Fachhochschule Wedel

Seminararbeit Informatik

Themenbereich „Künstliche Intelligenz“

Thema Nr. 10

Wissen über Raum und Zeit

Eingereicht von: Alexis Bechzidis
Am Redder 4
22880 Wedel

Erarbeitet im:	7.Semester
Fachrichtung:	Wirtschaftsinformatik
Abgegeben am:	8.Juni 2005

Referent: Prof. Dr. Sebastian Iwanowski
Fachhochschule Wedel
Feldstrasse 143
22880 Wedel

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis

1. Einführung

1.1 Motivation

Diese Ausarbeitung beschäftigt sich mit der Frage, wie menschliches Alltagswissen über Raum und Zeit formal repräsentiert werden kann und warum dieser Aspekt für Systeme mit künstlicher Intelligenz so relevant ist.
Komplexes menschliches Verhalten basiert u. a. auf folgenden drei Fähigkeiten:

- die Fähigkeit, die Welt wahrnehmen und verstehen zu können
- die Fähigkeit zu Handeln
- die Fähigkeit mit anderen Menschen kommunizieren zu können.

Das menschliche Handeln ist dabei in Raum und Zeit verankert. Es basiert auf Vorwissen über bestimmte Situationen, die an bestimmten Orten zu bestimmten Zeiten herrschen. Zustände sollen durch bewusstes Handeln herbeigeführt, Prozesse in Gang gesetzt oder Ereignisse verursacht werden.
Die Wunschvorstellung ist es, diese Aspekte genauso gut durch Wissensbasierte Systeme ausführen zu lassen.
Daraus ergibt sich, dass eine adäquate Repräsentation dieses Wissen über die Welt und eine geeignete Darstellung der Raum-, Zeitkomponenten eine grundlegende Voraussetzung für die erfolgreiche Arbeit leistungsfähiger Computersysteme mit künstlicher Intelligenz sind.

1.2 Aufbau des Seminars

Wesentlicher Bestandteil dieses Seminars ist es, die Struktur von Raum und Zeit, wie sie Teil des Alltagswissens ist, zu repräsentieren. Einen Ausgangspunkt bildet dabei die Analyse natürlicher Sprachen bzw. die Analyse von Sätzen natürlicher Sprachen. Für eine Verwendung der räumlichen und zeitlichen Inhalte einer Sprache, in Systemen künstlicher Intelligenz, müssen diese in geeigneten mathematischen, formalen Theorien repräsentiert werden.
Räumliches und zeitliches Wissen wird in den KI-Theorien getrennt betrachtet. Dafür lassen sich verschiedene Gründe finden. Während der Raum dreidimensional ist, gibt es bei der Zeit nur eine Dimension. Zudem besitzt der Raum keine ausgezeichnete Richtung. Es ist möglich sich in alle drei Dimensionen gleichermaßen zu bewegen. In der Zeit ist dies nicht möglich.

Hier ist die Richtung vorgegeben, sie geht nur in die Zukunft. Ein weiterer Unterschied besteht darin, dass im Raum vorwiegend Objekte
lokalisiert werden, wohingegen es sich in der Zeit hauptsächlich um die Lokalisierung von Ereignissen handelt.

Aufgrund dieser Unterschiede wird in dieser Ausarbeitung ebenfalls eine Trennung vorgenommen und mit den Aspekten zeitlichen Wissens begonnen.

Grundlage für alle KI-Theorien zeitlichen Wissens ist die klassische Temporallogik. Sie wird im nächsten Kapitel vorgestellt und beschäftigt sich mit dem Entwurf formaler Theorien des zeitlichen Schließens und der formalen Modellierung verschiedener Zeitvorstellungen. Die KI-Theorien knüpfen an die klassische Temporallogik an und entwickeln deren Resultate unter ihren jeweiligen Anwendungsperspektiven fort. Das Ergebnis sind anwendungsorientierte Logiksysteme, die als formaler Rahmen für die Wissensrepräsentation und –verarbeitung dienen.

Im darauf folgenden großen Abschnitt werden dann Theorien für die Repräsentation räumlichen Wissens behandelt. Im Wesentlichen lassen sich dabei in der Informatik zwei Ausrichtungen feststellen: Die Orientierung an mathematischen Theorien des Raumes, der Topologie und Geometrie und zum Anderen, eine eher Logikorientierte Darstellung, durch die eine enge Anbindung an andere KI-Repräsentationsmethoden möglich ist.

2. Zeit und Situationen

Formale Systeme der Repräsentation und der Verarbeitung von Wissen über Zeit und Situationen werden in der KI insbesondere für den Einsatz in Planungs-, Diagnose- und Problemlösungssystemen, sowie für Systeme der maschinellen Sprachverarbeitung entwickelt. Situationen stehen dabei für Zustände, Prozesse und Ereignisse.
Durch die Integration einer zeitlichen Komponente kann in Wissensbasierten Systemen das Erkennen und die Ausführung bestimmter Handlungen zum Erreichen von Zielzuständen unter Berücksichtigung ihrer zeitlichen Bedingung behandelt werden. Die in Kapitel 2.2 vorgestellten Theorien über das zeitliche Schließen setzen auf grundlegende Entwicklungen der Temporallogik auf. Ausgangspunkt für ihre Entwicklung war die Erkenntnis, dass Aussagen zeitabhängige Wahrheitswerte besitzen können.
Die Aussage: *Es regnet*, mag für den 20.4.2005 zutreffend, jedoch für den 21.04.2005 falsch sein. Um derartige zeitabhängige Aussagen in der Aussagenlogik repräsentieren zu können, wurde das Ausdrucksinventar um die temporalen Operatoren P, F, G, und H erweitert.

Dabei steht:

Pq für „es war der Fall, dass q“
Fq für „es wird der Fall sein, dass q“
Hq für „es war immer der Fall, dass q“
Gq für „es wird immer der Fall sein, dass q“.

Eine Aussage der Form Pq ist wahr zu einer Zeit t gdw. es eine Zeit t’ vor t gibt, zu der q wahr ist. Eine Aussage der Form Hq ist wahr zu einer Zeit t gdw. q zu allen Zeiten t’ vor t wahr ist. Entsprechendes gilt für die Operatoren F und G.
Der nächste Schritt besteht in der Definition einer modelltheoretischen Semantik für die Sprache der temporalen Aussagenlogik. In den zugehörigen Modellstrukturen wird eine Klassifizierung der Zeit festgelegt, die im nächsten Abschnitt erläutert wird.

2.1 Zeitontologien

Mit dem Begriff *Ontologie* ist die Einteilung der Zeit in verschiedene Klassen gemeint. Je nachdem, ob Zeit als Punkt-, Perioden- oder Ereignisstruktur angesehen wird, ergeben sich verschiedene Definitionen des Zeitbegriffs.

a) Zeitontologie I: Punktstrukturen

„Die klassische Vorstellung der Zeit ist die einer Menge T von Punkten, die durch die Vorgängerrelation $\prec$ geordnet ist:

[Def] Eine Punktstruktur T ist ein geordnetes Paar (T, $\prec$) mit einer nichtleeren Menge T und der binären Relation $\prec$ über T.“[1]

Für die Zeitpunkte und die Vorgängerrelation muss eine strikte partielle Ordnung gelten. D.h. es gelten Transitivität und Irreflexivität.

