieses Verfahren auf den kreisfreien Identitätsgraphen  $I$  von  $G$  bezüglich einer Lösung  $h$  an, so entspricht die berechnete Maximale Hülle  $H$  von  $G$  einer Gruppe von Knoten, die um  $\varepsilon > 0$  nach oben verschoben werden kann, ohne eine der Ungleichungen zu verletzen:

$$\begin{aligned} \forall v \in H \subseteq I, w \in succ(v) : \\ s_{v,w} = 0 &\Rightarrow (v, w) \in E_I \Rightarrow w \in H \\ s_{v,w} > 0 &\Rightarrow (v, w) \notin E_I \\ &\Rightarrow \exists \varepsilon > 0 : h(v) + \varepsilon + c_{v,w} \leq h(w) \end{aligned}$$

Die schwachen Zusammenhangskomponenten  $Z_i$  von  $I|_H$  partitionieren  $H$  in Gruppen. Für jede Gruppe  $Z_i$  mit positiver Gruppensumme  $\sum_{v \in Z_i} g(v)$  gilt dann:

- $Z_i$  besitzt einen Freiraum für eine Verschiebung nach oben
- Eine Verschiebung von  $Z_i$  nach oben verringert den Gesamtflächenverbrauch

Dies entspricht den Bedingungen an eine Knotengruppe im Verfahren von Lodde und Ladage. Falls kein solches  $Z_i$  existiert,<sup>2</sup> gibt es keine Gruppe, deren Verschiebung nach oben eine Verbesserung des Flächenverbrauches bringen würde.

Bislang ist nicht bekannt, ob die iterierte Anwendung dieses Schrittes immer zu einer optimalen Lösung führt. Es wäre z.B. denkbar, daß Knotengruppen wieder nach unten verschoben werden müssten, um das globale Optimum zu erreichen. Weitere Untersuchungen hierzu stehen noch aus.

<sup>2</sup>Wenn mindestens ein  $Z_i$  eine positive Gruppensumme besitzt, sind alle Gruppensummen positiv, da man ohne Verletzung der Hülleneigenschaft eine Gruppe mit negativer Gruppensumme weglassen könnte und eine Hülle mit größerem Gewicht bekommen würde.

## LITERATUR

1. LADAGE, L.: *Kompaktierung heterogener Maskenlayouts mit komplexen Restriktionen*. Doktorarbeit, Universität Dortmund, Lehrstuhl Informatik 1, Dortmund, Germany, 1995.
2. LADAGE, L. und G. LODDE: *Kompaktierung von 45 Grad Strukturen mittels Flächenminimierung*. Forschungsbericht 459, Universität Dortmund, Lehrstuhl Informatik 1, 1993.
3. LENGAUER, T.: *Combinatorial algorithms for integrated circuit layout*. Teubner, 1990.
4. PICARD, J.-C.: *Maximal closure of a graph and applications to combinatorial problems*. Management Sciences, 22:1268–1272, 1976.
5. SCHIELE, W.: *Entwurfsregelanpassung der Maskengeometrie integrierter Schaltungen*. VDI Verlag, 1984.

# Effiziente boolsche Maskenoperationen mit Hilfe des Multiscans

Thomas Dilling

Tel: 0231 / 755 6345

Thomas.Dilling@cs.uni-dortmund.de

## ZUSAMMENFASSUNG

Boolsche Maskenoperationen werden benutzt, um zum Beispiel den Durchschnitt, die Vereinigung oder die Differenz von Punktmengen zu bestimmen. In diesem Artikel werden Algorithmen zur Berechnung dieser Operationen vorgestellt. Mit Hilfe des Multiscans können diese Operationen effizienter realisiert werden.

**STICHWÖRTER:** Algorithmische Geometrie, Scan-Line-Verfahren, Boolsche Maskenoperationen

## 1 EINLEITUNG

Beim physikalischen Entwurf von Maskenlayouts für integrierte Schaltungen werden Gebietsmengen auf verschiedenen Maskenebenen erstellt (s. [4]). Als Operationen auf diesen Gebietsmengen werden unter anderem der Durchschnitt, die Vereinigung oder die Differenz benutzt. Diese Operationen werden auch boolsche Maskenoperationen genannt.

In Abbildung 1 sieht man die Ergebnisse der Maskenoperationen AND, OR/MERGE, AND NOT und XOR. Neben den boolschen Maskenoperationen gibt es noch die Operationen OVERSIZE und UNDERSIZE, die die Größe der Gebiete verändern (Minkovskisumme zweier Punktmengen). Auf diese beiden Operationen wird im folgenden nicht eingegangen.

Boolsche Maskenoperationen werden im CAD-Tool CAMBIO-XT<sup>1</sup> eingesetzt, um z. B. die elektrische Funktionalität von geometrischen Strukturen zu bestimmen.

<sup>1</sup>entwickelt am Lehrstuhl 1 für Informatik an der Universität Dortmund [4]

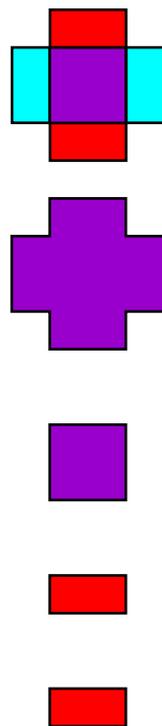


Abb. 1: Boolsche Maskenoperationen

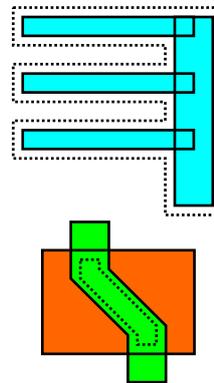


Abb. 2: Boolsche Maskenoperationen

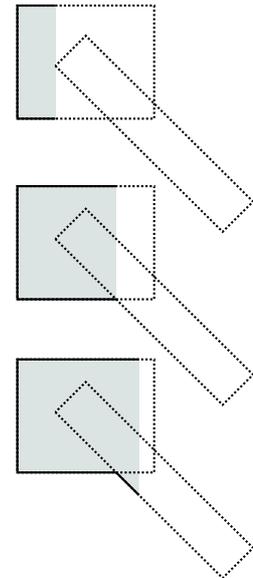


Abb. 3: Verschmelzen von zwei Gebieten

Die Verschmelzung (OR) einer Menge von Gebieten wird dabei benutzt um die Konnektivität dieser Gebiete zu bestimmen (s. Abb. 2 oben). Gebiete, die sich berühren (also elektrisch miteinander verbunden sind), werden zu einem Containergebiet verschmolzen. Die Operation AND (Durchschnitt) kann verwendet werden, um zum Beispiel die Gate-Fläche eines MOS-Transistors zu bestimmen (s. Abb. 2 unten). Die Gate-Fläche entsteht dort, wo sich Polysilizium über n-Diffusion befindet (nMOS-Transistor). Als Basisalgorithmus wird in Abschnitt 2 der Scan-Line-Algorithmus vorgestellt. In Abschnitt 3 wird eine Anwendung des Scan-Line-Verfahrens für die effiziente Implementierung von boolschen Maskenoperationen beschrieben (s. [7]). Nievergelt und Preparata (s. [9] und Abschnitt 4) geben eine weitere Implementierung an, die ebenfalls auf einem Scan-Line-Verfahren beruht.

Im Abschnitt 5 wird ein Scan-Line-Verfahren vorgestellt, das effizient Schnittpunkte und Nachbarschaften auf verschiedenen Maskenebenen bestimmen kann. Dieses Verfahren kann als Basisalgorithmus für skalierbare Maskenoperationen dienen.

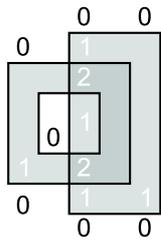


Abb. 4: Überdeckungszähler

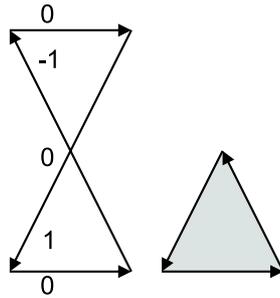


Abb. 5: Selbstüberschneidendes Gebiet (links) und das Ergebnisgebiet in CAMBIO (rechts)

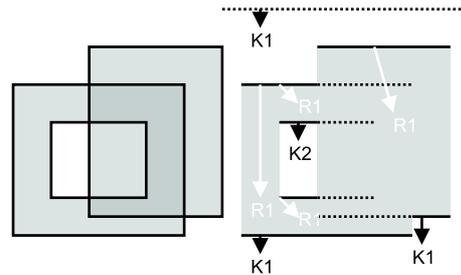


Abb. 6: Suchstruktur für Regionen

## 2 SCAN-LINE-VERFAHREN

Die aktuelle Implementierung basiert auf einem Scan-Line-Verfahren (s. [3] und [8]). Eine Scan-Line ist effizient in der Lage, Nachbarschaften zwischen Geradensegmenten und Schnittpunkte von Geradensegmenten zu bestimmen.

Mit Hilfe eines Scan-Line-Verfahrens kann der Rand des Ergebnisgebietes bestimmt werden (s. Abb. 3). In dieser Abbildung sollen zwei Gebiete miteinander verschmolzen werden. Den Fortschritt der Scan-Line erkennt man an der grauen Füllung der Gebiete. In diesem Beispiel kann der untere und obere Rand leicht bestimmt werden. Es muss nur die für die aktuelle X-Position unterste bzw. oberste Gebietsbegrenzung gesucht und übernommen werden.

## 3 DER ALGORITHMUS VON LAUTHER

Der Nachteil dieses Verfahrens ist, dass nur zusammenhängende Gebiete richtig behandelt werden. Der Algorithmus von Lauther [7] behebt diesen Nachteil und zeigt, wie mit dem selben Algorithmus viele boolesche Operationen realisiert werden können. Für jede Maske wird ein Überdeckungszähler mitgeführt. Der Zähler wird um eins erhöht, wenn ein Gebiet an der aktuellen X-Position beginnt und entsprechend um eins verkleinert, wenn ein Gebiet an der Position endet (s. Abb. 4). Der Überdeckungszähler gibt also an, wie viele Gebiete einen Punkt überdecken. Die boolesche Operation  $op$  kann dann durch den Ausdruck  $(z_A > 0) \text{ op } (z_B > 0)$  realisiert werden.

Es muss noch der Sonderfall eines selbstüberschneidenden Gebietes behandelt werden. Ein selbstüberschneidendes Gebiet ist ein Gebiet, dessen Rand einen echten Schnittpunkt (Schnittpunkt nicht auf einem Endpunkt) hat (s. Abb. 5). Das Polygon ist so gezeichnet, dass im oberen Teil der „Sanduhr“ der Überdeckungszähler negativ wird. Eine sinnvolle Behandlung ist, dass Gebietstück mit der negativen Überdeckung zu ignorieren (wie es in CAMBIO aktuell implementiert ist). Eine andere Imple-

mentierung kann das negative Gebiet als positives Gebiet auffassen. In der Abbildung 5 wäre das Ergebnis die „Sanduhr“ selbst. Um die zweite Alternative zu implementieren muss der Überdeckungszähler auf ungleich 0 geprüft werden und nicht auf größer 0.

Beim Erzeugen des Ergebnisgebietes werden die Eingaberänder der Gebiete übernommen, wenn der Ausdruck  $z_A > 0 \text{ op } z_B > 0$  zwischen *falsch* und *wahr* wechselt. Zusammengesetzte boolesche Maskenoperationen werden berechnet, indem ein binärer Ausdrucksbaum erzeugt wird. Blätter in diesem Ausdrucksbaum sind Eingabergebiete und innere Knoten sind Zwischenergebnisse der (zweistelligen) Operationen. Der Ausdrucksbaum kann mit Mitteln aus der Theorie des Compilerbaus (s. [1]) in die effizientere Darstellung als gerichteter azyklischer Graph umgewandelt werden, damit gleiche Teilausdrücke erkannt und nur einmal berechnet werden.

Problematisch beim Verfahren von Lauther ist das Erzeugen des Randes. In der Ausgabe des „Überdeckungs“-Scans befinden sich die relevanten Ränder der Eingabe, also alle Geradensegmente, die mit dem Ergebnisrand deckungsgleich sind. Es kann aber passieren, dass dieses Geradensegment nur zum Teil zur Ausgabe gehört. In diesem Fall muss der vorläufige Rand abgeschnitten und durch ein neues Segment fortgeführt werden. Das Bestimmen des Randes ist aufwendig und wird ebenfalls durch eine Art Scan-Line-Verfahren implementiert (s. auch [4]).

Einfacher funktioniert das Erzeugen des Randes, wenn nicht Eingaberänder vorläufig in die Ausgabe übernommen werden und mit anderen Eingaberändern kombiniert werden müssen, sondern wenn in eine geeignete Datenstruktur nur die Stützpunkte des Ausgaberrandes in einer Liste gespeichert werden. Dabei stellt sich nur das Problem, für einen gegebenen Stützpunkt die passende Punktliste zu finden. Im folgenden Abschnitt wird eine effiziente Datenstruktur für diese Aufgabe vorgestellt.

## 4 REGIONEN

Im Artikel von Nievergelt und Preparata [9] wird ein Algorithmus beschrieben, der für eine gegebene Menge von Gebieten eine Menge von Regionen mit gleichen

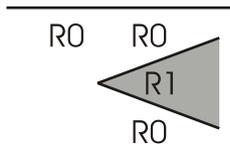


Abb. 7: Start einer neuen Region



Abb. 8: Knick eines Randes

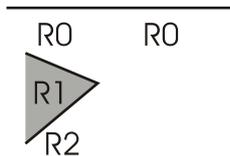


Abb. 9: Ende einer Region. Vereinigung verschiedener Regionen

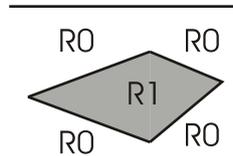


Abb. 10: Ende einer Region. Vereinigung derselben Region

Überdeckungszählern berechnet. Dieser allgemeine Ansatz wurde für CAMBIO angepasst, sodass eine Region eine maximale, zusammenhängende Punktmenge<sup>2</sup> beschreibt, für die der Ausdruck  $z_A > 0 \text{ op } z_B > 0 = \text{wahr}$  ist [5].

Die Datenstruktur, die hier verwendet wird, speichert eine Region, deren Rand aus einer Liste von Stützpunkten besteht. Die Region wird durch eine Gerade am oberen Rand indiziert (s. Abb. 6). Wenn ein Ereignis stattfindet, das den Rand einer Region verändert, wird in der Liste aller oberen Ränder nach dem Intervall gesucht, das den Punkt des Ereignisses enthält. Mit Hilfe der oberen Intervallgrenze wird die entsprechende Region gefunden und manipuliert. Die Manipulationen richten sich nach dem Typ des Ereignisses.

**Start:** Startereignisse erkennt man daran, dass alle vom Punkt ausgehenden Segmente nach rechts gehen<sup>3</sup>. In diesem Fall wird eine neue Region erzeugt. Die Region, in der dieser Punkt liegt, wird in zwei Streifen aufgeteilt, die unter- und oberhalb der neuen Region verlaufen (s. Abb. 7).

Weil sich die alte Region aufteilt, muss für den unteren Streifen ein neuer Eintrag in der Suchstruktur vorgenommen werden. Der obere Streifen kann weiterhin unter dem alten oberen Rand gefunden werden. Ein weiterer Eintrag in die Suchstruktur wird für die neue Region eingefügt.

**Knick:** Ein Knick ist ein Ereignis, das die Region nicht aufteilt, vereinigt oder beendet. Die einzige Aufgabe ist, in der Suchstruktur den oberen Rand auszutauschen (s. Abb. 8).

**Ende:** Dieses Ereignis beendet einen Streifen der Region. Wenn die Region nur aus einem Streifen bestanden hat, wird die komplette Region beendet. Dies ist der Zeitpunkt, an dem für diese Region ein Gebiet erzeugt wird. Der Eintrag in der Suchstruktur für diese Region wird gelöscht. Die zu löschende Region befindet sich innerhalb anderer Regionen. Diese Regionen werden am Endpunkt miteinander verschmolzen. Dabei sind zwei Fälle zu betrachten. Erstens können zwei verschiedene Regionen miteinander verschmolzen werden (s. Abb. 9). In diesem Fall wird aus den beiden alten Regionen eine neue Region erzeugt und unter dem obersten Rand der beiden Regionen weitergeführt. Der obere Rand der unteren Region wird nicht mehr benötigt und kann entfernt werden. Der zweite Fall tritt ein, wenn die beiden zu verschmelzenden Streifen zu einer Region gehören (s. Abb. 10). Dieses Ereignis tritt nur dann ein, wenn die beendete Region eine Region vorher in zwei Streifen geteilt hat. Auch in diesem Fall wird die zurückbleibende Region unter der obersten der beiden Ränder weitergeführt und es wird auch der andere Rand gelöscht. Der wesentliche Unterschied ist der, dass der Rand der die beendete Region umschlossen hat einen Kreis bildet und ein Loch in der zurückbleibenden Region darstellt.

Initial gibt es eine spezielle Region, die eigentlich keinen äußeren Rand hat (aus Gründen einer einfacheren Implementation wird ein Rand angegeben, der alle Punkte der Eingabe enthält, im Prinzip eine vergrößerte *bounding box*). Diese Region kann zusammen mit Regionen, die in Löchern liegen, als Komplement der Maskenoperation angesehen werden.

Die boolschen Maskenoperationen in CAMBIO-XT haben unter anderem folgende Eigenschaften: Alle Gebiete, die aus Regionen entstehen sind maximal zusammenhängend. Zwei Gebiete sind nicht zusammenhängend, wenn es keinen Weg mit einer Breite größer  $\epsilon$  zwischen den beiden Gebieten gibt, d. h. zwei Gebiete können sich höchstens in einem Randpunkt schneiden (s. Abb. 11).

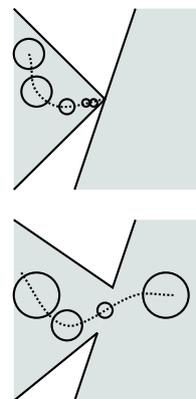


Abb. 11: Zusammenhang von Gebieten

Gerade bei eindimensionalen Kompaktierverfahren ist die Rotationsinvarianz wichtig. Eindimensionale Verfahren erreichen eine „zweidimensionale“ Kompaktierung des Layouts, in dem mehrere eindimensionale Kompaktierschritte hintereinander ausgeführt werden und dabei das Layout um Vielfache von  $90^\circ$  gedreht wird. Rotationsinvarianz garantiert hier, dass die Ergebnisse der

<sup>2</sup>Definitionen aus der mengentheoretischen Topologie finden sich in [10]. Hier soll eine intuitive Anschauung reichen.

<sup>3</sup>Wenn die Scan-Line von links nach rechts wandert.

Maskenoperationen auf gedrehte Eingaben bis auf die Rotation gleich sind (s. Abb. 12).

Weitere Eigenschaften können für eine geschickte Implementierung der nachfolgenden Algorithmen ausgenutzt werden. Eine Eigenschaft ist die, das Schnittpunkt gleichviele eingehende wie ausgehende Kanten hat (s. Abb. 13).

## 5 MULTISCAN

Der Multichromatische Scan (kurz Multiscan) [6] ist eine Erweiterung des Bichromatischen Scans von Basch et. al. [2]. Der Bichromatische Scan ist in der Lage, effizient Nachbarschaften und Schnittpunkte zwischen Geradensegmenten von zwei verschiedenen Masken zu bestimmen. Leider kann der Algorithmus nicht effizient auf mehr als zwei Maskenebenen erweitert werden. Im Multiscan wird dieses Problem mit Hilfe mehrerer, untereinander verzweigter Haltelinien gelöst.

Dabei ist der Multiscan aufgrund geschickterer Implementierung (ca. viermal) schneller als die bisherige Scan-Line-Variante. Dieser Geschwindigkeitsvorteil wird hauptsächlich durch eine genauere Unterscheidung der möglichen Ereignistypen erreicht. Neben Start-, Knick- und Endpunkt gibt es nun Startedge, Endedge und ComplexIntersection (s. Abb. 14). Dies sind die in Maskenlayouts am häufigsten vorkommenden Ereignisse. Die Start- und Endecken z. B. ersparen mehrfaches Suchen in der Haltelinie, weil hier nicht für jedes Segment in der Haltelinie gesucht werden muss. Die Ereignisse können bereits in der Initialisierungsphase einfach erkannt werden.

Durch eine interne (Abb. 15) und eine externe (Abb. 16) Maskenverzweigung kann effizient auf Nachbarn auf der gleichen bzw. einer anderen Maske zugegriffen werden.

Diese Verzweigung kann auch dazu benutzt werden um eine skalierbare Version der booleschen Maskenoperationen zu implementieren. Es ist mit dieser Scan-Line-Variante effizient möglich auch für mehr als zwei Masken eine Maskenoperation durchzuführen, weil hier für jede Maske eine Haltelinie vorhanden ist. In jeder dieser Haltelinien kann ein Überdeckungszähler mitgeführt werden. Durch die schnellen Zugriffe über die externe Verzweigung auf die anderen Masken kann dann ein komplexerer Ausdruck als  $z_A > 0$  op  $z_B > 0$  angegeben werden (s. Abb. 17). Wie bei dem Verfahren von Lauther mit komplexen Ausdrücken, wird auch hier ein gerichteter azyklischer

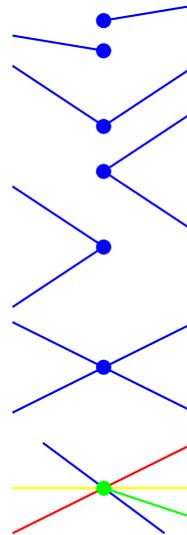


Abb. 14: Ereignisse des Multiscans

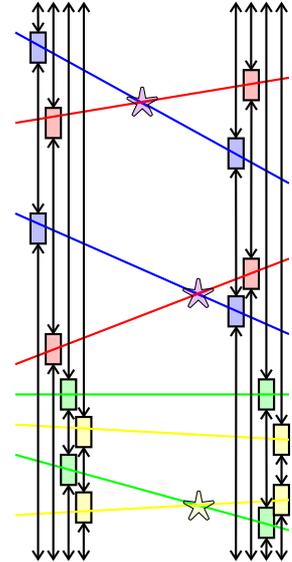


Abb. 15: Interne Verzweigung

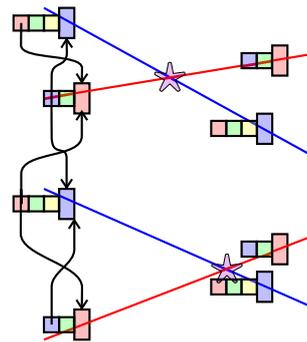


Abb. 16: Externe Verzweigung

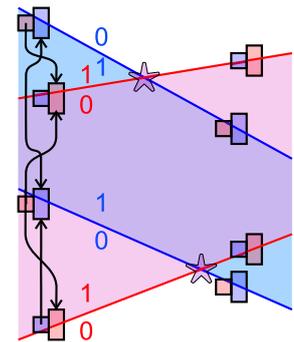


Abb. 17: Skalierbare Maskenoperationen

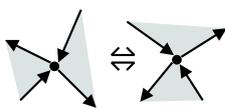


Abb. 12: Rotationsinvarianz

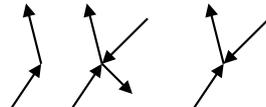


Abb. 13: „Knotenflußregel“

Ausdrucksbaum aufgebaut. Bei der rekursiven Auswertung wird bei Knoten für Eingabemasken auf den entsprechenden Überdeckungszähler zugegriffen. Dieser Ansatz ist schneller, weil nicht mehr für jedes Zwischenergebnis eine Maske generiert werden muss. Diese Zwischenergebnisse müssen bisher wieder abgescannt werden, was jedesmal einen Aufwand von  $O((n+k)\log(n+k))$  erfordert.

## 6 ZUSAMMENFASSUNG

Aufgrund der besseren Implementierung ist der Multiscan schneller als die vorherige Implementierung. Dieser Vorteil soll für die Maskenoperationen ausgenutzt werden. Auch durch Verzicht auf die Komplementberechnung kann eine bessere Laufzeit erreicht werden. Mit Hilfe der komplexeren Ausdrücke bei der Berechnung der Maskenoperationen kann in einem Schritt ein Ergebnis berechnet werden, wo vorher viele Zwischenergebnisse berechnet werden mussten.

## LITERATUR

1. AHO, A. V., R. SETHI und J. D. ULLMAN: *Compilerbau*. Addison-Wesley, 1988.
2. BASH, J., L. J. GUIBAS, and G. D. RAMKUMAR: *Reporting red-blue intersections between two sets of connected line segments*. In *4th European Symposium on Algorithms*, 1996.
3. BENTLEY, J. L. and T. A. OTTMANN: *Algorithms for reporting and counting geometric intersections*. IEEE Transactions on Computers, C-28(9):643–647, 1979.
4. BRÜCK, R.: *Entwurfswerkzeuge für VLSI-Layout*. Hanser Verlag, 1993.
5. DILLING, T.: *Algorithmen für geometrische Probleme*. In: REUSCH, B. (Hrsg.): *17. Workshop Interdisziplinäre Methoden in der Informatik*, Universität Dortmund, 1997.
6. DILLING, T.: *Multi-Layer-Scan: Effizientes Abtasten mehrerer Maskenebenen*. In: REUSCH, B. (Hrsg.): *18. Workshop Interdisziplinäre Methoden in der Informatik*, Universität Dortmund, 1998.
7. LAUTHER, U.: *An  $o(n\log n)$  algorithm for boolean mask operations*. In *Proceedings of the 18th Design Automation Conference*, pp. 555–562, 1981.
8. MEHLHORN, K. and S. NÄHER: *Implementation of a sweep line algorithm for the straight line segment intersection problem*. Research report, Max-Planck-Institut für Informatik, 66123 Saarbrücken, Germany, ????
9. NIEVERGELT, J. and F. P. PREPARATA: *Plane-sweep algorithms for intersecting geometric figures*. Communications of the ACM, 25(10):739–747, 1982.
10. QUERENBURG, B. VON: *Mengentheoretische Topologie*. Hochschultext. Springer Verlag, 1979.



# Von Cambio XT zum Analog Companion Eine Software wird marktreif

*Kurt Liebermann*

Tel: 0231/755 6516

lieberma@ls1.cs.uni-dortmund.de

## 1 ZUSAMMENFASSUNG

Im Rahmen des Projektes ELAN (Effiziente Layoutentwurfsmethodik für analoge/digitale Systeme) wird das am LS1 entwickelte System zur Kompaktierung von mixed-signal Layout, Cambio-XT, weiterentwickelt. Ziel des Projekts ist die Entwicklung der Software bis zur Marktreife. Cambio-XT soll unter dem Namen Analog Companion vertrieben werden.

## 2 STICHWÖRTER:

Layout-Kompaktierung, mixed-signal Layout, analog Layout, Cambio-XT, Analog Companion.

