Menschliches und Maschinelles Lernen

Bildung und Revision von Begriffsstrukturen zum Tag/Nachtzyklus

Diplomarbeit

Martin Mühlenbrock

Dortmund, im Dezember 1994

betreut von

Prof. Dr. Katharina Morik

Zweitgutachter

Dr. habil. Joachim Hertzberg

Lehrstuhl VIII

Fachbereich Informatik

Universität Dortmund

Zusammenfassung

In dieser Arbeit wird die kognitive Modellierung eines menschlichen Lernprozesses beschrieben. Die unterschiedlichen Vorstellungen von Kindern verschiedener Altersstufen über die Erde und ihre Erklärungen für den Tag/-Nachtzyklus wurden formal mit dem System MOBAL repräsentiert. In Experimenten mit Fragen und neuen, widersprüchlichen Informationen wurde die Entwicklung und Revision der relevanten Begriffsstrukturen durch die Übergänge der operationalen Modelle systematisch untersucht.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis

Tabellenverzeichnis

Kapitel 1

Kognitive Modellierung

Many theoretical flaws can remain hidden in a verbal theory until one begins to program it.
[Simon and Kaplan, 1989, Seite 31]

Lernen, eine der faszinierendsten menschlichen Fähigkeiten, birgt noch immer viele Geheimnisse. In den letzten Jahrzehnten spielt bei der Untersuchung des menschlichen Lernens ein bestimmtes Medium eine immer größere Rolle — der Computer. Er kann ein Modell darstellen für adaptive Prozesse. Doch die Annäherung an das Phänomen des Lernens ist nicht leicht.

In dieser Arbeit wird der Versuch unternommen, einen menschlichen Lernprozeß, der sich in verschiedenen psychologischen Studien gezeigt hat, mit einem Rechner zu modellieren. Es soll dabei eine explizite Beschreibung entstehen, die plausible Hypothesen über einige Aspekte menschlichen Lernens und Anregungen für maschinelle Lernverfahren liefern kann. Die Ausgangsbasis der Modellierung bilden die Ergebnisse einer Untersuchung, in der Kinder verschiedener Alterstufen nach ihren Vorstellungen von den Himmelskörpern und nach ihren Erklärungen für das Zustandekommen des Tag/Nachtzyklus gefragt wurden [Vosniadou and Brewer, 1994]. Dieser verhältnismäßig komplexe Sachbereich stellt eine gewisse Herausforderung an eine kognitive Modellierung dar, die seine inneren Strukturen repräsentieren will.

Die individuellen Vorstellungen werden formal als prädikatenlogische Modelle mit dem System MOBAL dargestellt [Morik et al., 1993]. Es wird dabei eine Repräsentation gebildet, die relevante Fragen beantworten und ihre Antworten erklären kann. Neue Informationen können zu Widersprüchen in den operationalen Modellen führen und Revisionen erforderlich machen. Durch diese Reaktionen kann es zu Übergängen zwischen den Modellen kommen, so daß sich anschließend eine wissenschaftlichere Erklärung für den Tag/Nachtzyklus ergibt. Bei diesem Lernvorgang spielt das bereits vorhandene Wissen eine herausragende Rolle.

Abschnitt 1.1 Menschliches Lernen Menschliche Lernprozesse werden als Veränderungen von Begriffsstrukturen beschrieben.

Abschnitt 1.2 Maschinelles Lernen Maschinelle Lernprozesse können zur expliziten und verständlichen Darstellung von Begriffsentwicklungen dienen.

Abschnitt 1.3 Zusammenfassung Ein kurzer Überblick über das Inventar an Hilfsmitteln zur Repräsentation verschiedener Erklärungen für den Tag/Nachtzyklus.

1.1 Menschliches Lernen

Angenommen, im Zoo gibt es ein neues Tier. Ein bisher eher unbekanntes Tier – z.B. ein Zork. Genauer gesagt, im Zoo ist ein neues Gehege eingerichtet worden mit mehreren Zorks darin.[1] Beim Anschauen des Geheges, was kann man über Zorks lernen? Die meisten Menschen würden wahrscheinlich Verallgemeinerungen über die Größe, die Form, die Farbe, die Behaarung oder die Bewegungsweise von Zorks anstellen, soweit diese Eigenschaften zu erkennen sind. Andererseits nähme wohl niemand an, daß alle Zorks weiblich sind, in Gehegen leben, immer schlafen und vier Jahre alt sind, auch wenn man bei dem Zoobesuch nur weibliche, vier Jahre alte, in einem Gehege schlafende Zorks gesehen hat. Doch warum nicht? Was unterscheidet eine Eigenschaft wie Farbe von einer Eigenschaft wie Alter?

Im allgemeinen gar nichts. Ob eine Eigenschaft geeignet ist, um sich eine Vorstellung über etwas machen zu können, wird nicht allein durch die Eigenschaft selbst bestimmt, sondern auch durch zusätzliches, schon vorhandenes Wissen. So kann man davon ausgehen, daß die meisten Menschen biologisches Vorwissen haben, das ihnen sagt, daß die Farbe einer Tierart eine verläßliche Eigenschaft ist, um sie von anderen Tierarten zu unterscheiden. Wenn also die Zorks im Zoo hellbraungestreift sind, dann kann man mit einiger Sicherheit davon ausgehen, daß alle Zorks hellbraungestreift sind. Denn Eigenschaften wie die Farbe werden vererbt und sind deshalb in der Regel für alle Exemplare einer Tierart gleich. Dies gilt für eine Eigenschaft wie das Alter bei Tieren nicht, bei Antiquitäten jedoch wohl.

Vieles deutet also darauf hin, daß menschliches Lernen grundlegend durch bereits vorhandenes Wissen beeinflußt wird. Das Vorwissen wirkt sich auf den Lernprozeß aus, indem es bestimmt, welche Hypothesen plausibel erscheinen. Andererseits wirkt sich der Lernprozeß auch auf das Vorwissen aus, denn neue Erkenntnisse müssen in Übereinstimmung mit vorhandenen Vorstellungen gebracht werden. Individuell verschiedene Lernprozesse führen zu einer individuell unterschiedlichen Organisation des Wissen und umgekehrt, wie in Abschnitt 1.1.1 näher erläutert wird. Dabei lassen sich auch Zusammenhänge zwischen der individuellen Entwicklung von Vorstellungen und den Vorstellungen in der Geschichte der Wissenschaft feststellen, wie in Abschnitt 1.1.2 dargelegt wird.

[1] Dieses Beispiel ist angelehnt an [Murphy, 1993, S. 174–176].

1.1.1 Begriffsentwicklung

Menschliches Wissen ist organisiert in *Begriffen*. Nur so ist es überhaupt vorstellbar, daß Menschen durch ihre Erlebnisse und die Vielfalt an Informationen, die sie dabei aufnehmen, nicht einfach überwältigt werden [Smith and Medin, 1981]. Begriffe (*concepts*) fassen reale und imaginäre Objekte und Ereignisse zu Klassen oder Kategorien zusammen und können als Worte auch Bezeichner für die Begriffsmitglieder oder -instanzen sein, welche die *Begriffsextension* bilden. Die Mitglieder eines Begriffes sind einander ähnlich und haben übereinstimmende Eigenschaften [Rosch, 1978].

Die Ähnlichkeit der Mitglieder bezieht sich wiederum auf die Begriffe und ihre kausalen und erklärenden Verbindungen zu anderen Begriffen, die zusammen Begriffsstrukturen ausformen [Murphy and Medin, 1985, Carey, 1985b]. Begriffe sind also gegeben durch ihre *Begriffsintension*, d.h. durch eine Menge definierender Eigenschaften, die einzeln notwendige und gemeinsam hinreichende Bedingungen für den Begriff darstellen, und durch einen Inferenzprozeß über verbundene Begriffe, durch den eine Erklärung für die Zugehörigkeit zum Begriff gebildet wird (vgl. [Wrobel, 1993a]).

Die kognitive Entwicklung, die von Mensch zu Mensch sehr verschieden sein kann, ist gekennzeichnet durch die Ausprägung individueller Begriffsstrukturen (für eine Einführung siehe [Siegler, 1991, Flavell et al., 1993]). Lernen wird dabei nicht als ein passives Übernehmen von Wissen gesehen, sondern als ein Prozeß, bei dem der Lernende aktiv sein Wissen selber konstruieren muß auf der Basis der Vorstellungen oder Begriffe, die er bereits vorher erworben hat (*konstruktivistische* Sichtweise). Diese bereits erworbenen Vorstellungen spielen eine ganz zentrale Rolle im Lernprozeß [Posner et al., 1982, Driver and Erickson, 1983, Gilbert and Watts, 1983, Osborne and Wittrock, 1985, Strike and Posner, 1985, Driver, 1989]. Sie beeinflussen die Interpretation der sinnlichen Wahrnehmungen und deren Weiterverarbeitung. Individuell verschiedene Lernprozesse führen zur Entwicklung alternativer Begriffsstrukturen (*alternative conceptual frameworks*),[2] die sich von wissenschaftlichen Vorstellungen unterscheiden.

Beim Lernen kann es notwendig sein, einen bestimmten Begriff schon zu kennen, um einen weiteren erlernen zu können. Andererseits kann eine schon erfolgte Begriffsbildung die Aneignung eines anderen Begriffs erschweren, denn neue Informationen können Veränderungen in der gesamten Begriffsstruktur hervorrufen (*conceptual change*). Unklar ist jedoch, ob diese Veränderungen eher als Anreicherung oder Ersetzung bestehender Strukturen (leichte Restrukturierung) beschrieben werden können oder als Neuzusammenstellung von Teilstrukturen (starke Restrukturierung) [Carey, 1986, Carey, 1991, Villani, 1992]. Bei starken Restrukturierungen kann man vor allem erwarten, daß die Begriffstrukturen vor und nach der Veränderung unvergleichbar (inkommensurabel) sind.

[2] Für die Bezeichnung (alternativer) Begriffstrukturen gibt es im internationalen Raum viele verschiedene Ausdrücke wie z.B. *misconceptions*, *alternative frameworks*, *notions*, *mental models*, *theories*, *belief systems* und andere, die spezielle Aspekte im Rahmen bestimmter theoretische Perspektiven widerspiegeln [Habimbola, 1988].

Menschliche Begriffsveränderungen werden untersucht bei der kognitiven Entwicklung von Anfängern zu Experten in einem Sachbereich (*expert/novice shift*) [Chi et al., 1981, Chi et al., 1982] und bei der kognitiven Entwicklung von Kindern zu Erwachsenen.[3] Die Entwicklung von Kindern kann als sachbereichsabhängig (*domain specific*) betrachtet werden und ist damit der Entwicklung von Anfängern zu Experten vergleichbar [Carey, 1985a, Carey, 1990].

Doch auch wenn die Entwicklung von Begriffstrukturen individuell verschieden verläuft, so lassen sich dennoch Gemeinsamkeiten finden:

> *The evidence from a number of carefully conducted studies suggests that children's ideas within specific domains tend to follow certain trajectories. Moreover, although there is a variation at the individual level and there may be specific cultural influences to be considered, the general picture is that there is much in common in the conceptual trajectories for children from different backgrounds and from different countries.* [Driver, 1989, S. 488]

In den folgenden Kapiteln 2 bis 4 wird es auch darum gehen, solche Lerntrajektorien bei der Entwicklung der kindlichen Erklärungen zum Tag/Nachtzyklus zu finden.

1.1.2 Wissenschaftliches Entdecken

Die konstruktivistische Sichtweise auf menschliches Lernen kann auch verwendet werden, um die Entwicklung der Wissenschaft im Laufe ihrer Geschichte zu untersuchen, da diese selbst wiederum auf den kognitiven Aktivitäten der beteiligten Menschen beruht [Novak, 1988, Nussbaum, 1989, Nersessian, 1992]. So gibt es denn auch in der Wissenschaftsgeschichte Vorstellungen, die alternativen Vorstellungen bei Kindern heute sehr ähnlich sind (siehe z.B. [Gentner and Gentner, 1983]).

Allerdings finden sich in den Wissenschaften Methoden zur Theoriebildung und -prüfung, die keine Entsprechung beim Menschen haben. Auch die personelle Verköperung (*embodiment*) und ihre Einbettung in den wissenschaftlichen Kontext (*embedding*), gegeben durch die Organisierung der Forschung, Kommunikation und Zusammenarbeit [Shrager and Langley, 1990], haben zusätzlich zu der kognitive Entwicklung der einzelnen Wissenschaftler einen Einfluß auf die erzielten Erkenntnisse.

1.2 Maschinelles Lernen

Die Computersimulation eröffnet die Möglichkeit zu tieferen theoretischen Erkenntnissen über die komplexe Interaktion zwischen bereits vorhandenen Begriffsstrukturen und neuen Informationen. Sie wirkt *hypothesenprüfend* als Hilfsmittel zur Präzisierung und logischen Strukturierung bestehender

[3] Die Bibliographie [Pfundt and Duit, 1991] enthält ungefähr 2000 Einträge zu Arbeiten auf diesem Gebiet.

Theorien und *hypothesengeneriernd* als Anregung zur Formulierung neuer Theorien [Strube et al., 1993].

Damit ergeben sich aus psychologischer Sicht folgende Gründe für ein interdisziplinäres Interesse an Theorien des maschinellen Lernens [Pazzani, 1994]:

Hypothesenprüfend Die Implementierung eines lauffähigen Programms zum maschinellen Lernen erfordert die präzise Spezifikation der verwendeten Theorien menschlichen Lernens. Die Implementierung eines operationalen, d.h. rechnerbasierten Modells kann wichtige Aspekte ins Licht rücken, die sonst leicht übersehen werden. Der Vergleich zwischen menschlichem und maschinellem Lernen kann auf Schwächen in bestehenden psychologischen Theorien hinweisen.

Hypothesengenerierend Modelle maschinellen Lernens können zukünftige Forschungsvorhaben anregen, indem sie hilfreiche Einsichten vermitteln und Ausgangspunkte für theoretische Modelle menschlichen Lernens bilden.

Umgekehrt stellen sich aus informationstheoretischer und -verarbeitender Sicht folgende Erwartungen an die Erforschung menschlichen Lernens [Pazzani, 1994]:

Hypothesenprüfend Menschen sind die geeignetsten „Objekte", die für die empirische Untersuchung einer Vielfalt von Lernprozessen zur Verfügung stehen. Experimentelle Ergebnisse mit Versuchspersonen können der Validierung operationaler Modelle dienen und auf Unzulänglichkeiten hinweisen.

Hypothesengenerierend Es gibt im Bereich des maschinellen Lernens viele offene Fragestellungen in Verbindung mit Lernaufgaben, die von Menschen täglich angegangen und gelöst werden. Menschen können z.B. aus unvollständigen und widersprüchlichen Informationen mit Unterstützung vorhandenen Hintergrundwissens lernen.

Für die rechnerbasierte Untersuchung kognitiver Entwicklungsprozesse werden zunächst die Wissensstrukturen und Vorgehensweisen repräsentiert, die für die Ausführung von Aufgaben in unterschiedlichen Entwicklungszuständen stehen (*Schnappschüsse*). Die Implementierung eröffnet dann die Möglichkeit zur Darstellung von Lernprozessen als Übergang zwischen den operationalen Modellen [Simon and Kaplan, 1989]. Diese dynamische Perspektive ermöglicht die Untersuchung von Reihenfolgeabhängigkeiten und Schwierigkeiten im Vergleich menschlichen und maschinellen Lernens (siehe z.B. [Elio and Anderson, 1984, MacGregor, 1988, Pazzani, 1991]).

Aus psychologischer Sicht zeigen sich jedoch einige nicht unerhebliche Probleme bei der Modellierung komplexer Sachbereiche. Unzureichende Programmierkenntnisse, fehlende Methoden der empirischen Validierung rechnerbasierter Modelle und nicht zuletzt der hohe Zeit- und Arbeitsaufwand verhindern häufig die Verwirklichung von Computersimulationen [Rabinowitz et al., 1987]. In Abschnitt 1.2.1 wird ein Ansatz zur Erleichterung der Erstellung formaler Modelle präsentiert, der auf dem Einsatz kooperierender Systeme basiert. In Abschnitt 1.2.2 wird konkret ein System zur Unterstützung der Modellierungsarbeit vorgestellt.

1.2.1 Evolvierende Modelle

Es gibt im Prinzip unendlich viele Möglichkeiten, einen Sachbereich zu modellieren. Ein Modell legt fest, welche Aspekte eines Sachbereichs wichtig sind, indem es den relevanten Ausschnitt in der erforderlichen Granularität darstellt [Hobbs, 1985]. Ein operationales Modell, also ein Modell, dessen Repräsentationssprache von einem Rechner interpretierbar ist, kann die Fähigkeiten, die es beschreibt, auch hervorzubringen [Morik, 1992]. Für die Dokumentation, Kommunikation und Diskussion über ein Modell ist seine explizite und verständliche Repräsentation auf der Wissensebene notwendig [Dietterich, 1986, Clancey, 1989].