[TRANS] $\forall t_1 t_2 t_3 (t_1 \prec t_2 \wedge t_2 \prec t_3 \rightarrow t_1 \prec t_3)$

[IRREF] $\forall t \neg (t \prec t)$

Je nach Anforderungen, die an die Relation $\prec$ zwischen Zeiten gestellt werden, erhält man verschieden starke Systeme der Temporallogik. Der Unterschied besteht in der Definition, ob die Zeit als gebunden oder ungebunden in der Vergangenheit und/oder Zukunft, als linear oder verzweigend, als diskret, dicht oder kontinuierlich betrachtet wird. Als Alltagsauffassung der Zeit wird häufig die, eines linearen, kontinuierlichen und unbegrenzten Zeitstrahl betrachtet. Die Logik legt sich hier nicht fest, sondern stellt die Mittel bereit, alternative Zeitvorstellungen präzise zu charakterisieren.

Unter gebunden bzw. ungebunden wird die Vorstellung verstanden, ob es einen ersten bzw. letzten Zeitpunkt gibt oder die Zeit sich unbegrenzt in die Vergangenheit und Zukunft erstreckt. Diese Definition kann in zwei Postulaten festgehalten werden:

[BOUND] (a) $\exists t_1 \neg \exists t_2 (t_2 \prec t_1)$

(b) $\exists t_1 \neg \exists t_2 (t_1 \prec t_2)$

[SUCC] (a) $\forall t_1 \exists t_2 (t_2 \prec t_1)$

(b) $\forall t_1 \exists t_2 (t_1 \prec t_2)$

[1] Vgl. Görz / Rollinger / Schneeberger: Handbuch der Künstlichen Intelligenz, 2000 S.355

Ist die Zeit diskret oder dicht, d.h. kann sie durch die Menge der ganzen oder reellen Zahlen dargestellt werden?

$$[\text{DISC}]\ \forall t_1 (\exists\, t_2 (t_2 \prec t_1) \rightarrow \exists\, t_3 (t_3 \prec t_1 \wedge \neg \exists t_4 (t_3 \prec t_4 \prec t_1))) \wedge$$
$$\forall t_1 (\exists\, t_2 (t_1 \prec t_2) \rightarrow \exists\, t_3 (t_1 \prec t_3 \wedge \neg \exists t_4 (t_1 \prec t_4 \prec t_3)))$$

$$[\text{DENSE}]\ \forall t_1 t_2 (t_1 \prec t_2 \rightarrow \exists\, t_3 (t_1 \prec t_3 \wedge t_3 \prec t_2))$$

Ein linearer oder verzweigender Zeitbegriff kann mit der Vorstellung erklärt werden, ob die Zeit in die Zukunft („Vorwärtsverzweigende" bzw. „links-lineare" Zeit) oder in die Vergangenheit („Rückwärtsverzweigende" bzw. „rechts-lineare" Zeit) verzweigen kann oder eben nicht. Damit verbunden ist die Überlegung der unbestimmten Zukunft und das alternative zukünftige Entwicklungen denkbar sind. Die Zeit wird somit durch eine Baumstruktur repräsentiert. Entsprechendes gilt für die rückwärtsverzweigende Zeit. Hier sind alternative vergangene Entwicklungen möglich, die zum derzeitigen Zustand der Welt geführt haben. Im Gegensatz dazu steht das Linearitätspostulat, durch das die Zeitstruktur als Totalordnung charakterisiert wird und sie als eindimensionalen, deterministischen Zeitstrahl reflektiert.

Auch wenn im Alltag meist die Vorstellung einer linearen Zeit herrscht und der Gedanke an eine verzweigende Struktur befremdlich wirkt, weil in unserem Weltbild normalerweise nicht die Zeit selbst verzweigt, sondern lediglich alternative Entwicklungen des Geschehens, d.h. alternative Ereignisverläufe denkbar sind, so lässt sich dennoch die Frage nach der philosophischen Position stellen, ob man eine Verzweigung *der* Zeit oder eine Verzweigung *in* der Zeit postuliert.

Die erste Position beruft sich auf die Leibnizsche Idee einer relativen Zeit: Jeder Zeitpunkt ist durch die Menge der Ereignisse, die an ihm stattfinden, definiert. Daher ist jede Verzweigung des Ereignisverlaufs zugleich eine Verzweigung der Zeit selbst. Die zweite Position steht dagegen in der Tradition von Newtons absoluter Zeitauffassung: Die Zeit existiert unabhängig von den Ereignissen, die in ihr stattfinden. Sie ist gleichsam ein eigenständiger „Behälter" für Ereignisse. Daher impliziert eine Verzweigung des Ereignisverlaufs in dieser Auffassung keine Verzweigung der Zeit.

a) Zeitontologie II: Periodenstrukturen

Experimentelle Untersuchungen in der Wahrnehmungspsychologie haben ergeben, dass die subjektive Gegenwart, das „Jetzt" immer eine ausgedehnte Periode ist. Der „Moment" als kleinste subjektive Zeiteinheit, unterhalb derer keine perzeptuelle Diskrimination mehr möglich ist, ist eine Periode von ca. 30 ms Ausdehnung. Ebenso verweisen natürlichsprachliche Ausdrücke wie *gerade jetzt* und *in diesem Moment* auf Zeiteinheiten von einer gewissen, wenn auch kurzen Dauer.

Es liegt also nahe, diese Erkenntnisse in der Repräsentation der Zeit anzuwenden und sie als eine Periodenstruktur zu modellieren. Neben der Vorgängerrelation wird dabei eine zweite Relation, die „Inklusion", auf der Menge der Perioden benötigt.

[Def] Eine Periodenstruktur I ist ein geordnetes Tripel (I, $\subseteq$, $\prec$) mit einer nichtleeren Menge I und den beiden binären Relationen $\subseteq$ („Inklusion") und < („Präzedenz") auf I.

Eine Minimalforderung an Periodenstrukturen besteht darin, dass $\subseteq$ eine partielle und < eine strikte partielle Ordnung ist. Für $\subseteq$ sollen Transitivität, Reflexivität, Antisymmetrie und für <, wie bei der Punktstruktur, Transitivität und Irreflexivität gelten:

[TRANS($\subseteq$)] $\forall t_1 t_2 t_3 (t_1 \subseteq t_2 \wedge t_2 \subseteq t_3 \rightarrow t_1 \subseteq t_3)$

[REF($\subseteq$)] $\forall t (t \subseteq t)$

[ANTIS($\subseteq$)] $\forall t_1 t_2 (t_1 \subseteq t_2 \wedge t_2 \subseteq t_1 \rightarrow t_1 = t_1)$

[TRANS($\prec$)] $\forall t_1 t_2 t_3 (t_1 \prec t_2 \wedge t_2 \prec t_3 \rightarrow t_1 \prec t_3)$

[IRREF($\prec$)] $\forall t \neg (t \prec t)$

Mit Hilfe der Inklusionsrelation kann eine Überlappungsrelation definiert werden: Zwei Perioden überlappen einander, wenn sie eine gemeinsame Teilperiode besitzen.