## 3 EINLEITUNG

Im Herbst 1999 wurde das Projekt ELAN (Effiziente Layoutentwurfsmethodik für analoge/digitale Systeme) durch das BMFT rückwirkend vom 01.05.1999 mit Laufzeit bis zum 30.04.2001 genehmigt. Ziel des Vorhabens ist die Verbesserung der Entwurfssystematik und -effizienz auf dem Gebiet der analogen und analog-digitalen Schaltungen und Systeme. Dazu sollen zum einen neue Methoden und Algorithmen entwickelt werden, die eine frühzeitige Planung der Systemtopologie unter Berücksichtigung analoger Randbedingungen zulassen. Zum anderen soll der interaktive Entwurfsstil im Zusammenhang mit automatisierten Verfahren für die Platzierung, Verdrahtung und insbesondere die Kompaktierung durch Entwicklung geeigneter Algorithmen sowie deren Implementierung ermöglicht werden. Hiermit sollen manuelle Vorgehensweisen, wie sie z.Zt. im analogen Bereich weitestgehend üblich sind, durch Top-Down-Entwurfsmethoden bzw. SDL-Methoden (Schematic Driven Layout) abgelöst und somit erhebliche Zeitgewinne im Layoutentwurf erzielt werden. Die zu entwickelnden Methoden und Algorithmen sollen so gestaltet werden, daß sie für Anwender sowohl aus der Großindustrie als auch aus dem KMU Bereich nutzbar sind. Das Vorhaben gliedert sich in die Teilprojekte TP1 (Systempartitionierung und Floorplanning/Platzierung) sowie TP2 (Interaktive entwurfsregelkonforme Layoutadaptation). Im Rahmen des TP2 wird der Kompaktor Cambio-XT durch den Lehrstuhl Informatik I als Unterauftragnehmer der Firmen Bosch/Reutlingen und Temic-Semiconductors/Ulm erweitert und vervollständigt. Ein

weiteres Ziel des Projektes ist es, ein marktreifes Produkt zu erhalten. Es soll später unter dem Namen Analog Companion vermarktet werden.

## 4 PROJEKTINHALTE

Mit den Partnern Bosch und Temic-Semiconductor wurde ein Aufgabenkatalog ausgearbeitet, der zu gleichen Teilen die Entwicklung und Implementierung grundlegender Algorithmen für die Kompaktierung (Behandlung mehrerer Grids, Kompaktierung von Pfaden, Automatisches Einfügen von Jogs, Einbindung von Modulgeneratoren), Hilfsmittel für die Migration (Bauteilerzeugung) als auch die für die Behandlung von Analog-Layout notwendige Einbindung von Schaltplan- und Netzinformationen umfasst. Die Umsetzung dieser Arbeiten soll bis Ende 2000 vollzogen sein, der Rest der veranschlagten Projektzeit steht für Evaluierung, Korrekturen sowie Dokumentation zur Verfügung.

## 5 MARKTFÄHIGKEIT

Zur Untersuchung der Marktfähigkeit wurde der Analog Companion auf der DAC '99 (Design Automation Conference) in New Orleans der Fachwelt vorgestellt. Nach einer Vielzahl von Vorführungen mit anschließender Diskussion wurde deutlich, dass das Konzept des Kompaktors sowohl als Migrationswerkzeug als auch als interaktives Werkzeug zur Layoutgenerierung allgemein akzeptiert wird und dass derzeit ein solches Produkt auf dem Markt fehlt. Einige Anregungen insbesondere in Bezug auf die Umsetzung analoger Regeln konnten direkt in den Aufgabenkatalog übernommen werden. Es ist davon auszugehen, dass das Produkt Analog Companion nach seiner Fertigstellung gute Marktchancen besitzt.

## 6 LITERATUR

1. **Migas, Dilling, Hahn, Reusch, Milzner:** Device Substitution – A novel approach for retargeting Analog VLSI Layouts; Proceedings on Design of Circuits and Integrated Systems (DCIS98), 1998, Seite 4-9.
2. **Bos:** Ein neues Verfahren zur nicht-parametrischen Trendanalyse; 18. Workshop Interdisziplinäre Methoden in der Informatik, Forschungsbericht,

K. Liebermann

Universität Dortmund, 1998.

3. **Dilling:** Multi-Layer-Scan: Effizientes Abtasten mehrerer Maskenebenen;18. Workshop Interdisziplinäre Methoden in der Informatik, Forschungsbericht, Universität Dortmund, 1998.

# Robust Design of CAD System as Example of Redesign of CAMBIO System

*Xinhua Xu*

Tel. 0231/755 6346

[Xu@ls1.cs.uni-dortmund.de](mailto:Xu@ls1.cs.uni-dortmund.de)

## Abstract

CAMBIO system as one of the few available layout compaction systems for analog circuits has its inherent complexity in algorithm, system architecture and software structure. How to redesign this system to make it robust for the further development and maintenance will be discussed in this paper.

**Key words:** CAD, system architecture, software structure, data organization, software redesign, layout compaction

## 1 INTRODUCTION

CAD is one of the important applications of computer. It means the use of computer hardware and software for the design of products that are needed by our society. CAMBIO system is being developed at the department of computer sciences of Dortmund University. It is a CAD system for the processing of mask layout of integrated circuits. At the moment it has a 1-d layout compactor that can handle any physical layout structures and circuit specific design rules.

The development of CAMBIO system has already a long history. Rainer Brück [1] has presented a detailed report about the development of CAMBIO system. In this paper we will concentrate on the redesign of the system. The theoretic background of software redesign will be discussed. How to improve the robustness of CAMBIO system by changing system architecture, module partitioning and geometrical data organization will be presented.

## 2 THEORETICAL BACKGROUNDS OF THE SOFTWARE REDESIGN

The software redesign is a software design stage that changes or adapts the existed software to improve its quality. It may be behavior preserving or not. Software redesign involves the redesign of system architecture, software structure and data organization.

### 2.1 SYSTEM ARCHITECTURE

System architectures specify the global organization and reference model of system. The design of system architectures has very important affects on the design systems. CAD software reference architectures have

been introduced in [2]. In this section we discuss only the system organization architectures of design systems. They can be divided into:

- ◆ Standard software based architecture
- ◆ Standalone tools based architecture
- ◆ Classic database based architecture
- ◆ Central memory-based database architecture
- ◆ Parallel design supported architecture

The first four architectures are already widely used, although they may be not mentioned explicitly. A CAD system may use one or the combination of the above architectures. The architecture of CAD systems affects not only the developers but also the users. The choice of architecture is the most important activity in designing CAD systems.

Central memory-based database architecture is now widely used in VLSI CAD systems after the first success of such architecture in Bell Laboratories (LTX2 system), at the University of California at Berkeley (BBL system), and in CADENCE Edge System in 1980s [3]. The core of this architecture is the central memory-resident database. All tools in the CAD system can access them. The data may be organized using hierarchical structure with multiple views.

The important idea of this architecture is that we use memory-resident data but treat it as a database. Therefore using this architecture data access is fast, organized, and clean. We need not to retrieve single data repeatedly from the disk, so we can rapidly visualize the whole data in this kind of database.

### 2.2 SOFTWARE STRUCTURE

Software structure deals with the internal organization of a module and external interaction to other modules. Module is an abstract organization unit. It can be a function, a class, or a group of classes that have the same design pattern. Restructuring means the behavior preserving change of software structure [4].

#### 2.2.1 ROBUST DESIGN OF FUNCTION CALLING STRUCTURES

Function calling structures can be reflected from the function calling graph. The function calling graph

expresses how functions call each other. The existence of cycles in function calling graph may add the software complexity.

**[Definition 1]** A **function calling graph** is a directed graph  $G = (V, E)$  where each node  $v \in V$  is a function  $f_i$ . Each directed edge  $e \in E$  that starts from node  $f_i$  to node  $f_j$  represents the calling of function  $f_i$  to function  $f_j$ .

**[Definition 2]** If there exists a path from a node  $v1$  that represents function  $f_i$  to node  $v2$  that represents function  $f_j$  in the function calling graph  $G = (V, E)$ , we call function  $f_i$  has **accessed** function  $f_j$ . The number of the edges of the longest path of all simple paths that starts from node  $v1$  to node  $v2$  is called the **depth level of node  $v2$  with respect to node  $v1$** , or simply **depth level** if node  $v1$  is a start node.

**[Definition 3]** If there is a cycle in the function calling graph, we call there is a **recursive calling** in functions. Two nodes  $v1$  and  $v2$  in a function calling graph  $G = (V, E)$  are called **recursive accessed**, notation  $v1 \leftrightarrow v2$  if there exists a directed path from  $v1$  to  $v2$  and from  $v2$  to  $v1$  in the graph. A node  $v$  is not accessible to itself if there is no directed edge from  $v$  to  $v$ . The maximal set of  $V' \subseteq V$ , so that  $v1 \leftrightarrow v2 \quad \forall v1, v2 \in V'$  is called the **recursive accessed function set**. The number of elements in the set  $V'$  is called the **recursive stage** of  $V'$ . The number of the edges of the longest path of all simple paths in the graph is called the **function calling depth** of the calling structures.

The complexity of software increases when the function calling depth increases. The function calling depth is not the inherent characteristics of software, rather it depends on our design. Each program can be restructured to an ideal level of calling depth. In the following we show how we can reduce the function calling depth.

We assume that a function  $f_i$  is at the  $i$  level, where  $i > 1$  in the function calling graph  $G$ . This function is called by a set of other functions  $G = \{g_1, g_2, \dots, g_n\}$ . According to our Definition 2 the level of function  $g_i \in G$  is lower than that of function  $f_i$ . We now place function  $f_i$  under function  $J_j$  that has two or more levels above than that of function  $f_i$ . In the following we show how we can restructure function  $J_j$  and all functions  $g_i \in G$ , so that we can keep the same functionality of the program while reduce the function calling level of the program.

1) Rewrite all functions  $g_i \in G$  so that these functions do not call function  $f_i$  directly, rather they send the message of calling function  $f_i$  to the message queue of the application. This message is appended at the head of the message queue and assigned to be handled by function  $J_j$ . After

function  $g_i \in G$  has sent the message, the program comes back to the main loop to deal with the messages in the message queue. The first message it deals is calling function  $f_i$ . At the last the program comes back to function  $g_i$ .

2) Rewrite function  $J_j$  so that they will call function  $f_i$  at once when there is a message for it.

## 2.2.2 ROBUST DESIGN OF CLASS ORGANIZATION STRUCTURES

Recently object oriented approach is widely used in designing software. This approach supports information hiding, inheritance and polymorphism. Using this approach we can abstract data, concept, or operations in a unified way, that is, we can put the data and its corresponding operations in a single entity, which we generally call class.

However the integration of data and operations in one class may lead to another danger situation: If the operations of a class access functions or attributes of other classes, then we may have interdependent classes. If a class inherits another class, the first class will depend on the second class. If attributes of a class contain other classes, then that class will depend on the other classes. Above all, in the object oriented approach we may easily fall into many mutually interacting classes, which may seriously impact the complexity and maintainability of software.

These mutually interacting classes may form complex cyclic dependency between classes. This cyclic problem greatly increases the complexity of software. Classes in the cycle can not be tested independently. Clearly any method that would break the dependency cycles would greatly improve the software structure.

By robust design of class organization structures we mean that we design the class organization structures in such a way that instead of having a big knot of mutually dependent classes, we have layers of classes, where any class depends only on classes from lower layers. This arrangement permits more independent testing, and makes software easier to understand.

**[Definition 4]** A **base class** is an abstract data structure that contains atom data variables, reference variables to other classes, constructor variables of other classes, and operations. A class can only inherit from base classes or other classes in a hierarchical approach, that is, in tree-like structure. Classes cannot contain mutually dependent constructor variables.

**[Definition 5]** Class  $C$  is an **independent class** if  $C$  can be compiled and tested without internal information of any other classes. Class  $C_A$  is **independent of class  $C_B$** , if  $C_A$  can be compiled and tested without internal information of  $C_B$ .

Clearly an independent class must satisfy the following conditions:

- 1) Does not inherit from any other classes, and
- 2) Does not call functions or access attributes of other classes in operations, and
- 3) Does not contain constructors of other classes

**[Definition 6]** Class  $C_A$  is called **dependent on** class  $C_B$  if class  $C_A$  can be compiled and tested only with the internal information of class  $C_B$ , Notation  $C_A \rightarrow C_B$ . If class  $C_A$  depends on class  $C_B$  and class  $C_B$  depends on class  $C_A$ , we call class  $C_A$  and class  $C_B$  are interdependent, Notation  $C_A \leftrightarrow C_B$ .

**[Definition 7]** A direct graph  $G = (V, E)$  is called a **class dependency graph** if each node  $v \in V$  represents a class and each directed edge  $e \in E$  represents the dependency of two classes.

**[Theorem 1]** Class  $C_A$  depends on class  $C_B$  if and only if

Class  $C_A$  inherits from class  $C_B$  directly or indirectly, or

There exists operation in class  $C_A$  that calls functions or using attributes of class  $C_B$  directly or indirectly, or

There exists constructor variable of class  $C_B$  in class  $C_A$  directly or indirectly.

### 2.3 DATA ORGANIZATION

Most of the problems with today's software stem from the poor organization of data. Data related errors are often difficult to find. In modern CAD system because the data relationships are very complex and CAD tools operate on central memory-resident database, the organization of the data forms the heart of most CAD system. How to organize the data affects directly the success of CAD systems.

Data organization can be divided into intrusive data organization and non-intrusive data organization [5]. The intrusive data organization puts the data directly under the data entity, while non-intrusive data organization puts the reference of the data in the data entity. In the paper [5] these two organization approaches have been compared. We put the results again here. The intrusive data organization has the following advantages:

- ◆ Reduce the memory allocation calls
- ◆ Avoid the reference misuse

This organization approach has also some disadvantages. It will increase memory requirements, if only small sets of these objects are referred in many structures. The object relation can only be used for one

kind of object. It may lead to semantic mismatch to our mental model and conceptual confusion in class hierarchy of object oriented methods. Intrusive organization is widely used in CAD systems, especially in VLSI CAD systems, such as, Electric system. Non-intrusive organization is widely used in class libraries, such as, Microsoft Visual C++ foundation class library and STL library.

## 3 THE REDESIGN OF CAMBIO SYSTEM

In this section the system architecture, module partitioning and data organization of the current CAMBIO system will be examined and the redesign of CAMBIO system will be presented.

### 3.1 CAMBIO SYSTEM ARCHITECTURE

The current CAMBIO system architecture is a central memory-based. All tools are integrated inherently into the system (see Figure 1). The drawbacks of this kind of tool integration are that the memory requirement of the system increases with the number of tools, the system is very complex and it is difficult for improvement and maintenance.

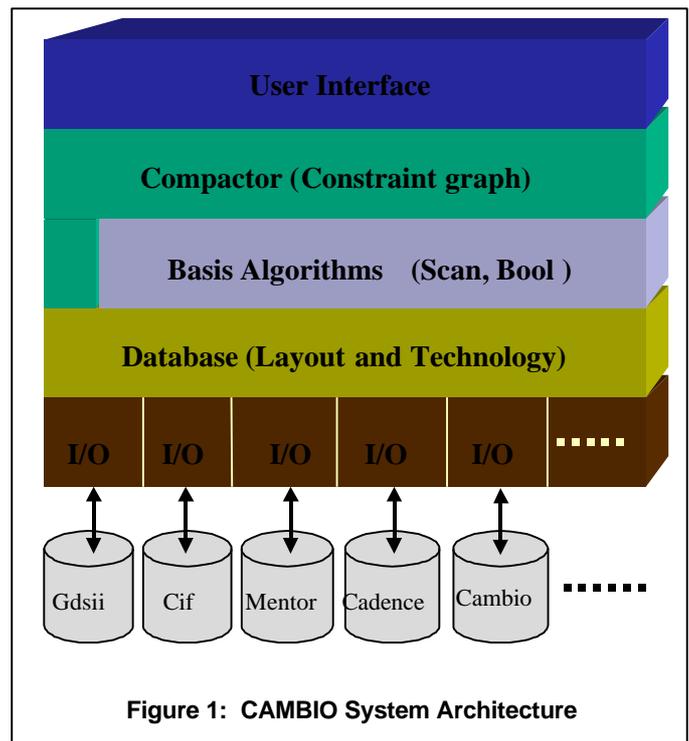


Figure 1: CAMBIO System Architecture

In order to solve the problems in the current CAMBIO system, we introduce a new system architecture for CAMBIO system (see Figure 2). The new system architecture has the following benefits:

- ◆ Limit of the memory requirement of the compactor
- ◆ Reduction of the complexity of the compactor

- ◆ Improvement in the software reuse
- ◆ Simplification of the module dependency
- ◆ Easy for maintenance and improvement

### 3.2 CAMBIO MODULE PARTITIONING

CAMBIO system is physically divided into some

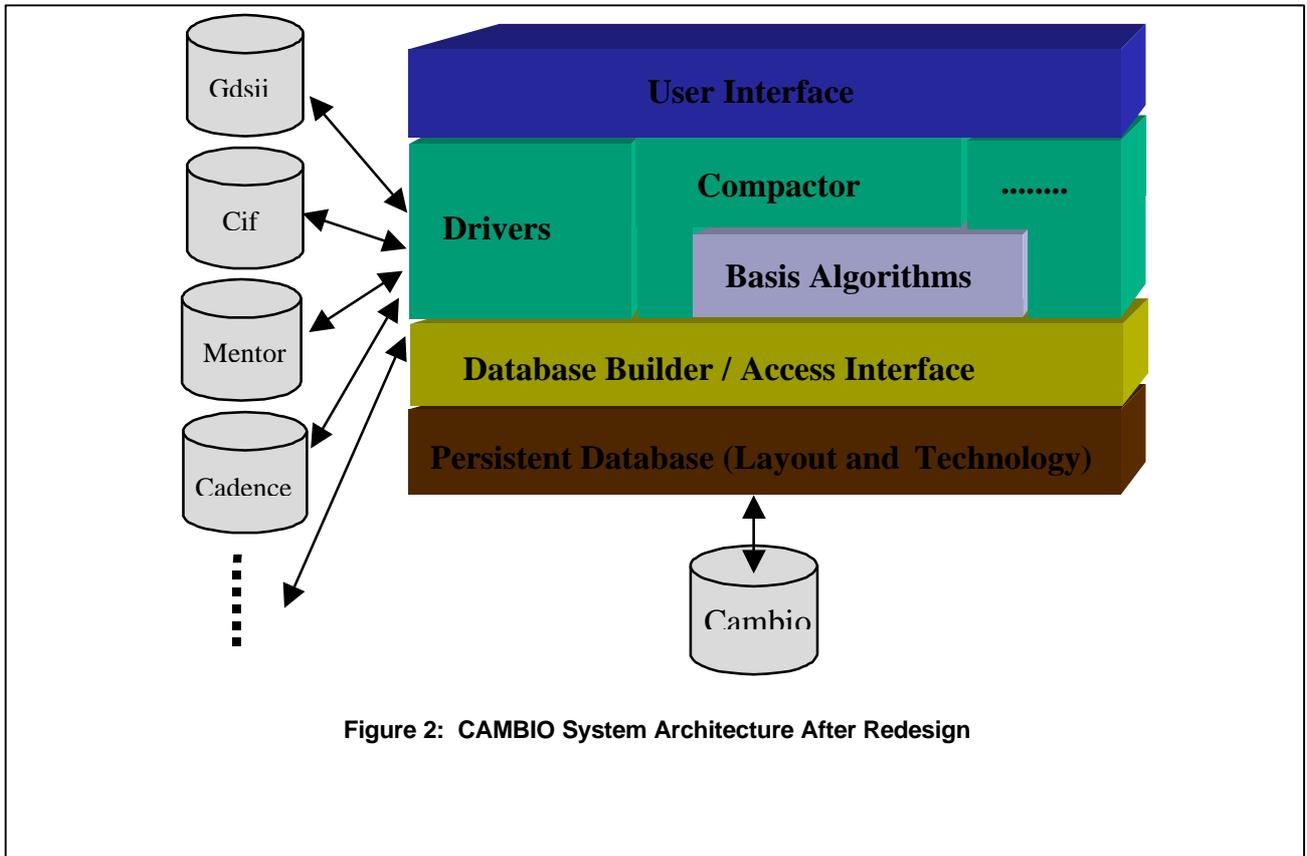


Figure 2: CAMBIO System Architecture After Redesign

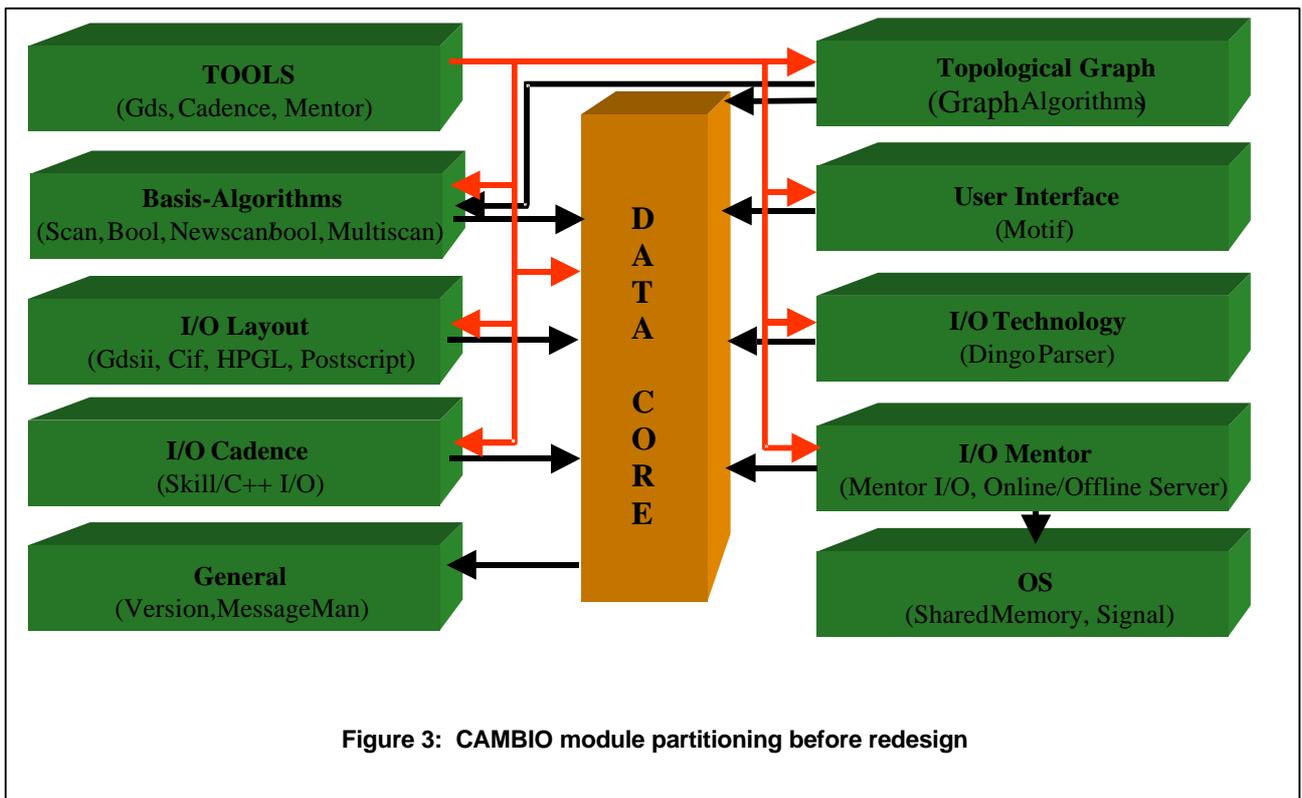


Figure 3: CAMBIO module partitioning before redesign

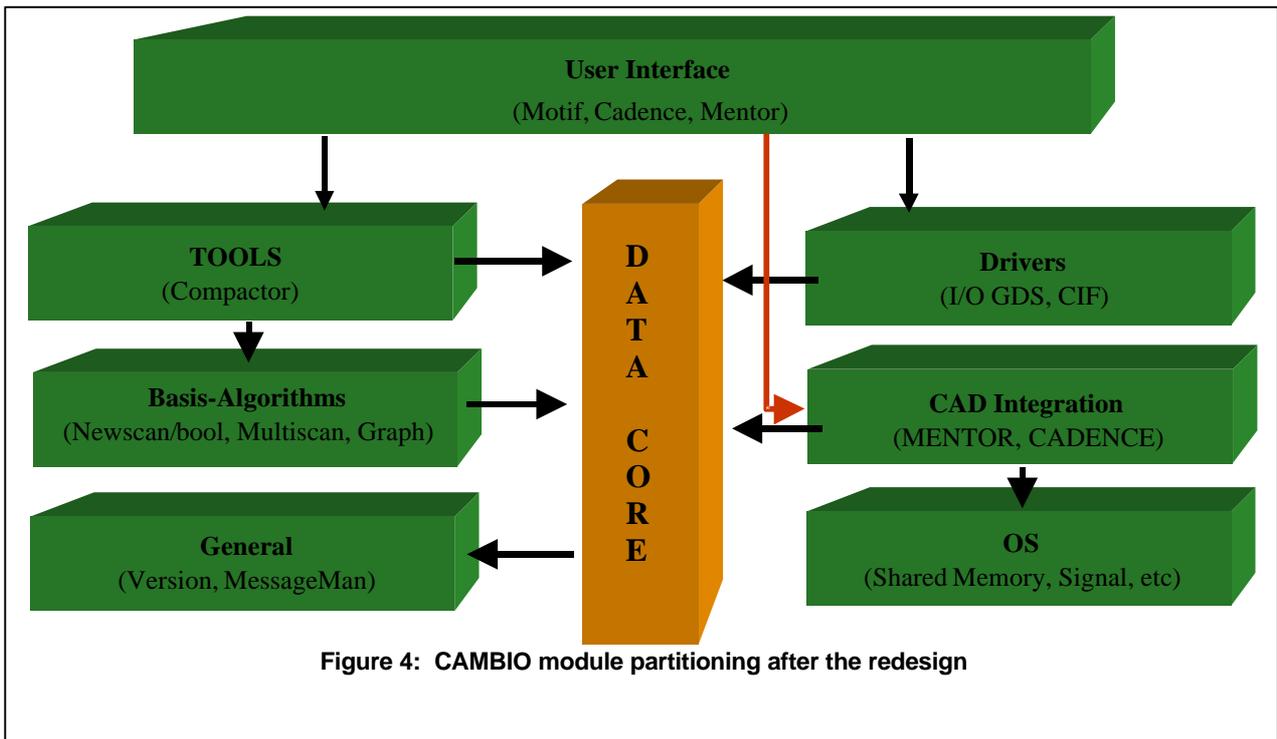


Figure 4: CAMBIO module partitioning after the redesign

modules. The arrows in the Figure 3 represent the dependency among modules. In the current partitioning the module TOOLS has strong dependency to the other modules. The new module partitioning simplifies the dependency among modules (see Figure 4). The module TOOLS depends now only on the module BASIS-ALGORITHMS and the module DATA CORE.