Die Künstliche Intelligenz hat sich einen eigenen Weg geschaffen, anspruchsvolle Aufgaben anzugehen: Sie schaut beim Menschen nach. In Abschnitt 1.1.1 wurde der konstruktivistische Prozeß der menschlichen kognitiven Entwicklung beschrieben. Die konstruktivistische Vorgehensweise bei der Erstellung von Modellen (*sloppy modeling*) ist gekennzeichnet durch die folgenden Eigenschaften [Morik, 1989]:

- Modellierung ist ein *unendlicher* Prozeß, denn ein Modell ist immer unvollständig, da sich der dargestellte Sachbereich und das Wissen über ihn verändern können.

- Modellierung ist ein *approximativer* Prozeß, denn ein Modell ist immer nur mehr oder weniger adäquat zum repräsentierten Wissen.

- Modellierung ist ein *fehlerbehafteter* Prozeß, denn ein Modell kann nicht sofort widerspruchsfrei sein und gleichzeitig alle relevanten Aspekte eines Sachbereichs darstellen.

Aus diesen Punkten ergibt sich der evolutionäre Charakter von Modellierungsprozessen.

Die Entwicklung formaler Modelle kann durch ein geeignetes Modellierungs- und Lernsystem unterstützt werden (*balanced cooperative modeling*) [Morik, 1989, Morik, 1993]. An ein solches System werden bestimmte Anforderungen gestellt, insbesondere an seine Schnittstelle zum Benutzer [Wrobel, 1988]:

- Es sollte eine flexible Interaktion mit dem Benutzer vorsehen und neue Informationen auswerten, sobald sie eingegeben werden.

- Es sollte Revisionen ermöglichen, also neben der Erweiterung auch die nichtmonotone Veränderung von Modellen unterstützen und automatisch deren Auswirkungen auf alle abhängigen Daten im Modell propagieren.

- Es sollte die logische Konsistenz der repräsentierten Informationen überwachen, Widersprüche anzeigen und dem Benutzer Gelegenheit zu deren Auflösung oder vorläufigen Zurückhaltung geben.
- Es sollte alle lokalen und globalen Konsequenzen, die sich aus Benutzereingaben für das Modell ergeben, berechnen und anzeigen.
- Es sollte angemessene Benutzersichten auf das dargestellte Modell vorsehen mit der Möglichkeit zu fokussierten Betrachtungsweisen.
- Es sollte sich mit seiner Schnittstelle den Kenntnissen des Benutzers anpassen und soviel Information wie nötig und so wenig wie möglich anzeigen.

Das System MOBAL wurde entwickelt, um den Erfordernissen einer kooperierenden Modellierungsarbeit so weit wie möglich entgegenzukommen.

1.2.2 Ein kooperatives Modellierungssystem

Ein Repräsentationsformalismus legt die Syntax, Semantik und den Beweismechanismus eines wissensbasierten Systems fest. Das System MOBAL[4] verwendet eine Prädikatenlogik ohne mehrstellige Funktionssymbole [Morik et al., 1993, Sommer et al., 1993]. Durch die Spezifikation eines Vokabulars an Symbolen spezifiziert der Benutzer eine Repräsentationssprache, die den Rahmen für ein darzustellendes Modell vorgibt.

Begriffe (siehe Abschnitt 1.1) werden in MOBAL durch eine Prädikatendeklaration spezifiziert [Wrobel, 1993a]. Das bedeutet, daß Prädikate Namen für Begriffe darstellen, auf die verwiesen werden kann. Es bedeutet nicht, daß die so repräsentierten Begriffe in der Umgangssprache nur unter diesen Namen bekannt sind. Ein Prädikat kann eine oder mehr Argumentenstellen haben, für die wiederum Sorten angegeben oder durch MOBAL berechnet werden können. So wird z.B. durch

```
opaque/1:  <object>.
```

ein Prädikat mit dem Namen `opaque` (undurchsichtig) deklariert, dessen einzige Argumentstelle von der Sorte `<object>` ist. Dieses Prädikat kann nun zur Repräsentation eines Begriffes von *Undurchsichtigkeit* dienen.[5]

Fakten sind die kleinste Repräsentationseinheit in MOBAL und stellen die Extension von Begriffen dar, indem sie die Zugehörigkeit der Individuen eines Sachbereichs zu einem Begriff festlegen [Wrobel, 1993a]. Fakten sind Prädikate mit Konstanten als Argumenten, wie z.B.

```
opaque(hill).
```

[4]Das System MOBAL wurde entwickelt von der Gesellschaft für Mathematik und Datenverarbeitung (GMD), Sankt Augustin.

[5]Notation: Prädikate werden in dieser Arbeit durchgehend in der Schriftart `Typewriter` gesetzt, die Begriffe, die sie repräsentieren sollen, in der Schriftart *Italic*.

Dieses Faktum soll ausdrücken, daß ein bestimmtes Individuum, bezeichnet mit dem konstanten Term `hill`, ein Mitglied des Begriffs mit dem Namen `opaque` ist, d.h. also *Der Berg ist undurchsichtig*. Die Nichtzugehörigkeit zu einem Begriff kann explizit durch negierte Fakten angegeben werden. So wird z.B. durch

```
not(opaque(cloud)).
```

ausgedrückt, daß das Objekt (<object>) `cloud` kein Mitglied des Begriffs `opaque` ist, also *Die Wolke ist nicht undurchsichtig*.

Mehrstellige Prädikate stellen *relationale* Informationen dar, im Gegensatz zu rein propositionaler Informationen in einem Formalismus von nur aussagenlogischer Ausdrucksfähigkeit. Das folgende Deklaration

```
covers/4:  <object>,<object>,<object>,<event>.
```

spezifiziert das vierstellige Prädikat `covers` mit Argumenten von den Sorten <object>, <object>, <object> und <event>, um damit einen Begriff von *verdecken* zu repräsentieren. Ein Faktum wie

```
covers(cloud,sun,me,event0).
```

drückt eine Relation zwischen den Objekten `cloud`, `sun` und `me` und dem Ereignis `event0` aus, d.h. *Wolken verdecken die Sonne beim Ereignis* `event0`.

Ein Begriff wird definiert durch seine Intension, die durch Regeln repräsentiert wird [Wrobel, 1993a]. Regeln sind in MOBAL Klauseln mit mindestens zwei Literalen und einem ausgezeichneten Kopf. Der Kopf einer Regel wird als Konklusion und alle anderen Literale als Prämissen bezeichnet. Es bestehen keine Beschränkungen auf die Anzahl von positiven oder negierten Literale in einer Regel.

Notwendige Bedingungen für einen Begriff werden durch Regeln dargestellt, die das Begriffsprädikat als einzige Prämisse haben, z.B.

```
covers(O1,O2,O3,E) → disappears(O2,O3,E).
```

Das Prädikat `disappears` stellt einen Begriff für *verschwinden* dar und steht durch diese Regel in Beziehung zum Begriff *verdecken*. Die Zeichen `O1`, `O2`, `O3` und `E` sind Variablen, die durch Konstante instantiiert werden können. Diese Regel soll aussagen, daß der Begriff des Verdeckens den Begriff des Verschwindens impliziert, oder genauer *Wenn ein Objekt ein zweites Objekt aus Sicht eines dritten Objekts verdeckt, dann verschwindet in diesem Moment das zweite Objekt für das dritte Objekt*.

Hinreichende Bedingungen für einen Begriff sind Regeln mit dem Begriffsprädikat in der Konklusion, wie z.B.

```
not(between(O1,O2,O3,S1)) & invisible(O2,O1,O3,S2)
     & state_seq(S1,E,S2) & not(stationary(O1,E))
     → covers(O1,O2,O3,E).
```

Diese Regel definiert, daß die Begriffe `between`, `invisible`, `state_seq` und `stationary` den Begriff `covers` impizieren. Diese Implikation wird näher spezifiziert durch das Auftreten der Variablen `O1`, `O2`, `O3`, `S1`, `S2` und `E` in den Argumentstellen der verschiedenen Prädikate.

Die Relationen zwischen den Prädikaten sind inferentieller Natur. Das System MOBAL enthält eine Inferenzmaschine, die unter Beachtung von Widersprüchen automatisch aus Fakten durch Vorwärts- und Rückwärtsinferenzen weitere Fakten ableitet [Emde, 1991]. So leitet die Inferenzmaschine aus dem oben angegebenen Faktum

```
covers(cloud,sun,me,event0).
```

und der Regel

```
covers(O1,O2,O3,E) → disappears(O2,O3,E).
```

das neue Faktum

```
disappears(sun,me,event0).
```

ab. Eine Menge von Regeln repräsentiert also zusammen mit dem Inferenzmechanismus eine Begriffsstruktur (Abschnitt 1.1). In komplexeren Strukturen können lokale Veränderungen globale Konsequenzen haben. Die Inferenzmaschine propagiert alle Veränderungen der Fakten- und Regelmenge und zeigt sie dem Benutzer unmittelbar an (vgl. Abschnitt 1.2.1).

Neben der Darstellung durch Regeln gibt es in MOBAL auch die Möglichkeit, negative oder disjunktive Beziehungen zwischen Prädikaten durch Bedingungen (*integrity constraints*) zu repräsentieren. So wird z.B. durch

```
covers(O1,O2,O3,E) & covers(O2,O1,O3,E) ⇝ .
```

eine Negation zwischen bestimmten Verdeckungskonstellationen ausgedrückt, nämlich *Wenn ein Objekt ein zweites Objekt aus Sicht eines dritten Objekts verdeckt, dann kann nicht gleichzeitig aus derselben Perspektive das zweite Objekt das dritte Objekt verdecken.* Im Gegensatz zu Regeln werden durch Bedingungen keine weiteren Fakten abgeleitet. Zusätzlich hält MOBAL noch eine Reihe von vordefinierten Prädikaten bereit für arithmetische Funktionen, wie z.B. das Prädikat

```
ne/2: <>,<>.
```

zur Darstellung von Ungleichheit (*not equal*), und für autoepistemische Operationen, wie z.B. das Prädikat

```
unknown/1: <proposition>.
```

dessen Argumente Literale sind und das zu einem nichtmonotonen Verhalten des Systems führt (siehe [Morik et al., 1993]).

Zur Darstellung von widersprüchlichen oder unvollständigen Informationen werden den Fakten Wahrheitswerte oder Evidenzpunkte zugewiesen. Die vier Wahrheitswerte `true`, `false`, `both` und `unknown` repräsentieren wahre, falsche, widersprüchliche bzw. unbekannte Informationen in Relation zum dargestellten Wissen (*beliefs*). Diese Wahrheitswerte bestimmen, welche Ableitungen aus den Fakten inferiert werden können. Wahre Fakten erfüllen die Prämissen von Regeln, wenn diese geeignet instantiiert werden können, so daß neue Fakten abgeleitet werden. Negierte Prämissen können nicht durch falsche Fakten, sondern nur durch wahre negierte Fakten erfüllt werden. Fakten werden mit `both` als widersprüchlich markiert, wenn sowohl sie wie auch ihre Negation eingegeben oder aus den vorhandenen Fakten abgeleitet wurden. Fakten mit dem Wahrheitswert `unknown` können hingegen aus dem vorhandenen Wissen nicht inferiert werden, sie erfüllen jedoch das entsprechende autoepistemische Prädikat `unknown` (siehe oben). Den Wahrheitswerten `true`, `false`, `both` und `unknown` entsprechen die Evidenzpunkte `[1000,0]`, `[0,1000]`, `[1000,1000]` bzw. `[0,0]`, die wiederum eine kontinuierliche Darstellung von Glaubwüdigkeit erlauben.

Widersprüchliche Fakten und die Verletzung von Bedingungen werden in einer Agenda angezeigt, wo sie unmittelbar oder zu einem späteren Zeitpunkt behandelt werden können (vgl. Abschnitt 1.2.1). Das Auflösen von Widersprüchen, die aus einer Basis von Fakten und Regeln folgen, ist möglich durch Revisionsoperationen [Gärdenfors, 1992, Nebel, 1991]. Im System MOBAL werden Widersprüche durch eine minimale Basisrevision aufgehoben, um nur kleinstmögliche Veränderungen in der Fakten- und Regelmenge vorzunehmen [Wrobel, 1993b]. Dies wird entweder durch das Löschen eingegebener Fakten oder durch die syntaktische Einschränkung von Regeln durch Ausnahmenlisten (*support sets*) erreicht. Letztere werden wiederum benutzt, um mit induktiven Verfahren auf neue Regeln zu schließen, die sich aus den gegebenen Fakten generalisieren lassen und keine Ausnahmen aufweisen [Wrobel, 1993a].

Dem Benutzer bietet MOBAL verschiedene Sichten auf die vorhandenen Wissensbasis (*domain*) an (vgl. Abschnitt 1.2.1). Das System sieht z.B. eine Abstraktion der Regelmenge vor, indem es eine Topologie aus Mengen von Prädikaten erstellt, die als Topologieknoten dargestellt werden [Morik et al., 1993]. In solch einer Prädikatentopologie sind jeweils zwei Knoten gerichtet miteinander verbunden, wenn es Regeln gibt, die mindestens ein Prädikat aus dem ersten Knoten als Prämisse haben und ein Prädikat aus dem zweiten Knoten als Konklusion. Eine Regel entspricht einer gegebenen Topologie, wenn alle Prämissenprädikate aus dem gleichen Knoten wie das Konklusionsprädikat oder aus dessen unmittelbaren Vorgängerknoten kommen. Auf diese Weise demonstriert eine Topologie die Struktur der Inferenz im dargestellten Sachbereich.

1.3 Zusammenfassung

Menschliches Wissen ist organisiert in individuell unterschiedlichen Begriffstrukturen, die alternativ zu wissenschaftlichen Vorstellungen sein können. Dieses Vorwissen spielt eine zentrale Rolle beim Lernen, doch ist die genaue Spezifikation der Begriffsveränderung noch eine offene Frage. Diese konstruktivistische Sichtweise findet sich auch bei der Untersuchung von Wissenschaftsentwicklungen.

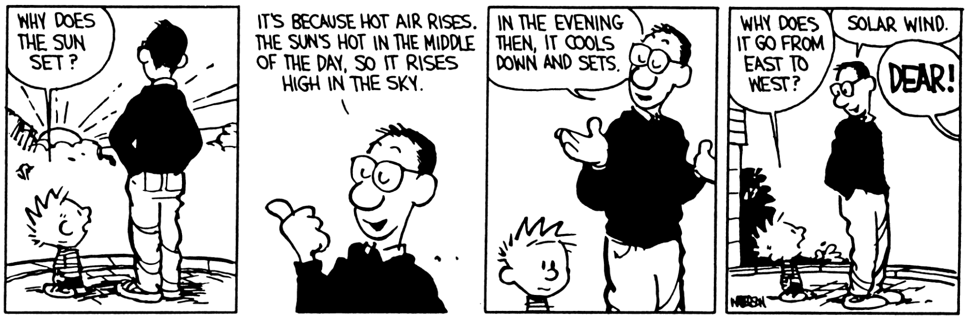
Durch eine kognitive Modellierung können Verfahren des maschinellen

Lernens Modelle für die Begriffsveränderungen beim Menschen sein und zur Präzisierung der Theorien über menschliches Lernen beitragen. Die Entwicklung formaler operationaler Modelle kann durch kooperierende Modellierungssysteme unterstützt werden. Das System MOBAL stellt Begriffe relational durch Prädikate, Fakten, Regeln und einen Inferenzmechanismus dar, der auch die Repräsentation unvollständigen oder widersprüchlichen Wissens erlaubt.

In den folgenden Kapiteln werden nun die unterschiedlichen Erklärungen von Kindern verschiedener Alterstufen für den Tag/Nachtzyklus vorgestellt (Kapitel 2) und deren Begriffstruktur mit dem System MOBAL modelliert (Kapitel 3). Die Modelle dienen dann als Ausgangsbasis für Experimente mit Fragen und neuen, wissenschaftlichen Informationen, um Aussagen über mögliche Lerntrajektorien machen zu können (Kapitel 4).

Kapitel 2

Erklärungen für Tag und Nacht



[Watterson, 1990, Seite 25]

Im zweiten Jahrhundert unserer Zeitrechnung entwickelte der ägyptische Mathematiker Ptolemäus eine Theorie, die die Astronomie weit über tausend Jahre lang beherrschen sollte. Ptolemäus Darstellung stimmte mit der Astronomie Platos und den Physikalischen Prinzipien des Aristoteles darin überein, daß sie die Erde zum Zentrum des Universums machte, um die der Mond, die Sonne und die Planeten kreisten. Durch die Postulierung solcher Kreisbahnen war es Ptolemäus möglich, eine große Anzahl von Beobachtungen im Zusammenhang mit den Himmelskörpern zu erklären.