[D $\circ$] Für alle $t_1, t_2 : t_1 \circ t_2 =_{def} \exists\, t_3 (t_3 \subseteq t_1 \wedge t_3 \subseteq t_2)$

[2]Vgl. Görz / Rollinger / Schneeberger: Handbuch der Künstlichen Intelligenz, 2000 S.358

c) Zeitontologie III: Ereignisstrukturen

Neben Ansätzen von Punkt- und Periodenstrukturen gibt es in der Zeitontologie einen dritten Ansatz, der mit einer ereignisbasierten temporalen Ontologie arbeitet. Hierbei wird von Ereignissen als unanalysierte Primitiven ausgegangen. Zeit ist dabei ein nicht direkt wahrnehmbares Konzept. Ihre Struktur ergibt sich aus der Struktur der Ereignisse, die zwar zeitliche Aspekte besitzen, etwa ihre Dauer, jedoch nicht ihren zeitlichen Gehalt reduzierbar sind. Eine Zeittheorie muss daher zunächst die strukturellen Relationen zwischen Ereignissen formulieren.

[Def] „Eine Ereignisstruktur $E = (E, \prec, \circ)$ besteht aus einer nichtleeren Menge E von Ereignissen und zwei binären Relationen, der Relation der vollständigen temporalen Präzedenz $\prec$ und der Relation der temporalen Überlappung $\circ$, die die folgenden Postulate erfüllen.“[3]

[Irrefl ($\prec$)]	$e_1 \prec e_2 \rightarrow \neg e_2 \prec e_1$
[Trans ($\prec$)]	$e_1 \prec e_2 \wedge e_2 \prec e_3 \rightarrow e_1 \prec e_3$
[Symm ($\circ$)]	$e_1 \circ e_2 \rightarrow e_2 \circ e_1$
[Refl ($\circ$)]	$e_1 \circ e_1$

Mit der Basisrelation der Überlappung kann die Unterspezifiziertheit der Ereigniswahrnehmung modelliert werden. Sie kann als Relation der vagen Simultanität aufgefasst werden.

Auf diese Weise lassen sich Sachverhalte, wie die folgenden sehr gut beschreiben:

a) Als der Wagen um die Ecke bog [e_1], trat ein Mann auf die Fahrbahn [e_2].
b) Doch noch während der Wagen abbog [e_1], rettete sich der Mann wieder auf den Bürgersteig [e_3]

Anhand von Satz a) lässt sich erkennen, dass e_1 gleichzeitig zu e_2 passiert. Wird Satz b) betrachtet, so sieht man e_1 ereignet sich gleichzeitig zu e_3. Trotzdem gibt es eine Vorgängerbeziehung zwischen e_2 und e_3 ($e_2 \prec e_3$).
Das natürlichsprachliche Adverb *gleichzeitig* drückt also nicht unbedingt absolute Simultanität aus.

[3]Vgl. Görz / Rollinger / Schneeberger: Handbuch der Künstlichen Intelligenz, 2000 S.358

2.2 Zeitliches Schliessen in der KI

Nach einer kurzen Einführung in die Temporallogik in Kapitel 2.1 sollen in diesem Abschnitt einige der einflussreichsten KI-Theorien der Repräsentation und Verarbeitung zeitlichen Wissens in ihren Grundzügen vorgestellt werden. Sie setzen auf die klassische Temporallogik auf und machen sich ihre Erkenntnisse zu nutze.

2.2.1 Das Situationskalkül

Das Situationskalkül, welches von John McCarthy und Patrick Hayes Ende der 60er Jahre des letzten Jahrhunderts entwickelt wurde, stellt den Beginn der Entwicklung formaler Theorien des zeitlichen Schliessens in der KI dar.
Für McCarthy und Hayes sind Situationen die temporalen Basiseinheiten. Eine Situation ist ein „Schnappschuss“, also der vollständige Zustand, der Welt zu einer bestimmten Zeit. D.h. zeitliche Relationen, wie „vor“ oder „nach“ können als Relationen zwischen Situationen dargestellt werden. Da Situationen in der Regel nicht vollständig beschrieben werden können, werden sie nur partiell durch die in ihr geltenden bekannten Fakten charakterisiert. Aus diesen Fakten ist es dann möglich, weitere Fakten über diese oder zukünftige Situationen herzuleiten.
Der Übergang von Situation zu Situation erfolgt durch Handlungen oder allgemeiner Ereignisse, die die geltenden Fakten in der Ausgangssituation verändern, so dass eine Folgesituation entsteht.
Als vereinfachtes Beispiel sei eine Situation S_1 gegeben, in der ein Objekt a auf einem Tisch b liegt. Dies kann durch folgenden Term ausgedrückt werden: HOLDS ((liegt_auf(a, b), S_1).
Als Ereignis e_1 soll das Objekt a vom Tisch auf den Boden c transportiert werden. Das Resultat dieses Ereignisses ist eine neue Situation: S_2 = result(e_1,S_1) , für die gilt:
HOLDS ((liegt_auf(a,c), S_2).
Die Funktion result, die aus Situationen und Ereignissen Folgesituationen berechnet, ist das Kernstück des Situationskalküls von McCarthy und Hayes. Ausgehend von einer Ausgangssituation S_0 können durch ihre Anwendung lineare oder verzweigende Strukturen von Nachfolgesituationen erstellt werden.

Problematisch am Situationskalkül in dieser Fassung ist die Tatsache, dass nur direkte Nachfolgebeziehungen modelliert werden können. Dies ist auf die zentrale Stellung der result Funktion zurückzuführen. Simultane aber dennoch abgegrenzte Handlungen, wie *Er fuhr in die Stadt und hörte dabei Radio* können so nicht korrekt dargestellt werden. Ebenso müssen kontinuierliche Veränderungen, wie *Die Wanne wird mit Wasser gefüllt*, darstellbar und komplexe Ereignisse für die weitere Verarbeitung aufteilbar sein.
Die folgenden KI-Theorien haben versucht, diese Schwächen des Situationskalküls zu verbessern.

2.2.2 McDermotts Temporallogik für Planung

McDermotts Temporallogik ist speziell für den Einsatz in Planungssystemen gedacht. Sie soll vor allem zwei Aspekte der Zeit erfassen: die Kontinuität der Zeit und die Unbestimmtheit der Zukunft. Die Kontinuitätseigenschaft wird für die Repräsentation von Handlungen wie: *Die Wanne wird mit Wasser gefüllt* benötigt, wohingegen mit Unbestimmtheit der Zukunft alternative zukünftige Entwicklungen gemeint sind, mit denen Sachverhalte wie: *Maria verhindert, dass Peter überfahren wird* dargestellt werden können. Das bedeutet, es sind verschiedene Ereignisse denkbar, welche die Zukunft bestimmen. Hält Maria Peter zum Beispiel fest, so wird dieser nicht überfahren, tut sie es nicht, so tritt das Unglück ein.
In McDermotts Ontologie gibt es für die Repräsentation dieser Sachverhalte zwei Objekte: eine partiell geordnete Menge von Zuständen („states“) und eine total geordnete Menge von Zeitpunkten („dates“). Zustände sind ähnlich den Situationen im Situationskalkül punktuelle Weltzustände, die eine dichte vorwärtsverzweigende Struktur bilden. Sie werden durch eine Datumsfunktion auf Zeiten abgebildet.
Vorgestellt werden kann sich diese Zustandsstruktur als Stapel von Fotographien, deren Reihenfolge der zeitlichen Abfolge entspricht. Durch bloßes Ansehen der Bilder kann jedoch nicht auf die genaue Zeit geschlossen werden. Dafür ist die Datumsfunktion auf der Rückseite notwendig. In dem Stapel gibt es zusätzlich noch Stellen für eine mögliche Verzweigung. Dort kann zwischen mehreren alternativen Stapeln zum Weiterschauen gewählt werden. Dieser Sachverhalt soll die verzweigende Zukunft repräsentieren. In der folgenden Abbildung ist die Zustandsstruktur als Baumstruktur abgebildet.