### 3.3 CAMBIO GEOMETRICAL DATA

The current CAMBIO geometrical data organization is shown in Figure 5. It has both intrusive and non-intrusive organization. The relationship between mask layer and polygon is intrusive aggregation while the relationship between mask layer and path or text is non-intrusive aggregation. This kind of organization has the following drawbacks:

- ◆ Bad polymorphism for geometrical objects
- ◆ Increase the number of memory allocation
- ◆ Not homogeneous handling of geometrical objects under mask layer
- ◆ Maintenance of two implementation schema for insert, delete, and search of geometrical objects
- ◆ Not robustness against the misuse
- ◆ Complex code segments

To remove the above drawbacks, the following geometrical data organization is proposed. The new geometrical data organization is whole intrusive (see Figure 6). Using the new data organization, the following benefits are obvious:

- ◆ Robust: The data integrity is guaranteed through the intrusive organization.
- ◆ Efficient: The number of memory allocation is reduced
- ◆ Uniform: Same schema for the insert, delete, and search of geometrical objects
- ◆ Polymorphism for the operations on the

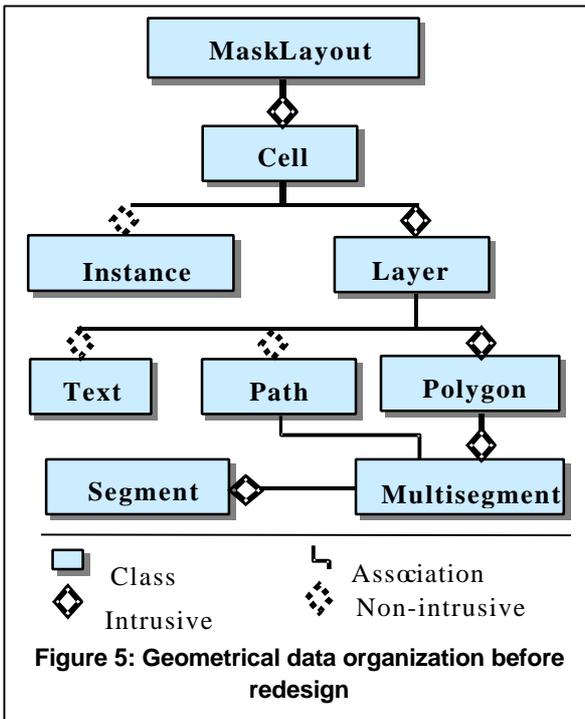
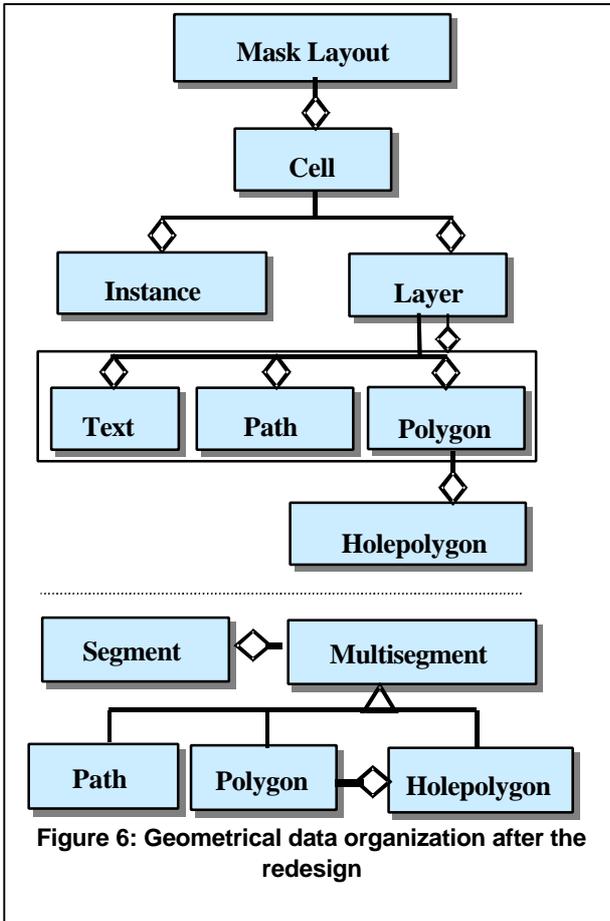


Figure 5: Geometrical data organization before redesign

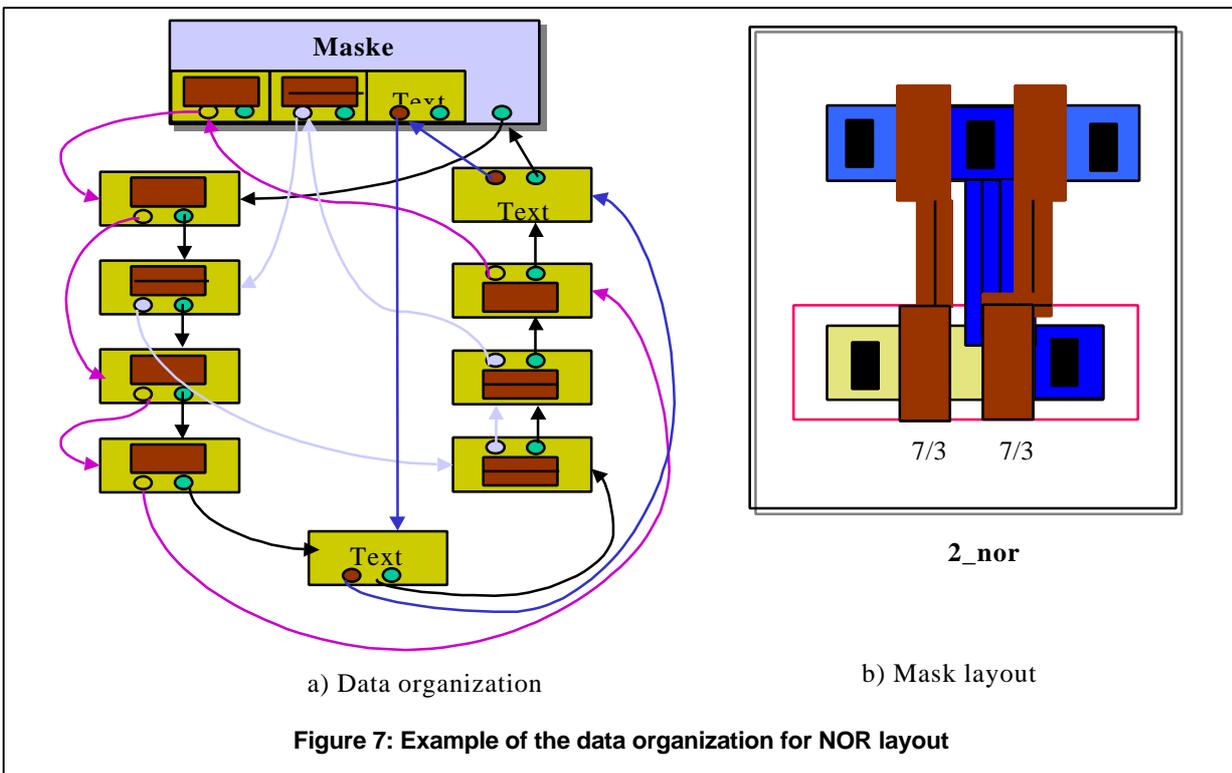
multisegment object. Multisegment class is not more a concrete class but an abstract class.



To demonstrate how the new geometrical data organization works, we show an example of the organization of layout data for NOR layout in Figure 7.

#### 4 REFERENCES

1. **Brück, Rainer:** 10 Jahre physikalischer Entwurf am Lehrstuhl Informatik 1, 16. Workshop Interdisziplinäre Methoden in der Informatik, Universität Dortmund, 1996
2. **Kehrer B. and Vatterrott G.:** Integration Aspects of STEP and their Expression in the CAD Reference Model, in: Teixeira J.C. and Rix J. (ed.) Modelling and Graphics in Science and Technology, Springer-Verlag, 1996
3. **Soukup J. :** Organized C: A Unified Method of Handling Data in CAD Algorithms and Databases, *ACM/IEEE Design Automation Conference*, 1990
4. **Opdye W. F.:** Refractoring Object-Oriented Framework, PhD thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign, 1992
5. **Xu X. H.:** Intrusive Organization of Internal Database, 18. Workshop Interdisziplinäre Methoden in der Informatik, Universität Dortmund, 1998



# Steuerung mobiler Roboter

*Michael Wittner*

0231/755 6371

Wittner@ls1.cs.uni-dortmund.de

Dieser Beitrag ist nicht schriftlich verfügbar. Wenden sie sich im Bedarfsfall bitte direkt an den Autor.



# Eine generische grafische Benutzerschnittstelle für automatisierbare vernetzte Räumlichkeiten

*Reimar Grasbon*

Tel: 0231/755 6310

grasbon@ls1.cs.uni-dortmund.de

## ZUSAMMENFASSUNG

Es wird ein Konzept vorgestellt, welches bei elektronischen Geräten die Trennung zwischen Funktionalität und Bedienung ermöglicht. Die Grundlage dazu bildet eine Bedienschnittstelle, die konstruktiv an unterschiedlichste Aufgabenstellungen angepaßt werden kann.

**STICHWÖRTER:** Homebus, Schnittstelle, Bedienkonzept, Oberfläche

## 1 EINLEITUNG

Seit einiger Zeit existiert die Idee, die Vorteile vernetzter Systeme auch auf Gerätschaften anderer Gattungen auszuweiten. Das Schlagwort des vernetzten Hauses steht stellvertretend für die Umsetzung dieser Idee. Gemeint ist damit, konventionelle Haushaltsgeräte, Geräte der Konsumelektronik und sogar Installationen miteinander zu verbinden. Die Grundlage für die Kommunikation bietet ein sogenannter Homebus als abstrakte Voraussetzung für den Informationsaustausch.

Sind die Voraussetzungen für den Informationsaustausch erst einmal geschaffen, eröffnet sich die Möglichkeit, auch von anderer Stelle aus ein Gerät über den Bus bedienen zu können. Diese Trennung von Bedienung und Funktionalität ist grundsätzlich nicht neu. Die Bedienung der einzelnen Geräte wird dabei aber durch die Vielzahl unterschiedlicher Bedieneinheiten zunehmend unübersichtlich. Die Lösung dieses Problem kann nur in der Zusammenführung der unterschiedlichen Fernbedienungen liegen, quasi als zentrale Bedieneinheit. Problematisch ist allerdings, daß allgemein unterschiedlichste Geräte an der Kommunikation teilnehmen.

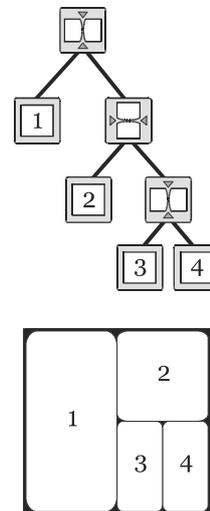
Ziel ist es, eine mögliche Lösung für dieses Problem anzubieten. Dazu gehört ein Konzept, das das (Fern)Bedienen beliebiger Geräte von einer bestimmten Stelle aus erlaubt. Eine Menge von Geräten/Stationen sind also über ein Bussystem miteinander verbunden. Gesteuert werden sie über ein ausgezeichnetes Gerät (das „Darstellende Gerät“), auf welches die Stationen ihre Bedienfunktionalität exportieren und welches dann die Interaktion mit dem Menschen übernimmt.

## 2 LAYOUT

Die erste Aufgabe zur Visualisierung externer Bedienfunktionalität ist ein Layoutkonzept, daß eine möglichst

qualifizierte Platzvergabe auf dem darstellenden Gerät regelt.

Dabei stellte sich der „Baum“ als praktikabelste Datenstruktur heraus (Abbildung 1). Er ermöglicht eine rekursive Platzvergabe, also eine successive Aufteilung des Raumes.



**Abbildung 1: Layoutbaum und Platzaufteilung**

Knoten und Blätter des Baumes vertreten dabei einzelne Bereiche, die in sich weiter unterteilt sein können. Grundlegend ist diese Art der Verteilung sehr effektiv. Zusätzlich dazu wird eine festgelegte Topologie nicht verändert. Wenn man sich vorstellt, daß diese Bereiche später zu Steuerelementen werden, stellt sich die Frage: Wieviel Platz benötigt ein Bereich und wie wird der zur Verfügung stehende Raum aufgeteilt?

### 2.1 MINDESTGRÖßEN UND GRÖßENPROPAGATION

Man kann voraussetzen, daß jedes Steuerelement einen spezifischen Mindestplatzbedarf besitzt. Das ist der Raum, den er mindestens benötigt, um seine Aufgabe noch sinnvoll übermitteln zu können. Beinhaltet nun ein Bereich einen weiteren Bereich (Kindbereich), so folgt daraus, daß sich der Mindestplatzbedarf des Vaterbereichs um den des Kindbereiches erweitert. Verallge-

meint man die Situation, so wird eine in den Blättern des Baumes „entstandene“ Mindestgröße immer weiter in Richtung Wurzel getragen. Anders ausgedrückt: Die Elternbereiche ermitteln ihren Mindestplatzbedarf aus (oder mit) dem Platzbedarf ihrer Kinder. Auf diese Weise kann, nachdem alle Bereiche ihren Mindestplatzbedarf ermittelt haben der Mindestplatzbedarf des kompletten Layouts am Wurzelbereich abgelesen werden. Als Folgeschritt kann man nun den wirklich zur Verfügung stehenden Platz verteilen. Dazu wird quasi umgekehrt der Platz von der Wurzel aus durch den Baum bis in die Blätter propagiert.

Die Baumstruktur allein ist jedoch nicht ausreichend. Zum einen sind eine Reihe wünschenswerter Anordnungen nicht modellierbar und zum anderen fehlt eine Heuristik, die die Vergabe des zu verteilenden Platzes effizient festsetzt.

## 2.2 LOBBY- UND EINENGEN-EIGENSCHAFT

Das Problem bei der Vergabe des Platzes besteht darin, daß alle Bereiche uniform behandelt werden. Um dem entgegenzusteuern, hat jeder Bereich die Möglichkeit anzugeben, ob er bei der Vergabe möglichst viel oder möglichst wenig Platz konsumieren möchte. Diese Zusatzinformation fließt dann in die Größenpropagation mit ein. Ein weiteres Problem tritt auf, wenn benachbarte Bereiche eine bestimmte Position zueinander einhalten sollen (Bsp. Gitterstruktur, Abbildung 2). Die Baumstruktur kann solche Anordnungswünsche nicht unmittelbar berücksichtigen. Deshalb existiert die Möglichkeit, daß sich Bereiche bei der Forderung ihrer Größen untereinander „absprechen“. Diese Kooperation, die während der Mindestgrößenermittlung zum Tragen kommt, wird als die „Lobby-Eigenschaft“ bezeichnet.

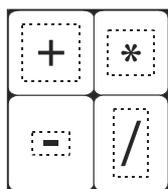


Abbildung 2: Wirkung der Eigenschaft „Lobby“

## 3 STEUERELEMENTE

Bereiche allein sind für die Umsetzung des Layoutkonzeptes brauchbar, aber von Elementen einer Bedienoberfläche noch weit entfernt. Es liegt nahe das Konzept weiterzuentwickeln und die Bereiche Bedienfunktionen übernehmen zu lassen. Dabei geht die Vorstellung nicht von fertig konfigurierten Bedienteilen aus, sondern setzt praktisch eine Stufe vorher an. Die Funktionalität der Bedienung wird soweit zerlegt, daß ein Satz von Grund-

elementen entsteht. Mit Hilfe dieses Baukastens lassen sich dann durch Kombination die verschiedensten Arten von Steuerelementen realisieren. Der Layoutbaum bildet dazu die Grundlage, indem Bausteine wieder Bausteine enthalten können. Durch dieses objektorientierte Sichtweise sind Funktionalitäten vererbbar.

### 3.1 GRUNDBAUSTEINE

Um ein möglichst breites Spektrum von Bedienelementen herstellen zu können, haben sich folgende Bereiche mit folgenden Fähigkeiten als nützlich herausgestellt (Abbildung 3).

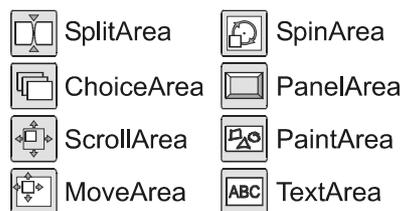


Abbildung 3: Die Grundbausteine

#### 3.1.1 Spalt-Bereich (SplitArea)

Der Spaltbereich hat die Fähigkeit Platz zu verteilen. Damit ist er das Grundelement für alle topologischen Anordnungswünsche. Er teilt den ihm zur Verfügung stehenden Platz entweder horizontal oder vertikal auf, so daß sich seine Kinder nebeneinander oder untereinander anordnen. Er tritt in der Oberfläche nicht direkt in Erscheinung, sondern liefert seinen Beitrag indirekt durch die Platzaufteilung. Der Spaltbereich ist der Bereich, in dem sich die oben angesprochenen Eigenschaften „Lobby“ und „Einengen“ wiederfinden.

#### 3.1.2 Wahl-Bereich (ChoiceArea)

Jede Oberfläche bietet die Möglichkeit, durch Interaktion das Aussehen zu verändern. Damit sind banale Dinge wie z.B. das Selektieren von Listeneinträgen, das Wechseln einer Karteikarte oder auch das Drücken eines Knopfes (Wechsel zwischen gedrückt/losgelassen) gemeint. Betrachtet man die Vorgänge abstrakter, erkennt man einen Zusammenhang: Aus einer Menge von Alternativen wird eine ausgewählt und dargestellt. Diese Eigenschaft bietet der Wahlbereich. Er kann wie der Spaltbereich mehrere Kindbereiche besitzen. Im Gegensatz zum Spaltbereich teilt der Wahlbereich seinen Platz aber nicht auf, sondern er ermöglicht genau einem seiner Kinder den ihm zugeteilten Platz komplett zu Nutzen.

#### 3.1.3 Roll-Bereich (ScrollArea)

Es wird generell das Problem auftauchen, daß Informationen aufgrund von Platzmangel nicht mehr auf der

Oberfläche dargestellt werden können. Beispielsweise wird die Programmliste eines TV-Tuners nicht komplett auf dem darstellenden Gerät Platz finden. Der Einsatz eines Wahlbereichs ist hier denkbar. So könnte durch die Programme oder Listenteile durchgeblättert werden. Besser ist hier hingegen der intuitiven Verfahrensweise des Nutzers entgegenzukommen. Die nächstliegende Möglichkeit lautet daher dem Nutzer nur Auszüge aus der Programmliste zu präsentieren. Allgemein muß es daher einen Bereich geben, der quasi nur eine Teilmenge vom Ganzen darstellt. Der Rollbereich bietet diese Funktionalität. Er definiert eine vollständig neue Lay-outebene, d.h. eine neue Zielfläche mit theoretisch uneingeschränktem Platzangebot. Nun wird quasi durch ein Fenster auf die neue Ebene geblickt, die dadurch immer nur teilweise zusehen ist. Die Ebene kann unter dem Fenster bewegt werden, was es ermöglicht jeden Teil der Ebene in den Sichtfenster zu bekommen. Mit dem Rollbereich hat man die Möglichkeit sich praktisch über die Grenzen der existierenden Auflösung hinwegzusetzen.

### 3.1.4 Schiebe-Bereich (MoveArea)

Genau wie ein Druckknopf zwei Zustände kennt, gibt es Steuerelemente deren Wertebereich nicht booleisch ist. Denkt man z.B. daran, ein Steuerelement "Schieberegler" zusammenzusetzen, hat man einen Wertebereich, der über einem abgeschlossenen Intervall definiert ist. Ebenso verhält es sich bei einer Fortschrittsanzeige (untere/obere Grenze, Stand). Während der Regler eine punktuelle Position widerspiegelt, ist es z.B. beim Füllstandsanzeiger üblich, alle Werte bis hin zum Minimum hervorzuheben. Mit anderen Worten: Im einen Fall handelt es sich um eine Punkt-, im anderen um eine Balken-anzeige. Der Rollbereich aus dem vorangegangenen Abschnitt ermöglichte es, einen großen Bereich nur auszugswise darzustellen. Der Schiebereich bewirkt in gewisser Hinsicht das Gegenteil. Er stellt einen kleinen Bereich innerhalb eines größeren dar. Der größere Bereich, also der umgebende, ist dabei der Schiebereich selbst, der kleinere, der in ihm plazierte wird, ist der bewegbare Kind-Bereich.

### 3.1.5 Dreh-Bereich (SpinArea)

Eines der ältesten Bedienelemente ist der Drehregler. Jedes Stellrad, jeder Wasserhahn, sogar das Steuerrad eines Verkehrsmittels ist grundlegend von dieser Gattung. Aber auch Ausgaben sind frühzeitig durch Drehbewegungen dargestellt worden. Das Dreheiseninstrument ist ein klassisches Beispiel. Die Umsetzung eines Drehreglers auf rein elektronischen Bedienteilen stellt ein Problem dar. Der Grund hierfür liegt in der Drehbewegung an sich. Eine lineare Veränderung wie beispielsweise die eines Schiebereglers ist algorithmisch relativ einfach umzusetzen, wohingegen das Beschreiben einer Kreisbahn das Vorhandensein trigonometrischer Methoden voraus-

setzt. Hinzu kommt, daß sich ein Drehregler in einen Schieberegler verwandeln läßt, insofern dieser einen unteren und oberen Anschlag besitzt. Es gibt aber Situationen, in denen das nicht der Fall ist. Als Beispiel dafür sei das Jog-Stellrad genannt, das sich in der Regel auf Videospiegeln wiederfindet und dort das beliebige Vor- und Rückspulen des Bandes ermöglicht.

Der Drehbereich bietet die Möglichkeit, die Funktionalität eines Drehreglers nachzuempfinden. Damit hat er Ähnlichkeiten zum Schiebereich. Hier wird der Kindbereich aber auf einer Kreisbahn bewegt. Der Drehbereich besitzt folglich eine zweidimensionale Ausrichtung aber nur und einen eindimensionalen Wertebereich.

Gerade die Möglichkeit eine Kreisbahn zu beschreiben, wirft bezüglich der Mindestgrößenermittlung und der Größenpropagation besondere Schwierigkeiten auf.

### 3.1.6 Tafel-Bereich (PanelArea)

Alle bisher besprochenen Bereiche dienen dazu, Platz zu verteilen oder gewisse Aktionen mit den Kindbereichen durchzuführen. Kombinationen dieser Grundbausteine ermöglichen es, diverse Funktionalitäten zur Verfügung zu stellen. Letztlich muß der Platz aber irgendwie ausgefüllt werden. Zu diesem Zweck existieren die nun folgenden Bereiche. Sie visualisieren Steuerelemente und sind damit Teil des "Frontends". Auf das konkrete Aussehen, das Design, haben sie jedoch keinen Einfluß. Der Stil, in dem der Benutzer die Oberfläche präsentiert bekommt, ist Sache des darstellenden Gerätes. Folglich braucht man eine möglichst hardwareunabhängige Beschreibung der grafischen Erscheinungsweise. Letzten Endes bilden die visualisierenden Bereiche die eigentliche Schnittstelle zum Benutzer.

Der Tafelbereich hat die Aufgabe den ihm zustehenden Platz so auszufüllen, daß dem Benutzer eine bestimmte Bedeutung suggeriert wird. Ein konkretes grafisches Aussehen zu erzwingen ist ja aus eben genannten Gründen nicht möglich. Es wird eine abstraktere Form benötigt, die das Aussehen beschreibt, und auf diversen Anzeigegeräten, in unterschiedlichen Auflösungen gleich interpretiert wird. Verallgemeinert: Der Tafelbereich kann zur visuellen Umsetzung verschiedener Sachverhalte herangezogen werden. Die Voraussetzung dafür ist aber, daß ein Katalog mit verschiedenen Erscheinungsformen existiert. Das ist quasi eine Aufzählung gebräuchlichster Nutzungsabsichten. Doch der Anzahl sind Grenzen gesetzt. Je mehr, desto besser relativiert sich spätestens dann, wenn jeder der Ausprägungen eine klare grafische Repräsentation gegenübergestellt werden muß. Dieses Problem verschärft sich enorm, wenn die Hardwareausstattung der Kreativität Grenzen setzt. Die Folge ist, daß man hier einen Kompromiß suchen muß. Der Tafelbereich kann in der aktuellen Version sieben verschiedene Ausprägungen annehmen.

### 3.1.7 Bild-Bereich (PaintArea)

Nichts ist so eingängig wie eine bildliche Darstellung. Selbstverständlichkeit muß eine Oberfläche, die den Anspruch erhebt, eine grafische Bedienkonsole zu sein, diese Möglichkeit wahrnehmen, mehr zu sagen als tausend Worte. Bilder dienen nicht nur der symbolhaften Beschreibung funktionaler Sachverhalte, sondern sind auch als Illustration oder schmückendes Beiwerk. Bis heute ist der Einsatz von Bildern eine problematische Angelegenheit. Das hat damit zu tun, daß sich die unterschiedlichen Voraussetzungen zur grafischen Darstellung gerade bei Bildern besonders hervortun. Für die hier entwickelte Bedienoberfläche ist das Spektrum der Hardwarevoraussetzungen besonders breit. Wo bei allen anderen Bausteinen eine deutliche Trennung zwischen Beschreibung und Darstellung der Komponenten möglich war, wird bei Einsatz von Bildern dieses unabhängige Nebeneinander nicht ganz einzuhalten sein. Der Bildbereich ist dafür da Pixelbilder darzustellen (keine vektororientierten Zeichnungen). Der Bereich bietet eine Reihe von Eigenschaften, ein Bild anzupassen und zu positionieren.

### 3.1.8 Text-Bereich (TextArea)

Gegensatz zu Bildern läßt das geschriebene Wort, wenn man den literarischen Charakter einmal nicht in den Vordergrund stellt, keinen Spielraum für Interpretationen. Eine Bezeichnung, die da lautet "Ja" oder "Nein", sind immer noch die sicherste Methode, eine Bedeutung zu übermitteln. Für Texte ist hier der Textbereich zuständig. Das umfaßt Beschriftungen aller Art aber z.B. auch Zählerstände. Die wichtigste Tatsache ist die Lesbarkeit, bzw. der Zeichensatz. Die Entscheidung darüber fällt natürlich das Darstellende Gerät. Im Textbereich sind, ähnlich wie in der PaintArea nur abstrakte Vorgaben untergebracht, wie z.B. Erscheinungsweise, Ausrichtung oder Festgrößenzeichensatz. Auch der Textbereich kümmert sich um eine Reihe von Problemen. Das Konzept der Größenvergabe baut z.B. darauf auf, daß die Mindestgröße zu einem bestimmten Zeitpunkt feststeht. Ein markanter Unterschied liegt dann darin, ob sich der eingesetzte Text während seiner Lebensdauer ändert oder nicht. Wie jeder der hier besprochenen Bereiche besitzt auch der Textbereich eine individuelle Strategie, die Mindestgrößen weiterzuleiten, und die Einengungseigenschaft vererben.

## 4 NACHRICHTENKONZEPT

Bisher sind nur die statischen Gesichtspunkten der Oberfläche behandelt worden. Was nun noch kurz angesprochen werden soll ist, wie die Oberfläche zum Leben erweckt wird. Die Rede ist vom Konzept der Nachrichten zwischen Bereichen. Der Bus wird dabei als abstraktes Medium angesehen. Es könnte sich dabei also gleichermaßen um ein konkretes Medium, wie z.B. ein „twisted Pair“ oder eine Funkverbindung, aber auch ein über In-

terprozeßkommunikation aufgebautes System von Prozessen handeln. Das hier vorgestellte Konzept setzt auf die Transportschicht (Schicht 4 nach ISO-Schichtenmodell '79) auf.

Es existieren verschiedene Bereichsobjekte mit unterschiedlichen Fähigkeiten und Eigenschaften. Weiterhin existiert ein darstellendes Gerät, auf dem diese Bereiche aktiv arbeiten. Dabei können Bereiche Nachrichten versenden und welche in Empfang nehmen um daraufhin interne Eigenschaften (Zustände) zu ändern.

Eine externe Station überträgt ihre gesamte Bedienoberfläche inklusiv der Nachrichtendefinitionen in Form eines Skriptes an das darstellende Gerät. Vergleichsweise einem Brief mit Rückumschlag ist in (bzw. an) den Bereichen bereits angegeben, welche Nachricht die Station im Falle eines bestimmten Ereignisses zurückerhalten möchte.

### 4.1 ABLAUFBEISPIEL

Das folgende Beispiel erläutert die Wechselwirkung von Nachrichten und Ereignis im System (Abbildung 4):

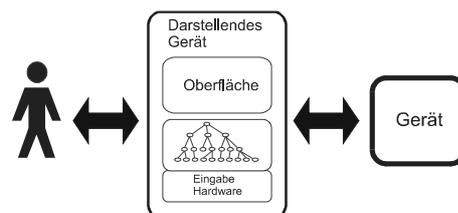


Abbildung 4: Übersicht Interaktion

1. Der Nutzer tätigt eine Eingabe über die Eingabehardware des darstellenden Gerätes. Er löst ein Ereignis aus, indem er z.B. eine Taste auf der Oberfläche betätigt.
2. Daraufhin wird eine Nachricht an das die Taste vertretende Bereichsobjekt im Layoutbaum gesendet.
3. Der Bereich ändert daraufhin seinen Zustand. Der Tastendruck wird z.B. entsprechend visualisiert
4. Danach sendet der Bereich eine Nachricht. Der Empfänger kann dabei entweder ein anderer Bereich oder aber die extern zugeordnete Station sein.
5. Im Empfängerobjekt wird die Ausführung einer Funktion ausgelöst.
6. Die ausgelöste Funktion kann nun ihrerseits wieder weitere Nachrichten auf die Reise schicken. Eine externe Station könnte so z.B. Inhalte ihrer Oberfläche aktualisieren.