Ptolemäus Ansichten blieben, abgesehen von kleinen Änderungen, bis zum Jahre 1543 unangefochten, als Kopernikus' *De Revolutionibus Orbium Coelestium* erschien. Nach Kopernikus bildet die Sonne das Zentrum des Universums und die Erde dreht sich um sie genauso wie die anderen Planeten, während der Mond sich um die Erde dreht. Es sollte allerdings noch mehr als hundert Jahre dauern, bis die kopernikanische Sichtweise, durch Galileo erweitert und ergänzt, allgemein anerkannt wurde.

Die heliozentrische Sichtweise des Kopernikus hatte entscheidende Vorteile gegenüber der ptolemäischen, geozentrischen Sichtweise. So lieferte sie z.B. eine Erklärung für die bis dahin anomale Beobachtung, daß die Planeten Merkur und Venus, im Gegensatz zu den anderen Planeten wie Mars, Jupiter und Saturn, niemals in Opposition zur Sonne stehen. Denn in der heliozentrischen Sichtweise bilden die Planeten Merkur und Venus die inneren Planeten, d.h. sie sind näher zur Sonne als die Erde, und deshalb ist eine Konstellation unmöglich, in der sich die Erde auf einer Linie zwischen ihnen und der Sonne befindet.

Die meisten Menschen werden jedoch kaum jemals solche Beobachtungen machen, und doch zeigen psychologische Studien, daß auch ihre Vorstellungen in der (empirischen) Astronomie grundlegenden Veränderungen unterworfen sind, die häufig denen in der Geschichte der Astronomie ähnlich sind. Um Studien solcher Art soll es in diesem Kapitel gehen, zuerst allgemein, dann detailliert am Beispiel einer Studie über die Erklärungen von Kindern verschiedener Altersstufen zum Tag/Nachtzyklus.

Abschnitt 2.1 Studien über Vorstellungen in der Astronomie 27 verschiedene Studien über Vorstellungen in der Astronomie werden im Vergleich dargestellt.

Abschnitt 2.2 Studien über Vorstellungen zum Tag/Nachtzyklus Detaillierter und mit ihren Ergebnissen werden fünf Studien über Vorstellungen zum Tag/Nachtzyklus beschrieben.

Abschnitt 2.3 Der Tag geht, die Nacht kommt: individuelle Erklärungen In einer Studie von Vosniadou und Brewer konnten 16 verschiedene Erklärungen zum Tag/Nachtzyklus bei Kindern im Alter von 6 bis 11 Jahren ermittelt werden.

Abschnitt 2.4 Diskussion Die Studienergebnisse werden im Hinblick auf ihre rechnergestützte Modellierung analysiert.

2.1 Studien über Vorstellungen in der Astronomie

In den vergangenen Jahren sind eine ganze Reihe von Studien über individuelle Vorstellungen in der Astronomie entstanden. Das rege Interesse an diesem Thema begann mit einer allgemein anerkannten Studie von Nussbaum und Novak über die Vorstellungen siebenjähriger Kinder von der Erde (siehe Eintrag 14 in Tabelle 2.3) [Nussbaum and Novak, 1976, Nussbaum and Novak, 1978]. Sie befragten 52 Kinder einer Schule in Ithaca, USA, nach ihren Vorstellungen von der Form der Erde, der Gravitation und der Erde im Raum. Ihre Interviewtechnik basiert auf der Annahme, daß es nicht möglich ist, individuelle Vorstellungen als eng begrenzt und unabhängig zu betrachten und danach isoliert von anderen Vorstellungen zu fragen (siehe Abschnitt 1.1.1). Ihre Vorgehensweise wurde auch in vielen anderen Studien, mehr oder weniger abgeändert, verwendet.

In den sechs Tabellen 2.1 bis 2.6 sind 27 verschiedene Studien über Vorstellungen in der Astronomie umfassend und im Vergleich dargestellt. Die Studien sind numeriert und bibliographisch geordnet, Sekundärreferenzen wurden kursiv gesetzt. Für jede Studie ist angegeben, welcher Art sie ist, welchen Gegenstandsbereich sie abdeckt, an welchem Ort sie stattfand, wer

Tabelle 2.1: Studien zu Vorstellungen in der Astronomie

Studie		Art	Gegenstand	Ort	Probanden	Mittel
1	[Bar et al., 1994]	Querschnittsstudie (Alter)	Gravitation	Schulen in Jerusalem, Israel	400 Kinder, 4 bis 13 Jahre alt, w/m gleich[a]	strukturierte Interviews mit Demonstrationsobjekten (30 min)
2	[Baxter, 1989]	Querschnittsstudie (Alter)	Form der Erde, Gravitation, Tag/Nachtzyklus, Mondphasen, Jahreszeiten	Schule in Wellington, Großbritannien	100 Kinder, 9 bis 16 Jahre alt, w/m gleich	Fragebogen mit Wahlantworten, Demonstrationsobjekten und Pilotstudie
3	[de Vecchi, 1986]	—	Erde im Raum, Mondphasen, Jahreszeiten	Schule in Frankreich	Kinder, 8 bis 11 Jahre alt	Interviews
4	[Dupré et al., 1984]	—	Gravitation	Italien	373 Erwachsene	Fragebogen mit Demonstrationsobjekten und Pilotstudie
5	[Gunstone and White, 1980, Gunstone and White, 1981]	—	Gravitation	Hochschule in Monash, Victoria, Australien	468 Erwachsene	Fragebogen mit Demonstrationsobjekten
6	[Jones et al., 1987]	Querschnittsstudie (Alter)	Form und Größe der Erde, Erde im Raum	Schulen in Hobart, Tasmanien, Australien	32 Kinder, 8 bis 11 Jahre alt, w/m gleich	strukturierte Interviews mit Demonstrationsobjekten

[a] gleiche Anzahl weiblicher und männlicher Probanden (w/m gleich)

Studie		Art	Gegenstand	Ort	Probanden	Mittel
7	[Klein, 1982]	Querschnittsstudie (Kultur)	Form der Erde, Gravitation, Erde im Raum, Tag/-Nachtzyklus	Schule in Minnesota, USA	jeweils 12 mexikanisch– und anglo–amerikanische Kinder, 7 bis 8 Jahre alt, w/m gleich[a]	strukturierte Interviews (20 min)
8	[Krupa et al., 1985]	Querschnittsstudie (Alter)	Gravitation	Kindergarten und Schulen in Boston, Massachusetts, USA	105 Kinder, 5 bis 9 Jahre alt, w/m gleich	strukturierte Interviews mit Demonstrationsobjekten und Pilotstudie
9	[Lightman et al., 1987]	—	Expansion des Universums	Illinois, USA	1120 Erwachsene	Telefoninterviews
				Schulen in Arlington und Old Saybrook, Massachusetts, USA	83 Kinder, 14 bis 18 Jahre alt, w/m gleich	Aufsatz
10	[Mali and Howe, 1979]	Querschnittsstudie (Alter)	Form der Erde, Gravitation	Schulen in Kathmandu und Pokhara, Nepal	250 Kinder, 8 bis 12 Jahre alt, w/m gleich	strukturierte Interviews mit Demonstrationsobjekten
11	[Mayer, 1987]	Querschnittsstudie (Unterricht)	Gravitation	Schulen in Italien	518 Kinder, 14 bis 18 Jahre alt	Fragebogen mit Wahlantworten

[a] gleiche Anzahl weiblicher und männlicher Probanden (w/m gleich)

Tabelle 2.2: Studien zu Vorstellungen in der Astronomie (Fortsetzung)

Studie	Art	Gegenstand	Ort	Probanden	Mittel
12 [Noce and Vicentini, 1988]	Querschnittsstudie (Alter)	Gravitation	Schule in Italien	224 Kinder, 14 bis 17 Jahre alt	Fragebogen
	—		Hochschule in Italien	138 Erwachsene	
13 [Nussbaum, 1979] *[Nussbaum, 1985, Nussbaum, 1986]*	Querschnittsstudie (Alter)	Form der Erde, Gravitation, Erde im Raum	Schule in Jerusalem, Israel	240 Kinder, 9 bis 13 Jahre alt	strukturierte Interviews mit Demonstrationsobjekten
14 [Nussbaum and Novak, 1976, Nussbaum and Novak, 1978]	Längsschnittstudie (Unterricht)	Form der Erde, Gravitation, Erde im Raum	Schule in Ithaca, New York, USA	52 Kinder, 7 bis 8 Jahre alt	strukturierte Interviews mit Demonstrationsobjekten und Pilotstudie
15 [Nussbaum and Sharoni-Dagan, 1983]	Längsschnittstudie (Unterricht)	Form der Erde, Gravitation, Erde im Raum	Schule in Jerusalem, Israel	114 Kinder, 7 bis 8 Jahre alt	strukturierte Interviews mit Demonstrationsobjekten
16 [Ogar, 1986]	Querschnittsstudie (Alter)	Schwerelosigkeit	Schulen in Krakau und Starachowice, Polen	155 Kinder, 10 bis 14 Jahre alt	Fragebogen mit Wahlantworten (40 min)
			Hochschule in Krakau, Polen	34 Erwachsene	

Tabelle 2.3: Studien zu Vorstellungen in der Astronomie (Fortsetzung)

Studie	Art	Gegenstand	Ort	Probanden	Mittel
17 [Ogunniyi, 1987]	Querschnittsstudie (Alphabetisierung)	Astronomie ...	Schule in Oyo State, Nigeria	714 Kinder	Fragebogen mit Wahlantworten
			Hochschulen in Oyo State, Nigeria	384 Erwachsene	
			Oyo State, Nigeria	30 Erwachsene (Analphabeten)	vorgelesener Fragebogen mit Wahlantworten
18 [Ruggiero et al., 1985]	—	Gravitation	Schule in Italien	40 Kinder, 12 bis 13 Jahre alt	strukturierte Interviews mit Demonstrationsobjekten
19 [Sadler, 1987]	—	Tag/Nacht-zyklus, Mondphasen, Jahreszeiten	Schule in Cambridge, Massachusetts, USA	25 Kinder, 14 bis 15 Jahre alt	Interviews
		Mondphasen	Schulen in Boston, Massachusetts, USA	213 Kinder und Erwachsene, 14 bis 18 Jahre alt	Fragebogen mit Wahlantworten
20 [Smith and Treagust, 1986]	—	Astronomie ...	Australien	Kinder und Erwachsene	Wortassoziationsfragebogen

Tabelle 2.4: Studien zu Vorstellungen in der Astronomie (Fortsetzung)

Studie		Art	Gegenstand	Ort	Probanden	Mittel
21	[Smith and Treagust, 1988, Treagust and Smith, 1989], *[Treagust, 1987, Treagust and Smith, 1986]*	—	Gravitation, Erde im Raum	Schulen in Australien	24 Kinder, 15 bis 16 Jahre alt	Gruppeninterviews (30 min)
					113 Kinder, 15 bis 16 Jahre alt	Fragebogen
22	[Sneider and Pulos, 1983]	Querschnittsstudie (Alter)	Form der Erde, Gravitation	Schulen in San Fransisco, Californien, USA	159 Kinder, 8 bis 14 Jahre alt	strukturierte Interviews mit Demonstrationsobjekten und Pilotstudie
23	[Targan, 1987]	Längsschnittstudie (Unterricht)	Mondphasen	Hochschule in St. Cloud, Minnesota, USA	61 Erwachsene	Fragebogen
24	[Vicentini-Missoni, 1982]	—	Form der Erde, Gravitation	Schule in Italien	36 Kinder, 9 bis 10 Jahre alt	strukturierte Interviews
25	[Viglietta, 1986]	—	Erde im Raum, Tag/Nachtzyklus	Schule in Italien	25 Kinder, 11 Jahre alt	Fragebogen

Tabelle 2.5: Studien zu Vorstellungen in der Astronomie (Fortsetzung)

Studie	Art	Gegenstand	Ort	Probanden	Mittel
26 [Vosniadou, 1991a]	Querschnittsstudie (Alter)	Form der Erde, Gravitation, Erde im Raum, Tag/-Nacht-zyklus, Mondphasen, Jahreszeiten	Schule in Urbana, Illinois, USA	60 Kinder, 6 bis 11 Jahre alt, w/m gleich[a]	strukturierte Interviews mit Pilotstudie
[Vosniadou and Brewer, 1992b]		Form der Erde			
[Vosniadou and Brewer, 1994]		Erde im Raum, Tag/Nachtzyklus			
27 [Watts, 1982], *[Watts and Zylbersztajn, 1981]*	Querschnittsstudie (Alter)	Gravitation	Schulen in London, Großbritannien	20 Kinder, 6 bis 12 Jahre alt	Interviews

[a] gleiche Anzahl weiblicher und männlicher Probanden (w/m gleich)

Tabelle 2.6: Studien zu Vorstellungen in der Astronomie (Fortsetzung)

die Probanden der Studie waren und welche Mittel zur Durchführung verwendet wurden. Die Spalten der Tabellen beschreiben im einzelnen:

- In **Art** der Studie wird angegeben, ob es sich um eine Querschnitts- oder um eine Längsschnittstudie handelt.

  Für Querschnittsstudien wird weiterhin spezifiziert, welche Eigenschaft zur Klassenbildung verwendet wurde. In den meisten Querschnittsstudien wurden die Versuchspersonen nach ihrem Alter unterschieden. Nur in der Studie 7 werden zwei kulturell verschiedene Gruppen untersucht und in der Studie 17 werden die Versuchspersonen getrennt nach Alphabeten und Analphabeten betrachtet.

  In den Längsschnittstudien 13, 14 und 23 wurden die Versuchspersonen vor und nach einer Unterrichtsserie über Phänomene der Astronomie zu ihren Vorstellungen befragt.

  Leere Felder in dieser Spalte bedeuten, daß sich aus der zitierten Literatur keine Angaben zur Art der Studie machen lassen.

- Der **Gegenstand** der Studien umfaßt Vorstellungen zur Form und Größe der Erde, zur Gravitation, zur Erde im Raum, zur Schwerelosigkeit, zum Tag/Nachtzyklus, zu den Mondphasen, zu den Jahreszeiten und zur Expansion des Universums. Zusäzlich wurden in Studie 17 noch traditionelle afrikanische Vorstellungen in der Astronomie untersucht.

- Der **Ort** gibt an, in welcher Stadt, in welchem Land und, falls angegeben, mit welcher schulischen oder wissenschaftlichen Institution die Studie durchgeführt wurde.

- Für die **Probanden** ist ihre Anzahl angegeben und ob es sich um Kinder oder Erwachsene handelt. Bei Kindern ist zusätzlich noch ihr Alter aufgeführt und, falls bekannt, ob Jungen und Mädchen in der Stichprobe gleichverteilt waren (w/m gleich).

- Unter **Mittel** wird beschrieben, ob eine Pilotstudie durchgeführt wurde, ob (strukturierte) Interviews durchgeführt wurden oder ob Fragebogen (mit vorgegebenen Wahlantworten) verwendet wurden. In einigen Studien wurden Demonstrationsobjekte wie Globen, bewegliche Figuren, Zeichnungen, Knetmasse, durchbohrte Hartschaumbälle oder fallende Radiergummis benutzt.

Von den 27 Studien befassen sich fünf Studien ausdrücklich mit den individuellen Vorstellungen zum Tag/Nachtzyklus, nämlich die Studien 2, 7, 19, 25 und 26. Die Ergebnisse dieser Studien werden im folgenden Abschnitt präsentiert.

2.2 Studien über Vorstellungen zum Tag/Nachtzyklus

Wie erklären (sich) Kinder den Wechsel zwischen Tag und Nacht, den sie täglich selbst miterleben? Welche weiteren Vorstellungen spielen bei ihren Erklärungen für den Tag/Nachtzyklus eine Rolle?

In fünf verschiedenen Studien wurde versucht, die Vorstellungen, die Kinder im Zusammenhang mit dem Tag/Nachtzyklus haben, zu ermitteln. Dieser Sachbereich ist gut geeignet für die Untersuchung individueller Erklärungen, da es sich um ein Gebiet mit etwas komplexeren Strukturen handelt und Kinder alltäglich Beobachtungen zu den beteiligten Phänomenen machen können. Weiterhin hat dieses Thema einen festen Platz in der schulischen Ausbildung (siehe z.B. [Lightman and Sadler, 1988, Vosniadou, 1991b]), so daß die Kinder auch frühzeitig mit wissenschaftlichen Informationen zu diesem Bereich in Kontakt kommen.