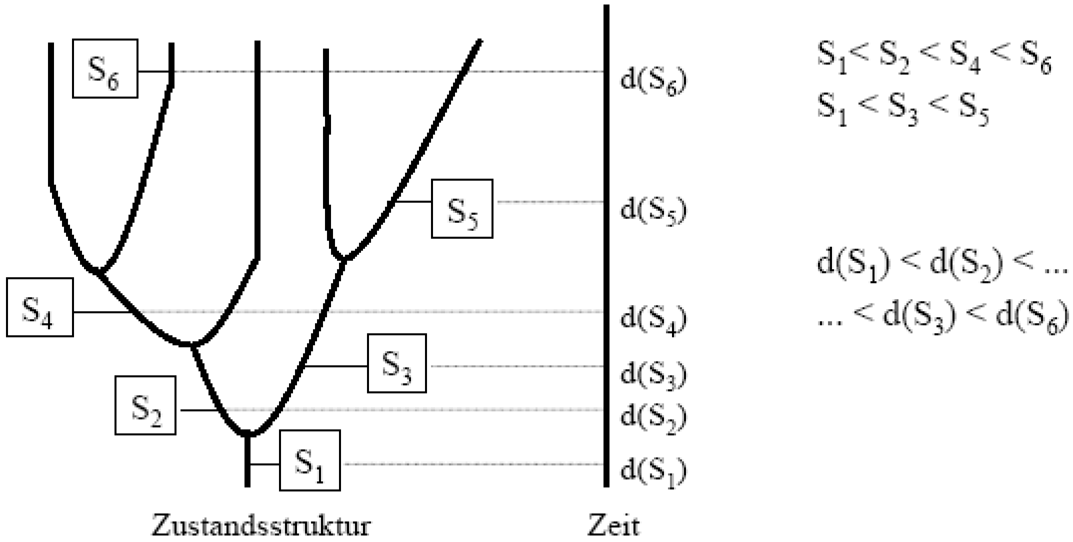

Abbildung 1: McDermotts Zustandsstrukturen[4]

Wie in der Grafik sichtbar wird, ordnet die Datumsfunktion d jedem Zustand s genau eine Zeit zu. Sie sichert zu, dass alle Zustände vergleichbare Zeiten haben. Jeder Pfad durch die Baumfunktion wird „Chronik“ genannt. Sie ist formal eine total geordnete Menge von Zuständen und entspricht einer bestimmten möglichen Entwicklung des Geschehens. In diesem Beispiel gehören S_1, S_2, S_4, S_6 sowie S_1, S_3, und S_5 zu verschiedenen Chroniken. Chronikübergreifend besteht zwischen den einzelnen Situationen keine Anordnungsrelation. Nur die zugeordneten Zeiten d stehen in Beziehung zueinander.

Über die Zustände hinweg können bestimmte Fakten gelten. Jedem Fakt entspricht die Menge der Zustände, in denen er wahr ist. Auf diese Weise kann ihm indirekt über die date Funktion eine Menge von Zeitpunkten bzw. eine Periode zugeordnet werden. Fakten repräsentieren also Situationen die, wenn sie zu einer Periode bestehen, auch in allen Teilen der Periode bestehen. Solche Situationen werden „homogen“ genannt. Die Aussage *Das Buch liegt auf dem Tisch* lässt sich auf diese Weise modellieren. $TT(s_1,s_2,p)$ bedeutet, dass der Fakt p von Zustand s_1 bis s_2 gültig ist.

[4] www.informatik.hu-berlin.de/ ~hochstra/zeitliches_Schliessen.pdf, S.6

Im Gegensatz dazu stehen „heterogene“ Ereignisse, wie *Peter schreibt an seiner Diplomarbeit*. Sie werden als Zustandsintervalle behandelt. Jedem Ereignis entspricht exakt ein Intervall, nämlich jenes, welches das Ereignis vollständig ausfüllt. Peter hat zu keinem echten Teil der Zeitspanne ebenfalls seine Diplomarbeit geschrieben; er war lediglich dabei sie zu schreiben. Ein solcher Sachverhalt kann durch den Term *sunion(e)* repräsentiert werden. $S \in$ sunion(e) würde dann bedeuten:
Im Zustand s ist ein Ereignis des Typs e im Verlauf.
McDermott arbeitet also mit einer verzweigenden Struktur von Weltzuständen und einer linearen Zeitstruktur. Die beiden Strukturen sind konzeptuell voneinander unabhängig. D.h. alternative mögliche Entwicklungen werden durch verschiedene Chroniken und nicht durch eine Verzweigung der Zeit selbst modelliert. Die Zeit selbst hat in dieser Theorie die Form einer Punktstruktur. Ausgedehnte Zeiten werden aus Zeitpunkten durch Intervallbildung abgeleitet. Die im vorigen Abschnitt genannten Argumente sprechen jedoch dafür, Perioden als temporale Basiseinheiten zu nehmen. Ein Vertreter dieser Periodenontologie wird im folgenden Abschnitt vorgestellt.

2.2.3 Allens Zeit- und Handlungslogik

Die von James Allen entwickelte Zeit- und Handlungslogik ist die derzeit einflussreichste Theorie in der KI über die Repräsentation und Verarbeitung zeitlichen Wissens. Sie beschäftigt sich vor allem mit der Bedeutungsrepräsentation von Handlungs- und Ereignissätzen.
Allen geht in seiner Theorie, im Gegensatz zu McDermott, nicht von Zeitpunkten als elementare temporäre Einheiten aus, sondern betrachtet direkt Zeitperioden bzw. Intervalle als primitive Basiseinheiten. Ebenso wenig existiert in seiner Logik eine verzweigende Zukunft, wie eine verzweigende Vergangenheit. Mögliche zukünftige Entwicklungen ordnet Allen der Theorie des hypothetischen Schliessens zu.
Um die Welt zu beschreiben sind eine Menge temporal qualifizierender Aussagen nötig, die angeben, was über die Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft bekannt ist. Dabei existieren statische und dynamische Aspekte. Statische Aspekte oder Eigenschaften werden durch sog. „properties“ und dynamische Aspekte oder Geschehnisse durch sog. „occurrences“ erfasst. Dabei sind die Eigenschaften den Fakten McDermotts gleichzusetzen. Geschehnisse können Ereignisse oder Prozesse sein.