Die Topologie des Nachrichtennetzwerks unterliegt keinen Restriktionen. Der Entwickler der Oberfläche hat da-

für zu Sorge tragen, daß beim Fluß der Nachrichten keine Kreise entstehen. Die Nachrichten im System sind konzeptionell neben der Übermittlung von Ereignissen auch für den Transfer weiterer Daten (Text, Bild, Werte) verantwortlich. Es würde den Rahmen des Beitrags sprengen, auf die Verfahrensweise, wie auch zu vielen anderen Details genau einzugehen. Eine ausführliche Darstellung des kompletten Konzeptes mitsamt einer leistungsstarken Entwicklungsumgebung findet sich in [1].

## 5 LITERATUR

1. **Grasbon, Hundeloh:** Generische grafische Benutzerschnittstelle für automatisierbare vernetzte Räumlichkeiten, Diplomarbeit am Lehrstuhl 1 des Fachbereichs Informatik der Universität Dortmund, 3.1999
2. **Cornell, Gary, Horstmann, Cay S.:** JAVA bis ins Detail: Das Buch für Experten, Verlag Heinz Heise, 1997.
3. **Grady Booch:** Objektorientierte Analyse und Design, Addison-Wesley, Bonn u.a., 1994
4. **DIN 66234 part 8:** Grundsätze ergonomischer Dialoggestaltung, Beuth-Verlag, 1988.
3. **Görner, Claus:** Vorgehenssystematik zum Prototyping graphisch-interaktiver Audio-, Video-Schnittstellen, Springer Verlag, Berlin, 1994.
4. **Echelon Co.:** LonTalk Protocol Specification, Version 3.0, <http://www.echelon.com>, www, 1994.
5. **Martin Schleuder:** Expertensysteme und neuronale Netze im intelligenten Wohnhaus der Zukunft, Metropolis-Verlag, Marburg 1994.
6. **Home Systems Consortium/European Home Systems Association:** Home Systems Specification Release 1.1, European Home Systems Association, Eindhoven 1992.
7. **LonMark Interoperability Association:** LonMark Application Layer Interoperability Guidelines, Version 3.0, <http://www.echelon.com>, www, 1996.
8. **W3:** HTML 4.0 Specification, <http://www.w3.org/TR/REC-html40-971218>, www, 1997



# Überlegungen zu einer Taxonomie für Hypermedia

*Gisbert Dittrich*

Tel: 0231/755 6444

dittrich@cs.uni-dortmund.de

## ZUSAMMENFASSUNG

Unter Hypermedia verstehen wir die Verbindung nicht-linearer Dokumentstrukturen mit der Verwendung heterogener Medienobjekte wie Text, Graphik, Audio, Video und Animation. Zur Zeit ist die Situation im Bereich von Hypermedia geprägt durch Beiträge zu sehr unterschiedlichen Themen unter unterschiedlichsten Aspekten.

In diesem Beitrag will ich den Versuch unternehmen, wesentliche Bestimmungsstücke (und Beziehungen zwischen diesen) für die Behandlung der Beiträge zu Hypermedia zu finden, um damit die Beiträge etwas systematisieren zu können.

Erste (einfache) Beispiele von Aktivitäten sollen in diesem Schema beschrieben werden.

STICHWÖRTER: Taxonomie, Klassifikation, Hypermedia.

## EINLEITUNG

Nach dem „Duden“ von 1989 bezeichnet Taxonomie [griech: - taxis: das Anordnen - nomos: Gesetz] in der Botanik bzw. der Zoologie einen „Zweig der Systematik, der sich mit dem praktischen Vorgehen bei der Klassifizierung der Lebewesen in systematische Kategorien befaßt.“

In Analogie dazu soll das endgültige Ziel der Überlegungen, mit denen ich in diesem Beitrag beginnen will, darin bestehen, eine systematische Klassifikation der wesentlichen Begriffe und Aktivitäten im Umfeld von Hypermedia zu erhalten.

## 1 ZUM BEGRIFF „HYPERMEDIA-DOKUMENT“

Unter „Hypermedia“ verstehen wir, wie inzwischen wohl weitgehend üblich, eine Zusammenziehung aus „Hypertext“ und „Multimedia“. Hypertext behandelt nichtlinear strukturierte Dokumente (ursprünglich nur Textdokumente), während man sich in Multimedia mit heterogenen Informationseinheiten in Dokumenten beschäftigt, was meint, daß man neben Text und Graphik auch Audio, Video und Animation mit einbezieht.

Zudem ist anzumerken, daß unter Multimedia auch vieles verstanden wird, was sich „nur“ mit der

Behandlung von einer Sorte von komplexen Medienobjekten wie z. B. Video beschäftigt. Weiterhin ist es inzwischen weitgehender Sprachgebrauch, das, was hier als "Hypermedia" eingeführt wurde, allein mit "Multimedia" zu bezeichnen.

Was die Architektur resp. die Modellierung von Hypermediadokumenten betrifft, so existieren inzwischen diverse Vorschläge, wie etwa die von Dexter ([1], [3]), Lange[4] und Tochtermann [5]. Ich ziehe den Ansatz von Tochtermann zur Definition des Begriffs "Hypermediadokument" vor. Eine grobe Veranschaulichung der dazu verwendeten Grundbegriffe kann man in Figur 1 (nächste Seite) finden.

Diese Modellierung verwendet als Beschreibungsmittel VDM [6]. Eine Probe für diese Darstellung sei hier angefügt:

Document\_Object ::

s-dok\_basis: Document\_Basis

s-dok\_graph: Document\_Graph

s-dok\_struct: [Document\_Structures]

s-dok\_attribute: [Attributes]

Diese Architektur verwendet als Bestimmungsstücke für Dokumente als Basiselemente Medienobjekte und zur Modellierung der Verbindung der Präsentationen der Informationseinheiten zusammengesetzte Knoten, Unter-/Teildokumente sowie Sichten. Durch Verwendung weiterer Attribute lassen sich noch nicht berücksichtigte Eigenschaften wie z. B. räumliche Verteilung modellieren. Dies führt direkt zu einer Klassifikation, die sich abstützt auf:

- verwendete Medienobjekte (Document\_Basis)
- Vernetzungs-/graphische Struktur (Document\_Graph)
- verwendete Strukturierungen (zusammengesetzte Knoten, Unterdokumente sowie Sichten).

## 2 ZUR KLASSIFIKATION VON HYPERMEDIA

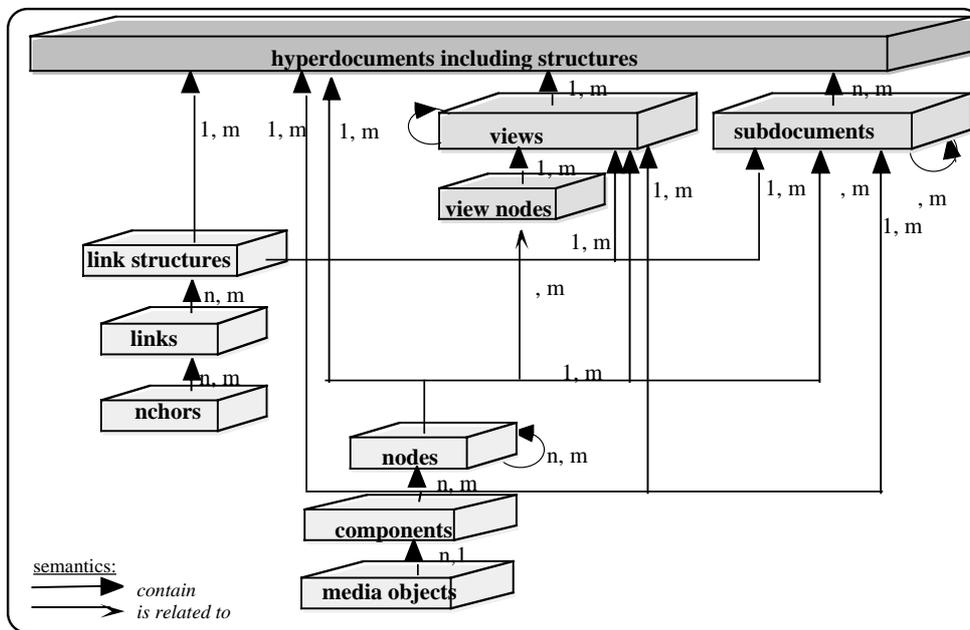
Die Frage ist, ob dadurch eine Klassifikation des Verwendungsbereichs Hypermedia ermöglicht wird, wie er

für die Praxis verwendbar ist. Wenn z.B. Tagungen aus-  
geschrieben werden, hat man es immer wieder mit dieser  
Problematik zu tun. Daher wollen wir uns einmal  
(auszugsweise) CfPs für solche Tagungen ansehen.

Schauen wir uns den CfP von Hypertext 2000 etwa

Theories, models, architectures, standards and frame-  
works

Hypermedia user interfaces (link marking, composition,  
browsing, consistency of open hypermedia interfaces,  
representing traditional databases)



Figur 1. Architektur von Hyperdokumenten nach Tochtermann [5]

(auszugsweise) an:

CfP für Hypertext 2000: Topics (not limited to)

World Wide Web applications and extensions

Hypertext's effects on communities

Collaborative hypermedia technology and applications

Hypertext writing - fiction, scholarship and technical writing

Empirical studies and hypermedia evaluation

Hypermedia in education and training

Hypertext rhetoric and criticism

Hypermedia and time - narratives and storyboarding

Innovative hypertexts and novel uses of hypertext and hypermedia

Integration and open hypermedia architectures

Large-scale distributed hypermedia

Structuring hypertext documents for reading and retrieval

Techniques for generating, recognizing, navigating and visualizing structure

Hypermedia infrastructure technologies (persistent object stores, link services, hyperbases, distributed databases, information retrieval, versioning, access control)

Object-oriented hypermedia (data models, distributed architectures, component-based architectures, application design and re-use)

Hypermedia middleware and components

Workplace deployment and industrial applications of hypermedia

Hypermedia authoring

Hypermedia for the Internet

Dies Beispiel zeigt: Nein, allein Aspekte der Architektur von Hypermediadokumenten sind ersichtlich nicht ausreichend für eine Klassifikation. Mindestens auch Aspekte von zu verwendenden Werkzeugen, beteiligten Menschen, Anwendungsbereichen, und angestrebten Zielen spielen offenbar eine Rolle.

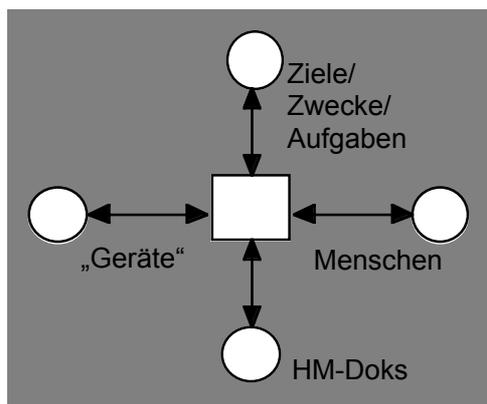
Daher bin ich hier daran interessiert, ein Beziehungsgefüge zwischen Grundgrößen zu erzeugen, das die Konzepte von und Aktivitäten im Bereich Hypermedia beschreiben lassen. Dies sollte möglichst konsistent und redundanzfrei geschehen.

Wie kann das durchgeführt werden? Ich halte das objektorientierte Vorgehen (auch hier) für adäquat. Dazu haben wir grundlegende Aspekte für den Anwendungsbereich (hier: Hypermedia) und dazu angemessene Eigenschaften und Funktionen zu identifizieren ebenso wie Beziehungen zwischen ihnen. Ich verwende für diesen ersten Ansatz nur Umgangssprache als Darstellungsmittel.

Um sich hierzu einer Lösung zu nähern, erscheint es mir wichtig, die "richtigen" Fragen dazu zu stellen und zu beantworten. Meiner Meinung nach sind wesentliche Beispiele solcher Fragen folgende:

- Was ist/wie modelliert/ wie beschreibt man Hypermedia?
- Was sind/wie modelliert/ wie beschreibt man Hypermedia-Dokumente?
- Welche Menschen haben damit zu tun? Welche Rollen spielen sie dabei?
- Welche Unterstützung durch Geräte/Werkzeuge (Hardware wie Software) ist nötig oder hilfreich?
- Welche Ziele/Zwecke/Aufgaben verfolgt man damit?
- Welche Voraussetzungen müssen (zwingend) erfüllt werden, damit Ziele/Zwecke/Aufgaben erreicht werden können?
- Welche Anwendungsgebiete gibt es?
- Zudem sind grundsätzlich Fragen zur Qualitätsverbesserung von Interesse.

Hier soll ein erster Versuch einer Beantwortung der Fragen gegeben werden. Spätere Versionen können modifiziert und stärker ausgearbeitet werden. Ich hoffe, daß das grundsätzliche Vorgehen klar und der Grundansatz sich als tragfähig erweisen wird.



Figur 2. Grundbegriffe und Beziehungen

Zuallererst ist als zentraler Grundbegriff der des Hypermedia-Dokuments zu nennen. Zudem haben wir uns den Menschen zuzuwenden, die mit diesen Dokumenten durch den Einsatz geeigneter Werkzeuge zu tun haben.

Hierfür sind jeweils geeignete Eigenschaften zu identifizieren, um die Grundgrößen wie auch Aktivitäten in Verbindung mit Hypermedia zu klassifizieren. Dies wird hier nur durch die Angabe von Schlagwörtern ausgeführt.

### • Hypermedia-Dokumente

- werden modelliert nach dem Ansatz von

- ◆ Dexter ◆ Tochtermann ◆ andere ◆ ....

- sind "strukturiert" in Form von

- ◆ "logisch" (etwa wie im Tochtermann-Ansatz beschrieben:)

- verwenden Medienobjekte
- zusammengesetzte Knoten
- Unterdokumente
- Sichten

- ◆ räumlich : nicht verteilt/verteilt

- ◆ zeitlich: Versionen

(→ wichtig für Erzeugungsprozeß)

- tragen bei zum Ziel/ haben den Zweck/erfüllen die Aufgabe

- werden manipuliert durch:

- ◆ das Werkzeug
- ◆ von dem Menschen/dem Team/ ....
- ◆ Operationen

### Operationen an Dokumenten

- Zur Erstellung

- ◆ (Triviales) Dok erzeugen
- ◆ ändern (i.a. mit vielen Parametern)
- ◆ löschen/vernichten
- ◆ duplizieren
- ◆ Hilfen zum Information Retrieval erstellen:

- *Statisch:*
  - Inhaltsverzeichnis(se)
  - Indexe
  - Touren

- *Dynamisch:*
  - Lokale Browser-Darstellung
  - Historie

- Dynamische Touren erstellen

- Volltextsuche

- Suchen unter Ausnutzung der Dokumentstruktur

- Zur Nutzung

- ◆ "lesen"     ◆ browsen
- ◆ Information Retrieval

- Inhaltsverzeichnis   • Index   • Historie

- "Technische" Operationen"

- ◆ übertragen   ◆ speichern   ◆ .....

• **Beteiligte Menschen**

- unterliegen "Randbedingungen"

- ◆ physiologisch     ◆ psychologisch
- ◆ ethisch             ◆ ästhetisch
- ◆ .....

- treten auf

- ◆ **einzel**     ◆ **im Team**
- ◆ **in "Gemeinschaft"**

- in der Rolle als ....

- ◆ Autor
- ◆ Nutzer
  - Leser   • Informationsbeschaffer
  - Präsentierer   • Lehrer   • Lerner
  - Vermittler (z.B. Verkäufer/Käufer)
- ◆ "Provider"
  - technischer Hilfen   • Content-Provider

- haben Ziele

- manipulieren/ nutzen Werkzeuge

• **Geräte/Werkzeuge**

- manipulieren/nutzen Dokumente/Dokumentteile

- bieten Funktionalitäten

- unterstützen Methoden

- brauchen Ressourcen:

• **Ressourcen**

- sind: ◆ Hardware:

- Computer             • Speichermedien
- Transfermedien     • .....

◆ Software:

- Betriebssystem     • .....

- unterstützen die Aufgaben ....

- ◆ Speichern     ◆ Übertragen   ◆ .....

• **Ziele/Zweck/Aufgabe**

- inhaltlich (Was will man damit erreichen?)

◆ Informieren

- Lehren             • Werben   • .....

◆ Sich informieren

- Lernen             • Informationsbeschaffung

• ....

◆ Kommunizieren   ◆ Kooperieren   ◆ Kaufen (?)

- "technische Ziele": (noch präziser formulieren !)

◆ überhaupt die Aufgabe erfüllen können

....◆ dann: effizienter, d.h.

- schneller         • billiger
- komfortabler (z. B. plug and play)

◆ ausgeführt an konkreten Aufgaben wie

• Speichern

*Medium:* - Papier - Platte - Band

*Zugriffsart:* - sequentiell - random - ....

• Übertragen

*Träger:*

- Kabel (*twisted Pair, Koax, Glasfaser*)

- "Luft"

*Art der Übertragung*

- "Logisch"

- unidirektional   • bidirektional

- topologisch

- point to point (1-1),(1 -n)

- broadcast (m-n))

- zeitlich

- asynchron   • synchron

- isochron (z.B. für Videokonferenz)

*verwendete Organisationsmittel*

- Protokolle

- Sicherheitsaspekte   - ....

• Präsentieren

elektronisch     auf Papier   ....

So weit also der erste Versuch, grundlegende Größen und dafür wichtige Eigenschaften zu spezifizieren, um damit einen tragfähigen Hintergrund zu erzeugen, der es erlaubt, Aktivitäten im Umfeld von Hypermedia zu klas-

sifizieren.

Im allgemeinen hat man, um eine Eigenschaft oder Aktivität zu spezifizieren, konkrete Werte für einige der Attribute auszuwählen. Dazu ist essentiell: Im allgemeinen müssen nur wenige Attribute mit Werten belegt werden. Die meisten können unspezifiziert bleiben.

Es lassen sich unterschiedliche Arten von Klassifikationen ausmachen. Dies soll exemplarisch illustriert werden.

#### **Spezialfälle der Klassifikation:**

##### • **“(stark-)lokale” Spezifikation**

Das soll heißen: Nur ein einziges (oder doch nur sehr wenige) Attribut(e) sind festzulegen.

Beispiel: “Die Behandlung von Videos”

Dazu spezifiziere man folgendermaßen:

In: “*HM-Dokumente*”

darin: “sind ”strukturiert” in Form von “logisch” “

darin: “verwenden Medienobjekte“: Video

(evtl. weitere Attributwerte, die implizit festgehalten werden.)

##### • **“(schwach-)lokale” Spezifikation**

Beispiel: “Video-online für Videokonferenzen”

Spezifiziere :

1. “Video” wie bisher

2. Videokonferenz über Eigenschaften wie:

- Menschen: treten auf: in Gemeinschaft:  $\geq 2$  Teilnehmer  
 - Werkzeuge:brauchen Ressourcen: .....: Transfermedien: Netz (Müßte noch weiter ausgeführt werden.)

- Ziele/...: “technische Ziele”: ausgeführt an... : Übertragen: Art der Übertragung: zeitlich: isochron

evtl. weitere Attributwerte festlegen.

##### • **“(schwach-)globale” Spezifikation**

Beispiel: “Vorlesung Desktop-Video”

(Wird hier nicht vollständig ausgeführt, sondern nur im wesentlichen angerissen.)

Spezifiziere :

1. “Video” wie bisher

2. Ziel: Erstellen von Videos

3. Verwendete Ressourcen

HW: Rechner mit Mindestanforderungen, Schnittkarte, schnelle Platte, (Videorecorder)

4. ....

Mit diesem Ansatz lassen sich offenbar die meisten Einträge in CfPs von einschlägigen Konferenzen klassifizieren. Bitte versuchen Sie sich an eigenen Beispielen. Eine Bemerkung scheint mir zum Schluß noch wichtig. Es gibt offenbar mehrere voneinander unabhängige zentrale Grundbegriffe, die es nicht opportun erscheinen lassen, von nur einem einzigen Punkt aus auszugehen. Damit verbietet sich auch eine natürliche Hierarchisierung, d. h. die Beschreibung durch ein “Inhaltsverzeichnis” allein.

Nach meiner Erfahrung ist das die Situation, mit der man es in allen Behandlungen von komplexen Realitäten zu tun hat.

### **3 AUSBLICK**

In diesem Papier haben wir das Problem aufgeworfen und einen Ansatz angerissen, eine Beschreibung von für Hypermedia relevanten Begriffen zu erzeugen. Wir versuchten, diesen Ansatz konsistent und redundanzfrei zu erreichen. Mit ersten einfachen Beispielen haben wir gezeigt, wie dieser Ansatz funktioniert.

Dieses Papier ist zu sehen als ein Einstiegspunkt, um grundlegende Begriffe, charakterisiert durch Attribute und Relationen, zu finden, um einen Wissenschaftsbereich klassifizieren zu können. Als Beispiel haben wir hier Hypermedia gewählt. Eine Behandlung anderer Bereiche ist sicherlich in analoger Weise möglich.

Dieser Ansatz ist sicher noch weiter auszubauen durch Erweiterungen, Verfeinerungen, evtl. auch durch Modifikationen.

Ich erwarte, daß eine geeignete graphische Repräsentation der gesamten Beschreibung als semantisches Netz sich als sehr hilfreich erweisen dürfte.

### **4 LITERATUR**

1. Halasz, F.-Schwartz, M. „The Dexter Hypertext Reference Model“ in: [2], p. 95-134
2. Moline, J.- Benigni, D.- Baronas, J.: *Proceedings of the Hypertext Standardization Workshop 1990*, NIST Special Publication 500 – 178, Gaithersburg, National Institute of Standards and Technology
3. Halasz, F.-Schwartz, M. “The Dexter Hypertext Reference Model“ in: *Communications of the ACM*, Febr. 1994, Vol. 37,Nr. 2, p. 30-39
4. Lange, D.B. “A Formal Model of Hypertext” in: [2], p. 145 – 166, 1990
5. Tochtermann, K. “*Ein Modell für Hypermedia*”, Verlag Shaker 1995
6. Jones, C.B. “*Systematic Software Development using VDM*” Prentice Hall 1990



# Der Verweisbegriff in verteilten Hyperdokumenten – Begriffsbestimmung und Formalisierungsansätze

*Jörg Westbomke*

Tel: 0231/755 6326

Westbomke@ls1.cs.uni-dortmund.de

## ZUSAMMENFASSUNG

Verteilte Hypermediadokumente sind heute ein alltäglich genutztes Medium. Vernetzte WWW-Seiten, per Streaming verteilte Videosequenzen oder Videokonferenzen sind Anwendungen, die zumindest im Prototypenstatus vorhanden sind. Während viele dieser Anwendungen bereits implementiert sind bzw. gegenwärtig werden, ist die Frage nach Konzeptbildungen oder gar nach formalen Modellbildungen für diese neuen Phänomene weitgehend unbeantwortet. In diesem Artikel wird eine spezielle Fragestellung im Kontext der verteilten Hyperdokumente betrachtet. Für Verweise wird untersucht, ob eine Anpassung der bestehenden Konzepte von Nöten ist und wie diese aussehen könnte.

**STICHWÖRTER:** Hypermedia, räumliche Verteilung, XML, Verweise, Links

## 1 EINLEITUNG

Die Verbreitung des Internets und damit verbunden die Vernetzung von immer mehr Rechnern ist auch für den Bereich Hypermedia nicht ohne Auswirkungen geblieben. So ist heutzutage die Nutzung des World Wide Webs fast selbstverständlich geworden. Vor diesem Hintergrund soll in diesem Artikel untersucht werden, ob die bis dato gültigen Konzepte weiterhin voll Bestand haben, oder ob sich Anpassungen an die neue Situation ergeben müssen.

Der Bereich Hypermedia, als Kunstwort für die Bereiche Hypertext und Multimedia, ist u. a. durch die Verwendung von Verweisen, sogenannten Links, gekennzeichnet. Dieses Konzept soll im weiteren näher betrachtet werden. Dieses ist sicherlich nur ein Teilaspekt bei der Betrachtung von verteilten Hypermediadokumenten<sup>1</sup>, doch sind Verweise beispielsweise das zentrale Konzept zur Verteilung von in HTML kodierten Hyperdokumenten. Da HTML aber die z. Z. häufigste Beschreibungsart für Web-basierte Dokumente darstellt, sei dies Anlaß genug, sich detailliert mit Verweisen auseinanderzusetzen. Es ist dabei natürlich klar, daß die

---

<sup>1</sup> Die Begriffe Hypermediadokument und Hyperdokument werden in diesem Artikel synonym verwendet.

Betrachtung von verteilten Hyperdokumenten nicht auf Verweise beschränkt werden kann und das entsprechende Untersuchungen für die anderen Konzepte folgen müssen.

## 2 GRUNDLAGEN

Bevor auf die besonderen Charakteristiken von Verweisen in verteilten Hypermediadokumenten eingegangen wird, sollen die Grundlagen für den nicht verteilten Fall erarbeitet werden. Dazu wird zuerst der Begriff des Verweises im Kontext von Hyperdokumenten besprochen.

Die Frage nach der Bestimmung von Hypermediadokumenten ist zugleich die Frage nach theoretischen Modellbildungen. In diesem Zusammenhang ist insbesondere das Modell von Klaus Tochtermann [11] zu nennen. Dieses formale Modell ist die Grundlage für die weiteren Betrachtungen. Neben dem Tochtermann-Modell existieren mit dem Dexter Reference Model ([7], [8]) oder der Hypertext Abstract Machine (HAM, [3]) noch weitere Ansätze, die hier nicht weiter diskutiert werden. [12] enthält Argumentationsketten zur Auswahl des Modells nach Klaus Tochtermann.

### 2.1 DAS MODELL NACH TOCHTERMANN

Dieses Modell für Hypermedia wurde 1995 im Rahmen einer Dissertation entwickelt [11]. Diese Modellbildung zeichnet sich insbesondere durch die Integration von Strukturierungen für Hyperdokumente in das Modell aus. Als Spezifikationssprache wurde die Vienna Development Method (VDM) gewählt.

Das Referenzmodell gliedert sich in zwei Bereiche: die Basiskonzepte und die Strukturierungskonzepte.

Bei den Basiskonzepten unterscheidet Tochtermann zwischen der Speicherebene, der Ebene der Hypermedia-konzepte und der Benutzungsschnittstelle. Auf der Speicherebene werden die Knoteninhalte und auch Verweisinformationen gesichert und verwaltet. Knoteninhalte können Texte, Grafiken, Audio- oder Videosequenzen sein. Diese werden als Medienobjekte bezeichnet. Neben der reinen Datenhaltung werden auf dieser Ebene auch Operationen spezifiziert, die den operationalen Umgang

mit den Medienobjekten beschreiben. Diese Operationen spezifizieren im wesentlichen den Zugriff auf die Medienobjekte. Auf der Ebene der Hypermediakonzepte werden elementare Größen eines Hypermediadokumentes beschrieben. Diese Konzepte, wie Knoten, Anker, Verweise, Hypermediadokumente, usw. setzen dabei die Objekte der Speicherebene in Beziehung zueinander und bilden so die Struktur des Hypermediadokumentes. Auf der dritten Ebene, der Benutzungsschnittstelle, werden die Interaktionsmöglichkeiten des Benutzers mit dem Hypermediasystem beschrieben. Dazu werden Operationen angegeben, die die Interaktionsmöglichkeiten des Benutzers mit dem System modellieren.