In der Studie von Baxter (siehe auch Eintrag 2 in Tabelle 2.1) wurden 48 Jungen und 52 Mädchen im Alter von 9 bis 16 Jahren, Schüler einer englischen Schule, befragt [Baxter, 1989]. Dabei konnten sechs verschiedene Erklärungen für den Tag/Nachtzyklusgefunden werden. Diese Erklärungen sind unter Eintrag 2 in Tabelle 2.7 dargestellt, zusammen mit ihrer relativen Häufigkeit innerhalb der Stichprobe. Eine interessante Erklärung ist Erklärung 3, die besagt, daß es Nacht wird, weil der Mond die Sonne verdeckt. Offensichtlich haben diese Kinder, die immerhin ungefähr 17 % der Gesamtanzahl ausmachen, die Erklärung für den Tag/Nachtzyklus in Verbindung gebracht mit Informationen über die Entstehung einer Sonnenfinsternis.

Klein untersuchte die Erklärungen von zwei Gruppen mit unterschiedlichem kulturellen Hintergrund [Klein, 1982], nämlich von 12 mexikanisch–amerikanischen Kindern und von 12 anglo–amerikanischen Kindern im Alter von ungefähr 7 Jahren (Eintrag 7 in Tabelle 2.2). Ihre Ergebnisse weisen einen hohen Anteil an Kindern ohne Erklärung auf (41,7 % unter Eintrag 7 in Tabelle 2.7). Hier fällt Erklärung 5 auf, nach der die Sonne nachts weit weg in ein anderes Land oder zu einem anderen Planeten geht.

In Studie 19 interviewte Sadler 25 Kinder einer amerikanischen Schule, wie in Tabelle 2.4 und 2.7 dargestellt wird [Sadler, 1987]. Kinder mit Erklärung 4 machten das Erlöschen der Sonne für das Dunkelwerden in der Nacht verantwortlich, und in Erklärung 5 verdeckt die Erdatmosphäre die Sonne in der Nacht. Die Hälfte der Schüler hatte vor der Befragung an einem Kurs in *Earth Science* teilgenommen, mit einem Anteil von 25 % Astronomie. In dieser Gruppe gab es genauso viele unwissenschaftliche Erklärungen wie in der anderen Gruppe, doch die Kinder hier verwendeten *wissenschaftlichere* Ausdrücke wie *orbit* oder *tilt*.

Die 25 elfjährigen Kinder einer italienischen Schule hatten in der Studie von Viglietta anscheinend nur zwei verschiedene Erklärungen für den Tag/-Nachtzyklus (siehe Eintrag 25 in Tabellen 2.5 und 2.7) [Viglietta, 1986].

Schließlich wurden in der Studie von Vosniadou und Brewer (Eintrag 26

Studie		Erklärungen		Anteil
2	[Baxter, 1989, S. 504–508]	1.	*Die Sonne geht hinter Hügel.*	[a]≈ 1 %
		2.	*Wolken verdecken die Sonne.*	≈ 4 %
		3.	*Der Mond verdeckt die Sonne.*	≈ 17 %
		4.	*Die Sonne geht um die Erde.*	≈ 18 %
		5.	*Die Erde geht um die Sonne.*	≈ 32 %
		6.	*Die Erde dreht sich auf ihrer Achse.*	≈ 28 %
7	[Klein, 1982, S. 102–105]	1.	*Die Erde dreht sich um sich selbst.*	25 %
		2.	*Die Sonne geht auf die andere Seite der Erde.*	12,5 %
		3.	*Die Sonne geht um die Erde.*	8,3 %
		4.	*Die Sonne ist auf dem Boden.*	4,2 %
		5.	*Die Sonne geht in ein anderes Land oder zu einem anderen Planeten.*	8,3 %
		6.	*Weiß nicht.*	41,7 %
19	[Sadler, 1987, S. 423]	1.	*Die Erde dreht sich.*	—
		2.	*Die Sonne bewegt sich um die Erde.*	
		3.	*Der Mond verdeckt die Sonne.*	
		4.	*Die Sonne geht aus (erlischt).*	
		5.	*Die Atmosphäre verdeckt die Sonne.*	
25	[Viglietta, 1986, S. 370]	1.	*Die Sonne geht auf die andere Seite der Erde.*	—
		2.	*Die Erde dreht sich um die Sonne.*	

[a] Die Werte wurden aus einer graphischen Darstellung zurückerrechnet [Baxter, 1989, S. 508].

Tabelle 2.7: Studien zu Vorstellungen über den Tag/Nachtzyklus

Studie		Erklärungen		Anteil
26	[Vosniadou and Brewer, 1994, 162–163]	1.	*Die Sonne wird durch Wolken oder Dunkelheit verdeckt.*	6,6 %
		2.	*Die Sonne und der Mond gehen runter auf/in den Boden.*	11,6 %
		3.	*Die Sonne und der Mond gehen runter auf die andere Seite der Erde.*	3,3 %
		4.	*Die Sonne und der Mond gehen irgendwie unter.*	5 %
		5.	*Die Sonne geht raus in den Weltraum.*	3,3 %
		6.	*Die Sonne und der Mond drehen sich um die Erde.*	1,6 %
		7.	*Die Erde und der Mond drehen sich um die Sonne.*	1,6 %
		8.	*Die Erde dreht sich hoch und runter, die Sonne und der Mond sind fest auf gegenüberliegenden Seiten.*	18,3 %
		9.	*Die Erde dreht sich hoch und runter, die Sonne ist fest, aber der Mond bewegt sich.*	6,6 %
		10.	*Die Erde dreht sich um ihre Achse, die Sonne und der Mond sind fest auf gegenüberliegenden Seiten.*	3,3 %
		11.	*Die Erde dreht sich um ihre Achse, die Sonne ist fest, aber der Mond bewegt sich.*	1,6 %
		12.	*Die Erde dreht sich irgendwie.*	5 %
		13.	*Die Erde dreht sich und die Sonne geht hoch und runter.*	8,3 %
		14.	*Die Erde dreht sich um sich selbst und um die Sonne.*	8,3 %
		15.	*Die Sonne wird durch Wolken verdeckt und geht hoch und runter und dreht sich.*	10 %
		16.	*Weiß nicht.*	5 %

Tabelle 2.8: Studien zu Vorstellungen über den Tag/Nachtzyklus (Fortsetzung)

in Tabelle 2.6) 60 Kinder einer amerikanischen Schule im Alter von 6 bis 11 Jahren nach ihren Erklärungen für den Tag/Nachtzyklus befragt [Vosniadou and Brewer, 1994]. Dabei konnten 16 verschiedene Erklärungen ermittelt werden, die in Tabelle 2.8 dargestellt sind. Diese Studie zeichnet sich dadurch aus, daß sie, ähnlich wie die in Abschnitt 2.1 vorgestellte Studie von Nussbaum und Novak [Nussbaum and Novak, 1976], einen Einblick gewährt in die Überlegungen, die hinter dem Zustandekommen des Fragebogens und der Auswertung der Antworten stehen. Diese Überlegungen und die Ergebnisse der Studie werden im nun folgenden Abschnitt beschrieben.

2.3 Der Tag geht, die Nacht kommt: individuelle Erklärungen

In einer umfassenden Studie haben Stella Vosniadou und William F. Brewer die Vorstellungen von Kindern unterschiedlicher Altersstufen hinsichtlich verschiedener astronomischer Phänomene untersucht (siehe Tabelle 2.6). Im einzelnen haben sie dabei nach den kindlichen Vorstellungen über Gravitation, über die Form und Zusammensetzung der Erde, über die Position und Größe der Erde im Verhältnis zu anderen Himmelskörpern und über das Zustandekommen des Tag/Nachtzyklus, der Mondphasen und der Jahreszeiten gefragt. Einen Überblick über die gesamte Studie findet man in [Vosniadou, 1991a]. Ausführlichere Darstellungen gibt es über die Untersuchungen zur Form der Erde [Vosniadou and Brewer, 1992b, Vosniadou, 1989b] und zum Tag/Nachtzyklus [Vosniadou and Brewer, 1994].

In diesem Abschnitt soll die Art und Durchführung der Studie und ihre Ergebnisse zu den Erklärungen des Tag/Nachtzyklus näher betrachtet werden.

2.3.1 Eckdaten der Studie

In der Studie wurden 60 Schüler einer Grundschule in Urbana, Illinois, in den Vereinigten Staaten befragt [Vosniadou and Brewer, 1994]. Unter ihnen waren 20 Schüler der ersten Klasse (Durchschnittsalter 6 Jahre und 9 Monate), 20 Schüler der dritten Klasse (Durchschnittsalter 9 Jahre und 3 Monate) und 20 Schüler der fünften Klasse[1] (Durchschnittsalter 11 Jahre). Die Kinder kamen vorwiegend aus der Mittelschicht und jeweils die Hälfte waren Jungen und Mädchen (siehe auch Eintrag 26 in Tabelle 2.6).

Die Vorstellungen der Kinder wurden mit Hilfe eines 48-teiligen Fragebogens untersucht. Allerdings betrafen nur 13 Fragen den Tag/Nachtzyklus; die übrigen Fragen bezogen sich auf andere astronomische Phänomene. Der Fragebogen wurde in ausführlichen Pilotstudien entwickelt. Die Fragen wurden nach ihrem Potential ausgewählt, zwischen verschiedenen Erklärungen differenzieren zu können. Der Fragebogen enthielt sowohl Fragen nach dem

[1] Im Gegensatz zum deutschen hat das amerikanische Schulsystem fünf Grundschuljahre.

Faktenwissen der Kinder (z.B. „Bewegt sich die Sonne?“), als auch generative Fragen, die die Kinder dazu veranlassen sollten, Phänomene zu erklären, die sie nicht beobachtet können und zu denen sie normalerweise auch keine direkte Informationen erhalten (z.B. „Wo ist die Sonne nachts?“ oder „Wo sind die Sterne am Tag?“). Bei Unklarheiten wurden Nach- und Gegenfragen gestellt.

Die Fragen sind in Tabelle 2.9 aufgelistet und betreffen das Verschwinden der Sonne in der Nacht (Fragen 1 bis 4), Erklärungen für den Tag/Nachtzyklus (Fragen 5 und 6), die Bewegung des Mondes (Fragen 7 bis 10) und das Verschwinden der Sterne am Tag (Fragen 11 bis 13). Zusätzlich zu den verbalen Antworten wurde bei Frage 5 auch die Weiterführung einer Zeichnung verlangt. Die Einzelbefragung jedes Kindes dauerte 30 bis 45 Minuten und wurde durch Notizen des Interviewers und durch eine Tonbandaufzeichnung protokolliert, die durch zwei unabhängige Personen ausgewertet wurden.

Zu allen vier Fragesätzen wurden Antwortmuster entwickelt, die von den Kindern erwartet wurden, wenn sie die jeweiligen Fragen aufgrund einer bestimmten Erklärung beantworteten. Nach der individuellen Befragung der Kinder wurden die tatsächlichen Antworten der Kinder mit den Antwortmustern der vier Fragesätze verglichen. Auf diese Weise entstanden vier Kategorien:

- Erklärungsarten für das Verschwinden der Sonne in der Nacht (*explanation types for the disappearance of the sun at night*) [Vosniadou and Brewer, 1994, S. 140–141]
- Erklärungsarten für den Tag/Nachtzyklus (*explanation types for the day/night cycle*) [Vosniadou and Brewer, 1994, S. 146–148]
- Erklärungsarten für die Bewegung des Mondes (*explanation types for the movement of the moon*) [Vosniadou and Brewer, 1994, S. 157–158]
- Erklärungsarten für das Verschwinden der Sterne am Tag (*explanation types for disappearnace of the stars during the day*) [Vosniadou and Brewer, 1994, S. 160]

Diese vier Kategorien wurden anschließend zu einer generellen Kategorie zusammengefaßt (*overall mental models of the day/night cycle*) [Vosniadou and Brewer, 1994, 162–163], die hier im weiteren einfach *Erklärungen* genannt wird.

2.3.2 Die Erklärungen der Kinder

Die Studie hat insgesamt 16 unterschiedliche Erklärungen der Kinder für den Tag/Nachtzyklus gefunden, die auch schon kurz in Tabelle 2.8 vorgestellt wurden. Sie unterscheiden sich im Hinblick auf die beteiligten Objekte und auf die Art und Weise, wie diese im Zusammenspiel den Wechsel von Tag und Nacht verursachen [Vosniadou and Brewer, 1994, 159, 164–166]:

Das Verschwinden der Sonne in der Nacht:			
1.	„Wo ist die Sonne nachts?“	*Q22:*[a]	*„Where is the sun at night?“*
2.	„Wie passiert das?“	*Q23:*	*„How does this happen?“*
3.	„Bewegt sich die Erde?“	*Q24a:*	*„Does the earth move?“*
4.	„Bewegt sich die Sonne?“	*Q24b:*	*„Does the sun move?“*
Erklärungen für den Tag/Nachtzyklus:			
5.	„Jetzt mache es so, daß es Tag für die Person[b] ist. Gut! Jetzt mache es so, daß es Nacht für die Person ist.“	*Q25:*	*„Now make it so that it is day for that person. Good! Now make it so that it is night for that person.“*
6.	„Sag’ mir noch einmal wie das passiert.“	*Q26a:*	*„Tell me once more how this happens.“*
Die Bewegung des Mondes:			
7.	„Bewegt sich der Mond?“	*Q30:*	*„Does the moon move?“*
8.	„Bewegt sich der Mond mit Dir mit, wenn Du spazierengehst?“	*Q31:*	*„Does the moon move along with you when you go for a walk?“*
9.	„Bewegt sich der Mond, wenn Du im Bett liegst und schläfst?“	*Q32:*	*„Does the moon move when you are asleep in your bed?“*
10.	„Warum bewegt sich der Mond?“	*Q33:*	*„Why does the moon move?“*
Das Verschwinden der Sterne am Tag:			
11.	„Wo sind nachts die Sterne?“	*Q36a:*	*„Where are the stars at night?“*
12.	„Wo sind sie tagsüber?“	*Q36b:*	*„Where are they during the day?“*
13.	„Bewegen sich die Sterne?“	*Q37:*	*„Do the stars move?“*

[a] Q22 (*question*) bis Q37 verweisen auf die ursprüngliche Numerierung der Fragen in dem 48-teiligen Fragebogen.

[b] Der Interviewer zeichnete einen Kreis, der die Erde darstellen sollte, auf ein Blatt Papier und malte ein kleines Männchen links oben auf den Kreis.

Tabelle 2.9: Fragen nach den kindlichen Vorstellungen zum Tag/Nachtzyklus [Vosniadou and Brewer, 1994, S. 137].

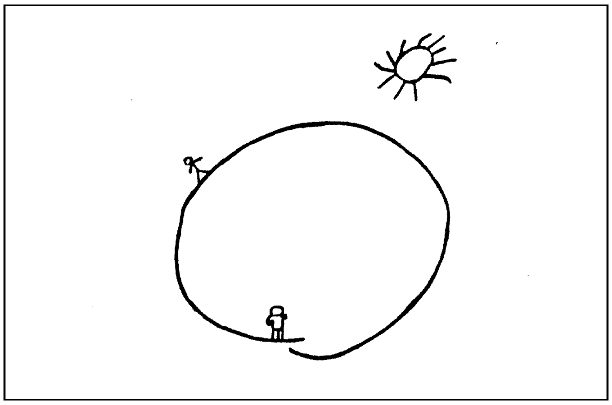


Abbildung 2.1: Zeichnung eines Kindes (Tamara) mit der Erklärung 1 *Die Sonne wird durch Wolken oder Dunkelheit verdeckt.* [Vosniadou and Brewer, 1994, S. 152]

1. *Die Sonne wird durch Wolken oder Dunkelheit verdeckt.* (The sun is occluded by clouds or darkness.)

   Die vier Kinder in dieser Kategorie sagten als Antwort auf die Fragen nach dem Verschwinden der Sonne in der Nacht (Fragen 1 bis 4 in Tabelle 2.9) und auf die Fragen nach der Erklärung für den Tag/Nacht-zyklus (Fragen 5 und 6 in Tabelle 2.9), daß etwas, meistens Wolken oder Dunkelheit, die Sonne verdecke.

   So z.B. Tamara, 5. Klasse [Vosniadou and Brewer, 1994, S. 150]:

   I: „Now can you make it so it is day for that person?"
   K: „He's outside the earth."
   I: „Where should he be?"
   K: „In here." (*siehe Zeichnung in Abbildung 2.1*)
   I: „... Ok now, make it daytime for him."
   K: „The sun is out here, but it looks like it's in the earth, when it shines... "
   I: „Ok. What happens at night?"
   K: „The clouds cover it up."
   I: „Tell me once more how it happens."
   K: „Cause at 12 o'clock it's dark."

   Einige dieser Kinder sagten auf die Fragen nach der Bewegung des Mondes (Fragen 7 bis 10 in Tabelle 2.9) und auf die Fragen nach dem Verschwinden der Sterne am Tage (Fragen 11 bis 13 in Tabelle 2.9), daß Wolken tagsüber auch den Mond und die Sterne verdecken.