Für die Repräsentation des zeitlichen Wissens bedient sich Allen einer mehrsortigen Prädikatenlogik erster Stufe mit Termen für Termen für Zeitintervalle, Eigenschaften, Ereignissen, Prozessen, Handlungen usw.
Temporales Kernstück dieser Logik sind dreizehn, sich wechselseitig ausschliessende, Relationen zwischen Zeitintervallen, die alle möglichen Beziehungen darstellen können. Es folgen die sieben Grundrelationen. Zu diesen kommen die jeweiligen inversen Relationen hinzu; da EQUAL zu sich selbst invers ist, ergibt sich ein System von dreizehn Basisrelationen:

1. STARTS(t_1, t_2)
   t_1 hat denselben Anfang wie t_2, endet aber vor dem Ende von t_2
2. FINISHES(t_1, t_2)
   t_1 hat dasselbe Ende wie t_2, beginnt aber vor dem Anfang von t_2
3. DURING(t_1, t_2)
   t_1 ist vollständig in t_2 enthalten
4. BEFORE(t_1, t_2)
   t_1 ist vor t_2 und t_1 und t_2 überlappen sich nicht
5. OVERLAP(t_1, t_2)
   t_1 beginnt vor t_2 und endet nach Anfang von t_2
6. MEETS(t_1, t_2)
   t_1 ist vor t_2 und es gibt kein Intervall zwischen t_1 und t_2, d.h. t_1 endet, wenn t_2 beginnt
7. EQUAL(t_1, t_2)
   t_1 und t_2 sind dasselbe Intervall

Die logischen Eigenschaften der Zeitrelationen sind durch Axiome festgelegt. Von besonderer Bedeutung sind dabei die Axiome, welche das kombinatorische Verhalten der Relationen beschreiben. Zwei Beispiele sind hier aufgeführt:

$$\text{BEFORE}(t_1, t_2) \wedge \text{BEFORE}(t_2, t_3) \rightarrow \text{BEFORE}(t_1, t_3)$$

$$\text{MEETS}(t_1, t_2) \wedge \text{DURING}(t_2, t_3) \rightarrow \text{OVERLAPS}(t_1, t_3) \vee \text{DURING}(t_1, t_3) \vee \text{STARTS}(t_1, t_3)$$

Diese beiden Axiome besagen nichts weiter, als:

- wenn t_1 vor t_2 liegt und t_2 vor t_3, dann muss auch t_1 vor t_3 liegen
- wenn t_1 auf t_2 trifft und t_2 vollständig in t_3 enthalten ist, sich t_1 und t_3 überlappen müssen oder t_1 auch in t_3 enthalten sein muss oder t_1 gemeinsam mit t_3 beginnt, jedoch früher endet

Die Gesamtheit der Kompositionssysteme ergibt ein Constraint-System, welches es möglich macht durch bekannte Relationen zwischen Zeitintervallen auf Relationen zu anderen Interwallen zu schliessen:

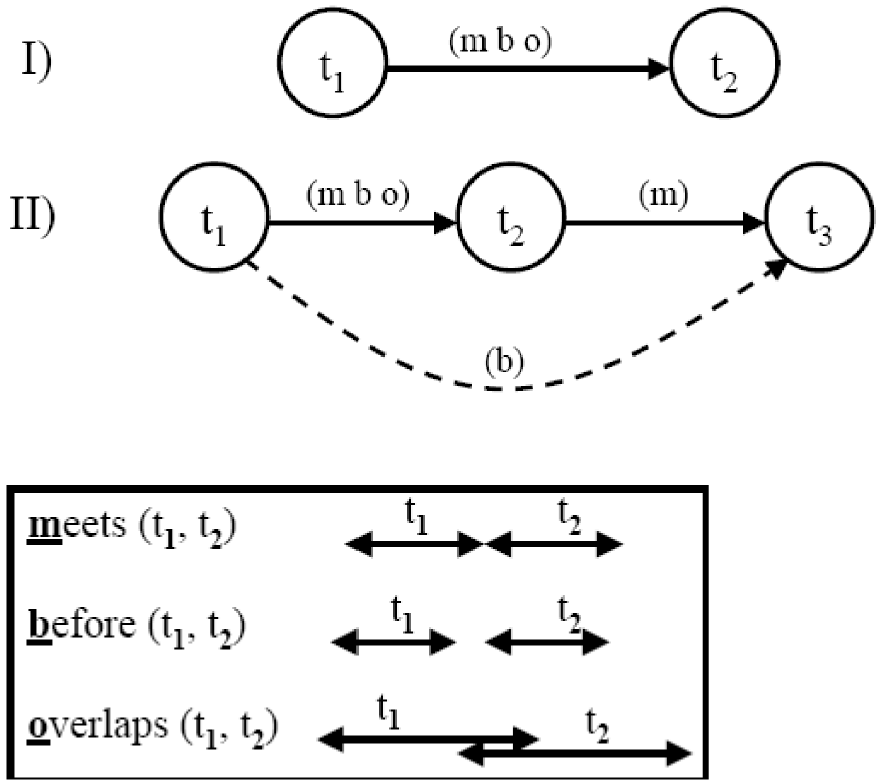

Abbildung 2: Netzwerkrepräsentation von Intervallrelationen[5]

Gelten zwischen den beiden Intervallen t_1 und t_2 die Relationen MEETS oder BEFORE oder OVERLAPS und kommt dann noch ein weiteres Intervall t_3 hinzu für das MEETS(t_2, t_3) bekannt ist, so muss zwischen t_1 und t_3 gelten: BEFORE(t_1, t_3).

[5] www.informatik.hu-berlin.de/ ~hochstra/zeitliches_Schliessen.pdf, S.12

Nach den diversen Relationen zwischen Zeitintervallen soll nun Allens Prädikatenlogik für die Beziehungen zwischen Eigenschaften, Ereignissen und Prozessen mit den dazugehörigen Zeiten, zu denen diese gelten, näher gebracht werden. Für diese Relationen gelten spezielle Axiome, die die charakteristischen zeitlichen Eigenschaften der verschiedenen Situationssorten erfassen sollen. Im Folgenden soll Allens Behandlung von Eigenschaften und Ereignissen kurz erläutert werden.

Die Relation HOLDS zwischen Eigenschaften p und Zeiten t drückt aus, dass die Eigenschaft p für das Intervall t gilt. Für HOLDS gilt die Abgeschlossenheit der Intervallmenge bezüglich Inklusion. Das bedeutet: gilt p für t, dann auch für alle Teilintervalle von t.

In Prädikatenlogik ausgedrückt: $\text{HOLDS}\ (p, t_1) \leftrightarrow (\forall\, t_2)\ (\ \text{IN}(t_2, t_1) \rightarrow \text{HOLDS}\ (p, t_2))$

Wobei IN die vereinfachte Schreibweise der Disjunktion von $\text{DURING}(t_1, t_2)$, $\text{STARTS}(t_1, t_2)$ und $\text{FINISHES}(t_1, t_2)$ ist.