Aufbauend auf den Basiskonzepten werden Strukturierungskonzepte angegeben. Strukturierungsmöglichkeiten werden dabei als ein zentraler Punkt des Referenzmodelles angenommen. In der Arbeit werden dazu Strukturierungsformen entwickelt und formalisiert. Ein grundlegendes Konzept ist der zusammengesetzte Knoten. Dieser zeichnet sich dadurch aus, daß sein Knoteninhalte nicht nur durch Komponenten<sup>2</sup> identifizierte Medienobjekte enthalten kann, sondern daß Knoten selbst wieder Teil eines Knotens sein können. Neben dieser grundlegenden Strukturierungsmöglichkeit werden auch weitere Strukturierungskonzepte entwickelt. Dazu werden Sichten, Verweisstrukturen und Dokumentordner eingeführt und formalisiert. Analog zu den zusammengesetzten Knoten werden Verweisstrukturen als Strukturierung für Verweise eingeführt. Verweisstrukturen bezeichnen dabei eine Menge von Verweisen über den Knoten eines Hypermediadokumentes. Dokumentordner stellen Teildokumente des Hypermediadokumentes dar. Eine Besonderheit eines Dokumentordners ist sein *Rand*, der Informationen über die ein- und ausgehenden Verweise des Dokumentordners enthält. Sichten sind ein weiteres wesentliches Strukturierungskonzept. Mit Hilfe von Sichten ist es beispielsweise möglich, Benutzergruppen, in Abhängigkeit von den konkreten Anforderungen, abschließend die relevanten Anteile des Hypermediadokumentes zugänglich zu machen. Die Sichten sind bei Tochtermann so spezifiziert, daß Sichten über Sichten ausdrücklich erlaubt sind.

Für die folgende Arbeit wird das Modell nach Tochtermann als Basis gewählt, da dieses Modell durchgängig formalisiert dargestellt ist und auch die angegebenen Strukturierungen als zentral angenommen werden. Wie schon erwähnt, ist das Tochtermann-Modell in der Spezifikationsprache VDM angegeben. Diese Sprache ist wenig bis gar nicht geeignet, um damit konkrete Hypermediadokumente anzugeben. Aus diesem Grund wurden zuerst die Konzepte des Tochtermann-Modells in eine

---

<sup>2</sup> Es sei darauf hingewiesen, daß der Begriff Komponente an dieser Stelle mit anderer Bedeutung benutzt wird als im Dexter-Modell.

geeignete XML-Spezifikation überführt. Eine detaillierte Begründung der Wahl von XML als Spezifikationsmethode und der Darstellung des Ergebnisses der Transformation ist in [12] zu finden.

## 2.2 HYPERDOKUMENTDARSTELLUNG IN XML

Mit der Extensible Markup Language ist seit 1998 ein neuer W3C-Standard (World Wide Web Consortium) vorhanden. XML ist als echte Teilmenge zu SGML (Standard Generalized Markup Language) eine Spezifikationsprache, die insbesondere im Bereich Internetanwendungen aktuell starke Aufmerksamkeit erzeugt. XML (vgl. [2], [4]) ist eine Meta-Sprache, mit der es möglich ist, Dokumentklassen zu beschreiben. Mit XML wird dabei eine sog. DTD (Document Typ Definition) angegeben, die die Menge der möglichen Auszeichnungen in dem konkreten Dokument, sowie deren Abhängigkeiten untereinander, bestimmt. Jedes XML-Dokument besteht also aus zwei Teilen: zum einen aus der Dokumenttyp-Definition und zum anderen aus der Dokumentinstanz. Die Dokumenttyp-Definition stellt dabei eine Art „Regelmenge“ dar, die die Dokumentinstanz einhalten muß, um ein gültiges Dokument zu sein. Die das Dokument verarbeitende Instanz, zumeist Parser bzw. XML-Applikation genannt, hat die Konsistenz von DTD und Instanz zu überprüfen. Wie bereits erwähnt, gehört XML zu der Klasse der Auszeichnungssprachen, d. h. daß der Inhalt einer Dokumentinstanz durch Auszeichnungen in Form von Start- und Endzeichen strukturiert ist bzw. werden kann. Dazu sind in der DTD Elementdefinitionen anzugeben. Ein Element ist jeweils durch ein Start- und Endzeichen begrenzt. Zwischen diesen Markierungen ist der Inhalt kodiert. Die DTD legt dabei in Form eines Inhaltsmodells fest, welcher Inhalt für die einzelnen Elemente erlaubt ist.

Die XML-Spezifikation 1.0 gibt neben Grammatikregeln auch Einschränkungen in Form von sog. Wohlgeformtheits-(WGB) und Gültigkeitsbedingungen (GKB) (englisch: well-formedness constraints (WFC) and validity constraints (VC)) zur Beschreibung explizit an.

Wie schon erwähnt, erfährt XML gegenwärtig große Aufmerksamkeit in der Community. So wird derzeit an der Standardisierung von Verweisen innerhalb und zwischen Dokumenten (XPointer und XLink [10]) gearbeitet. Auch die Standardisierung einer Stilsprache zu XML (XSL) ist in Vorbereitung. Mit XSL ist es dann möglich, die Visualisierung eines XML-Dokumentes festzulegen. Selbst die Angabe der DTD zu HTML soll in Zukunft wohl nicht mehr mittels SGML, sondern mit XML erfolgen.

In diesem Papier fehlt leider die Möglichkeit, XML (vgl. dazu [4]) genauer darstellen zu können. Darum wird im folgenden davon ausgegangen, daß XML, zumindest in Grundzügen, bekannt ist. Daher werden XML-Beschreibungselemente ohne detaillierte Erläuterung verwendet.

### 3 VERTEILTE HYPERMEDIADOKUMENTE

Nachdem durch das Kapitel 2 die Grundlagen erläutert wurden, was unter einem Hypermediadokument verstanden werden soll und wie dieses in XML dargestellt werden kann, soll nun der Aspekt der Verteiltheit in den Vordergrund rücken. Rein von der Begrifflichkeit her wären einige Formen der Verteilung von Hypermediadokumenten denkbar. Grob könnte man zwischen folgenden Aspekten unterscheiden:

- Zeitliche Verteilung (Versionierung),
- Verteilte Erstellung (kooperative Erstellung) und
- Räumliche Verteilung.

Aspekte der Versionierung von Hyperdokumenten werden in der Dissertationsschrift von A. Haake [5] angesprochen und sollen hier nicht weiter vertieft werden. Die Behandlung von Autorensystemen zur kooperativen Erstellung von Hypermediadokumenten wird in [6] behandelt. Dieser Aspekt der Verteiltheit soll an dieser Stelle jedoch ebenfalls nicht weiter vertieft werden.

In dieser Arbeit soll näher auf den Aspekt der räumlichen Verteilung eingegangen werden. Als erstes gilt es zu klären, wie der Aspekt Raum im Kontext eines Hyperdokumentes definiert sein könnte. Zu diesem Zweck sei die folgende Abbildung gegeben.

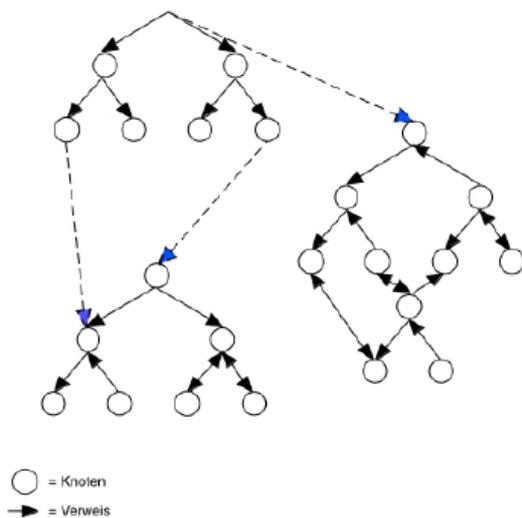


Abbildung 1: Struktur eines Hyperdokumentes

Die Abbildung 1 zeigt die schematische Darstellung eines Hyperdokumentes mit Knoten und Verweisen. Gemäß der Darstellung handelt es sich um ein Hyperdokument. Es wäre jedoch auch denkbar, daß es sich um drei Hypermediadokumente handeln könnte, die durch Verweise miteinander verbunden sind. Die durchbrochen gezeichneten Verweise stellen in diesem Fall Verweise dar, die nicht innerhalb von Dokumenten verlaufen, sondern Verbindungen zwischen Hyperdokumente realisie-

ren. Anhand dieses kleinen Beispiels kann man leicht erkennen, daß es sinnvoll ist, mindestens zwei verschiedene Kategorien von Verweisen zu unterscheiden: Verweise innerhalb von Dokumenten und Verweise zwischen Dokumenten.

Damit erschließt sich auch ein wenig der Begriff der räumlichen Verteilung. Im folgenden wird von einem räumlich verteilten Dokument gesprochen, wenn die ein Dokument charakterisierenden Hypermediaobjekte nicht in einer physikalischen Einheit zusammengefaßt sind. Gemäß dem Tochtermann-Modell ist ein Hypermediadokument gekennzeichnet durch die Dokumentbasis, den Dokumentgraph und evtl. Strukturierungen. An einigen Beispielen soll verdeutlicht werden, was darunter zu verstehen ist. Eine Macromedia Director Anwendung, die auf einer CD gespeichert ist, wird als nicht verteilt betrachtet. Ist die gleiche Director Anwendung aber so programmiert, daß sie Daten aus dem Internet in Form von Shockwave-Dateien o. ä. herunterlädt, so ist sie räumlich verteilt. WWW-Seiten die mittels der Frame-Technologien HTML-Dateien von mehreren Servern miteinander „vereinen“ werden ebenfalls als räumlich verteilt betrachtet, während WWW-Sites bestehend aus HTML-Dateien, die auf einem Server residieren, nicht als verteilt<sup>3</sup> zu bezeichnen sind.

In der weiteren Arbeit wird unterstellt, daß räumlich verteilte Dokumente geprägt sind durch die besondere Verwendung von Verweisen. Daher wird in den restlichen Kapiteln, detailliert der Verweisbegriff besprochen.

#### 3.1 ERWEITETER VERWEISBEGRIFF

In der Arbeit von Tochtermann wurden Verweise im wesentlichen nach dem Ursprung und dem Ziel des Verweises kategorisiert. Weiterhin wurde unterschieden, ob es sich um uni- oder bi-direktionale Verweise handelte. Weitere Kategorisierungskriterien waren, ob der Verweis statisch oder dynamisch definiert ist, bzw. ob es sich um einen operationalen Verweis handelte oder nicht. Verweise können weiterhin dadurch ausgezeichnet sein, daß mit ihnen Attribute assoziiert sind. (Für eine detaillierte Erläuterung des Verweisbegriffes bei Tochtermann siehe [11]).

Ein interessanter Aspekt von Verweisen, der mit dem Tochtermann Modell nicht zu modellieren ist, findet sich in der Auszeichnungssprache HTML wieder. Dort existiert der *Image*-Befehl.

```

```

Abbildung 2: Der Image-Befehl in HTML

<sup>3</sup> Im ganzen Text wird kurz von verteilten Dokumenten gesprochen. Wenn nicht anders angegeben, sind damit immer räumlich verteilte Dokumente gemeint.

Dieser Befehl weist den Browser an, das durch den bezeichneten Verweis bestimmte (evtl. entfernte) Medienobjekt zu laden und an der bezeichneten Stelle im Dokument darzustellen. Es wäre eine spannende Frage zu diskutieren, ob dies überhaupt noch ein Verweis im Tochtermann'sche Sinne wäre, da dieser fordert, daß alle Meidenobjekte eines Hyperdokumentes in dessen Dokumentbasis gespeichert sein müssen. Festzuhalten gilt es jedoch, das sich diese Art von Verweisen deutlich von den bisher diskutierten Verweisen unterscheidet. Bislang wurde mit Verweisen stets eine Navigationsfunktion verbunden, das bedeutet, daß beim Verfolgen eines Verweises stets zu dem Ziel „gesprungen“ und der Zielpunkt dargestellt wurde. Der Image-Befehl von HTML enthält durch das `src`-Attribut auch einen Verweis, welcher jedoch nicht der Navigation dient, sondern welcher die Struktur des Hyperdokumentes beschreibt. Ein weiterer Unterschied dieser Art von Verweisen, ist der Zeitpunkt des Verfolgens des Verweises. Bei den bisher angenommenen Verweisen wird dem Verweis durch explizite Auswahl gefolgt. D. h., es wird auf den Ursprungsanker mit der Maus geklickt, bzw. der Ursprungsanker wird auf eine andere Art und Weise selektiert. Nicht so beim `IMG`-Befehl. Diesem Verweis folgt der Browser automatisch, sobald er ihn bei der Bearbeitung des Dokumentes erreicht. Der Zeitpunkt des Verfolgens stellt also bei verteilten Hyperdokumenten ein weiteres wichtiges Klassifikationsmerkmal für Verweise in Hyperdokumenten dar.

Ein weiteres bei Tochtermann nicht behandeltes Klassifikationskriterium für Verweise ist der Darstellungskontext von Verweisen. Bei Hypercard von Apple [1] bedeutet das Verfolgen eines Verweises stets, daß eine neue Karte verdeckt dabei in der Darstellung komplett die alte Karte. In modernen Dokumenten, z. B. in Macromedia Authorware Anwendungen oder auch dem Online-Hilfesystem zur Büroapplikation Word existieren Verweise, die bei Aktivierung ein neues Fenster, über dem alten Fenster, erzeugen, so daß sowohl der Ursprungsanker, wie auch der Zielanker gleichzeitig sichtbar sind. Dieses Phänomen soll ebenfalls Berücksichtigung finden, wenn im nächsten Abschnitt ein Formalisierungsansatz für Verweise in verteilten Hyperdokumenten aufgezeigt wird.

### 3.2 FORMALISIERUNGSANSATZ FÜR VERWEISE IN VERTEILTEN HYPERDOKUMENTEN

In dem vorhergehenden Abschnitt wurde aufgezeigt welche Klassifikationskriterien für Verweise in verteilten Hyperdokumenten existieren. Dieser Abschnitt soll dazu dienen diese Betrachtungen aufzugreifen, zu strukturieren und zu formalisieren.

Bei der Formalisierung der Verweise wird dabei im wesentlichen auf den Verweisbegriff von Tochtermann zu-

rückgegriffen. Dieser sieht insbesondere die optionale Angabe von Attributen vor. Konkrete Inkarnationen von Attributen werden benutzt werden, um die neuen Klassifikationen von Verweisen auszudrücken. So daß der hier vorgestellte Verweisbegriff im wesentlichen nicht im Widerspruch zu Tochtermann steht, sondern als Konkretisierung desgleichen aufzufassen ist.

Als Formalisierungsmittel werden XML und Spezifikationen im Umfeld zum Einsatz kommen. Die Motivation von XML als Spezifikationsmethode wurde bereits in Abschnitt 2.2 diskutiert und wird daher hier nicht weiter ausgeführt. Eine detaillierte Beschreibung der Formulierung des Tochtermann Modells in XML kann in [12] nachgelesen werden.

Die in Abschnitt 3.1 angeführten Klassifikationskriterien für Verweise lassen sich unterteilen in Aspekte, die für alle Hyperdokumente gelten und in Aspekte, die speziell auf räumlich verteilte Dokumente zutreffen. Diese beiden Aspekte werden im folgenden vorgestellt. Als Basis für die weiteren Betrachtungen wird die in [12] angegebene XML-Spezifikation zugrunde gelegt.

```
<!ELEMENT link (link_object) >
<!ATTLIST link link_ID ID #REQUIRED >
<!ELEMENT link_object (origin, destination,
    direction, attributes?, link_operations?) >
<!ELEMENT origin (anchors) >
<!ELEMENT destination (anchors|link_function)>
<!ELEMENT link_function (anchor, anchor)* >
<!ELEMENT direction />
<!ATTLIST direction direction (UNIDIRECTIONAL |
    BIDIRECTIONAL) #REQUIRED>
<!ELEMENT link_operations (link_operation+)>
<!ELEMENT link_operation (op_domain, op_range)>
```

#### Abbildung 3: Spezifikation eines Verweises in XML

Von dieser Spezifikation ausgehend, gelangt man zu folgender erweiterter Spezifikation von Verweisen.

```
<!ELEMENT link (link_object) >
<!ATTLIST link link_id ID #REQUIRED
    show CDATA #FIXED ("new")
    actuate CDATA #FIXED "user" >
<!ELEMENT source (anchors | ext_anchor+) >
<!ELEMENT destination ((anchors | ext_anchor+)
    | link_function) >
<!ELEMENT ext_anchor (anchor_region?, attributes?) >
<!ATTLIST ext_anchor xml:link CDATA #FIXED
    "extended"
    href CDATA #REQUIRED
    role CDATA #FIXED "external anchor" >
```

[GKB: href darf nur auf HMObjekte vom Typ `hyperdocument`, `node` oder `component` verweisen.]

#### Abbildung 4: Spezifikation eines erweiterten Verweises in XML

Die Erweiterung des Verweisbegriffes, welche in Abbildung 4 dargestellt ist, ist im wesentlichen durch Hinzunahme von zusätzlichen Attributen realisiert. So wurden

dem Element *link* die Attribute *show* und *actuate* hinzugefügt. Diese Attribute wurden der XLink-Spezifikation folgend aufgenommen. Die Attribute sind dabei gegenüber der XLink-Spezifikation leicht modifiziert, sie können jeweils nur einen festen Wert annehmen. Diese Attribute weisen einen Browser, der XLink unterstützt, an das Ziel des Verweises in einem neuen Kontext darzustellen. Dem Verweis kann nur durch eine Benutzeraktion initiiert gefolgt werden. Der Browser wird dem Verweis nie automatisch folgen. Weiterhin wurde das Element *destination*, das das Ziel des Verweises bezeichnet, verändert. Neben den *anchor*- und *link\_function*-Elementen kann nun auch ein *ext\_anchor* Ziel eines Verweises sein. Ein *ext\_anchor* ist ein Ziel in einem entfernten Hyperdokument, das durch das *href*-Attribut bezeichnet ist. Durch diese Änderung wird die Unterscheidung von internen und externen Verweisen, wie zu Beginn von Kapitel 3 motiviert, in den Formalismus eingebracht.

Diese bisher beschriebenen Erweiterungen des Verweisbegriffes beziehen sich aber nicht speziell auf räumlich verteilte Dokumente, sondern haben für alle Hyperdokumente Gültigkeit. Wie schon erläutert, können in verteilten Dokumenten auch Verweise vorkommen, die nicht Navigationsaufgaben erfüllen, sondern die die Verteilung des Dokumentes beschreiben. Solche Verweise sollen im weiteren als Referenzen bezeichnet werden. Der Name wurde gewählt, da bei dieser Art von Verweisen nicht der Verweis an sich im Vordergrund steht, sondern das durch den Verweis bezeichnete Zielobjekt. Der Verweis ist also nur die technische Realisierung, um das räumlich entfernte Zielobjekt in das Hyperdokument zu integrieren.

```
<!ELEMENT reference EMPTY>
<!ATTLIST reference xml:link CDATA #FIXED
"extended"
    href CDATA #REQUIRED
    show CDATA #FIXED "embed"
    actuate CDATA #FIXED "auto"
    role CDATA #FIXED "reference">
```

**Abbildung 5: Spezifikation einer Referenz in XML**

Abbildung 5 zeigt die Spezifikation einer Referenz mittels XML. Bei dieser Spezifikation, wird eine spezielle Ausprägung eines XLink-Verweises benutzt. Die Referenz wird als leeres Element deklariert. Das entscheidende sind die Attribute, die zu diesem Element angegeben werden. So verweist das *href* Attribut auf eine URI [9]. Durch diese URI ist das referenzierte Zielobjekt eindeutig identifiziert. Die Attribute *actuate* und *show* mit den festen Wertbelegungen "auto" und "embed" weisen den XLink-fähigen Browser an, auf das durch *href* bezeichnete Zielobjekt automatisch zuzugreifen und es in dem aktuellen Kontext darzustellen. Das *role*-Attribut erfüllt keine besondere Funktion, es dient alleinig zu Charakterisierung des XLink-Verweises als Referenz.

Durch Abbildung 5 wurde spezifiziert, was unter einer Referenz verstanden werden soll. Nun bleibt noch anzugeben, wie diese Referenz in Hypermediadokumenten eingesetzt werden kann. So ohne weiteres ist dies mit dem Tochtermann-Ansatz nicht vereinbar, denn bei Tochtermann wird gefordert, daß alle Medienobjekte, die in einem Hyperdokument vorkommen auch in der Dokumentbasis des Hyperdokumentes enthalten sind. Dies ist für die Behandlung von Referenzen ein Problem, denn entweder erweitert man das Verständnis von der Dokumentbasis, so daß diese auch Referenzen auf Medienobjekte enthalten kann, oder man hebt die Forderung auf, daß alle Medienobjekte eines Hyperdokumentes in der Dokumentbasis gespeichert werden müssen. In dem zweiten Fall gilt es jedoch zu beantworten, was dann kennzeichnend für ein Hyperdokument ist. Die Dokumentbasis, der Dokumentgraph und die Dokumentstrukturierungen können es dann offensichtlich nicht mehr alleinig sein. An der Konzeption, daß ein Dokument durch die Dokumentbasis, den Dokumentgraphen und die Strukturierungen gekennzeichnet ist, soll festgehalten werden, darum wird im folgenden vorgestellt, wie der Begriff der Dokumentbasis erweitert werden kann, so daß er vereinbar ist mit Referenzen.

Bisher waren alle Medienobjekte in der Dokumentbasis vereinigt. Nach der Einführung von Referenzen ist es nun auch möglich Medienobjekte aus der Dokumentbasis von anderen Dokumenten in das eigene Dokument zu integrieren. D. h. die Dokumentbasis muß nun neben Medienobjekten auch Referenzen auf Medienobjekte enthalten können. Dieser Sachverhalt drückt sich in der folgenden XML-Spezifikation aus.

```
<!ELEMENT document_base (reference |
    media_object)*>
[GKB: Das href-Attribut des Elementes reference
verweist auf HMObjekt vom Typ media_object.]
```

**Abbildung 6: Spezifikation der Dokumentbasis**

Die Gültigkeitsbedingung sichert dabei zu, daß das *href*-Attribut nur auf Elemente vom Typ *media\_object* verweist.

## 4 ZUSAMMENFASSUNG

Die vorhergehenden Kapitel haben aufgezeigt, daß die zunehmende Vernetzung von Rechnern/ -systemen auch Auswirkungen für den Bereich Hypermedia haben. In diesem Artikel wurde ein erster Aspekt von verteilten Hyperdokumenten angegangen, indem ein erweiterter Verweisbegriff für räumlich verteilte Dokumente angegeben wurde. Weiterhin wurde aufgezeigt, daß sich dieser Verweisbegriff als echte Erweiterung formulieren ließ, so daß bestehende formale Modelle nicht revidiert, sondern nur erweitert werden müssen.

## 5 LITERATUR

1. **Apple Computer Inc.:** <http://www.apple.com/hypercard/>, [Stand: 13.2.00].
2. **T. Bray, T., Paoli, J., Sperberg-McQueen, C. M. (Eds.):** Extensible Markup Language (XML) 1.0, W3C Recommendation, <http://www.w3c.org/TR/1998/REC-xml-19980210.html>, [Stand: 13.2.99].
3. **Campbell, B., Goodman, J. M.:** HAM: A General Purpose Hypertext Abstract Machine, in: Communications of the ACM, Bd. 31, Nr. 7, Juli 1988, S. 856-861.
4. **Goldfarb, C. F., Prescod, P.:** XML - Handbuch, Prentice Hall (Informatik), 1999.
5. **Haake, A.:** Versionenunterstützung für strukturierte Hyperdokumente im elektronischen Publizieren, GMD-Bericht Nr. 275, R. Oldenbourg Verlag, 1996.
6. **Haake, J.:** Autorensysteme für die kooperative Erstellung von Hyperdokumenten, GMD-Bericht Nr. 279, R. Oldenbourg Verlag, 1995.
7. **Halasz, F., Schwartz M.:** The Dexter Hypertext Reference Model, in: Proceedings of the Hypertext Standardization Workshop 1990, S.95-134.
8. **Halasz, F., Schwartz M.:** The Dexter Hypertext Reference Model, in: Communication of the ACM, Februar 1994, Bd. 37, Nr. 2, S. 30-39.
9. **IETF (Internet Engineering Task Force):** RFC 1808: Relative Uniform Resource Locators, <http://www.w3.org/Addressing/rfc1808.txt>, [Stand: 16.2.00].
10. **Maler, E., DeRose S.:** XML Linking Language (XLink), W3C Recommendation, <http://www.w3c.org/TR/WD-xlink-19980303>, [Stand: 13.2.99].
11. **Tochtermann, K.:** Ein Modell für Hypermedia - Beschreibung und integrierte Formalisierung wesentlicher Hypermediakonzepte, Dissertation, Verlag Shaker, Aachen, 1995.
12. **Westbomke, J., Dittrich, G.:** Ein Ansatz zur formalisierten Beschreibung von Hypermediadokumenten in XML, Forschungsbericht Nr. 708, Universität Dortmund, Fachbereich Informatik, 1999.

# Web-Auftritt mit Links ? – Einige Anmerkungen –

*Norbert Jesse*

Tel: 0231/755 6221

jesse@ls1.cs.uni-dortmund.de

## ZUSAMMENFASSUNG

Die Präsenz im WWW ist heutzutage für nahezu jedes Unternehmen eine Selbstverständlichkeit. Nicht selbstverständlich ist die solide, zielgerichtete Planung des Auftritts. Wer die nötige Sorgfalt vermissen lässt, der zahlt mit unnötigen Kosten oder einer unzureichenden, gar nachteiligen Wirkung. Dieser Beitrag skizziert einige Aspekte der Webseiten-Gestaltung, die sich dem Autor bei Betrachtung des Web-Auftritts einiger universitärer Einheiten aufgedrängt haben.

## 1 HOW WIDE THE WEB

Das Internet verändert unsere Gesellschaft – das ist bekannt! Von der Geschwindigkeit, mit der dies geschieht, sind wir gleichwohl überrascht. Einige quantitative Angaben geben aus makroökonomischer wie betrieblicher Sicht Anhaltspunkte für das exponentielle Wachstum der Internet-Wirtschaft:

- während im Dezember 1997 320 Mio. Seiten gezählt wurden, waren es 1999 bereits mehr als 800 Mio.,
- ca. 180 Mio. Bilder sind abrufbar,
- die Zahl der Web-Nutzer beläuft sich in 1999 auf 130 Mio., im Jahr 2003 werden es etwa 350 Mio. Menschen sein.

Ziel der Web-Präsenz muss sein, von der richtigen (!) Klientel (schnell) gefunden und „gebookmarkt“ zu werden. Hier steckt das Problem: die Top 11 der Suchmaschinen decken zunehmend weniger Web-Seiten ab. Waren es 1997 etwa 60%, so sind es gegenwärtig nur etwa 42 %. Mehr als 50% der Web-Seiten sind folglich nahezu unsichtbar! Auch ist zu berücksichtigen, daß US-Seiten weitaus besser erreicht werden.

Die Konsequenzen sind offenkundig: Nur einer von 28 sog. Page Views führt zu dem gewünschten Suchergebnis (3,5%) und bei 130 Mio. Web-Nutzern bedeutet 1% an Fehlversuchen immerhin 1,3 Mio. frustrierte Sucher.

Etwa 301 Mrd. \$ werden gegenwärtig im Zusammenhang mit dem Internet jährlich umgesetzt, davon 102 Mrd. unmittelbar über den Internet-Handel. Zum Vergleich hierzu: die Energiewirtschaft setzt 223 Mrd., die Automobilindustrie 350 Mrd. \$ um. Immerhin 1,2 Mio. Arbeitsplätze sind Internet-/IT-basiert. Der durchschnittliche Umsatz pro Beschäftigter beläuft sich auf 250 Tsd. \$ und liegt damit deutlich über der Wertschöpfung in der Automobilindustrie mit 160 Tsd. \$.