2. *Die Sonne und der Mond gehen runter auf/in den Boden.* (The sun and the moon move down on/in the ground.)

   Gefragt nach dem Verschwinden der Sonne in der Nacht sagten die sieben Kinder mit dieser Erklärung übereinstimmend, daß die Sonne nachts runtergehe auf oder in den Boden, nicht aber auf die andere

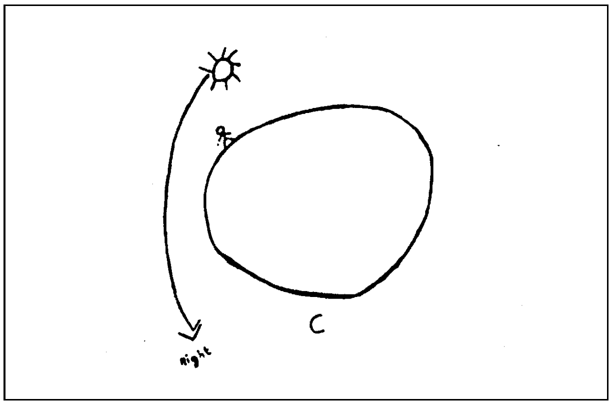


Abbildung 2.2: Zeichnung eines Kindes (Timothy) mit der Erklärung 3 *Die Sonne und der Mond gehen runter auf die andere Seite der Erde.* [Vosniadou and Brewer, 1994, S. 152]

Seite der Erde (siehe Erklärung 3). Einige von ihnen gaben auch an, daß der Mond rauf- und runtergehe.

Zur Erklärung verwendeten die Kinder Ausdrücke wie „auf den Boden", „in den Boden", „hinter Hügel" oder „ins Wasser" zusammen mit den von ihnen ergänzten Zeichnungen [Vosniadou and Brewer, 1994, S. 149].

3. *Die Sonne und der Mond gehen runter auf die andere Seite der Erde.* (The sun and the moon move down to the other side of the earth.)

   Es gab zwei Kinder mit dieser Erklärung. Sie sagten beide, daß die Sonne und der Mond hoch- und runtergehen, daß der Tag/Nachtzyklus sich ereigne, weil die Sonne auf die andere Seite der Erde oder unter die Erde gehe und der Mond dabei aufgehe. Am Tage gehen die Sterne auf die andere Seite der Erde.

   Als Beispiel hier die Antworten von Timothy, 1. Klasse, auf Frage Nr. 6 in Tabelle 2.9 [Vosniadou and Brewer, 1994, S. 150]:

   I: „Tell me once more how it happens."
   K: „When the moon comes up and the sun goes down."
   (*siehe Zeichnung in Abbildung 2.2*)
   I: „Where was the moon before?"
   K: „Under the earth."
   I: „What time was it when it goes under the earth?"
   K: „Day."

4. *Die Sonne und der Mond gehen irgendwie unter.* (The sun and the moon move down unspecified.)

   Die drei Kinder mit dieser Erklärung sagten alle, daß die Sonne und der Mond hoch- und runtergehen, unterschieden sich aber von den Kindern mit der Erklärung 3 dadurch, daß sie keine Angaben darüber machten, ob die Sonne auf den Boden oder auf die andere Seite der Erde geht.

5. *Die Sonne geht raus in den Weltraum.* (The sun moves out into space.)

   Zwei Kinder wurden dieser Kategorie zugeteilt. Sie sagten, daß sich die Sonne in der Nacht raus in den Weltraum bewege und daß das gleiche mit den Sternen am Tage passiere.

   Eines der beiden Kinder, die diese Erklärung hatten, schien zu glauben, daß Himmel und Weltraum zwei verschiedene Dinge seien und daß die Sonne nicht mehr gesehen werden könne, wenn sie sich vom Himmel zum Weltraum bewege [Vosniadou and Brewer, 1992a, S. 24][2].

6. *Die Sonne und der Mond drehen sich um die Erde.* (The sun and the moon revolve around the earth.)

   Nur ein Kind hatte diese Erklärung, in der die Sonne und der Mond sich einmal am Tag um die Sonne drehen: wenn die Sonne auf dieser Seite der Erde sei, dann sei der Mond auf der anderen. In dieser Erklärung blieben die Sterne am Tag, wo sie waren, man könne sie jedoch wegen der Helligkeit der Sonne nicht sehen.

7. *Die Erde und der Mond drehen sich um die Sonne.* (The earth and the moon revolve around the sun.)

   Eines der befragten Kinder verwendete diese interessante Erklärung, derzufolge sich die Erde *alle 24 Stunden* einmal um die Sonne dreht.

8. *Die Erde dreht sich hoch und runter, die Sonne und der Mond sind fest auf gegenüberliegenden Seiten.* (The earth rotates up and down, the sun and the moon are fixed at opposite sides.)

   Die elf Kinder in dieser Kategorie erklärten alle das Verschwinden der Sonne in der Nacht dadurch, daß die Erde sich hoch- und runterdrehe, und daß die Sonne und der Mond sich nicht bewegen, sondern fest auf gegenüberliegenden Seiten der Erde seien.

9. *Die Erde dreht sich hoch und runter, die Sonne ist fest, aber der Mond bewegt sich.* (The earth rotates up and down, the sun is fixed, but the moon moves.)

   Diese Erklärung ist ähnlich der vorhergehenden, nur gaben die vier Kinder in dieser Kategorie an, daß der Mond nicht fest sei, sondern sich auf irgendeine Art bewege oder sich um die Erde drehe.

10. *Die Erde dreht sich um ihre Achse, die Sonne und der Mond sind fest auf gegenüberliegenden Seiten.* (The earth rotates around its axis, the sun and the moon are fixed at opposite sides.)

[2] An dieser Stelle wurde als Referenz [Vosniadou and Brewer, 1992a] verwendet, da in [Vosniadou and Brewer, 1994] die entsprechende Erklärung ohne erkennbaren Grund und im Widerspruch zur fortlaufenden Numerierung der Erklärungen nicht gedruckt wurde. Auf dieses Problem wird in Abschnitt 2.4 noch näher eingegangen.

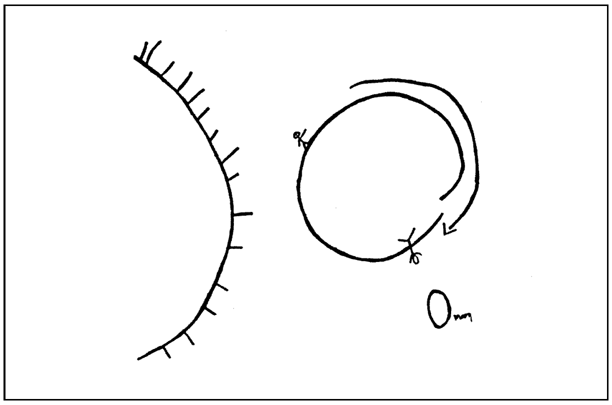


Abbildung 2.3: Zeichnung eines Kindes (Robert) mit der Erklärung 11 *Die Erde dreht sich um ihre Achse, die Sonne ist fest, aber der Mond bewegt sich.* [Vosniadou and Brewer, 1994, S. 153]

Zwei Kinder verwendeten diese Erklärung. Sie sagten beide, daß die Erde sich um ihre Achse drehe, auf die Fragen nach dem Verschwinden der Sonne in der Nacht und auf die Fragen nach einer Erklärung für den Tag/Nachtzyklus. Darüberhinaus sagten sie noch, daß der Mond sich nicht bewege und daß die Sterne, die auch fest sind, am Tage durch Wolken verdeckt werden.

11. *Die Erde dreht sich um ihre Achse, die Sonne ist fest, aber der Mond bewegt sich.* (The earth rotates around its axis, the sun is fixed but the moon moves.)

    Nur ein Kind konnte dieser Kategorie zugewiesen werden. Es sagte, daß sich die Erde um ihre Achse bewege, daß die Sonne fest sei, daß sich aber der Mond, im Gegensatz zu Erklärung 10, um die Erde drehe.

    So z.B. Robert, 5. Klasse [Vosniadou and Brewer, 1994, S. 151]:

    I: „Now can you make it so it is day for that person?“
    K: (*das Kind macht eine Zeichnung, siehe Abbildung 2.3*)
    I: „Now can you make it nighttime?“
    K: „Can I draw him somewhere else?“ (*malt ein kleines Männchen unten auf die Erde*)
    I: „Sure.“
    K: (*das Kind malt einen Pfeil, um zu zeigen, wie sich die Erde dreht*)
    I: „Tell me once more how it happens.“
    K: „When it was daytime, the earth spinned around to the sun. When it was nighttime, the earth turned around to where the moon is.“

12. *Die Erde dreht sich irgendwie.* (The earth rotates in an unspecified direction.)

Die drei Kinder in dieser Kategorie machten keine näheren Angaben darüber, wie sich die Erde nun genau bewegt.

13. *Die Erde dreht sich und die Sonne geht hoch und runter.* (The earth rotates and the sun moves up and down.)

    Die fünf Kinder in dieser Kategorie dachten, daß die Erde sich dreht *und* daß gleichzeitig die Sonne hoch- und runtergeht.

14. *Die Erde dreht sich um sich selbst und um die Sonne.* (The earth rotates and revolves.)

    Fünf andere Kinder erklärten den Tag/Nachtzyklus mal mit einer Drehung der Erde um sich selbst, mal mit einer Drehung um die Sonne.

15. *Die Sonne wird durch Wolken verdeckt und geht hoch und runter und dreht sich.* (The sun is occluded by clouds and moves up and down and rotates.)

    Die sechs Kinder in dieser Kategorie hatten sehr vermischte Erklärungen für den Tag/Nachtzyklus. Einige dieser Kinder gaben z.B. an, daß nachts Wolken die Sonne verdecken *und* daß die Sonne runter zum Boden gehe, und einige sagten, daß sich zusätzlich auch noch die Erde um sich selbst oder um die Sonne drehe.

16. *Weiß nicht.* (Undetermined.)

    Drei Kinder gaben unbestimmte Antworten auf die Fragen nach dem Verschwinden der Sonne in der Nacht und auf die Fragen nach einer Erklärung für den Tag/Nachtzyklus. Eines dieser Kinder sagte: „God made it that way.“

Die letzten fünf Kategorien, d.h. Erklärungen 12 bis 16, stellen entweder unbestimmte oder vermischte Erklärungen für den Tag/Nachtzyklus dar. Die 22 Kindern, die diesen Kategorien zugeordnet wurden, konnten keine schlüssigen (*coherent*) Erklärungen für den Wechsel von Tag und Nacht geben [Vosniadou and Brewer, 1994, S. 166, 168]. Das bedeutet auf der anderen Seite, daß 38 von 60 Kindern (63 %) eine zusammenhängende, schlüssige Erklärung unterstellt werden konnte.

Die Erklärungen der Kinder widerlegen eine Annahme, die vor Durchführung der Studie getroffen wurde und die sich auch im Fragebogen widerspiegelt, nämlich die Annahme, daß die Kinder denken, die Sterne seinen ursächlich beteiligt am Tag/Nachtzyklus. Ein überwiegender Teil der Kinder wußte jedoch, daß die Sterne fest sind und am Tage wegen der Helligkeit der Sonne nicht gesehen werden können [Vosniadou and Brewer, 1994, S. 175]. Allerdings sahen einige der Kinder[3] eine Verbindung zwischen dem Mond und dem Tag/Nachtzyklus: der Mond mache die Nacht, genauso wie die Sonne den Tag mache, und zwischen beiden bestehe eine „hydraulische“

[3] Es waren 12 bis 26 Kinder, genaueres läßt sich aus [Vosniadou and Brewer, 1994, S. 157] nicht ersehen.

Verbindung, so daß der Mond runtergeht, wenn die Sonne aufgeht, und umgekehrt [Vosniadou and Brewer, 1994, S. 156].

Die elf schlüssigen Erklärungen lassen sich nun aufgrund inhaltlicher Aspekte in drei verschiedene Klassen einteilen, die in einer gewissen Relation zum Alter der Kinder stehen.

2.3.3 Klassifizierung der Erklärungen

In der Annahme, daß sich individuelle Erklärungen durch den Einfluß wissenschaftlicher Informationen verändern (siehe Abschnitt 1.1.1), lassen sich die Erklärungen der Kinder auf der Basis dieses Einflusses klassifizieren [Vosniadou and Brewer, 1994, S. 168–169]:

Initiale Erklärungen Diese Erklärungen beruhen allein auf alltäglichen Beobachtungen und stehen nicht unter dem Einfluß wissenschaftlicher Informationen.

Synthetische Erklärungen Diese Erklärungen weisen Versuche auf, die individuelle Erklärung in Einklang mit wissenschaftlichen Informationen zu bringen.

Wissenschaftliche Erklärungen Dies sind die Erklärungen, die mit der wissenschaftlichen Ansicht übereinstimmen.

Die zentrale Beobachtung im Zusammenhang mit dem Tag/Nachtzyklus ist, daß die Sonne tagsüber am Himmel ist, nachts jedoch nicht. Eine verwandte Beobachtung ist, daß der Mond und die Steren nachts am Himmel sind, nicht aber während des Tages (obwohl der Mond manchmal eben doch am Taghimmel zu sehen ist) [Vosniadou and Brewer, 1994, S. 131]. Wissenschaftliche Informationen ergeben sich aus der kulturell anerkannten Sichtweise, daß Tag und Nacht durch die Drehung der Erde um die eigene Achse verursacht wird, daß die Erde die Form einer Kugel hat und daß sich die Erde um die Sonne dreht[4] [Vosniadou and Brewer, 1994, S. 169–170].

Ohne Einfluß wissenschaftlicher Informationen und damit als initial kann man die kindlichen Erklärungen 1, 2, 4 und 5 ansehen; als synthetisch lassen sich die Erklärungen 3 und 6 bis 9 klassifizieren; und schließlich kommen Erklärungen 10 und 11 der wissenschaftlichen Sichtweise am nächsten [Vosniadou and Brewer, 1992a, S. 39–40][5]

In Abbildung 2.4 wird die Abhängigkeit der initialen, synthetischen und wissenschaftlichen Erklärungen vom Alter der in der Studie befragten Kinder dargestellt. Obwohl es eine Querschnitts- und keine Längsschnittstudie war, zeigen die Ergebnisse, daß ein Großteil der Erstklässler mit einer initialen Erklärung für den Tag/Nachtzyklus in die Schule kommt [Vosniadou

[4]Daß die Erde sich um die Sonne dreht, ist zwar eine wissenschaftliche Information, allerdings dreht sie sich im Jahresrhythmus um die Sonne und dies verursacht nicht den Tag/Nachtzyklus. Auf dieses Problem wird in Abschnitt 2.4 noch näher eingegangen.

[5]An dieser Stelle wurde als Referenz [Vosniadou and Brewer, 1992a] verwendet, da sich in [Vosniadou and Brewer, 1994] die Klassifizierung der Erklärungen nicht mehr direkt auf die Ergebnisse der Studie bezieht. Darauf wird noch in Abschnitt 2.4 näher eingegangen.

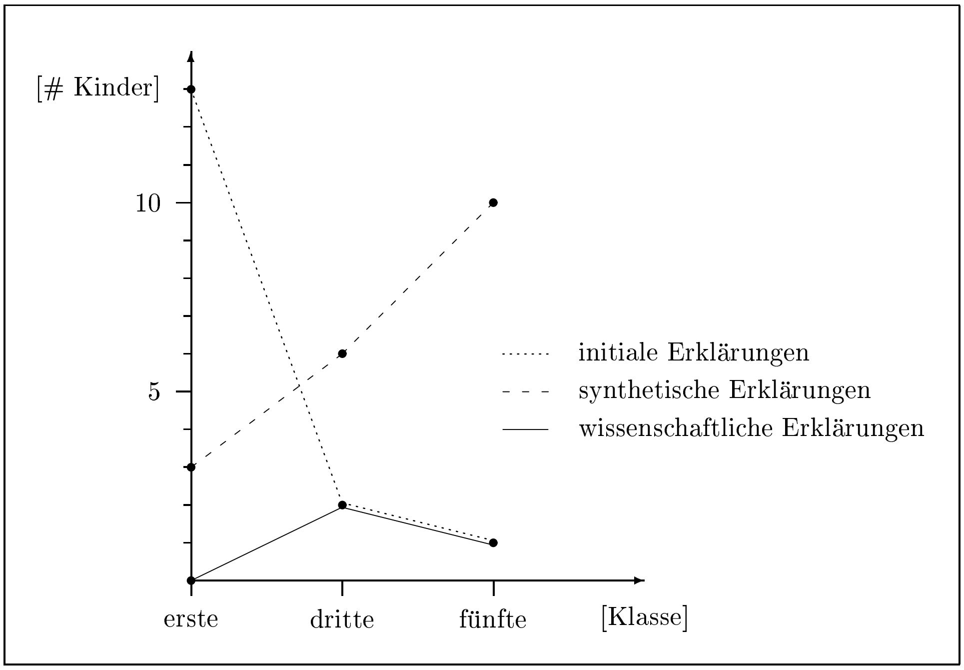


Abbildung 2.4: Häufigkeit der verschiedenen Erklärungsklassen in Abhängigkeit vom Alter der Kinder (Zahlenwerte errechnet aus [Vosniadou and Brewer, 1994, S. 162–163])

and Brewer, 1994, S. 170–171]. Während der ersten Schuljahre scheinen sie die intitialen Erklärungen durch synthetische zu ersetzen, so daß einige der Kinder am Ende ihrer Grundschulzeit den Wechsel von Tag und Nacht wissenschaftsgemäß erklären können.