Die Relation OCCUR zwischen Ereignissen e und Zeiten t drückt aus, dass e genau zu t stattfindet. „Genau“ drückt dabei aus, dass e weder zu Teilintervallen von t noch zu größeren Intervallen stattfindet. Es wird damit die Heterogenität von Ereignissen erfasst.

$$\text{OCCUR}(e, t_1) \wedge \text{IN}(t_1, t_2) \rightarrow \neg\text{OCCUR}(e, t_2)$$

Kritisch an Allens Theorie ist die Tatsache, dass für die Repräsentation zeitlicher Relationen zwischen Situationen bzw. deren Perioden selbst immer vollständiges Wissen vorausgesetzt wird. Dieser Sachverhalt kann sehr einfach an einem Beispiel verdeutlicht werden:

Wenn wir lediglich wissen, dass Peter vor Maria zu Hause war, dass also der Fakt, dass Peter zu Hause ist bereits vor dem Fakt, dass Maria zu Hause ist gegolten hat, verlangt die Repräsentation zeitlichen Wissens nach Allen auch immer eine Festlegung hinsichtlich ihrer Abschlüsse. Danach richtet es sich, ob zwischen den beiden Perioden die Relation BEFORE, MEETS, OVERLAPS usw. vorliegt. Sind diese Informationen allerdings nicht gegeben, d.h. liegt unvollständiges Wissen vor, so müssen diese Zeitrelationen durch oft lange Disjunktionen dargestellt werden:

Peter war schon vor Maria zu Hause.

$\text{BEFORE}(t_1, t_2) \vee \text{MEETS}(t_1, t_2) \vee \text{OVERLAPS}(t_1, t_2) \vee \text{FINISHES}(t_2, t_1) \vee \text{DURING}(t_2, t_1)$

Diese Darstellung ist zwar formal korrekt, doch sollte normalerweise für weniger Wissen auch eine einfachere Präsentation möglich sein. Für die Sprachverarbeitung würde dies bedeuten, dass für nahezu alle natürlichsprachlichen Ausdrücke lange Disjunktionen notwendig wären, wodurch die gegebene Unterbestimmtheit dieser Zeitausdrücke nicht direkt erfasst wäre.
Gegen dieses Defizit wurden von Christian Freksa sog. Semi-Intervalle eingeführt. Diese sind Primitive, die für die Anfänge und Enden von Intervallen stehen.
α (t) sei der Anfang eines und ω (t) das Ende eines Intervalls t. Der Sachverhalt von Peter und Maria könnte damit wie folgt dargestellt werden:

$$\alpha(t_1) \prec \alpha(t_2)$$

Die Relation zwischen $\omega(t_1)$ und $\omega(t_2)$ ist in diesem Fall irrelevant.

3. Raum

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit der Verarbeitung räumlichen Wissens. Dieses Gebiet der KI ist für viele Anwendungsbereiche interessant. Dazu gehören, wie auch für das zeitliche Wissen, die Verarbeitung natürlicher Sprache, beispielsweise im Bezug auf das Verstehen und Generieren von Wegauskünften und als weiteres Anwendungsbeispiel für Konfiguration und Planung, dass Schliessen über Form, Lage und ggf. Bewegung von Objekten.
Eine der Grundlagen für die Darstellung räumlichen Wissens in der Robotik oder der Bildverarbeitung war und ist seit geraumer Zeit die euklidische Geometrie. Eine Raumrepräsentation basierend auf dieser Geometrie ist jedoch dazu verpflichtet, Festlegungen im Hinblick auf die zugrunde liegenden Konzepte, wie z.B. Distanzen und Winkel vorzunehmen. Das mag bei visueller Wahrnehmung möglich sein, doch bei der Analyse natürlicher Sprache ist es dies nicht. Allein auf der Basis von oft benutzten Präpositionen, wie „unter“, „hinter“ oder „vor“ lassen sich keine derartigen Angaben machen. Die Aufgabe eines Wissensrepräsentationssystems besteht darin, festzulegen in welcher Beziehung die räumlichen Strukturen der Realität mit den Strukturen des Repräsentationssystems stehen. Dabei ist die Kunst alle relevanten Aspekte zu berücksichtigen und die weniger relevanten zu ignorieren, sowie einen angemessenen Detaillierungsgrad zu finden und auch partielle unterbestimmte Repräsentationen zu verwenden.
Im Folgenden werden drei Klassen von Ansätzen zur Verarbeitung unterbestimmten räumlichen Wissens vorgestellt: ein Logik-basierter Ansatz, Constraint Lösungsverfahren und bildbasierte bzw. hybride Ansätze.

3.1 Logik-basierter Ansatz

Im Wesentlichen soll hier der Region Connection Calculus (RCC), welcher an der Universität von Leeds etwickelt wurde, vorgestellt werden. Mit Hilfe des RCC können Aussagen über die Form und die topologischen Eigenschaften von Objekten getroffen werden. Topologisch meint dabei insbesondere, dass keine metrischen Informationen vorhanden sind, sondern nur qualitative Angaben, im Sinne von „grenzt an“ oder „schliesst ein“, gemacht werden.

Basiseinheiten, die in Relation gesetzt werden, sind sog. Regionen. Die Grundlage für die Axiomatisierung von RCC bildet die binäre C-Relation *(C für connection)* , die den topologischen Zusammenhang zweier Regionen beschreibt. Die folgenden zwei Axiome charakterisieren die C-Relation:

$$\forall x \; C(x,x)$$

$$\forall x \, y \; (C(x,y) \rightarrow C(y,x))$$

Eine Region x ist demzufolge immer mit sich selbst verbunden und wenn eine Region x mit einer Region y verbunden ist, dann auch y mit x.

Eine Variante des RCC ist der RCC-8. Er beruht auf einem System von 8 Relationen, die alle möglichen Beziehungen, welche zwischen zwei Regionen bestehen können, beschreiben:

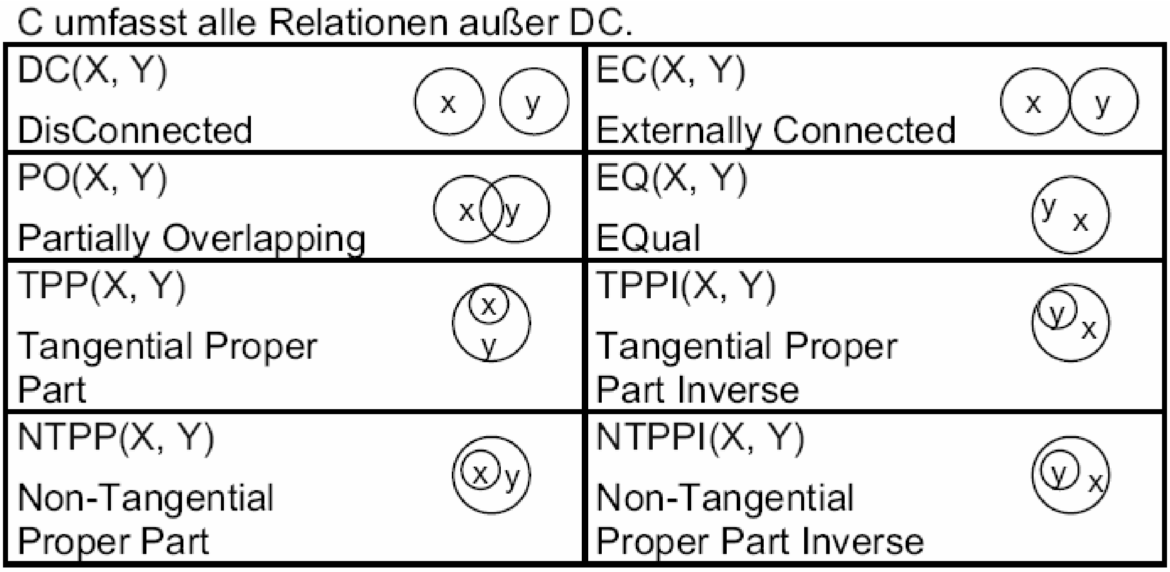

Abbildung 3 : Die Relationen des Region Connection Calculus[6]