Nahezu schwindelerregend sind die Steigerungen im Business-to-Business- und Business-to-Consumer-Bereich. Lagen die Umsätze 1997 bei 2 Mrd., so werden sie im Jahre 2000 bei 70 Mrd. und im Jahre 2003 aller Voraussicht nach bei 644 Mrd. US-Dollar liegen. Dies entspricht ab dem Jahre 2000 einer jährlichen Verdoppelung.

Was bedeutet dies nun für das einzelne Unternehmen? Auch hier mögen einige Zahlen die Größenordnung des Problems umreißen:

- Für einen umfangreichen eCommerce-Auftritt müssen mehr als 2 Mio. DM veranschlagt werden.
- 10% der Kosten entfallen auf das Einrichten der Web-Seiten, 90 % auf die Pflege.
- Ein Kostentreiber ist die Verbindung zwischen dem Internetshop und dem Backend (kritische Unternehmensdatenbank).
- Auf die ca. 400 000 Beschäftigten im Siemens Konzern entfallen etwa 100 000 Web-Seiten.
- Bei den Arbeitsämtern sind ca. 500 bis 600 Autoren für deren Web-Seiten tätig.
- Die Gestaltung von Web-Seiten ist zentraler Teil der Steuerung der Corporate Identity und bedarf eines Content-Managements, das Komponenten umfasst wie die zentrale Layoutverwaltung, Workflow-Planung, zugriffsgerechte Verwaltung, Export-/Importschnittstellen, Linkmanagement, Dokumentenmanagement u. a. m.

## 2 ERFOLG IST MESSBAR

Erfolg ist messbar, die Frage aber lautet: Wie? Klassische Return-on-Investment-Berechnungen sind sicherlich ein erster Schritt zur Beantwortung der Frage, was die Internet-Investition bringt. Ausreichend sind sie gewöhnlich nicht, da allzu oft wohldefinierte Ziele und Kenngrößen fehlen. Die Fokussierung auf unmittelbar monetäre bzw. quantitative Ziele wie „Umsatz erhöhen“, „Zeitaufwand verringern“ und „Kosten senken“ sind keinesfalls hinreichend. Bei der Erfolgsabschätzung ist auf das gesamte Spektrum der quantitativ und qualitativ definierten Ziele des Web-Auftritts abzustellen.

## 3 TYPEN DES WEB-AUFTRITTS

Es lassen sich vier verschiedene (Ideal-)Typen des Web-Auftritts unterscheiden, für die je spezifische Wege der Erfolgsmessungen besprochen werden müssen:

1. Prestigeauftritt: der Web-Auftritt als repräsentatives Firmenschild
2. Anzeigefunktion: Erschließen neuer Kunden und Partner
3. Web als Treffpunkt: Erhöhung der Kundenbindung
4. Warenautomat: Das Web als Hilfsmittel zur Vereinfachung von Produkt- und Informationstransaktionen

## 4 EXKURS: DIE ROLLE DER KUNDENBINDUNG

Die Erhöhung der Kundenbindung ist ein zentrales Marketingziel auch im eBusiness. Diese Stärkung der Bindung ergibt sich keinesfalls „nebenbei“, vielmehr ist ein intelligentes Konzept für den Web-Auftritt erforderlich. Bausteine für ein solches Konzept können sein:

- Mehrwert-Informationen,
- Personalisierung,
- intelligente Kommunikation,
- Nutzer-generierte Inhalte,
- Treueprogramme und
- eine hohe Ästhetik.

## 5 RETURN-ON-INVESTMENT ANBEISPIELEN

a) Berechnungsschema:

### Annahme

Kosten pro Mitarbeiter/h	60 DM
Produktive Zeit (ohne Internet)	89 %

### Einsparungen

Produktivitätssteigerung	0.8 %
Bei 1.840 h/Jahr	14,72 h/Pers.
Bei 60 DM, reale Einsp./Jahr	883,20 DM
bei 500 Mitarbeitern	441.600 DM

### Kosten

Anschaffung HW/SW	50.000 DM
Betreuung	200.000 DM

### ROI-Berechnung

Einsparung	441.600 DM
Kosten	- 250.000 DM
Vorteil (1 Jahr)	= 190.400 DM

b) Praktische Ansätze (Stichworte):

### Beispiel Direkt Anlage Bank

Zahl der Web-Transaktionen bei Internet-Ordersystemen

Stabilität der Kosten bei steigender Kundenzahl

### Beispiel Motorola

Früher: rd. 1000 Journalisten pro Monat mit ca. 10 Pressemitteilungen versorgt (per Post)

heute: per email und via Web-Server => 2000 DM/Monat eingespart

### Beispiel Isar Amper Werke

Kundenbindung - Vergleich mit anderen Maßnahmen

### Beispiel Reemtsma

mit Data-Mining präzise Mailings starten

### Beispiel Jungheinrich Konzern

Neukunden, Ausschreibung, Stellenanzeige mit spezieller Rufnummer

## 6 WEB-CONTENT-MANAGEMENT

Aufgaben des Web-Contentmanagements sind:

- die Begrenzung des Wildwuchses im Intranet,
- der Aufbau eines transparenten Informationsflusses im Unternehmen,
- die Reduzierung des Aufwands für das Publizieren im Intranet.

Unerlässlich ist der Einsatz standardisierter Werkzeuge mit offenen Schnittstellen zur komfortablen Einbindung vorhandener unternehmensspezifischer Applikationen.

## 7 DESIGN-REGELN FÜR DEN ENTWURF EINER WEB-SITE

Die in der Anlage aufgeführten Screen-Shots verdeutlichen nachdrücklich den Unterschied zwischen „luftigen“ und textlastigen, doch eher langweiligen Seiten. Hier sollen nur einige Stichworte genannt sein, die bei der Gestaltung von Web-Seiten zu bedenken sind:

Die Begriffe Visual- oder Screendesign umfassen als Oberbegriff das Interface-, das Site- und das Pagedesign:

### a) Regeln für das Interfacedesign

- Einzelseiten als geschlossene Einheit darstellen
- Wer spricht ? Logo, Adreßzeile, ... verwenden
- präzise und knapp formulieren
- klare Navigation (einheitlich, farbig, ...)
- übersichtlich strukturieren
- in sich konsistente Seiten bilden
- Standardsprungmarken auf jeder Seite setzen
- wenige Aktionen, um jede Seite zu erreichen.

### b) Regeln für das Sitedesign

- Logische Informationseinheiten bilden
- Hierarchie der Wichtigkeit und Bedeutung
- obere Hierarchie: max. 4 - 6 Themen
- Strukturplan (Metaphern) entwickeln: Buch, Baum, Gitter, Netz.

### c) Regeln für das Pagedesigns

- Keine Form, keine Schrift, keine Farbe wird alleine wahrgenommen
- Anmutungsqualität: Dynamik, Aggressivität, ... beachten
- Grafikdesign: visuelles Info-management mit Layout, Gestaltungsraster, Typographie, Illustration, Farben
- Blick des Betrachters führen: von top left corner
- gleichmäßige Ausrichtung der Elemente beruhigt den Seitenaufbau und lenkt auf Inhalte
- Platz „zum Atmen“ lassen.

## 8 SORGENKIND TYPOGRAPHIE

Der Text ist und bleibt das wichtigste Medium für die Kommunikation von Inhalten. Folgende Ratschläge sollten von jedem Web-Gestalter beachtet werden:

- gute Lesbarkeit: dunkler Text auf hellem Grund (kein Papierweiß, Kontrast)
- serifenlose Schriften besser lesbar
- linksbündiger Flattersatz
- sparsame Auszeichnungen (fett, groß, ...)
- keine Kapitalchen, Versalien oder Sperrungen
- kurze Textblöcke, Ränder sind Gestaltungselement
- Tabellen als Gestaltungsraster, Frames zur Gliederung und
- übersichtliche Navigation.

## 9 CHECKLISTE FÜR DAS WEB-DESIGN

Zum Abschluß dieser kurzen Abhandlung seien einige Empfehlungen gegeben, die bei dem Entwurf und der fortlaufenden Überprüfung des Web-Auftritts beachtet werden sollten:

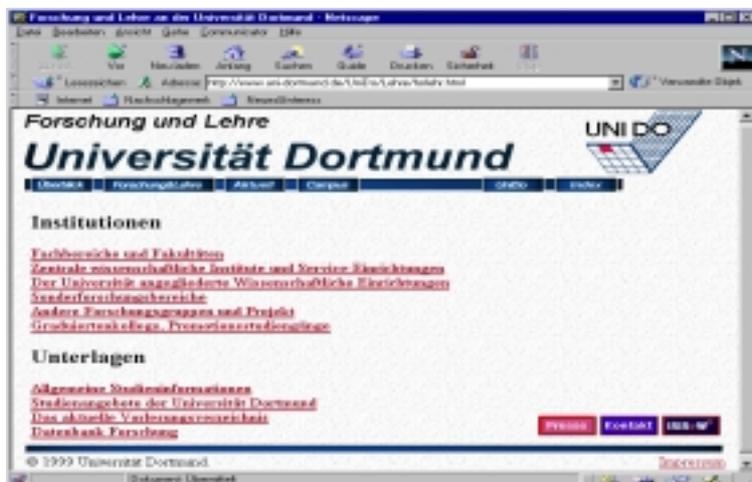
- Ziele quantitativ meßbar formulieren
  - neue Kontakte
  - Transaktionskosten
  - Transaktionsgeschwindigkeit
  - Materialkosten
  - Support-Kosten
  - Umsatz
  - Marktanteil

N. Jesse

- geographische Reichweite
- Zielkontrollen durchführen
- Besucherverhalten regelmäßig kontrollieren
- qualitative Bewertung: Meinungen von Mitarbeitern, Kunden, Fachleuten einholen
- Email-Feedback systematisch auswerten
- Relaunch alle 2 Jahre
- erfolglose Seiten schnell aktualisieren
- alle Ausgaben präzise festhalten
- Wettbewerb beobachten
- Publishing-Tools für die Pflege verwenden.

## 10 LITERATUR

1. **The Most** Comprehensive, In-depth Report of the Global Internet Ever Published, , 13. 7. 1999
2. **Ralf Lankau:** Webdesign und Webpublishing, München und Wien, 1998
3. **The Internet** Economy Indicators, <http://www.internetindicators.com>, 15. 6. 1999
4. **How Wide** the Web ?, [about.com](http://www.about.com), 12.7.99
5. **Erfolg** ist meßbar, in: Information Week, Nr. 4, 18. 2. 1999







# Wissensbasierte Segmentierung mit Hilfe aktiver Konturen

Jens Hiltner

Tel: 0231 / 755 6364

jens.hiltner@cs.uni-dortmund.de

## ZUSAMMENFASSUNG

Segmentierung stellt eine der schwierigsten Probleme in der heutigen Bildverarbeitung dar. Aktive Konturen wurden erstmals Ende der 80er Jahre vorgestellt. Sie stellen eine Form der modellbasierten Segmentierung dar. Obwohl verschiedene Überarbeitungen der Grundform existieren, sind die sogenannten *Snakes* sehr empfindlich gegenüber verrauschten Bildern. Dieser Schwachstelle soll mit Hilfe neuer Kriterien für die Energiebewertung entgegengewirkt werden.

**STICHWÖRTER:** Aktive Konturmodelle, Snakes, Segmentierung, Wissensbasierte Bildverarbeitung

## 1 EINFÜHRUNG

Die Bildverarbeitungsprozesskette mit der Aufgabe der Bildanalyse umfaßt vier Teilschritte, die *Bildvorverarbeitung*, die *Segmentierung*, die *Beschreibung* und schließlich die *Erkennung* (vgl. Abbildung 1). Die Segmentierung stellt dabei eines der schwierigsten Teile in dieser Prozesskette dar. Unterschieden werden mehrere Verfahren [14]:

- Regionenorientierte Segmentierung
- Kantenorientierte Segmentierung
- Modellbasierte Segmentierung

Nachdem der Begriff der Segmentierung erläutert worden ist, wird in dieser Arbeit ein modellbasiertes Verfahren vorgestellt und um Bewertungsmöglichkeiten für die *Güte der Segmentierung* erweitert, die Wissen über die gesuchten Objekte berücksichtigen. Dieses Wissen ist gerade bei medizinischen Bilddaten, die unterschiedliche Arten von Unsicherheiten beinhalten, für eine gute Segmentierung notwendig. Aufgrund der Unsicherheiten, die sich in den Variabilitäten der Objekte ausdrücken, finden unscharfe Beschreibungsmöglichkeiten Anwendung.

## 2 BILDSEGMENTIERUNG

Bei der Segmentierung wird das zu analysierende Bild in Teile oder Objekte zerlegt. Diese werden *Segmente* oder *Regionen* genannt. Eine Differenzierung zwischen Segment und Region wie in [16] wird in dieser Arbeit nicht vorgenommen. Auch wird häufig der Begriff Objekt verwendet, eine Unterscheidung zwischen Objekt und Segment wird nur dann vorgenommen, wenn dieses notwendig ist und ein Objekt aus mehreren Segmenten besteht.

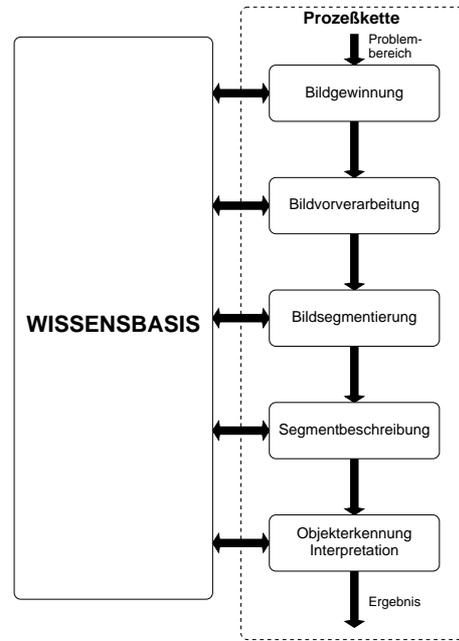


Abbildung 1: Grundlegende Schritte eines digitalen Bildanalyse-Systems.

Die Tiefe der Zerlegung ist problemabhängig, das heißt, daß die Zerlegung beendet werden kann, sobald das bzw. die gesuchten Objekte vom Rest des Bildes getrennt wurden [6]. Formal kann eine Segmentierung wie folgt definiert werden [23]:

**Definition 1.1 (Segmentierung)** Unter *Segmentierung* eines diskreten Bildsignals  $I(x, y)$  mit  $\{0 \leq x \leq M - 1$  und  $0 \leq y \leq N - 1\}$  wird die Unterteilung von  $I$  in  $k$  disjunkte, nicht-leere Teilmengen  $I_1, \dots, I_k$  verstanden, wobei ein zu definierendes Einheitlichkeitskriterium  $E$  wie folgt gilt:

1.  $\bigcup_{i=1}^k I_i = I$
2.  $I_i$  ist zusammenhängend  $\forall i \in \{1, \dots, k\}$
3.  $\forall I_i, i \in \{1, \dots, k\}$  ist das Einheitlichkeitskriterium  $E(I_i)$  erfüllt
4.  $\forall I_i, I_j, i, j \in \{1, \dots, k\}, i \neq j$  ist das Einheitlichkeitskriterium  $E(I_i \cup I_j)$  nicht erfüllt  $\square$

Nachdem das Bild segmentiert wurde, entsprechen die Bildpunkte nicht mehr den Grauwerten des Bildes. Stattdessen ist in den Bildpunkten das Segment, zu dem dieser Bildpunkt gehört, kodiert.

Es gibt eine große Anzahl von *Segmentierungsverfahren* (vgl. [6, 7, 14]), die sich neben den *Schwellenwertverfahren* jedoch generell in *kantenorientierte*, *regionenorientierte* und *modellbasierte* Verfahren einteilen lassen [6]. Welches bzw. welche der Verfahren angewendet werden können, ist abhängig von der Problemstellung und dem Bildmaterial.

Die Segmentierung eines Bildes in Regionen erfolgt nach Eigenschaften, die die Regionen besitzen müssen. Die zu einer Region gehörenden Bildpunkte sind – bezüglich eines zuvor definierten Ähnlichkeitskriteriums – untereinander ähnlich, während sie sich von den anderen Regionen bezüglich dieses Kriteriums unterscheiden.

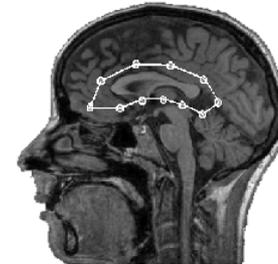
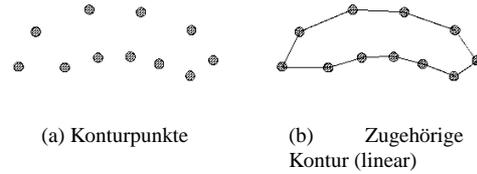
### 3 GRUNDLAGEN AKTIVER KONTURMODELLE

Kass, Witkin und Terzopoulos [15] haben ein modellbasiertes Verfahren vorgestellt, welches mit Hilfe einer vorgegebenen Kontur (der sogenannten *Initialkontur*) das gesuchte Objekt segmentieren soll. Dies geschieht, indem die Kontur durch eine *Energiegleichung* bewertet und diese minimiert wird. Die Bezeichnung Energiegleichung ist der Physik entliehen und beschreibt verschiedene Eigenschaften der Kontur, die mittels einer Menge von *Konturpunkten* repräsentiert wird (vgl. Abbildung 2). Interpoliert wird zwischen den Bildpunkten bei [15, 21] mit B-Splines, auch eine lineare Interpolation wird häufig verwendet. Neben den Bezeichnungen *Snakes* und *aktive Konturmodelle* finden sich auch noch *deformierbare Schablonen* oder *dynamische Konturen*. Die Minimierung der Konturenergie bedeutet eine Lagemodifikation der einzelnen Konturpunkte, die zu einem „besseren“ Energiezustand führt. Die Positionen der Konturpunkte sind allerdings nur auf einem diskreten Bildraster erlaubt.

Eine Kontur wird über ihre Länge  $s$  mittels den Punkten  $v(s) = (x(s), y(s))$  beschrieben. Eine diskrete Darstellung erfolgt durch  $v_i = (x_i, y_i)$ . Wichtig ist, daß eine Kontur immer *geschlossen* ist.

Die Energie  $E_{snake}$  einer Kontur setzt sich aus der *internen* und der *externen* Energie zusammen, letztere wiederum aus der *Bild-Energie* und aus zusätzlichen Bedingungen (der sogenannten *Constraint-Energie*).

$$\begin{aligned}
 E_{snake} &= \int_0^1 E_{snake}(v(s)) ds & (1) \\
 &= \int_0^1 E_{int}(v(s)) + E_{image}(v(s)) \\
 &\quad + E_{constr}(v(s)) ds
 \end{aligned}$$



(c) Beispieldatensatz mit eingebledeter Kontur

Abbildung 2: Exemplarische Darstellung der Konturpunkte und der linear interpolierten Kontur.

Im diskreten Fall ist die Energie durch die Summen der Teilenergien bestimmt (Gleichung (2)).

$$E_{snake} = \sum_{i=1}^n E_{int}(v_i) + E_{image}(v_i) + E_{constr}(v_i) \quad (2)$$

#### 3.1 INTERNE ENERGIE

Die interne Energie ist einzig abhängig von der Kontur selbst, nicht vom Bildinhalt (bzw. den Grauwerten). In Anlehnung an [15] wird die Schreibweise wie folgt übernommen:

$$v_s = \frac{\partial v}{\partial s} \quad (3)$$

$$v_{ss} = \frac{\partial^2 v}{\partial s^2} \quad (4)$$

Dann berechnet sich die interne Energie aus:

$$E_{intern} = \frac{\alpha(s) \cdot |v_s(s)|^2 + \beta(s) \cdot |v_{ss}(s)|^2}{2} \quad (5)$$

Hierbei sind  $\alpha$  und  $\beta$  Gewichte, welche die Form der Kontur steuern sollen. Eine Approximation der Ableitungen erfolgt durch finite Ausdrücke [2]:

$$v_s(s_i) \approx v'_i = \frac{v_i - v_{i-1}}{2h} \quad (6)$$

$$v_{ss}(s_i) \approx v''_i = \frac{v_{i+1} - 2v_i + v_{i-1}}{h^2} \quad (7)$$

Die Minimierung der internen Kontur bzgl. der ersten Ableitung bewirkt, daß sich die Kontur wie ein „Gummiband“ zusammenzieht (vgl. Gleichung (6) und Abbildung 3). Der Term wird umso kleiner, je geringer der Abstand zwischen zwei Konturpunkten ist.



Abbildung 3: Gummiband-Wirkung der ersten Ableitung.

$$E_{edge} = |\nabla I(x,y)|^2 \quad (10)$$

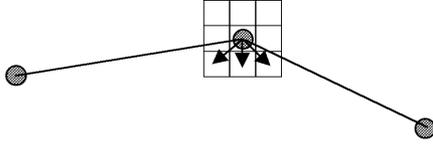


Abbildung 4: Wirkung einer gespannten gebogenen Platte durch die zweite Ableitung.

$$E_{edge'} = |G_\sigma * \nabla^2 I(x,y)|^2 \quad (11)$$

Falls der Konturpunkte an eine ‘‘Kante stoßen‘‘, soll ihre Lage nicht mehr verändert werden. Dies erreicht man durch die Abbruchbedingung aus Gleichung (12). Hierbei entspricht  $\tilde{I}$  wieder dem Gauß-gefilterten Bildpunkt ( $\tilde{I} = G_\sigma * I$ ). Eine Terminierung der Bewegung des entsprechenden Punktes erreicht man durch eine hohe Gewichtung mittels  $w_{term}$ . Dieser Energieterm berechnet die Orthogonale zum Gradienten.

Die zweite Ableitung einer Funktion wird durch die Krümmung der Funktion bestimmt. Bildlich gesprochen verhält sich die Kontur bei einer Minimierung der internen Energie über die zweite Ableitung wie eine ‘‘gebogene Platte‘‘, die eine Spannung besitzt und sich wieder ausrichten will (vgl. Gleichung (7) und Abbildung 4).

$$E_{term} = \frac{\tilde{I}_{yy}\tilde{I}_x^2 - 2\tilde{I}_{xy}\tilde{I}_x\tilde{I}_y + \tilde{I}_{xx}\tilde{I}_y^2}{\sqrt{(\tilde{I}_x^2 + \tilde{I}_y^2)^3}} \quad (12)$$

Mit Hilfe der Gewichte  $\alpha(s)$  und  $\beta(s)$  kann das Verhalten der Kontur gesteuert werden. Wird etwa  $\beta(s)$  an einer Stelle  $s_i$  auf Null gesetzt ( $s_i = 0$ ), kann an dieser Stelle ein ‘‘Knick‘‘ erlaubt werden.

### 3.3 ZUSATZBEDINGUNGEN

### 3.2 BILD-ENERGIE

Neben der internen und der Bild-Energie können noch Zusatzbedingungen in der Energiegleichung berücksichtigt werden. Zum einen gibt es sogenannte *Ziehkkräfte*. Hierfür werden zwischen einem Konturpunkt  $v_{spring(j)} = v_k$  für eine fixiertes  $k \in \{1, \dots, n\}$  und einem beliebigen, fixierten Punkt  $v_{fix(j)} \in M \times N$  im Bild eine Verbindung geschaffen, die sich wie eine Feder verhält. Dies bewirkt, daß der Konturpunkt in die Richtung des fixierten Punktes ‘‘gezogen‘‘ wird (Gleichung (13)).

Der zweite Term der Energie-Gleichung wird durch die *Bild-Energie* beschrieben. Diese wird durch die Grauwerte des Bildes, im dem das Segment gesucht wird, festgelegt. Sie setzt sich wiederum aus mehreren Termen zusammen.  $w_{line}$ ,  $w_{edge}$  und  $w_{term}$  stellen wieder Gewichte zur Steuerung der Eigenschaften dar.

$$E_{spring} = w_{spring} \cdot |v_{spring} - v_{fix}| \quad (13)$$

$$E_{image} = w_{line} \cdot E_{line} + w_{edge} \cdot E_{edge} + w_{term} \cdot E_{term} \quad (8)$$

Der erste Term betrachtet die Grauwerte selbst (vgl. Gleichung (9)). Entsprechend des Vorzeichens von  $w_{edge}$  in Gleichung (8) kann hier nach hellen ( $w_{line} < 0$ ) oder dunklen ( $w_{line} > 0$ ) Konturen gesucht werden.

$$E_{line} = I(x,y) \quad (9)$$

Zudem wird der Gradient des Bildes am Konturpunkt bestimmt (Gleichung (10)) und für die Konturfundung herangezogen. Der Gradient gibt die Steigung im *Grauwertgebirge* an und entspricht somit dem Grauwertübergang benachbarter Bildpunkte [6]. Hohe Grauwertübergänge können wiederum als Kanten im Bild interpretiert werden, die der Kontur des gesuchten Objektes entsprechen sollen. Da auch verrauschte Bildpunkte in der Regel hohe Gradientenbeträge besitzen, wird häufig ein Gauß-gefilterter Gradient betrachtet (vgl. Gleichung (11)).

Umgekehrt existieren Rückstoßkräfte, die praktisch eine Umkehrung von Gleichung (13) bewirken. Hierbei geht es um die Abstandsmaximierung zwischen einem Konturpunkt und einem beliebig fixierten Punkt.

Insgesamt kann man durch die Verwendung beider letztgenannten Energien eine gezielte Einflußnahme auf die Form der Konturbewegung erreicht werden.

Als weitere Zielsetzung kann die (annähernd) äquidistante Verteilung der Konturpunkte gewünscht sein (Gleichung (14)), was durch Gleichung (15) erreicht werden kann.

$$|v_i - v_{i-1}| = |v_i - v_{i+1}| \quad \forall i \quad (14)$$

$$E_{equi} = w_{equi} \cdot \left( 1 - \frac{\min(|v_i - v_{i-1}|, |v_i - v_{i+1}|)}{\max(|v_i - v_{i-1}|, |v_i - v_{i+1}|)} \right) \quad (15)$$

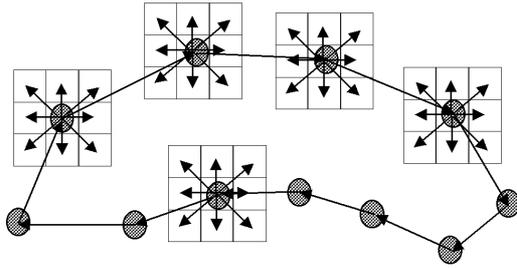


Abbildung 5: Exemplarische Darstellung der Positionsveränderungen der einzelnen Konturpunkte.

### 3.4 MODIFIKATIONEN

Die Berechnung mittels obiger Energierme ist relativ einfach für eine gegebene Kontur. Für die Minimierung verwendenden Kass et al. [15] den Ansatz der Euler-Lagrange-Differentialgleichung aus der Variationsrechnung. Dazu läßt sich das Integral aus Gleichung (1) als Funktional der Form  $F(s, v_s, v_{ss})$  darstellen. Wenn  $v$  ein lokales Minimum ist, so muß es die notwendige Bedingung der Euler-Lagrange-Differentialgleichung (Gleichung (16)) erfüllen. Näheres findet sich etwa in [1, 22].

$$-\frac{\partial}{\partial s} F_{v_s(s)} + \frac{\partial^2 s}{\partial s^2} F_{v_{ss}(s)} + F_v = 0 \quad (16)$$

Aufgrund der Komplexität der Minimierung wurden viele Modifikationen des Ansatzes vorgeschlagen. Amini et al. [1] verwenden etwa einen Ansatz aus der dynamischen Programmierung. Inoque et al. [13] nutzen genetische Algorithmen, um das Minimierungsproblem zu lösen. Dabei wird die Energiegleichung als Fitneß-Funktion verwendet. Näheres hierzu und weitere Ansätze finden sich wiederum in [22].