2.4 Diskussion

In den vorhergehenden drei Abschnitten wurden Studien über individuelle Vorstellungen in der Astronomie und zum Tag/Nachtzyklus im besonderen präsentiert. Ausführlich wurde dann eine Studie vorgestellt, in der 60 Kinder verschiedener Alterstufen befragt wurden und die dabei elf verschiedene schlüssige Erklärungen für den Wechsel von Tag und Nacht gefunden hat. In diesem Abschnitt sollen einige Punkte der Studie kritisch beleuchtet und im Hinblick auf die Modellierung der Erklärungen diskutiert werden.

2.4.1 Auswirkungen der Modellierungsarbeit

Die Darstellung der Erklärungen für den Tag/Nachtzyklus in Abschnitt 2.3 beruht auf [Vosniadou and Brewer, 1994]. Die rechnergestützte Modellierung der Erklärungen, die in Kapitel 3 noch ausführlich beschrieben werden wird, basiert allerdings hauptsächlich auf dem zur Veröffentlichung eingereichten Aufsatz [Vosniadou and Brewer, 1992a]. Dieser unterscheidet sich in einigen wichtigen Punkten von der endgültigen, veröffentlichte Fassung.

Diese Punkte sollen in diesem Abschnitt erläutert werden.

Bis zur oberen Hälfte der Seite 168 werden in [Vosniadou and Brewer, 1994] 16 verschiedene Erklärungen beschrieben, von denen elf schlüssig sind (vgl. Abschnitt 2.3.2). In der abschließenden Diskussion ab der unteren Hälfte der Seite 168 in [Vosniadou and Brewer, 1994] werden dann übergangslos und ohne weitere Erläuterungen lediglich acht verschiedene, schlüssige Erklärungen behandelt, die auch in der Reihenfolge ihrer Numerierung nicht mehr mit den vorhergehenden Erklärungen übereinstimmen. Diese Erklärungen entsprechen aber den Modellen, die das Ergebnis der ersten Formalisierungsarbeiten waren und mit Modellierung I zusammengefaßt werden (siehe ausführliche Darstellung in Kapitel 3) [Mühlenbrock, 1993, Mühlenbrock, 1994a].

Die Klassifizierung der Erklärungen als initial, synthetisch und wissenschaftlich erfolgte in [Vosniadou and Brewer, 1994, S. 168–170] bereits anhand von Modellierung I, so daß in Abschnitt 2.3.3 auf [Vosniadou and Brewer, 1992a] referenziert wurde. Weiterhin wird in [Vosniadou and Brewer, 1994, S. 149] die Erklärungsart *Die Sonne geht raus in den Weltraum.* als einzige und ohne erkennbaren Grund nicht mehr aufgeführt, so daß in Abschnitt 2.3.3 auf [Vosniadou and Brewer, 1992a] verwiesen werden mußte.

Die vier Fragesätze zum Tag/Nachtzyklus sind Teil einer umfassenderen Studie über die Vorstellungen von Kindern in der Astronomie, wie in Abschnitt 2.3.1 dargelegt wurde und wie in Tabelle 2.9 an der ursprünglichen Numerierung der Fragen im Fragebogen zu sehen ist. Insbesondere wurden auch die Vorstellungen der Kinder über die Erde untersucht [Vosniadou and Brewer, 1992b] (siehe auch Abschnitt 2.4.3). Da die Vorstellungen der Kinder von der Erde einen Einfluß auf ihre Erklärungen für den Tag/-Nachtzyklus haben können, gibt es in [Vosniadou and Brewer, 1994, S. 167] im Gegensatz zu [Vosniadou and Brewer, 1992a] eine Aufstellung der Beziehungen zwischen diesen Vorstellungen und den Erklärungen, womit sich eine Anregung aus [Mühlenbrock, 1993, S. 17] verwirklicht findet. Allerdings ist die Nützlichkeit der Darstellung fraglich, da hier der Index angegeben ist, der bei den Erklärungen fehlt, wie in Abschnitt 2.4.2 beschrieben wird.

Diese zusätzlichen Informationen über die Vorstellungen von der Erde konnten bei den bisherigen Modellierungen noch nicht berücksichtigt werden. Auf vorhandene Erweiterungsmöglichkeiten wird in der abschließenden Diskussion in Kapitel 5 noch einmal eingegangen.

2.4.2 Die Entstehung der Erklärungskategorien

Die Vorgehensweise, in der die Erklärungskategorien entwickelt wurden, wurde in Abschnitt 2.3.1 im einzelnen beschrieben: Die Antworten der Kinder wurden zunächst getrennt nach den 4 Fragesätzen klassifiert. So entstanden Erklärungsart 1 bis 11 für das Verschwinden der Sonne in der Nacht, Erklärungsart 1 bis 15 für den Tag/Nachtzyklus, Erklärungsart 1 bis 8 für die Bewegung des Mondes und Erklärungsart 1 bis 9 für das Verschwinden der Sterne am Tag [Vosniadou and Brewer, 1994, S. 140–141, 146–148, 157–158, 160]. Diese Klassen wiederum wurden zu generellen Erklärungen für den Tag/Nachtzyklus zusammengefaßt (siehe Abschnitt 2.3.2).

Wie aus den 11880 dabei möglichen Kategorien die resultierenden 16 Erklärungskategorien entstanden, läßt sich nur schwer nachvollziehen, da der Index, d.h. die Namen oder die Nummern der Kinder, nicht angeführt wird. So stellt man z.B. fest, daß vier Kinder der Erklärungsart *Die Sonne und der Mond gehen runter auf/in den Boden* zugeordnet wurden [Vosniadou and Brewer, 1994, S. 146], sieben Kinder aber der generellen Erklärung *Die Sonne und der Mond gehen runter auf/in den Boden* (Erklärung 2 in Abschnitt 2.3.2). Im Gegenatz dazu entsprachen die Antworten von vier Kindern der Erklärungsart *Die Erde dreht sich um die Sonne.* [Vosniadou and Brewer, 1994, S. 147], aber nur einem Kind wurde die generelle Erklärung *Die Erde dreht sich um die Sonne.* zugewiesen (Erklärung 7 in Abschnitt 2.3.2). In beiden Fällen lassen sich die Unterschiede in der Anzahl der Kinder aufgrund der fehlenden Transparenz in der zweistufigen Abstraktion nicht nachvollziehen. Aus dem gleichen Grund lassen sich die Antworten der Kinder auf die einzelnen Fragen und ihre Zeichnungen nicht immer den generellen Erklärungen zuordnen, da sie nur im Zusammenhang mit der Beschreibung der vier Unterklassen dargestellt werden.

Es muß allerdings darauf hingewiesen werden, daß die Präsentation eines Index unübersichtliche Datenmengen mit sich brächte, denn schließlich wurde jedem der 60 Kinder insgesamt 5 verschiedene Klassen zugeordnet. Andererseits wären solch große Datenmengen denkbar gut geeignet, um die Basis eine rechnergestützten Modellierung und Klassifizierung zu bilden.

Es stellt sich jedoch die Frage, ob die Klassenbildung in Erklärungsarten für das Verschwinden der Sonne in der Nacht und in Erklärungsarten für den Tag/Nachtzyklus mit anschließender Zusammenfassung in Erklärungen für den Tag/Nachtzyklus, wie sie in der Studie vorgenommen wurde, nicht methodisch problematisch ist. Denn tatsächlich sind die Fragesätze für das Verschwinden der Sonne in der Nacht und nach den Erklärung für den Tag/Nachtzyklus nicht vollständig voneinander unabhängig, so daß dieser Umstand auch für einen Teil der als unschlüssig klassifizierten 27 % der Antworten verantwortlich sein könnte.

2.4.3 Vorstellungen von der Erde

Wie schon in Abschnitt 2.4.1 erwähnt, wurden dieselben Kinder, deren Erklärungen für den Tag/Nachtzyklus untersucht wurden, auch zu ihren Vorstellungen von der Erde befragt. Dabei hatten 23 der 60 Kinder die wissenschaftliche Vorstellung einer kugelförmigen Erde, auf deren Oberfläche rundherum die Menschen leben [Vosniadou and Brewer, 1992b, S. 572]. Zwei der Kinder dachten, die Erde sei flach und geformt wie ein Rechteck oder eine runde Scheibe und sie werde vom Erdboden (*ground*) gestützt. Dies wurde als initiale Vorstellung gewertet. Weiterhin konnten bei 24 der 60 Kinder synthetische Vorstellungen gefunden werden: einige dieser Kinder glaubten, daß es *zwei* Erden gäbe: eine runde, die hoch am Himmel sei, und eine flache, auf der die Menschen lebten; anderen dachten, die Erde sei eine hohle Kugel, in deren Inneren die Menschen auf einer flachen Sohle lebten;

und schließlich sagten ein paar dieser Kinder, daß die Erde zwar rund wie eine Kugel sei, aber oben und unten abgeflacht, so daß die Menschen darauf stehen könnten. Bei den übrigen elf Kindern konnten keine schlüssigen Erdvorstellungen gefunden werden.

Im Zusammenhang mit dem Tag/Nachtzyklus wurde bei keinem der Kinder mit der initialen Vorstellung von einer flachen Erde eine Erklärung des Tag/Nachtzyklus durch die Drehung der Erde gefunden oder eine Erklärung, in der die Sonne nachts auf die andere Seite der Erde geht (Erklärungen 3 und 6 bis 11) [Vosniadou and Brewer, 1994, S. 167–168]. Andererseits erklärten die Kinder mit einer synthetischen oder der wissenschaftlichen Erdvorstellung den Tag/Nachtzyklus normalerweise mit einer Drehung und benutzten nur sehr selten Erklärungen, in der die Sonne durch Wolken verdeckt wird oder in der die Sonne hoch- und runtergeht (Erklärungen 1, 2, 4, 5). Das legt die Vermutung nahe, daß die Vorstellung von einer kugelförmigen Erde eine notwendige, aber keine hinreichende Voraussetzung für die wissenschaftliche Erklärung des Tag/Nachtzyklus ist.

Da die Studie über die Vorstellungen der Kinder über die Erde gleichzeitig mit der Studie über ihre Erklärungen zum Tag/Nachtzyklus durchgeführt wurde, konnten die Ergebnisse der einen Studie nicht bei der Entwicklung der anderen Studie helfen. Das zeigte sich z.B. darin, daß sich die Zeichnung, die die Kinder zur Erläuterung ihrer Vorstellungen zum Tag/Nachtzyklus ergänzen sollten (siehe Abschnitt 2.3.1 und Tabelle 2.9) als problematisch herausstellte. Denn Kinder mit einer initialen oder synthetischen Erdvorstellungen wiesen oftmals ausdrücklich die vorgegebene Zeichnung zurück, auf der ein Kreis mit einem kleinen Männchen oben drauf zu sehen ist, das die Menschen, die auf der Erde leben, darstellen sollte [Vosniadou and Brewer, 1994, S. 145].

Stattdessen malten sie ein neues Männchen auf die untere Linie innerhalb des Kreises oder ignorierten die vorgegebene Zeichnung völlig und malten eine eigene. Ein Beispiel für den ersten Fall ist Tamara mit der Erklärung *Die Sonne wird durch Wolken oder Dunkelheit verdeckt.* (siehe Abschnitt 2.3.2). Der relevante Teil ihres Gesprächsprotokoll von Seite 28 ist hier als Auszug noch einmal wiedergegeben:

> I: „Now can you make it so it is day for that person?"
> K: „He's outside the earth."
> I: „Where should he be?"
> K: „In here." (*siehe Zeichnung in Abbildung 2.1 auf Seite 28*)

Als weitere Überraschung gaben 23 der 60 Kinder auf die Frage „Wohin schaust Du, um die Erde zu sehen?" (*„Which way do you look to see the earth?"*) die Antwort „(Nach) oben!" (*„Up!"*) [Vosniadou and Brewer, 1992b, S. 555]. Vosniadou und Brewer versuchen diese eigenartige Antwort so zu interpretieren: Die Kinder seien daran gewöhnt, daß der Lehrer sage: „Laßt uns mal aufschauen zur Erde." (*„Let's look* up *at the earth."*) als Hinweis auf eine Karte der Erde, die an der Wand hängt [Vosniadou and

Brewer, 1992b, S. 555]. Die Antworten auf diese Frage wurden bei der Auswertung der Studie nicht berücksichtigt.

2.4.4 Erklärungen für andere Phänomene der Astronomie

Nicht nur die Vorstellungen der Kinder von der Erde wirken sich auf ihre Erklärungen für den Tag/Nachtzyklus aus. Auch Informationen über andere Phänomene der Astronomie scheinen ihre Erklärungen für den Wechsel von Tag und Nacht zu beinflussen. So spiegelt sich z.B. in der Kategorie 7 *Die Erde dreht sich um die Sonne.* die wissenschaftliche Erklärung für die Jahreszeiten; denn Frühling, Sommer, Herbst und Winter kommen u.a. dadurch zustande, daß sich die Erde um die Sonne dreht. Diese Drehung ist jedoch keine Erklärung für den Tag/Nachtzyklus.

Der Begriff der *wissenschaftlichen Information* für den Tag/Nachtzyklus, der sich nach Vosniadou und Brewer aus der kulturell anerkannten Sichtweise ergibt, daß Tag und Nacht durch die Drehung der Erde um die eigene Achse verursacht wird und daß sich die Erde um die Sonne dreht (siehe Abschnitt 2.3.3) [Vosniadou and Brewer, 1994, S. 169–170], bedarf einer Differenzierung in wissenschaftliche Informationen über den Tag/Nachtzyklus und wissenschaftliche Informationen über andere Phänomene. Bei einer expliziten formalen Repräsention des Sachbereichs wird deutlich, das sich die wissenschaftliche Information *Die Erde dreht sich um die Sonne.* auf die Zeiteinheit *1 Jahr* bezieht, während die wissenschaftliche Information *Die Erde dreht sich um sich selbst.* die Zeiteinheit *24 Stunden* betrifft (siehe hierzu auch Kapitel 3).

Ähnliches gilt auch für die Mondphasen: die wissenschaftliche Information *Der Mond dreht sich um die Erde*, Grund für das Zustandekommen von Neu- und Vollmond und sowie von abnehmendem und zunehmendem Mond, hat keine Relevanz für die wissenschaftliche Erklärung des Tag/-Nachtzyklus. Eine Klassifizierung von Erklärungen für den Tag/Nachtzyklus entlang der Dimension Erklärungsarten für die Bewegung des Mondes (siehe Abschnitt 2.3.1), wie sie sich zum Beispiel in der Differenzierung der Kategorien 10 *Die Erde dreht sich um ihre Achse, die Sonne und der Mond sind fest auf gegenüberliegenden Seiten.* und 11 *Die Erde dreht sich um ihre Achse, die Sonne ist fest, aber der Mond bewegt sich.* ausdrückt, ist nur dann berechtigt, wenn in diesen Erklärungen der Mond eine Rolle für den Tag/Nachtzyklus über die Mondphasen hinaus spielt. Zwischen 12 und 26 Kindern, genaueres läßt sich aus [Vosniadou and Brewer, 1994, S. 157] nicht entnehmen, sagten, daß der Mond die Nacht mache, genauso wie die Sonne den Tag mache. Ob sich diese Vorstellung nur auf Kinder mit initialen Erklärungen beschränkt oder auch auf Kinder mit den fortgeschrittenen, wissenschaftlichen Erklärungen 11 und 12 zutrifft (siehe oben), kann nicht mehr ermittelt werden (vgl. Abschnitt 2.4.2).

2.4.5 Erklärungen für alltägliche Phänomene

Der Einfluß auf die Erklärungen für den Tag/Nachtzyklusdurch die individuellen Vorstellungen von der Erde und von anderen Phänomenen in der Astronomie legt die Vermutung nahe, daß auch Erklärungen für Phänomene des alltäglichen Lebens sich zumindest mittelbar auf die Erklärungen für Nacht und Tag auswirken.