In gewisser Hinsicht stellt RCC-8 eine Verallgemeinerung der dreizehn Intervallrelationen von Allen auf höhere Dimensionen dar. Der entscheidende Unterschied zwischen den temporalen Beziehungen Allens und dem hier vorgestellten System räumlicher topologischer Beziehungen ist darin zu sehen, dass der eindimensionale temporale Fall auch eine Anordnungsbeziehung im Sinne von *früher* oder *später* einschliesst, während im räumlichen Fall keine Anordnung möglich ist.

[6] www.informatik.uni-hamburg.de/WSV/teaching/vorlesungen/rze-Unterlagen/RZE09-Raum-Topologie.pdf

Es ist nicht möglich zu sagen, Region X liegt rechts, links, über oder unter Y. Das ist auch der Grund, weshalb sich die Zahl der Relationen verringert hat.
Trotzdem sind natürlich die Anordnungsbeziehungen räumlicher Objekte interessant. Es ist für eine Wegbeschreibung wichtig zu wissen, ob wir vor oder nach Ort x rechts bzw. links abbiegen müssen.
Für die Repräsentation räumlichen Wissens werden diese Aspekte jedoch getrennt von den topologischen betrachtet.
Eschenbach und Kulik haben ein System entwickelt projektive Präpositionen wie *unter, vor, links von…* in Bezug auf die Anordnung von Objekten darzustellen. Die Grundidee ist, dass räumliche Relationen unterschiedliche Arten von Anordnungsbeziehungen beitragen und es außerdem auf die Perspektive bzw. das Referenzsystem ankommt, da *rechts* und *links* relative Präpositionen sind.
Während *vor* und *hinter* lineare Anordnungsinformationen spezifizieren, die durch orientierte Geraden beschreibbar sind, stellen Relationen, wie *links* und *rechts*, planare Anordnungsinformationen dar. Diese sind durch eine Gerade und einen Punkt, der nicht auf der Geraden liegen darf, modellierbar.
Axiome für lineare Anordnungsinformationen:
P und Q seien zwei Punkte.

1. $\forall P\ \forall Q \qquad [P \neq Q \rightarrow \exists l\, [P\, \varepsilon\, l \wedge Q\, \varepsilon\, l]]$
   zu zwei voneinander verschiedenen Punkten gibt es immer eine Gerade, die sie verbindet
2. $\forall l\ \forall P\ \forall Q \qquad [P \neq Q \wedge P\, \varepsilon\, l \wedge Q\, \varepsilon\, l \rightarrow \prec(l, P, Q) \vee \prec(l, Q, P)]$
   bei zwei voneinander verschiedenen Punkten P und Q auf einer orientierten Geraden l sind diese immer so angeordnet, dass entweder P vor Q oder Q vor P gilt.
3. $\forall l\ \forall P\ \forall Q \qquad [\prec(l, P, Q) \rightarrow \neg(\prec(l, Q, P))]$
   es gilt entweder „P vor Q“ oder „ Q vor P “

In den Axiomen für eine planare Anordnungsinformation wird zusammengefasst ausgesagt, dass ein dritter Punkt, welcher nicht auf einer orientierten Gerade liegt, sich rechts oder links von ihr befindet. Damit sind die beiden Halbebenen, welche die Gerade teilt, gemeint. Diese Formalisierung kann auch auf den 3-dimensionalen Raum erweitert werden.

3.2 Constraint-basierte Ansätze

Für die Automatisierung des räumlichen Schliessens eignet sich die Verwendung von spezialisierten Constraint-Lösern. Die Constraints beschreiben dabei geometrische Einschränkungen für die Lage und Form der betrachteten Objekte. Gesucht ist dann eine Anordnung oder Ausformung der Objekte, die allen Einschränkungen genügt. Häufig gibt es dabei nur unzureichende Constraints, da nicht genügend Informationen vorhanden oder nötig sind um exakte Lösungen zu finden.
Stellen wir uns zum Beispiel einen Roboter vor, dessen Sensorinformationen nicht ausreichen, um seine genaue Position im Raum zu bestimmen. Einer Hypothese über seinen Aufenthaltsort entspricht einem Gebiet A in der Karte seiner Umgebung. Soll dieser sich lediglich gefahrvermeidend verhalten, so genügt es zu durch räumliches Schliessen aus den vorhandenen Constraints herauszufinden, dass ein Gefahrengebiet B das Gebiet A überlappt, um beispielsweise zu stoppen. Es kommt hier nicht auf die genaue Lage und Form der beiden Gebiete an, sondern nur auf die topologische Relation.
Auf eine genauere Ausführung und Beispiele für Constraint-Systeme wird im Folgenden verzichtet.

3.3 Bildbasierte bzw. hybride Ansätze

In diesen sog. bildbasierten und hybriden Verfahren der Repräsentation räumlichen Wissens wird untersucht, wie Menschen oder Maschinen Wissen in Form von Bildern bzw. bildartigen Darstellungen repräsentieren. Im angelsächsischen Sprachbereich hat sich dafür der Begriff „*Diagrammatic Reasonig*“ durchgesetzt. Bildartige Darstellungen können Karten, Graphiken, Skizzen usw. sein. Unterschieden wird dabei noch zwischen mentalen und externen Bildern. Mentale oder interne Bilder sind diejenigen, welche sich in unserer Vorstellung befinden und die Menschen häufig nutzen, um etwa komplexe geometrische Anordnungsprobleme zu lösen. Externe Bilder sind die eben erwähnten Karten oder Skizzen.
Bevor ein Anwendungsbeispiel des Diagrammatic Reasoning gezeigt wird, sollen noch kurz einige Vor- und Nachteile einer bildbasierten im Gegensatz zu einer schriftlich formalen Darstellung angesprochen werden.

Eine bildliche Abbildung impliziert bei korrekter Ausführung diverse Regularien, wie die euklidischen Gesetze, Symmetrie oder Anordnungsbeziehungen, welche in schriftlicher Form alle erst festgehalten werden müssten. Zudem besteht dort die Gefahr, bestimmte Gesetzmäßigkeiten zu vergessen, diese sind in einem Bild implizit verankert und können ebenfalls keine Inkonsistenzen aufweisen. Weitere Vorteile der bildlichen Darstellung sind die normalerweise einfachere und schnellere Modifikation und Aktualisierung von Informationen.