Eines der wohl am verbreitetsten Verfahren ist das von Williams und Shah [25]. Hierbei handelt es sich um einen Greedy-Algorithmus. Falls für einen Konturpunkt ein  $m \times m$  großes Nachbarschaftsfenster als nächste mögliche Position in einem Iterationsschritt erlaubt ist und  $n$  Punkte für die Konturbeschreibung vorhanden sind, gibt es  $(mm)^n = m^{2n}$  mögliche Punkte für den nächsten Iterationsschritt. Deren Energie müßte für alle  $m^{2n}$  mögliche Konturen bestimmt werden. Williams und Shah berechnen die Energie sequentiell für jeden Bildpunkt. Jeder Punkt wird auf allen  $mm$  möglichen Positionen bewertet und der Energie-optimale verwendet. Danach wird der nächste Konturpunkt betrachtet. Entsprechend sind nur noch  $nmm$  mögliche Zustände zu betrachten. Probleme können etwa auftauchen, wenn dann Bildpunkte alternierend die Position wechseln. Diese Fälle müssen gesondert behandelt werden. Abbildung 5 zeigt für einige Punkte die möglichen Positionen für  $m = 3$  und  $n = 11$ .

### 3.5 VORTEILE AKTIVER KONTUREN

Ein Vorteil der aktiven Konturen ist sicherlich die Betrachtung ausschließlich *geschlossener* Konturen. Damit

entfällt das bei einer kantenorientierten Segmentierung notwendige Kantenschließungsverfahren. Durch die Verwendung unterschiedlicher Energiegleichungen ist auch eine Steuerbarkeit der Kontur möglich.

Für die Verfolgung von bewegten Objekten, dem sogenannten *Tracking*, haben sich aktive Konturmodelle als besonders geeignet erwiesen. Anwendungen finden sich etwa in der Verfolgung von Fahrzeugen in Straßenverkehrsaufnahmen. Ebenso ist die Lippenverfolgung eines Sprechers/einer Sprecherin möglich [3, 19]. Dieses System ergänzt eine computerbasierte Spracherkennung durch die Verfolgung der Lippenbewegung und erlaubt dadurch eine bessere Erkennungsrate. Auch die Verfolgung der Stimm Lippen in Endoskopieaufnahmen zur Befundung wurden mittels aktiver Konturen erfolgreich umgesetzt [20].

Eine Umkehrung der Snakes sind die sogenannten *Balloons*. Dabei wird die Initialkontur nicht um das gesuchte Segment gelegt, sondern im inneren dieses Segmentes plaziert. Diese Balloons werden dann „aufgeblasen“. Das heißt, sie verhalten sich wie Ballons, die sich von innen an die gesuchte Kontur „anschmiegen“ sollen. Vereinfacht kann hier von einer Maximierung der Energiegleichung bzw. von  $E_{balloon} = -E_{snake}$  ausgegangen werden. Allerdings sind hier noch weitere Kriterien zu berücksichtigen [4, 5].

### 3.6 NACHTEILE AKTIVER KONTUREN

Eines der größten Probleme aktiver Konturmodelle ist sicherlich die Initialisierungsphase. Die Bestimmung der Initialkontur erfolgt weitgehend manuell und liegt schon sehr dicht am realen gewünschten Ergebnis, was manchmal nach dem Anwendungszweck fragen läßt. Gerade hier lassen sich aber wissensbasierte Ansätze, wie sie etwa in [10, 11] vorgestellt werden, nutzen. Auch die Anwendung neuronaler Netze läßt sich bei entsprechenden Rahmenbedingungen wie in [17, 18] nutzen. Diese Rahmenbedingungen besagen, daß eine funktionale Beziehung zwischen einem leicht segmentierbaren Objekt im Bild und dem gesuchten Objekt existieren muß.

Weiterhin stellt sich das Problem der Festlegung der Gewichte für die einzelnen Energierme. Diese sind entscheidend für die Segmentierungsergebnisse. Normalerweise wird das Gewicht für den Terminierungsterm  $w_{term}$  sehr groß gewählt, so daß ein Konturpunkt an der Stelle fixiert wird, an der er auf eine Kante stößt. Kanten ergeben sich aber wie schon erwähnt auch an verrauschten Punkten, weshalb ein weiterer Kritikpunkt an den aktiven Konturmodellen deren Rauschempfindlichkeit ist. Als mögliche Lösung bieten sich hier Glättungsfilter an, beispielsweise ein Gauß-Filter (vgl. Gleichung (11)), eine Mittelwertbildung oder ein Median-Filter [7].

„Klassische“ Konturmodelle nach [15] können bis auf die Verwendung von Zieh- und Rückstoßkräften (Abschnitt 3.3) nur konvexe Segmente bestimmen. Um auch

nicht-konvexe Objekte segmentieren zu können, haben Weiler und Dettmann eine neue Nachbarschaftsbeziehung der Konturpunkte definiert, indem sie eine Delaunay-Triangulierung verwenden [24].

Das verwendete Wissen für die Segmentierung liegt bisher einzig beim Experten, der die Initialkontur vorgibt. Es gibt auch Ansätze, unscharfe Wissenskomponenten zu berücksichtigen, die sich aber mehr auf der "LowLevel"-Ebene bewegen, indem wieder nur lokale Eigenschaften des gesuchten Objektes verwendet werden [12].

#### 4 WISSENSBASIERTE ENERGIETERME

Die Verwendung von Wissen hat bisher hauptsächlich in der Klassifikation von schon segmentierten Regionen stattgefunden [8, 9, 11]. Entsprechende Beschreibungen der gesuchten Objekte lassen sich aber auch schon direkt in der Segmentierungsphase verwenden. Eigenschaftsbeschreibungen können entsprechend der Variabilität der Bildobjekte in einer unscharfen Wissensbasis hinterlegt bzw. von dort abgerufen werden. Exemplarisch sollen hier einige Interpretationen der linguistischen Variablen und Terme zur Segmentbeschreibung angegeben werden. Diese können dann als weitere Terme in der Energiegleichung Anwendung finden. Nachteil dieser Methode ist, daß ein „Herausschneiden“ des kompletten von der Kontur eingeschlossenes Bildbereiches notwendig ist, um alle geforderten Eigenschaften, etwa die *Helligkeit*, berechnen zu können. Die Berechnung der Segmenteigenschaften erfordert entsprechend mehr Zeit. Bei einer korrekten Segmentierung verschmilzt diese allerdings mit der Beschreibungs- und Erkennungsphase des Segmentes, wodurch der Aufwand nur entsprechend vorverlagert wird.

Im folgenden werden drei einfache Beispiele für die Berechnung von weiteren Energietermen für ein Segment  $S$ , wie sie in Abschnitt 3.3 vorgestellt sind, genannt. Prinzipiell lassen sich alle Segmenteigenschaften, die etwa in [8] genannt werden, verwenden.

$$E_{constr(perimeter)} = 1 - \mu_{perimeter} \left( \sum_{i=2}^n |v_i - v_{i-1}| \right) \quad (17)$$

$$E_{constr(size)} = 1 - \mu_{size}(sizeof(S)) \quad (18)$$

$$E_{constr(round)} = 1 - \mu_{round}(S_{disj}) \quad (19)$$

mit

$$S_{disj} = 1 - \frac{sizeof(S \cap \bar{K}) + sizeof(\bar{S} \cap K)}{2 \cdot sizeof(S)} \quad (20)$$

Die Abbildung 6 zeigt ein einfaches Beispiel für die Anwendung einer aktiven Kontur, die die in Gleichung (17) bis Gleichung (19) genannten Beschreibungen wie folgt benutzt (die Interpretation der Terme ist hier abhängig vom Bildmaterial gewählt):

Größe = mittel  
Umfang = mittel  
Rundheit = hoch

Abbildung 6(a) zeigt dabei das gesuchte Objekt. Die folgenden Abbildungen stellen Ergebnisse oder Zwischenergebnisse dar. Etwa zeigt Abbildung 6(b) ein Beispiel, wo die Anzahl der Konturpunkte zu gering war ( $n = 4$ ), das gleiche gilt für Abbildung 6(c) ( $n = 16$ ).

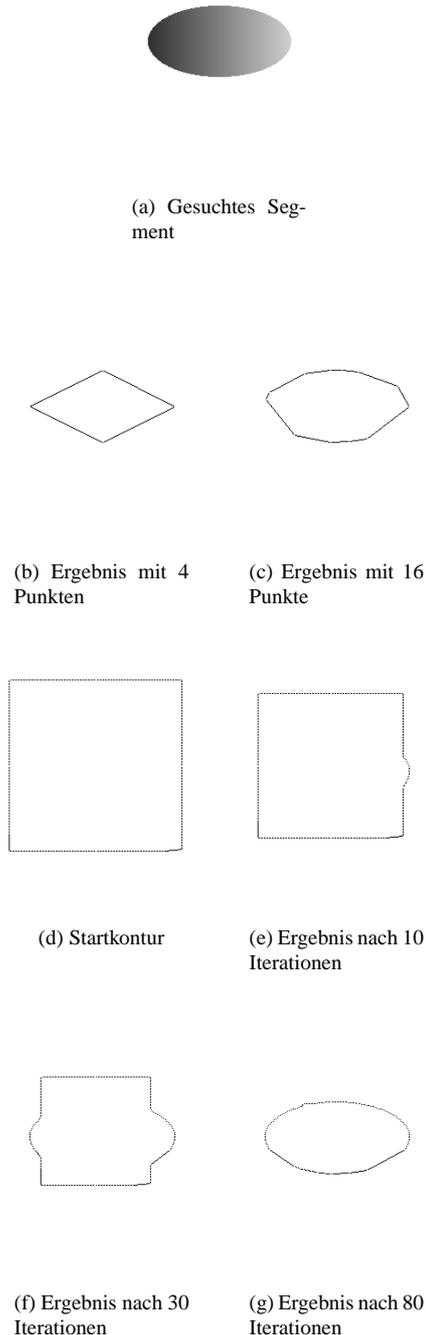
Die Abbildungen 6(d) bis 6(g) zeigen Zwischenergebnisse bei der Anwendung aktiver Konturen.

#### 5 ZUSAMMENFASSUNG

Aktive Konturmodelle eignen sich gut für die Segmentierung komplexer Objekte in einem Bild. Sowohl die gute Steuerbarkeit über Energiegleichungen als auch die Verwendung für variante Objekte bieten einen Vorteil gegenüber anderen Segmentierungsverfahren. Gegenüber kantenbasierten Verfahren besitzen sie zudem den Vorteil der geschlossenen Kanten. Doch sie besitzen auch viele Nachteile, etwa die Bestimmung der Initialkontur und die Rauschanfälligkeit. Deshalb wurde hier eine Verwendung weiterer – globaler – Energieterme vorgeschlagen. Diese beruhen auf unscharfem Wissen über Form und Aussehen der gesuchten Objekte. Hiermit ist es möglich, unabhängig von lokalen Eigenschaften das gesamte Objekt zu beschreiben.

#### LITERATUR

1. **Amini, A., Weymouth, T., and Jain, R.:** Using dynamic programming for solving variational problems in vision. IEEE Transactions On Pattern Analysis And Machine Intelligence 12 (1990), 855–867.
2. **Bronstein, I. N., Semendjajew, K. A., Musiol, G., and Mühlig, H.:** Taschenbuch der Mathematik, 4. ed. Verlag Harri Deutsch, Frankfurt am Main, 1999.
3. **Carnegie Mellon University:** NLips, 1999. <http://www.cmu.edu>.
4. **Cohen, L. D.:** Note on active contour models and balloons. Computer Vision, Graphics, and Image Processing. Image Understanding 53, 2 (1991), 211–218.
5. **Cohen, L. D., and Cohen, I.:** Finite-elemente methods for active contour models and balloons for 2-d and 3-d images. IEEE Transactions On Pattern Analysis And Machine Intelligence 15, 11 (1993), 1131–1147.



**Abbildung 6: Exemplarische Darstellung der Anwendung aktiver Konturen für die Segmentierung einer Ellipse mit unscharfen Beschreibungen.**

6. **Gonzalez, R. C., and Woods, R. E.:** Digital Image Processing. Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 1993.
7. **Haberäcker, P.:** Praxis der Digitalen Bildverarbeitung und Mustererkennung. Carl Hanser Verlag, München – Wien, 1995.
8. **Hiltner, J.:** Formbeschreibungen in der Bildverarbeitung. In Interdisziplinäre Methoden der Informatik (Dortmund, Jan. 1997), B. Reusch, Ed., no. 639 in Forschungsbericht, Universität Dortmund, pp. 92–100.
9. **Hiltner, J., Fathi, M., and Reusch, B.:** Fuzzy object descriptions for medical image processing. In Methodologies for the Conception, Design and Application of Soft Computing (Iizuka, Japan, Oct. 1998), T. Yamakawa and G. Matsumoto, Eds., World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., pp. 333–336.
10. **Hiltner, J., Fathi, M., and Reusch, B.:** MR-analysis using fuzzy expert knowledge represented by linguistic and model-based descriptions. In Fuzzy-Neuro Systems '99 (Leipzig, Mar. 1999), pp. 13–22.
11. **Hiltner, J., Jäger, M., Moser, M., and Tresp, C.:** Fuzzy Image Analysis for Medical Applications. In Knowledge-Based Intelligent Techniques in Industry, L. Jain, R. Johnson, Y. Takefuji, and L. Zadeh, Eds. CRC-Press, 1999, ch. 3, pp. 85–116.
12. **Höwing, F., Wermser, D., and Dooley, L.:** Linguistische Modellierung zur Erkennung anatomischer Objekte. In Bildverarbeitung für die Medizin 1999 (Berlin – Heidelberg, Mar. 1999), H. Evers, G. Glombitza, T. Lehmann, and H.-P. Meinzer, Eds., Informatik aktuell, Springer Verlag, pp. 357–361.
13. **Inoque, K., Asano, K., and Seo, W.:** Application of genetic algorithm to active contour model. Transactions of Japan Welding Research Institute 12, 1 (1994), 35–39.
14. **Jähne, B.:** Digitale Bildverarbeitung, 4. ed. Springer-Verlag, 1997.
15. **Kass, M., Witkin, A., and Terzopoulos, D.:** Snakes: Active contour models. In International Journal of Computer Vision (1987), vol. 3, pp. 259–268.
16. **Klette, R., and Zamperoni, P.:** Handbuch der Operatoren für die Bildbearbeitung, 2. ed. Friedrich Vieweg und Sohn Verlagsgesellschaft mbH, Braunschweig – Wiesbaden, 1995.
17. **Rittscher, J.:** Medizinische Bildverarbeitung mit neuronalen Netzen. Master's thesis, Universität Dortmund, Lehrstuhl Informatik I, Dortmund, 1998.

18. **Rittscher, J., Hiltner, J., and Moraga, C.:** Künstliche Neuronale Netzwerke zur Vorhersage der Hirnkontur. In *Bildverarbeitung für die Medizin 1999* (Berlin – Heidelberg, Mar. 1999), H. Evers, G. Glombitza, T. Lehmann, and H.-P. Meinzer, Eds., Springer Verlag, pp. 302–306.
19. **Schulemann, G.:** Spracherkennung liest von den Lippen ab. c't Heft 18, Aug. 1999.
20. **Sovakar, A., Scholl, I., Neuschaefer-Rube, C., Lehmann, T., and Spitzer, K.:** Verfolgung und Analyse von Stimmlippenkonturen in stroboskopischen Videosequenzen. In *Bildverarbeitung für die Medizin 1996* (Aachen, 1996), T. Lehmann, I. Scholl, and K. Spitzer, Eds., Verlag der Augustinus Buchhandlung, pp. 235–240.
21. **Stammler, T., Rudert, S., Michaelis, M., Reiser, M., and Englmeier, K.-H.:** Segmentation of MR images with B-spline snakes: A multi-resolution approach using the distance transform for model forces. In *Bildverarbeitung für die Medizin 1998* (Berlin – Heidelberg, Mar. 1998), T. Lehmann, V. Metzler, K. Spitzer, and T. Tolxdorff, Eds., Informatik aktuell, Springer Verlag, pp. 164–168.
22. **Stüttgen, T.:** Bildsegmentierung mit aktiven Konturmodellen unter Berücksichtigung unscharfen Wissens am Beispiel medizinischer Bilddaten. Master's thesis, Universität Dortmund, Dortmund, 1999.
23. **Wahl, F. M.:** Digitale Bildsignalverarbeitung, vol. 13 of *Nachrichtentechnik*. Springer-Verlag, Berlin – Heidelberg, 1989.
24. **Weiler, F., and Dettmann, J.:** Bildsegmentierung mit modellbasierten, aktiven Konturmodellen. In *Bildverarbeitung für die Medizin 1996* (Aachen, 1996), T. Lehmann, I. Scholl, and K. Spitzer, Eds., Verlag der Augustinus Buchhandlung, pp. 107–112.
25. **Williams, D. J., and Shah, M.:** A fast algorithm for active contours and curvature estimation. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing. Image Understanding* 55, 1 (1992), 14–26.



# Aspekte des Wissensmanagements

*Eike Hagen Riedemann*

Tel: 0231/755 6411

riedeman@ls1.cs.uni-dortmund.de

## ZUSAMMENFASSUNG

Um das Wissensmanagement zu ergründen, werden in diesem Beitrag die Begriffe *Wissen* und *Management* einzeln und im Zusammenhang vorgestellt. *Wissen* wird über seine Beziehungen und Unterschiede zu den Begriffen *Information*, *Daten* und *Medien* erläutert; Wissensmanagement hängt auch von Techniken der Ingenieurwissenschaften und vom Informationsmanagement ab. Die Aufgabe des Wissensmanagements wird als Regelkreis dargestellt, dessen äußerer Teil (Ziele definieren und bewerten) die eigentliche Aufgabe des Managements ist, während der innere Regelkreis die Umsetzung der Vorgaben des Managements beschreibt. Der Beitrag schließt mit einem Ausblick auf konkrete Lösungsansätze und Werkzeuge.

**STICHWÖRTER:** Wissensmanagement, Knowledge Management, Informationsmanagement, Wissen, Information, Daten, Medien, Regelkreis, Hyperwave.

## 1 EINLEITUNG

„Wissen ist Macht“ sagte Francis Bacon schon 1597. Der Vorstandsvorsitzende von Siemens, Heinrich V. Pierrer meinte dagegen 400 Jahre später, dass „50% der Wertekette“ eines Unternehmens wie Siemens „durch wissensintensive Arbeit“ gewonnen werde. Sogar in der Autowerbung wird dies in den Vordergrund gestellt: „Das neue *Denkmodell*<sup>1</sup> - Der neue Renault Scénic“.

Schätzungsweise 150.000\$ werden für Lernen und Bildung je Arbeitnehmer (im Unternehmen durchschnittlich) aufgewendet, daher sind Wissensverluste („kollektives Alzheimer-Syndrom“, s. [9]) durch Abwanderung bzw. Ausscheiden bei falschem Auslagern (Outsourcing) auch unter Kostengesichtspunkten zu betrachten.

Erfolgreiches Wissensmanagement ist also heutzutage in Unternehmen, Abteilungen und Projekten notwendig. Dabei reicht es allerdings nicht aus, sich des Mode-Instrumentariums „Internet“ zu bedienen und zu versuchen, sich damit das „Weltwissen“ - etwa mittels Suchmaschinen - anzueignen: bekanntlich „ertrinkt“ man dabei oft in einer „Flut“ von (unbewerteten) Informationen! Es kommt vielmehr darauf an, das richtige Wissen zur richtigen Zeit am richtigen Ort in der richtigen Menge, Form, Qualität und Aktualität an die richtigen Leute zu bringen. Das ist die Problematik und Aufgabe des

Wissensmanagements. In den folgenden Kapiteln werden die dabei relevanten Begriffe und Konzepte erläutert.

## 2 DEFINITIONEN UND BEGRIFFE: DATEN, INFORMATION, WISSEN

Der Begriff *Wissen* hängt mit dem Begriff *Information* und dieser wiederum mit dem Begriff *Daten* zusammen. Zur Darstellung von Wissen und Information wird in jedem Fall ein *Medium* benötigt.

### 2.1 DATEN

Daten (zu lateinisch *data*, Mehrzahl von *Datum*, d.h. ursprünglich geschichtliche Zeitangaben) sind:

a) (Zahlen-)Werte für Merkmalsgrößen von (physikalisch-technischen) Objekten und anderen Gegebenheiten (z.B. Produktionsdaten), die durch Beobachtung, Messung, Experimente und statistische Erhebungen gewonnen werden (s. [13], Bd. 6, 1980, S. 284);

b) einzelne oder (unter einer Konvention) zusammengesetzte Zeichen (Symbole, Bits, Bytes), aber ohne Interpretation, z.B. die Zeichenfolge ‚1 DM‘ in einer Tabelle (s. [12], S. 131; [2] und [5]).

Ein Vorteil von Daten ist, dass Daten vollständig (technisch) speicherbar und übermittelbar sind. Probleme, die beim Umgang mit Daten eine Rolle spielen, sind z.B. die Kosten der Datenerfassung, die Speicherkapazität und die Geschwindigkeit zum Finden von Daten (s. [4], S. 3)

### 2.2 INFORMATION

Information (zu lat. *informare* = durch Unterweisung bilden, unterrichten) ist im weiteren Sinne *Unterrichtung*, *Benachrichtigung*, *Aufklärung*, i. e. S. ist es:

a) (zweckorientierte, zusätzliches [neues] Wissen vermittelnde) *Nachricht*<sup>1</sup> (z.B. durch die Presse) (s. [13], Bd. 12, 1980, S. 581);

b) *Bedeutung*<sup>1</sup> von Nachrichten [Daten] in Bezug auf die reale Welt (s. [4]), z.B. Wert von ‚1 DM‘, bzw. eine Handlung/Unterlassung des Empfängers. Durch *Interpretation*<sup>1</sup> einer Nachricht in Bezug auf den Bedeutung Gehalt werden Nachrichten zu Informationen (s. [12], S. 237).

---

<sup>1</sup> Hervorhebung von mir, E.H.R.

Es lassen sich folgende Informationskategorien unterscheiden (s. [11], S. 77-80):

- a) sensorische (Eingabe)/ effektorische (Ausgabe)
- b) syntaktische
- c) semantische (Bedeutung)

Um die Bedeutung erfassen zu können, sollte die Informations-Quelle bzw. der -Überträger bekannt sein. Für die Analyse der Bedeutung ist die Taxonomie der Objekte (abstrakt ‚Fahrzeug‘ oder konkret ‚VW Golf‘) relevant, aber auch tektonische<sup>2</sup>, dynamische oder genetische Eigenschaften der Objekte als Systeme, sowie der angestrebte Verallgemeinerungsgrad der Analyse (naive Anschauung für spezielle Aussagen oder theoretische Aussagen mit allgemeiner Reichweite).

d) pragmatische Informationskategorie: Dabei wird Information als Teil einer Kommunikation mit Partnern aufgefasst.

Eine quantitative Analyse (wie z. B. „Entropie einer Nachricht“ bei dem kommunikativen Konzept der Informationsübertragung nach Shannon/Weaver) spielt im Zusammenhang des Wissensmanagements keine bzw. nur eine untergeordnete Rolle (bei der kostengünstigen „Codierung“ großer Datenmengen).

## 2.3 MEDIUM

Information braucht ein Medium für ihre Darstellung, zum Speichern und zum Verteilen, Verstehen und Nutzen. Dabei kommen statische Medien (z.B. Buch) oder interaktive Medien (z.B. Computer) in Frage. Mögliche Darstellungsformen sind dabei Sprache, Schrift (als Text und neuerdings als Hypertext), Bilder (Fotos oder Graphik) und ‚laufende‘ Bilder (Film, Video), also ‚Hypermedia‘ (vgl. [4], S. 4).

Als Kanal zum Verbreiten von Information kommt heutzutage das Internet/Intranet in Frage, da es noch flexiblere Eigenschaften (bzgl. Zugreifbarkeit in Raum und Zeit) hat als der traditionelle Buchdruck oder der Einzelplatzcomputer ohne Netzanschluss. Gerade für weltweit verteilte Organisationen ist dies besonders wichtig (s. [4], S. 3).

## 2.4 WISSEN

Im engeren *philosophisch/wissenschaftlichen* Sinne ist Wissen - im Unterschied zu Meinung und Glaube - auf Begründungen bezogene und strengen Überprüfungspostulaten unterliegende Kenntnis, institutionalisiert in den Wissenschaften (s. [13], Bd. 25, 1979, S. 434; s. auch Abschn. 3.3 unten).

---

<sup>2</sup> Tektonik = Lehre von der Zusammenfügung von Bauteilen zu einem Gefüge

*Beispiel:* P weiß, dass  $A = \log_{10} 512 = 9'$  gilt, d.h.: A ist wahr; P glaubt, dass A wahr ist; P kann Gründe angeben, warum A wahr ist (s. [7], S. 136).

Wissen ist ein *tieferes* Konzept als Information oder Daten, es setzt Verstehen von Information voraus (s. [3]). Wissen ist eine Mischung aus Erfahrung, Werten, Vorgehensweisen, Einsicht in Zusammenhänge von Informationen; es gibt einen Rahmen für die Auswertung und Einordnung von neuen Erfahrungen und Informationen (s. [4]) und ist ein entscheidendes Element für die Koordinierung kooperativer Arbeiten (s. [5]).

Wissen entsteht (z.Zt.<sup>3</sup>) nur durch Kopfarbeit ("Denken"), d.h. wissensgenerierende Aktivitäten sind (z.Zt.) durch Informationstechnologie nicht abbildbar (s. [2]). Wissen kann also (z.Zt.) direkt nur im Menschen existieren (als kognitive<sup>4</sup> Struktur im Gedächtnis) und verarbeitet werden (s. [4]).

Es gibt folgende **Wissensarten**:

a) *Fakten-Wissen (deklaratives Wissen; "wissen was")*, d.h. empirisch überprüfbar (verifizierbare) Behauptungen über Sachverhalte, z.B. 'Berlin ist die Hauptstadt Deutschlands' (wichtig zum Lösen von Kreuzworträtseln!).

b) *Handhabungs- und Orientierungs-Wissen (prozedurales Wissen; "wissen wie")*, d.h. die Fähigkeit, die gesammelten Fakten zur Problemlösung zu nutzen (in Bezug auf abgegrenzte Diskurswelt); dieses Wissen ist 'kennen und können' (s. [7], S. 35, Abb. 1.2), z.B. "Ich weiß, wie man mit Word einen Text erstellt."

Als **Wissenskategorien** werden *Erfahrung, Einsicht* und *Weisheit* ( $\neq$  engl. „knowledge“!) unterschieden (s. [4]). Als Beispiel für Weisheit steht etwa die Aussage: „Es ist alles eitel!“

Bei der **Wissensklassifikation** wird differenziert nach:

a) *Form: Implizites* (stilles, „unangreifbares“) Wissen liegt vor bei individueller Erfahrung, bei Fähigkeiten, Fertigkeiten, Kontext- (bzw. Hintergrund-)Wissen der Wissensträger. Implizites Wissen ist schwierig verfügbar zu machen und muss erst in die explizite Form überführt werden (vgl. Akquisition für Expertensysteme). *Explizites* („angreifbares“) Wissen ist dokumentiertes, verständliches (verbalisierbares) Wissen, z.B. in der Form von technischen Dokumentationen, Forschungsberichten, Patenten und Informationen über Kunden (s. [4], S.1). Explizites Wissen ist ‚leicht‘ transferierbar - von Wissensträgern hin zu Wissensbedürftigen.

---

<sup>3</sup> Zukünftige Entwicklungen der „Künstlichen Intelligenz“- und der Gehirn-Forschung lassen sich nicht abschätzen, daher wird diese zeitliche Einschränkung vorgenommen.