Das zentrale Prinzip in allen Erklärungen für den Tag/Nachtzyklus sind Mechanismen für das *Verschwinden* und *Erscheinen* von Objekten. Und tatsächlich ist das Verschwinden und Wiederauftauchen von Dingen ein geläufiges und hervorstechendes Phänomen im Alltagsleben schon sehr junger Kindern, mit dem sie sich ausgiebig beschäftigen (siehe z.B. [Piaget, 1973]). Darüberhinaus tauchen Wörter und Ausdrücke für das Verschwinden und Erscheinen von Dingen und Personen als einige der ersten im Wortschatz von Kindern auf [Brown, 1973]. Zu Beginn ihrer Grundschulzeit scheinen Kinder ein Repertoire möglicher Erklärungen für das Verschwinden und Erscheinen von zur Verfügung zu haben, z.B. daß ein Objekt ein anderes *verdeckt* oder daß etwas *weit weg* geht, so daß man es nicht mehr sehen kann.

Im Lichte dieser Betrachtungen umfaßt Kategorie 2 *Die Sonne und der Mond gehen runter auf/in den Boden.* (Seite 28) gleich zwei verschiedene Erklärungen für den Tag/Nachtzyklus:

2.1 *Die Sonne und der Mond gehen runter* in den Boden.

Diese Erklärung beruht auf dem Mechanismus, daß ein Objekt in ein anderes eintaucht und dadurch verschwindet, so wie man z.B. einen Stein nicht mehr sieht, den man im Sand vergraben hat.

Dieser Kategorie sollen alle Kinder mit Erklärung 2 zugeordnet werde, die in ihren Antworten Ausdrücke wie „in den Boden“ oder „ins Wasser“ verwendet haben.

2.2 *Die Sonne und der Mond gehen runter (auf den Boden)* hinter Hügel.

Hier wird das Verschwinden von Sonne und Mond durch einen Mechanismus erklärt, bei dem sich Objekte hinter anderen Objekten verstecken, z.B. wie bei einem Ball, der hinter eine Mauer rollt.

Alle Kinder mit Erklärung 2, deren Antworten Ausdrücke wie „auf den Boden“, oder „hinter Hügel“ enthalten, sollen dieser Kategorie zugeordnet werden.

Auf diesen Punkt wird in Kapitel 3 noch ausführlich bei der Beschreibung der Modellierung eingegangen.

Bemerkenswerterweise findet sich unter den elf schlüssigen Erklärungen für den Tag/Nachtzyklus keine, die den Wechsel vom Tag zur Nacht durch das Ausgehen (Verlöschen) der Sonne erklärt, obwohl auch dies ein häufig zu beobachtender Mechanismus für das Verschwinden besonders von leuchtenden Objekten ist.

Kapitel 3

Operationale Modelle für die Erklärungen

Die ersten Versuche, die verschiedenen Erklärungen für den Tag/Nachtzyklus auf einem Rechner zu repräsentieren, wurden im Sommer 1992 unternommen. Seitdem haben die operationalen Modelle, die dabei entstanden sind, eine Vielzahl großer und kleiner Veränderungen erfahren. Nach und nach kristallisierten sich die relevanten Aspekte des Sachbereichs immer mehr heraus, so daß die Modellierung nun einen stabilen, wenn auch nur vorläufigen Zustand erreicht hat. Sie stellt eine explizite Repräsentation der kindlichen Erklärungen dar und erlaubt es, Aussagen über die hypothetische Entwicklung der Vorstellungen zum Tag/Nachtzyklus zu machen.

Dabei machen fünf Umstände die Modellierung des Sachbereichs zu einer Herausforderung: Zuerst einmal basieren Erklärungen für den Tag/Nachtzyklus zu einem Teil auf räumlichem Schließen, dessen Formalisierung oft mit großen Schwierigkeiten verbunden ist. Dann gibt es einen starken Zusammenhang zwischen Erklärungen für Phänomene des täglichen Lebens und denen des Tag/Nachtzyklus, die nicht leicht voneinander getrennt werden können. Weiterhin liegen die Erklärungen der Kinder als natürlichsprachliche Äußerungen vor, illustriert mit einigen Zeichnungen, und diese können auf viele verschiedene Weisen modelliert werden. Darüberhinaus beruhen die Vorstellungen der Kinder zum einen auf persönlichen Beobachtungen und Erfahrungen und zum anderen auf Mitteilungen wissenschaftlicher Informationen durch andere, und beide können einen unterschiedlichen Einfuß haben. Und schließlich gibt es in diesem Sachbereich nur die Möglichkeit der indirekten, empirischen Verifikation der Modellierung durch weitere psychologische Studien. Auf all diese Punkte wird in diesem und den folgenden Kapiteln noch an verschiedenen Stellen näher eingegangen.

Die Modellierungstätigkeit erstreckte sich über drei verschiedene Phasen, deren Ergebnisse mit Modellierung I bis Modellierung III bezeichnet werden, und über drei verschiedene Versionen des zur formalen Repräsentation verwendeten Systems Mobal, und zwar Mobal 1.0 bis Mobal 3.0b. Das System Mobal wird grundlegend in [Morik et al., 1993] beschrieben, die Version Mobal 1.0 in [Morik and Sommer, 1991] und die Version Mobal 2.2

in [Sommer et al., 1993]. Die operationalen Modelle aus Modellierung I werden in [Mühlenbrock, 1994b] dargestellt und die aus Modellierung II in [Mühlenbrock, 1994a]. Die bisher letzte Fassung, Modellierung III, bildet die Grundlage dieses Kapitels.

Abschnitt 3.1 Graphische Formalisierung Aus den 16 Erklärungen für den Tag/Nachtzyklus wurden begründet neun verschiedene ausgewählt und in einer graphischen Form repräsentiert.

Abschnitt 3.2 Prädikatenlogische Formalisierung Die neun Erklärungen wurden durch Prädikate, Regeln, Bedingungen und Fakten als operationale Modelle mit dem System MOBAL repräsentiert.

Abschnitt 3.3 Alternative Modellierungen Es werden einige Variationen der formalen Darstellung der kindlichen Erklärungen vorgestellt.

Abschnitt 3.4 Diskussion Es wird untersucht, inwieweit es mit der formalen Repräsentationssprache möglich ist, andere Teilphänomene des Tag/Nachtzyklus oder alltägliche Phänomene zu repräsentieren.

3.1 Graphische Formalisierung

In Kapitel 2 wurden 16 verschiedene Erklärungen für den Tag/Nachtzyklus vorgestellt, die in einer Studie mit 60 Kindern verschiedener Alterstufen ermittelt worden sind. In diesem Kapitel soll nun beschrieben werden, wie die Erklärungen der Kinder als operationalen Modellen formalisiert werden können.

Hand in Hand mit der Repräsentation auf dem Rechner wurden auch graphische Formalisierungen der Erklärungen entwickelt. Dies bietet sich hier besonders an, da die Erklärungen zu einem großen Teil auf räumlichem Schließen basieren, das sich gut in Bildern veranschaulichen läßt. Es muß jedoch an dieser Stelle unbedingt darauf hingewiesen werden, daß diese Bilder die operationalen Modelle nur ergänzen, nicht aber ersetzen können. Denn Bilder sind statisch und können im Gegensatz zu den dynamischen Modellen nicht aktiv auf Fragen antworten oder auf neue Informationen reagieren.

Unter den 16 verschiedenen Erklärungen gab es fünf Erklärungen, nämlich Erklärung 12 bis 16, die als unbestimmt oder vermischt angesehen wurden (siehe Abschnitt 2.3.2). Diese Erklärungen können nicht modelliert werden, da nur ungenügende Informationen über sie vorliegen. Interessanterweise sind aber auch bei den Experimenten mit den operationalen Modellen vermischte Erklärungen aufgetreten, die in Kapitel 4 beschrieben werden. Eine weitere, zum Teil unbestimmte Erklärung ist Erklärung 4 *Die Sonne und der Mond gehen irgendwie unter*, bei der die Kinder keine Angaben darüber machten, ob die Sonne auf den Boden oder auf die andere Seite der Erde geht (siehe Seite 29). Da aber diese beiden Erklärungen schon von den Kategorien 2 und 3 abgedeckt werden, soll Kategorie 4 nicht mehr von diesen unterschieden werden.

Unter den übrigen zehn schlüssigen Erklärungen gibt es Paare von Kategorien, die sich voneinander nur durch die Bewegung des Mondes unterscheiden. Dies sind z.B. die Erklärungen 10 *Die Erde dreht sich um ihre Achse, die Sonne und der Mond sind fest auf gegenüberliegenden Seiten.* und 11 *Die Erde dreht sich um ihre Achse, die Sonne ist fest, aber der Mond bewegt sich*. Da die Sterne überhaupt keine Rolle bei der Erklärung des Tag/Nachtzyklus spielen (Abschnitt 2.3.2) und da nur ein Teil der Kinder dem Mond eine Rolle beim Tag/Nachtzyklus zugeschrieben hat (Abschnitt 2.4.4) und da sich die Mechanismen des Erscheinens und Verschwindens des Mondes nicht von denen der Sonne unterscheiden (Abschnitt 2.3.2 und 2.4.5), soll zunächst einmal nur die Rolle der Sonne zur Differenzierung von Modellen verwendet werden. Das bedeutet, daß die Erklärungen 8 und 9, bzw. die Erklärungen 10 und 11 zusammengefaßt werden.

Von den verbleibenden acht Erklärungen soll die Erklärung 2 aufgespalten werden in zwei verschiedene Erklärungen, nämlich in die Erklärung 2.1 *Die Sonne und der Mond gehen runter in den Boden.* und in die Erklärung 2.2 *Die Sonne und der Mond gehen runter hinter Hügel*, wie bereits in Abschnitt 2.4.5 erläutert wurde.

Übrig bleiben also neun verschiedene Erklärungen, die den formalen Modellen folgendermaßen zugeordnet werden:

Modell 1 *Wolken verdecken die Sonne.* (Clouds cover the sun.)

Dieses Modell repräsentiert Erklärung 1 von Seite 28 und ist in Abbildung 3.1 graphisch dargestellt.

Modell 2 *Die Sonne geht runter in den Boden.* (The sun goes down into the ground.)

Dieses Modell repräsentiert Erklärung 2.1 von Seite 39 und ist in Abbildung 3.2 graphisch dargestellt.

Modell 3 *Die Sonne geht hinter Hügel.* (The sun moves behind hills.)

Dieses Modell repräsentiert Erklärung 2.2 von Seite 39 und ist in Abbildung 3.3 graphisch dargestellt.

Modell 4 *Die Sonne geht weit weg.* (The sun goes far away.)

Dieses Modell repräsentiert Erklärung 5 von Seite 30 und ist in Abbildung 3.4 graphisch dargestellt.

Modell 5 *Die Sonne geht auf die andere Seite der Erde.* (The sun moves to the other side of the earth.)

Dieses Modell repräsentiert Erklärung 3 von Seite 29 und ist in Abbildung 3.5 graphisch dargestellt.

Modell 6 *Die Sonne dreht sich um die Erde.* (The sun revolves around the earth.)

Dieses Modell repräsentiert Erklärung 6 von Seite 30 und ist in Abbildung 3.6 graphisch dargestellt.

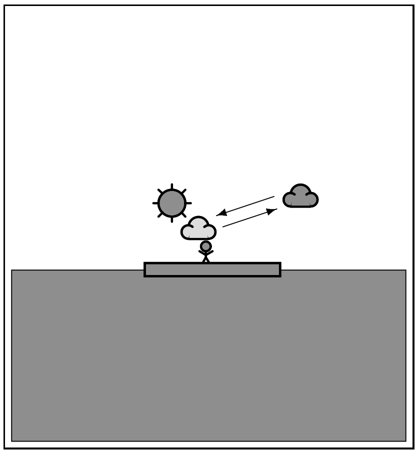


Abbildung 3.1: **Modell 1** – *Wolken verdecken die Sonne.* (initial)

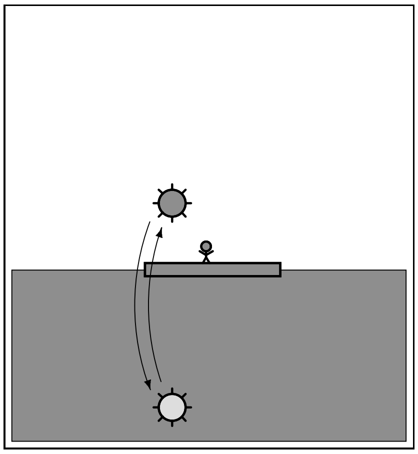


Abbildung 3.2: **Modell 2** – *Die Sonne geht runter in den Boden.* (initial)

Modell 7 *Die Erde dreht sich um die Sonne.* (The earth revolves around the sun.)

Dieses Modell repräsentiert Erklärung 7 von Seite 30 und ist in Abbildung 3.7 graphisch dargestellt.

Modell 8 *Die Erde dreht sich hin und her.* (The earth turns up and down.)

Dieses Modell repräsentiert Erklärung 8 und Erklärung 9 von Seite 30 und ist in Abbildung 3.8 graphisch dargestellt.

Modell 9 *Die Erde dreht sich um sich selbst.* (The earth rotates.)

Dieses Modell repräsentiert Erklärung 10 und Erklärung 11 von Seite 30 und ist in Abbildung 3.9 graphisch dargestellt.

In den Abbildungen 3.1 bis 3.4 wird die Erde als flache Scheibe dargestellt, die von einem unendlichen Untergrund abgestützt wird. Diese Darstellung steht im Einklang mit den Vorstellungen der Kinder von der Erde, wie sie in Abschnitt 2.4.3 beschrieben werden. Der unendliche Untergrund, der in diesen Abbildungen natürlich nur angedeutet werden kann, kann selbst auch als Teil der Erde angesehen werden, genauso wie der Ausdruck (Erd-)Boden (*ground*), den die Kinder verwendet haben (siehe Abschnitt 2.4.3), auch einfach nur *Erde* bedeuten kann. Das heißt, daß sich in den ersten vier Modellen die Erde unendlich nach unten und zu den Seiten ausdehnt. Der Fall, daß die Erde zu den Seiten begrenzt ist und sich nur nach unten hin unendlich ausdehnt, wird prinzipiell durch Modell 3 *Die Sonne geht hinter Hügel.* erfaßt, denn die Hügel sind zu den Seiten begrenzt und auch ein Teil der Erde.