Als Nachteil erweist sich, dass die Ausdrucksmächtigkeit bildbasierter Repräsentationen nicht so groß ist, wie die von generellen Sprachen. Negative Informationen können nicht dargestellt werden. Als Beispiel lässt sich der Satz: „*Hamburg liegt nicht in Süddeutschland*“ nehmen. Genauso verhält es sich mit disjunktivem Wissen, wie „*Alle Stadtteile Hamburgs liegen entweder nördlich oder südlich der Elbe*“ oder Regularitäten, wie „*Die Distanz von A nach B entspricht der Distanz von B nach A*“. Diese Informationen lassen sich lediglich erschliessen, nicht jedoch explizit visuell darstellen.

Eine Kombination von propositionaler und bildhafter Repräsentation wurde von Janice Glasgow mit der „*Computational Imagery*“ vorgestellt. Ausgehend von der Hypothese, dass bildbasiertes Schliessen ein adäquater und effizienter Inferenzmechanismus für oder auf räumliche Repräsentationen darstellt, hat sie ein System entwickelt, welches beide Repräsentationsarten kombiniert und vor allem in der Analyse von Molekülstrukturen und dem Data Mining in großen Chemiedatenbanken eingesetzt werden soll.

Aufbauend auf Erkenntnissen der Kognitionswissenschaft verwendet Glasgow drei miteinander verknüpfte Repräsentationsformalismen: eine hierarchische, propositionale Tiefenrepräsentation, eine räumliche und eine visuelle Repräsentation.

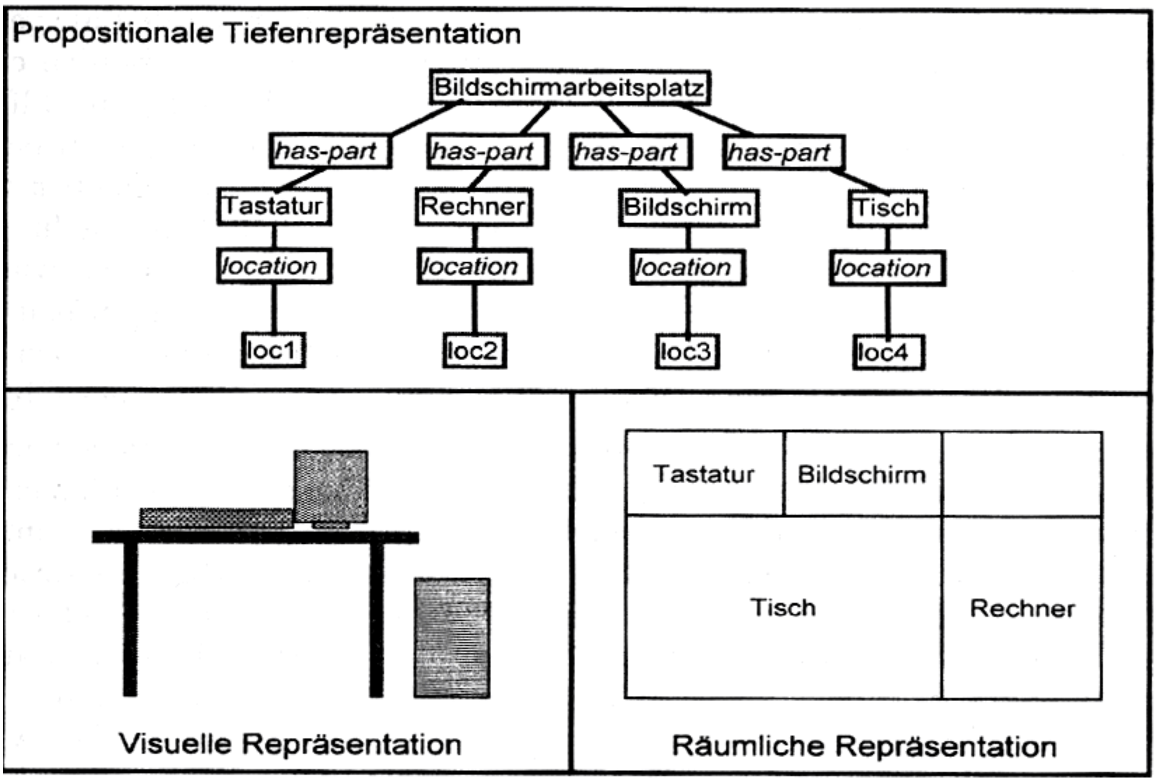

Abbildung 4 : Repräsentationssystem für Computational Imagery[7]

Die Propositionale Tiefenrepäsentation bildet die Basis. Sie ist dem Langzeitgedächtnis nachempfunden und enthält sog. IS-A oder PART-OF Beziehungen, sowie mathematische Beschreibungen für den Aufbau der Bilder, wie Koordinaten. Sie wird in einer Framesprache implementiert. Die räumliche Repräsentation enthält Wissen über die relativen Positionen der Objekte. Sie ist vom Aussagegehalt mit den Relationen des RCC-8 vergleichbar und lässt zwar Anordnungsbeziehungen erkennen, nicht jedoch absolute Entfernungen oder Winkel. Letztere sind aus der visuellen Repräsentation ablesbar. Für sie eignen sich Programme, wie CAD zur Darstellung.

[7]Vgl. Görz / Rollinger / Schneeberger: Handbuch der Künstlichen Intelligenz, 2000 S.395

4. Fazit

Mit dieser Ausarbeitung sollte näher gebracht werden, warum eine formale Darstellung des räumlichen und zeitlichen Wissens für Wissensbasierte Systeme bzw. Systeme mit Künstlicher Intelligenz wichtig ist. Sie ist die Grundlage deren Handlungen komplexer werden und sie unter zeitlichen Bedingungen ablaufen zu lassen.

Natürlich stellen die hier schemenhaft skizzierten Problemstellungen nur einen Teil der aktuell auf diesem Gebiet gestellten Fragen dar und es lassen sich sicherlich auch viele Ansatzpunkte zur Kritik finden, in Hinsicht auf das Ausreichen einer rein qualitativen Betrachtungsweise des räumlichen Wissens zum Beispiel.

Außer Frage steht jedoch, dass dieser Zweig der Forschung seine Berechtigung hat. Nur wird es unter Anderem in der Zukunft mehr und mehr darauf ankommen, die Resultate aus beiden Zweigen, den räumlichen und zeitlichen Theorien, zu kombinieren, um leistungsfähigere Systeme zu bekommen.

Literaturverzeichnis

Buch:

Görz, Rollinger, Schneeberger, 2000: Handbuch der Künstlichen Intelligenz 3.Auflage
Oldenburg Verlag München Wien
S.349 - 399

Internet:

Grundlagen der Verarbeitung von Wissen über Raum, Zeit und Ereignisse
www.informatik.uni-hamburg.de/WSV/teaching/vorlesungen/rze-Unterlagen/RZE09-Raum-Topologie.pdf

Zeitliches Schließen in der KI
www.informatik.hu-berlin.de/ ~hochstra/zeitliches_Schliessen.pdf

Workshop Ontologie-basiertes Wissensmanagement
www.ubka.uni-karlsruhe.de/vvv/2003/wiwi/7/7.pdf