<sup>4</sup> Kognition = menschliche Erkenntnis

Die Form des Wissens ist von entscheidender Bedeutung für den Transfer (s. [2], S. 9; siehe auch Abschn. 5.2.4 unten).

b) *Bindung* : Hierbei unterscheidet man individuelles, persönliches Wissen oder kollektives, im (gesamten) Unternehmen vorhandenes Wissen, welches meistens Aspekte der Organisation und Kultur des Unternehmens beinhaltet (s. [2], S. 9).

c) *Räumlichkeit*: Es gibt externes oder internes Wissen - letzteres innerhalb des Unternehmens bei einzelnen Mitarbeitern (s. [2], S. 9).

Fazit: Wissen sollte möglichst in expliziter Form, (räumlich) intern und kollektiv gebunden vorliegen, um leicht zugreifbar und stets verfügbar zu sein.

Nach Petkoff (s. [7], S. 136-138) lassen sich folgende **Wissensarten** gegenüberstellen:

- \* Alltagswissen  $\Leftrightarrow$  Expertenwissen
- \* kausales Wissen  $\Leftrightarrow$  strategisches Wissen  $\Leftrightarrow$  Regel-Wissen  $\Leftrightarrow$  Schema-Wissen
- \* unsicheres Wissen  $\Leftrightarrow$  unvollständiges Wissen

Problematisch ist die Objektivität<sup>5</sup> des Wissens, d.h. Wissen ist nicht das (Ab-)Bild einer objektiven Realität, sondern vielmehr eine besondere Weise der Organisation unserer Erfahrungen (s. [7], S. 22 f.).

### 3 DEFINITIONEN UND BEGRIFFE: MANAGEMENT, TECHNIK, INGENIEUR (-WISSENSCHAFT)

Im Folgenden werden die (betriebswirtschaftlichen) Managementmethoden betrachtet, aber auch die bei der Durchführung nötigen (ingenieurwissenschaftlichen) Techniken, die z.B. beim „Knowledge Engineering“ eine Rolle spielen.

#### 3.1 MANAGEMENT(-METHODEN)

Management (von italien. maneggiare = handhaben, bewerkstelligen, zu lat. manus = die Hand) beinhaltet folgende Aspekte:

- 1) Management im Sinne von „Leitung, Führung von Betrieben und anderen sozialen Systemen“ (s. [13], Bd. 15, 1980, S. 539)
- 2) Management im Sinne von „Kybernetik“ beinhaltet dagegen Steuerung über Feedback sowie Kontroll- und Evaluationsfunktionen (s. [7], S.27 f.)

<sup>5</sup> *Objektivität* ist die Selbsttäuschung des Subjekts, dass es Beobachtungen ohne ein Subjekt geben könne (s. [7], S. 22).

3) Management-Methoden umfassen alle Führungstechniken, die unter Hervorhebung eines bestimmten Merkmals zum Ziel haben, a) die Durchführung der Management-Aufgaben effizienter zu gestalten, b) die Leistungen der jeweiligen Organisationsmitglieder zu erhöhen und c) die Anpassungsfähigkeit einer Organisation an Veränderungen der Umwelt zu gewährleisten (s. [13], Bd. 15, 1980, S. 539).

#### 3.2 TECHNIK

Der Begriff Technik hatte ursprünglich (im Sinne von Aristoteles Begriff der *Techné* - sinnverwandt mit Kunstfertigkeit) folgende Bedeutung: individuelles oder zumftmäßig tradiertes Verfahrenswissen (vornehmlich i. S. praktischen Könnens) in allen Lebensbereichen, in denen gewisse (manuelle) Fertigkeiten eine Rolle spielen, also etwa in der Medizin (z.B. Operationstechnik). Heute bezeichnet *Technik* die Gesamtheit aller Objekte (Werkzeuge, Geräte, Maschinen u.a.), Maßnahmen und Verfahren, die von Menschen durch sinnvolle, zielgerichtete Ausnutzung der Naturgesetze und -prozesse sowie geeigneter Stoffe hergestellt bzw. entwickelt werden und sich - als Erweiterung der (begrenzten) menschliche Fähigkeiten - zweckmäßig und in einem jeweils als nützlich betrachteten Ausmaß anwenden lassen - insbesondere bei der Arbeit und in der Produktion (von Gütern, Werkzeugen u.a.), aber auch im Bereich des Informations- und Kommunikationswesens (s. [13], Bd. 23, 1979, S. 269 f.).

#### 3.3 INGENIEUR(-WISSENSCHAFT)

*Ingenieur* (zu latein. ingenium = angeborene natürliche Beschaffenheit, Begabung, Scharfsinn, Erfindungsgeist, mlatein. auch „Kriegsgerät“) ist eine Berufsbezeichnung für wissenschaftliche oder auf wissenschaftlicher Grundlage ausgebildete Fachleute der Technik. Ihre Aufgabe besteht darin, auf der Grundlage natur- und technikkwissenschaftlicher Erkenntnisse und unter Berücksichtigung wirtschaftlicher und gesellschaftlicher Belange technische Werkzeuge zu planen und zu konstruieren, sowie die Ausführung des Geplanten leitend anzuordnen und zu überwachen (s. [13], Bd. 12, 1980, S. 587).

*Wissenschaft* ist dabei die Tätigkeit, die das wissenschaftliche Wissen hervorbringt. Gegenüber dem nicht abgesicherten, häufig subjektiven Meinen muss das wissenschaftliche Wissen - seinem Anspruch nach - begründet sein, d.h. es wird unterstellt, dass es in jeder kompetent und rational geführten Argumentation Zustimmung finden könnte (s. [13], Bd. 25, 1979, S. 434).

## 4 DEFINITIONEN UND BEGRIFFE DES INFORMATIONEN- UND WISSENSMANAGEMENTS

### 4.1 INFORMATIONSMANAGEMENT

(1) Unter Informations- (und Kommunikations-) Management werden alle Führungsaufgaben (Gestaltungs- und Lenkungsarbeiten) verstanden, die sich auf - für das Unternehmen relevante - Informations- und Kommunikationsvorgänge beziehen - sowohl innerhalb des Unternehmens als auch zwischen dem Unternehmen und seinen Marktpartnern (Kunden, Lieferanten, Konkurrenten) (s. [12], S. 267).

(2) Das Informationsmanagement umfasst die Generierung von möglichst umfassenden Informationen (aus Daten) und die entscheidungsorientierte Aufbereitung und Präsentation dieser Informationen (s. [2], S. 9)

### 4.2 WISSENSMANAGEMENT (KNOWLEDGE MANAGEMENT<sup>6</sup>)

Zum Begriff Wissensmanagement gibt es die folgenden „Definitionen“:

(1) Schaffung eines organisatorischen Rahmens und der Funktionen zur Transformation von Wissen. Wissensmanagement greift dabei auf aufbereitete Daten aus dem Informationsmanagement zurück (s. [2], S. 9).

(2) Aufbau und Nutzung der angreifbaren (expliziten) und unangreifbaren (impliziten) Wissensressourcen einer Organisation. Wissensmanagement beinhaltet organisatorische und technische Maßnahmen. Beispiele *angreifbaren* Wissens sind dabei technische Dokumentationen, Forschungsberichte, Patente, Informationen über Kunden, Produkte oder Konkurrenten. Beispiele *unangreifbaren* Wissens sind individuelle Fähigkeiten, Erfahrungen und das Hintergrundwissen der Mitarbeiter (s. [4], S. 2)

(3) Gemeinsames Wissen eines Unternehmens produzieren und koordiniert fortentwickeln, sammeln, suchen, extrahieren, ordnen, weiterverbreiten, unternehmensweit verfügbar halten; erheben, analysieren und planen der Wissensentwicklung (s. [5], S.1 f.)

### 4.3 UNTERSCHIED ZWISCHEN INFORMATIONEN- UND WISSENSMANAGEMENT

Das *Informationsmanagement* benutzt Technologie zur Informationssammlung, Informationsspeicherung und Informationssteuerung bzw. -kontrolle.

Das *Wissensmanagement* benutzt dagegen Technologie, um Informationen zum Zwecke der Innovation zu (ver-)teilen und als Hebel einzusetzen.<sup>7</sup>

## 5 REGELKREIS DES WISSENSMANAGEMENTS

Wissensmanagement läßt sich als Regelkreis darstellen, und zwar als äußeren Regelkreis, der die reinen Managementtätigkeiten umfasst, und als inneren Regelkreis, der die Durchführung der vom Management vorgegebenen Aufgaben beinhaltet.

### 5.1 ÄUßERER REGELKREIS DES WISSENSMANAGEMENTS

Der äußere Regelkreis umfasst drei Tätigkeitskomplexe, die aus Sicht des Managements relevant sind:

(1) Als Vorgabe *Ziele definieren* (konkretisiert, einfach und positiv formuliert, Wesentliches, mit Zwischenzielen, unter Beachtung des Zeithorizonts [Langfristigkeit], s. [8]), und zwar auf folgenden drei Ebenen:

a) *normativ* (Unternehmenskultur/Leitbilder): Teilung und Weiterentwicklung der eigenen Fähigkeiten der Mitarbeiter - mit Anreizmechanismen und Freiheiten für persönliche Ziele (s. [7], S. 82).

b) *strategisch*: Dabei ist das organisatorische Kernwissen, d.h. der Kompetenzbedarf des Unternehmens, zu definieren (s. [7], S. 82). Außerdem ist der Wissensvorsprung zur Konkurrenz und die Wissensnutzung zu bestimmen. Als Konsequenz daraus sind brachliegende Fähigkeiten anzuwenden, wertlose Fähigkeiten auszulagern, die Basisfähigkeiten aufzuwerten (oder zu bewahren) und Kernkompetenzen (mit Hebelfähigkeit) auf andere (Markt-/Fach-)Gebiete zu übertragen.

c) *operativ*: Auf dieser Ebene (des „unteren“ Managements) ist eine Übersetzungsarbeit zu leisten, d.h. die Zuordnung der Ziele zu Bereichen und Anpassung an andere Aufgaben des Bereichs und die Verfeinerung der Ziele auf Abteilungen, Arbeitsgruppen, Personen (genaue Zielvorgaben pro Person unter Beachtung der Freiheiten, s.o.). (Siehe [6], Abschn. 2.1.)

(2) *Umsetzen der Ziele*: s. innerer Regelkreis (Kap. 5.2)

(3) *Bewerten der Zielerreichung*: Ziel und Zweck dieser Managementtätigkeit ist es einerseits, Schwächen und Fehler im Vorgehen zu erkennen, d.h. wirksame Kurskorrekturen bei langfristigen Wissensinvestitionen vorzunehmen (s. [7], S. 82), und andererseits erfolgreiche Aktivitäten hervorzuheben und zu lernen. Dabei werden Bewertungsmethoden zum Messen der Wissenszielerreichung eingesetzt (s. [7], S. 82). Die Schwierigkeit bei dieser Tätigkeit besteht darin, dass Wissensindikatoren nicht-monetär und schwer quantifizierbar sind - insbesondere bei mangelhafter Ausformulierung der Wissensziele und wegen des Mangels an einheitlichen Rechnungslegungsmethoden für immaterielle Werte. (Siehe [6], Abschn. 2.8.)

<sup>6</sup> deutsch: „Kenntnis-Handhabung“(!)

<sup>7</sup> engl.: to leverage

## 5.2 INNERER REGELKREIS DES WISSENSMANAGEMENTS

Die Durchführung des Wissensmanagements beinhaltet folgende neun Schritte, die nicht strikt sequentiell und nicht immer in der hier angegebenen Reihenfolge durchzuführen sind. Für jeden Schritt werden die Aufgabe, die Fragestellung, die Vorgaben oder Voraussetzungen, die Mittel und/oder die Schwierigkeiten (teilweise) angegeben.

### 5.2.1 IDENTIFIZIEREN DES WISSENS

\* *Aufgabe:* Analyse und Beschreibung der vorhandenen Informationsquellen und des Wissensumfeldes des Unternehmens.

\* *Fragen:* Ist das Wissen in der Organisation vorhanden? Was wird benötigt? Wer weiß es?

\* *Vorgaben:* Wissensziele legen fest, auf welchen Ebenen welche Fähigkeiten aufgebaut werden sollen (siehe [7], S. 81, 1.)

\* *Mittel:* Überblicke, Visualisierungen als Wissenskarten, z.B. ein Wissensbranchenbuch in der Form von Wissensträgerkarten (Inhalt: Wer ist Experte für was?) oder Wissensanwendungskarten, die etwas über das Prozesswissen (in welcher Reihenfolge sind für ein Produkt die Wissensträger zu kontaktieren) aussagen (siehe [1]).

\* *Probleme:* Das Herstellen von „Transparenz“ kostet Zeit und Geld. Bei Wissensträgerkarten besteht die Gefahr des Zugriffs Unberechtigter („Kopfjäger“/ „Headhunter“); außerdem werden die Persönlichkeitsschutzrechte der Wissensträger tangiert (s. [6], Abschn. 2.2).

### 5.2.2 ERWERBEN/ AKQUIRIEREN

\* *Aufgabe:* Optimierung der Erschließung der (externen) Quellen wie z.B. Bibliotheken und Unternehmensberatungen

\* *Fragen:* Welches Wissen kann wo erhalten werden? Wie gelangt man an das Wissen der Wissensträger?

\* *Mittel:* Sammeln (aus bekannten Quellen), Teilnahme an Konferenzen, Schulungen, Erwerb von Wissen externer Wissensträger (Experten), z.B. durch Fusion mit einer anderen Firma oder durch direkten Einkauf von Wissensprodukten (z.B. Patente, Blaupausen, Software). (Siehe [7], S. 81, 2.; [6], Abschn. 2.3.)

\* *Probleme:* Bei Schulungen und Konferenzen wird das explizite Wissen der Lektoren nur zu implizitem Wissen der Teilnehmer, das erst wieder explizit gemacht werden muss. Beim Firmenkauf kann nicht ausgeschlossen werden, dass die fähigsten Mitarbeiter abwandern (s. [6], Abschn. 2.3).

### 5.2.3 ENTWICKELN

\* *Aufgabe:* Erzeugen neuen Wissens

\* *Fragestellung:* Wie wird neues Wissen aufgebaut?

\* *Mittel:* Erfahrung, Beobachtung, rationales Schlussfolgern, klassische Forschung und Entwicklung und Marktforschung (s. [7], S. 81, 3.).

\* *Individuelle Voraussetzungen:* Die Mitarbeiter benötigen Kreativität, Problemlösungsfähigkeiten, ein passendes Umfeld – mit Freiräumen, beachteten Interessensgebieten und Fehlertoleranz (s. [6], Abschn. 2.4).

\* *Kollektive Voraussetzungen:* Man braucht Teams mit erhöhter Kommunikationsintensität, sinnvollen, realistischen Zielsetzungen, einem Grundkonsens, einer offenen Atmosphäre für neue Ideen (s. [6], Abschn. 2.4).

\* *Probleme:* Wissensentwicklung muss (fast) ohne Technologie auskommen. Ausnahmen sind die Kombination bzw. Extraktion von existierendem Wissen („Data Mining“) und die Unterstützung von Kreativitätssitzungen (s. [5] und [4], S. 4, Nr. 1).

### 5.2.4 TRANSFERIEREN

\* *Aufgabe:* Umformen von (implizitem) Wissen in explizite Information bzw. Daten mit Metadaten (zum Suchen)

\* *Fragen:* Wie kann implizites Wissen explizit gemacht werden?

\* *Mittel:* Erklären des Wissens durch Sprechen, Vorbereiten eines Vortrags, Schreiben, Zeichnen, Erstellen einer Präsentation, einer WWW-Seite etc.; Codieren der Information, z.B. Aufzeichnen von Sprache oder Verwenden von Autorensystemen (s. [4], S. 5 f.).

\* *Probleme:* Motivation von Mitarbeitern für das Abgeben von Information<sup>8</sup>; Sprachprobleme zwischen Experten und Wissensakquisiteuren, d.h. die Wissensrepräsentation ist für den Experten evtl. ungewohnt oder undurchschaubar und er weiß nicht, wie das mentale Modell seines subjektiv bevorzugten Problemlösungsprozesses darauf abgebildet werden kann (s. [7], Abschn. 1.2.9 f.); es fehlen geeignete Dokumentenformate und geeignete Metadaten zum Suchen der Dokumente.

### 5.2.5 AUFBEREITEN & SPEICHERN

\* *Aufgabe:* Erhöhung und Sicherung der Qualität der Informationen

\* *Fragestellung:* Wie kann der Wert der Information an sich und für möglichst viele Nutzer erhöht werden?

---

<sup>8</sup> Dem steht das Zitat von Francis Bacon in der Einleitung („Wissen ist Macht“) entgegen.

\* *Mittel:*

- Freigabeverfahren (4-Augen-Prinzip)
- automatische Volltextindizierung
- (automatisches) Klassifizieren durch Schlagwörter
- automatisches Mitführen von Metadaten (z.B. Autor, Erstellungsdatum)
- Dokumente anreichern mit Meinungen, Kommentaren (Notizen) und manuellen Metadaten (z.B. Ablaufdatum)
- Daten in Beziehung setzen (Einordnen in Klassifikationsschema, typisierte Hyperlinks einfügen) (s. [4], S. 5 f., Nr. 5)
- Versionskontrolle
- Archivierung alter Dokumente (s. [4], S. 5, Nr. 4)

\* *Probleme*

- Standardisierung der Metadaten
- Wahl der Schlagwörter
- Wahl der Dokumentenformate und Speichermedien
- Arbeitsaufwand für manuelle Zusatzinformationen

### 5.2.6 (VER-)TEILEN & ZUGREIFEN

\* *Aufgabe:* Die verfügbaren gespeicherten Daten sind in verständliche Informationen umzuwandeln und effizient und sinnvoll an die geeigneten Personen zu verteilen, d.h. ohne Interessierte zu übergehen und Unbeteiligte damit zu belasten.

\* *Fragen:* Wer soll was zu welchem Zeitpunkt in welchem Umfang wissen? Wie kann man die Prozesse der Wissensverteilung und des Zugriffs auf Wissen erleichtern?

\* *Mittel und Vorgehensweisen des Zugriffs:*

- Anzeigen der Information (für das Auge)
- Abspielen der Information (für Auge/Ohr)
- Vorlesen der Information (für das Ohr)

(s. [4], S. 6, Nr. 7)

\* *Mittel und Vorgehensweisen der Verteilung:* Die *zentral* gesteuerte *Wissensmultiplikation* umfasst die Schulung aller Mitarbeiter, permanente Weiterbildung und Sozialisation neuer Mitarbeiter durch Mentoren. Dagegen unterstützen *Wissensnetzwerke* das *dezentrale* Prinzip: Navigieren durch Verfolgen von Hyperlinks, Suchen im Volltext oder über Metadaten, Agenten definieren mit Suchprofilen, Internet-/Extranet-Zugriffe mit Netz-Stöberern (Web-Browsern) selbst tätigen, aktive Informationskanäle (push channels) benutzen (s. [4], S.6, Nr. 6).

\* *Probleme:* Die Effizienz der Verteilung hängt vom Medium ab – vgl. Entwicklung vom Buchdruck zum Internet (Medium-Problem: s. [4], S. 3). Die Effektivität der Verteilung hängt von Kenntnissen über die Benutzerprofile ab. Die Effektivität des Zugriffs hängt von geeigneter medialer Präsentation der Daten ab (z.B. durch "graphische Oberflächen"), d.h. es gibt ein nichttechnologisches Kognitionsproblem (s. [7], S. 29; vgl. [11]).

Fazit: Das Wissensmanagement steht und fällt mit der Wissensverteilung!

### 5.2.7 VERSTEHEN

\* *Aufgabe:* Explizites Wissen zu implizitem Wissen machen (Internalisierung, s. [7], S. 61); implizites Wissen in den Kontext des schon existierenden Hintergrundwissens einordnen.

\* *Frage:* Was sagt mir die Information?

\* *Vorgehen:* Neue Wissensinhalte mit alten, schon gespeicherten Wissensinhalten verknüpfen zu einem Wissensnetzwerk von „Propositionen“ (Hypertext!) (s. [10], S. 41).

\* *Voraussetzung:* Der Kontext der Information muss mitgeliefert werden, z.B. durch Erläuterung der Terminologie.

\* *Probleme:* Jeder Mensch hat ein anderes Hintergrundwissen (Kontext). Es gibt keine technische Unterstützung für das Verstehen (keinen 'Nürnberger Trichter'), daher kann Verstehen nur durch Kopfarbeit bewirkt werden (s. [4], S. 6, Nr. 8).

### 5.2.8 NUTZEN

\* *Aufgabe:* Es muss versucht werden, den Mitarbeitern die Verwendung des mühsam gesammelten Wissens nahezubringen, insbesondere von wertvollen Fähigkeiten und Wissensbeständen - wie z.B. Patenten, Lizenzen (s. [7], S. 81, 5.).

\* *Fragen:* Wie kann man die Nutzung fördern? Wie kann Wissen effektiv und effizient eingesetzt werden?

\* *Mittel:* Offenes Betriebsklima schaffen für Verwendung fremden Wissens, Belohnung für Flexibilität und Offenheit für Neues, „hirngerechte“ Aufbereitung des gespeicherten Wissens, Einsatz moderner computergestützter Präsentationsverfahren, Aktualisierung der Informationen in der Wissensbasis (s. nächsten Schritt „Bewahren“).

\* *Probleme:* Nutzung fremden Wissens gilt als Eingeständnis persönlicher Wissensmängel, Betriebsblindheit (für fremde Vorgehensweisen und Produkte), mangelnde Berücksichtigung der Anwenderbedürfnisse bei Erstellung der Wissensbasis (s. [6], Abschn. 2.6).

Fazit: „Nutzen“ ist die entscheidende Aktivität - das Hauptziel - beim Wissensmanagement.

### 5.2.9 BEWAHREN

\* *Aufgabe:* Aktualisierung und regelmäßige Selektion des Bewahrungswürdigen in der Wissensbasis, um die Qualität des Erarbeiteten und die Akzeptanz der Mitarbeiter dauerhaft zu sichern.

\* *Frage:* Welches Wissen soll wie für die Zukunft konserviert werden?

\* *Mitte und Vorgehen:* Einzelinformationen sind zu selektieren und zu verdichten zu zentralen Dokumenten mit korrektem und auf das Wesentliche beschränktem Inhalt (Kombination „explizit-explizit“, s. [7], S. 61). Diese Informationen sind angemessen zu speichern, d.h. verschiedenste organisationale Speichermedien für Wissen sind effizient zu nutzen (s. [7], S. 81 f., Nr. 6). Beim individuellen Wissen sind Wissensträger an die Organisation zu binden bzw. eine systematische Übergabe ist sicherzustellen (japanisches „sempai-kohai“-Prinzip: Der Mentor transferiert Wissen an den Neuling). Kollektives Wissen ist für den späteren Zugriff zu „explizieren“, elektronisches Wissen ist gegen Angriffe auf die Speichersysteme (durch Hacker o. ä.) zu schützen. Eine regelmäßige Aktualisierung des Wissens ist entscheidend für die Nutzung.

\* *Probleme:* Es besteht die Gefahr der „kollektiven Amnesie“ (Gedächtnisverlust) durch ausscheidende Mitarbeiter bei Verschlankung der Organisation (s. [9], Kap. 1). Die Selektion und Verdichtung des Wissens ist ein Aufwands- und Entscheidungsproblem. Bei elektronischen Datenspeichern gibt es technische Probleme, Angriffsmöglichkeiten durch Hacker und schleichenden Verlust bei unstrukturierter Ablage. Generell besteht eine starke Abhängigkeit vom Informationsmedium. (Zur Aktivität „Bewahren“ siehe [6], Abschn. 2.7.)

## 6 AUSBLICK

Der hier in Kapitel 5 vorgestellte Regelkreis des Wissensmanagements geht auf die (schweizer) Schule von Probst zurück. Andere Lösungsansätze wurden z.B. von Arthur Anderson bzw. Doz et al. vorgestellt. (Genauerer siehe [2], S. 10, und [7], Kap. 7.1.)

Mit der Architektur von Wissensmanagement-Systemen beschäftigen sich u.a. Loser und Herrmann (s. [5]). Dort findet sich auch eine Liste der Werkzeuge, die verschiedene Aspekte des Wissensmanagements unterstützen – wie z.B. „Move“ für das Workflowmanagement. Ein Beispiel für ein umfassendes Werkzeug ist der „Hyperwave Information Server“ (s. [3]).

## 7 LITERATUR

1. **Eppler, Martin J.:** Praktische Instrumente des Wissensmanagements – Wissenskarten: Führer durch den „Wissensdschungel“. Gablers Magazin, 8/97, S. 10-13
2. **Gill, Christian; Liestmann, Volker:** Wenn Ihr Unternehmen wüßte, was es alles weiß – Wissensmanagement in Kompetenznetzwerken produzierender Unternehmen. FIR+IAW Mitteilungen 3/99, S. 9 f.
3. **Kappe, Frank:** Knowledge Management mit dem Hyperwave Information Server. Proc. Online '99, Düsseldorf, Congress VII: Workflow & Knowledge Management, 1.-4. Febr. 1999
4. **Kappe, Frank:** Knowledge Management: Aufbau von Wissenspotentialen in verteilten Organisationen. Proc. Online '99, Congress VII: Workflow & Knowledge Management, Düsseldorf, 1.-4. Febr. 1999
5. **Loser, Kai-Uwe; Herrmann, Thomas:** Management des Wissens ist mehr als Management von Information. Computerwoche 9/98, S. 97-100
6. **Neumeier, Thomas:** Modell des Wissensmanagements nach Probst. Seminararbeit im Fach „Allgemeine Wirtschaftsinformatik III: Theoretische Grundlagen der Wirtschaftsinformatik“ (Leitung: Prof. Dr. Lehner, Universität Regensburg), URL: <http://www.hausarbeiten.de/data/informatik/info-probst/info-probst.htm> (zuletzt gesichtet 1.9.1999)
7. **Petkoff, Boris:** Wissensmanagement – Von der computerzentrierten zur anwenderorientierten Kommunikationstechnologie. Addison-Wesley, Bonn, 1998, 497 S.
8. **Probst, Gilbert J. B.; Deussen, Arne:** Eckpunkte für ein erfolgreiches Wissensmanagement: Wissensziele als neue Managementinstrumente. Gablers Magazin, 8/97, S. 6-9
9. **Romhardt, Kai:** Process of Knowledge Preservation: Away from a Technology Dominated Approach. Workshop “Knowledge-Based Systems for Knowledge Management in Enterprises” zusammen mit “21<sup>st</sup> Annual German Conf. on AI '97”, 9.-12. Sept. 1997, Freiburg; <http://www.dfki.uni-kl.de/~aabecker/Freiburg/Final/Romhardt/romhardt.html>
10. **Scheidgen, Helmut; Strittmeier, P.; Tack, W. H.:** Information ist noch kein Wissen. Beltz, Weinheim, Basel, 1990 (Taschenbuch „Psychologie heute“, Bd. 536)

11. **Strohner, Hans:** Kognitive Systeme – Eine Einführung in die Kognitionswissenschaft. Westdeutscher Verlag, 1995, 280 S.
12. **Zilahi-Szabó, M. G.** (Hrsg.): Kleines Lexikon der Informatik und Wirtschaftsinformatik. R. Oldenbourg, München, 1995, 625 S.
13. **Meyers Enzyklopädisches Lexikon.** 25 Bde., Bibliographisches Institut, Mannheim, 1975-1979 (Korr. 1980)

# Datenhaltung und Backup in heterogenen Netzwerken

*Wolfgang Hunscher*

Tel: 0231/755 6262

wh@ls1.cs.uni-dortmund.de

Dieser Beitrag ist nicht schriftlich verfügbar. Wenden sie sich im Bedarfsfall bitte direkt an den Autor.