In den Abbildungen 3.5 bis 3.9 ist die Erde als Kugel und damit als in alle Richtungen begrenzt dargestellt. Dies entspricht der Hypothese, daß die Vorstellung von einer kugelförmigen Erde eine notwendige, wenn auch

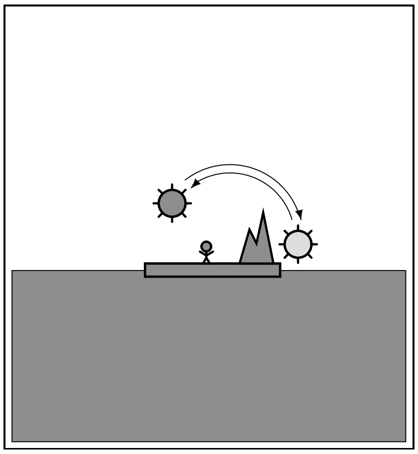


Abbildung 3.3: **Modell 3** – *Die Sonne geht hinter Hügel.* (initial)

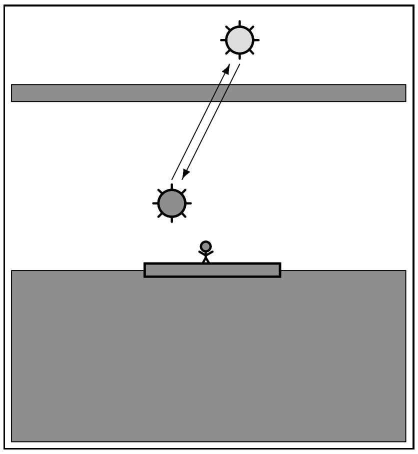


Abbildung 3.4: **Modell 4** – *Die Sonne geht weit weg.* (initial)

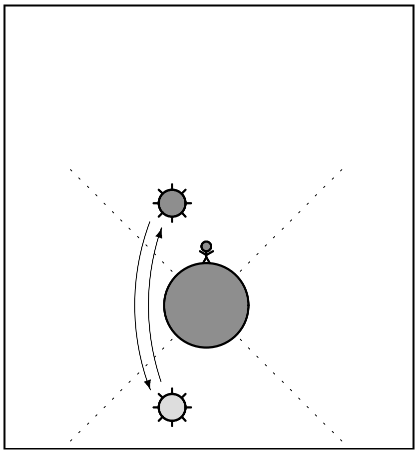


Abbildung 3.5: **Modell 5** – *Die Sonne geht auf die andere Seite der Erde.* (synthetisch)

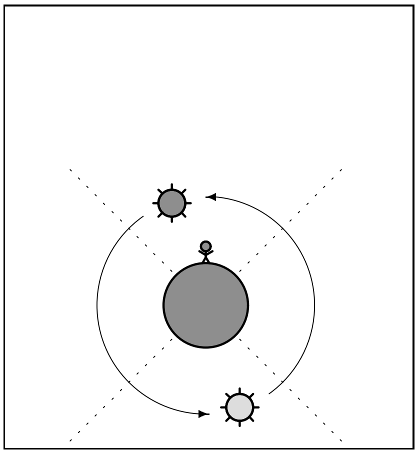


Abbildung 3.6: **Modell 6** – *Die Sonne dreht sich um die Erde.* (synthetisch)

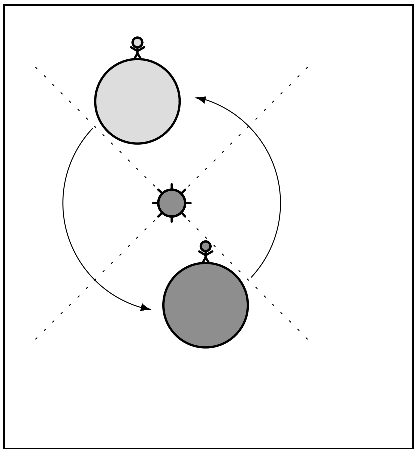


Abbildung 3.7: **Modell 7** – *Die Erde dreht sich um die Sonne.* (synthetisch)

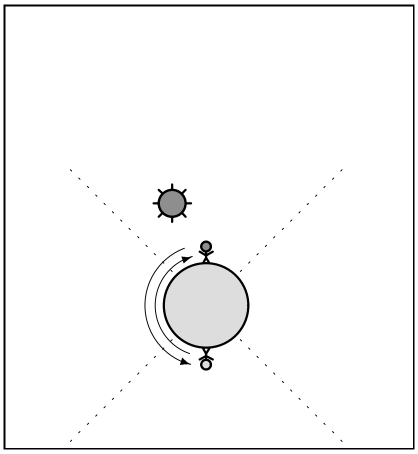


Abbildung 3.8: **Modell 8** – *Die Erde dreht sich hin und her.* (synthetisch)

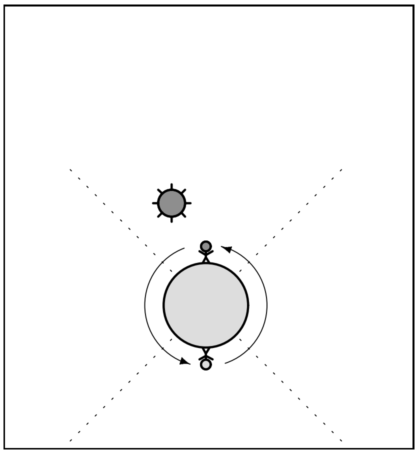


Abbildung 3.9: **Modell 9** – *Die Erde dreht sich um sich selbst.* (wissenschaftlich)

keine hinreichende Voraussetzung für die wissenschaftliche Erklärung des Tag/Nachtzyklus ist (Abschnitt 2.4.3). Die gestrichelten Linien in diesen Abbildungen veranschaulichen die Aufteilung des Raumes in relevante Regionen (*areas*), die bei der prädikatenlogischen Formalisierung des räumlichen Schließens in Abschnitt 3.2 noch eine wichtige Rolle spielen werden. Sie sollen keineswegs die Erdachse (*axis*) repräsentieren, die in manchen Aussagen der Kinder auftaucht. Denn die Erdachse ist kein reales, sondern ein theoretisches Konstrukt, das sich unmittelbar aus der Erdrotation ergibt und damit gleichbedeutend mit dieser ist. Dies findet sich so auch in den Erklärungen der Kinder wieder.

Die Klassifizierung der Erklärungen in initiale, synthetische und wissenschaftliche Erklärungen, wie sie in Abschnitt 2.3.3 beschrieben wurde, kann entlang der Zuordnung von Seite 43 auf die Modelle übertragen werden. Somit stellen Modell 1 bis 4 initiale und Modell 5 bis 8 synthetische Modelle dar und Modell 9 wird als wissenschaftlich klassifiziert. Diese Klassifizierung wie auch die formal–graphische Repräsentation der Modelle sind in den Modellierungen II und III gleich geblieben. In Modellierung I wurde noch nicht zwischen Modell 2 und 3 unterschieden, so daß es insgesamt nur acht Modelle für den Tag/Nachtzyklus waren (vgl. Abschnitt 2.4.2).

3.2 Prädikatenlogische Formalisierung

Die Begriffsstruktur (Abschnitt 1.1.1), die den neun Modellen für den Tag/-Nachtzyklus zugrundeliegt (Abschnitt 3.1), wurde auf dem System MOBAL (Abschnitt 1.2.2) nach dem *sloppy modeling*–Paradigma (Abschnitt 1.2.1) modelliert. Dabei sind operationale Modelle entstanden, die auf Fragen antworten und auf neue Informationen reagieren können. Experimente solcher Art mit den operationalen Modellen werden Gegenstand des Kapitels 4 sein.

Mit der Auswahl geeigneter Prädikate wird das Vokabular zur Repräsentation der relevanten Begriffe des Sachbereichs festgelegt. Als Prädikatsnamen wurden Wörter der englischen Sprache, nicht der deutschen Sprache verwendet. Zum einen sollte dadurch die Kommikation mit den Partnern im Programm *Learning in Humans and Machines* erleichtert werden, zum anderen wird damit vermieden, daß sich Fehler und Mißverständnisse durch die Übersetzung der englischen Vorlage ins Deutsche einschleichen. So gibt es z.B. für den deutschen Ausdruck „dreht sich“ gleich drei verschiedene englische Übersetzungen bei der Beschreibung der Modelle: in Modell 6 und 7 wird er mit „revolves“ übersetzt, in Modell 8 mit „turns“ und in Modell 9 mit „rotates“. Um diese Nuancenvielfalt nicht zu verlieren, wurden die Ausdrücke in der Originalsprache belassen.[1] Die Prädikate in diesem Sachbereich sind bis zu fünfstellig und werden im Abschnitt 3.2.1 beschrieben.

[1] Das alles kann man natürlich auch im Deutschen durch zusätzliche Präpositionalphrasen wie „dreht sich *um etwas anderes*“ oder „dreht sich *um sich selbst*“ ausdrücken, doch sind solche Ausdrücke allein schon wegen ihrer Länge denkbar ungünstig für Prädikatsnamen.

Durch Regeln werden inferentielle Beziehungen zwischen den Prädikaten hergestellt. Auf diese Weise wird die Bedeutung der repräsentierten Begriffe postuliert. So repräsentiert z.B. das Prädikat `day_night_cycle` den Begriff *Tag/Nachtzyklus*. Eine Inferenz, die ein Faktum mit dem Prädikat `day_night_cycle` ableitet, stellt somit eine Erklärung für den Tag/Nachtzyklus dar. Die verwendeten Regeln werden in Abschnitt 3.2.2 beschrieben. Aus praktischen Gründen mußte verhindert werden, daß das Netz von Regeln Zyklen enthielt. Deshalb wurde ein Teil der Beziehungen zwischen Prädikaten durch Bedingungen (*integrity constraints*) repräsentiert. Die genaue Begründung und die verwendeten Bedingungen finden sich in Abschnitt 3.2.3.

Bei der Modellierung stellte sich heraus, daß es sinnvoll ist, die gleichen Prädikate und die gleichen Regeln für alle neun Modelle zu verwenden und nur die Faktenmenge zu variieren. Dies ermöglicht einen direkten strukturellen Vergleich zwischen den verschiedenen operationalen Modellen und entspricht der Annahme, daß bei allen Kindern die Begriffsintensionen (siehe Definition Abschnitt 1.2.2) schon vorhanden sind und nur die Begriffsextensionen sich ändern (vgl. Abschnitt 1.1.1). Auf diesen Punkt wird noch einmal näher in der abschließenden Diskussion in Abschnitt 5 eingegangen. Als Beispiele für Faktenmengen werden in Abschnitt 3.2.4 die Faktenmengen eines initialen Modells (Modell 1) und die des wissenschaftlichen Modells (Modell 9) dargestellt. Anschließend werden die Unterschiede zwischen diesen beiden Modellen und den anderen sieben Modellen beschrieben.

3.2.1 Prädikate

Das Vokabular der Modellierung umfaßt 34 verschiedene Prädikate mit unterschiedlicher Stelligkeit von einer bis zu fünf Stellen. Die Granularität der Repräsentationssprache ist so gewählt, daß alle relevanten Aspekte des Sachbereichs ausgedrückt werden können. In diesem Abschnitt werden alle 34 Prädikate mit einer semiformalen, umgangssprachlichen Beschreibung vorgestellt. In den beiden folgenden Abschnitten 3.2.2 und 3.2.3 wird eine formale Definition der Prädikate durch Regeln und Bedingungen angegeben.

Die für die Modellierung ganz wesentliche räumliche Struktur des Sachbereichs wird grundlegend durch das vierstellige Prädikat `in/4` aufgespannt:

```
in(object1,area1,object2,state0).
```

> *Das Objekt* `object1` *ist in der Region* `area1` *des Objektes* `object2` *im Zustand* `state0`.

In Abbildung 3.10 ist eine Konstellation von Objekten (*objects*) und Regionen (*areas*) dargestellt, für die diese Beschreibung gilt. Wie man sieht, hat jedes der beiden Objekte `object1` und `object2` vier Regionen, nämlich `area1` bis `area4`. Die Regionen sind durch gestrichelte Linien angedeutet. Die Anzahl der Regionen pro Objekt ist allerdings nicht auf vier beschränkt. Die Repräsentationssprache ermöglicht auch die Darstellung feiner aufgeteilter Regionen oder die erweiterte Darstellung von Konstellationen im dreidi-

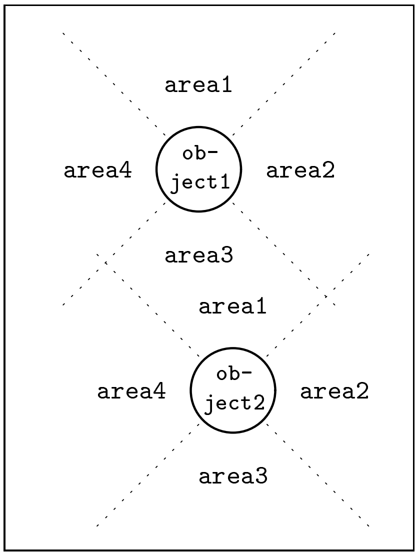


Abbildung 3.10: Die räumliche Struktur des Sachbereichs

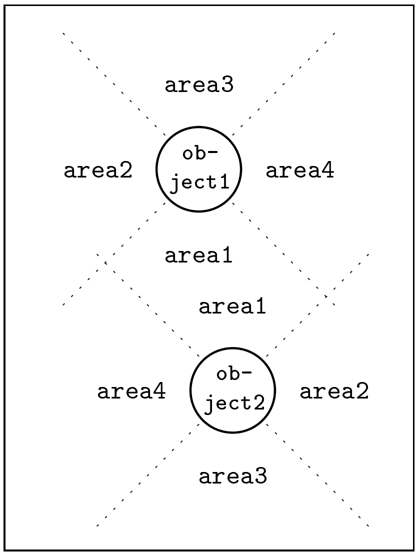


Abbildung 3.11: Bandbreite der räumlichen Repräsentationsmöglichkeiten

mensionalen Raum, doch für diesen Sachbereich ist die Aufteilung wie in Abbildung 3.10 optimal.

Die Ausrichtung der Objekte ist natürlich nicht festgelegt. So gilt z.B. in Abbildung 3.10 auch

```
in(object2,area3,object1,state0).
```

aber nicht in Abbildung 3.11. Hier steht das Objekt `object1` „auf dem Kopf", es ist um 180° gedreht und es gilt

```
in(object2,area1,object1,state0).
```

Genausogut ist auch die Darstellung einer Drehung um 90° oder 270° möglich, und zwar bei beiden Objekten.

Eine Ordnungsrelation auf den Regionen wird durch das Prädikat `next_area/2` ausgedrückt, z.B. durch

```
next_area(area1,area2).
```

An die Region `area1` *schließt als nächstes die Region* `area2` *an.*

Mit dem Prädikat `complementary/2` läßt sich darstellen, daß sich zwei Regionen auf entgegengesetzten Seiten eines Objektes befinden, z.B.

```
complementary(area1,area3).
```

Die Region `area1` *ist entgegengesetzt der Region* `area3`.

wie auch in Abbildung 3.10 zu sehen ist.

Die grundlegenden zeitlichen Strukturen werden mit Hilfe der Prädikate `next_event/2` und `next_state/2` repräsentiert, wie in

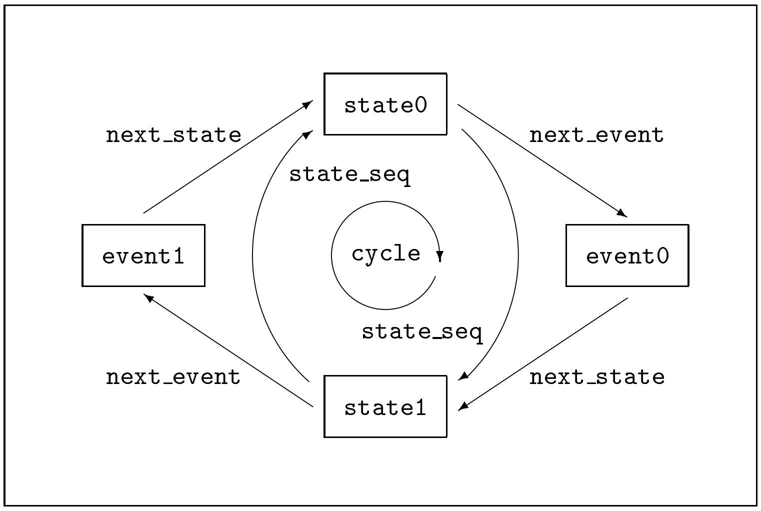


Abbildung 3.12: Die zeitliche Struktur des Sachbereichs

`next_event(state0,event0).`

> *Nach dem Zustand* `state0` *folgt als nächstes das Ereignis* `event0`*.*

`next_state(event0,state0).`

> *Nach dem Ereignis* `event0` *folgt als nächstes der Zustand* `state0`*.*

Durch sie kann eine Abfolge von Zuständen (*states*) und Ereignissen (*events*) beschrieben werden (siehe Abbildung 3.12). Komplexere Folgen von Zuständen und Ereignissen werden durch die Prädikate `state_seq/3`, `event_seq/3` und `cycle/4` beschrieben:

`state_seq(event0,state1,event1).`

> *Das Ereignis* `event0`*, der Zustand* `state0` *und das Ereignis* `event1` *bilden eine Zustandssequenz, d.h. eine Sequenz mit einem Zustand in der Mitte.*

`event_seq(state0,event0,state1).`

> *Der Zustand* `state0`*, das Ereignis* `event0` *und der Zustand* `state1` *bilden eine Ereignissequenz, d.h. eine Sequenz mit einem Ereignis in der Mitte.*

`cycle(state0,event0,state1,event1).`

> *Der Zustand* `state0`*, das Ereignis* `event0`*, der Zustand* `state1` *und das Ereignis* `event1` *bilden einen Zyklus, d.h. nach dem Ereignis* `event1` *folgt wieder der Zustand* `state0`*.*

Die beiden Prädikate `state_seq` und `cycle` werden in Abbildung 3.12 veranschaulicht.

Mit den vier einstelligen Prädikaten `opaque/1`, `solid/1`, `shining/1` und `observing/1` werden bestimmte Eigenschaften von Objekten angegeben:

`opaque(object1).`

> *Das Objekt* `object1` *ist undurchsichtig.*

`solid(object1).`

> *Das Objekt* `object1` *ist fest, d.h. hart.*

`shining(object1).`

> *Das Objekt* `object1` *scheint.*

`observing(object1).`

> *Das Objekt* `object1` *beobachtet.*

Zusätzlich können Aussagen über die Größe (`bigger/2`), über die Unendlichkeit (`infinte/2`) und den Zusammenhalt (`on/2`) von Objekten gemacht werden:

`bigger(object1,object2).`

> *Das Objekt* `object1` *ist größer als das Objekt* `object2`*.*

`infinite(object1,area1).`

> *Das Objekt* `object1` *ist in Richtung der Region* `area1` *unendlich.*

`on(object1,object2).`

> *Das Objekt* `object1` *ist auf dem Objekt* `object2`*.*

Aussagen über die Beweglichkeit von Objekten absolut lassen sich mit dem Prädikat `stationary/2` repräsentieren, Aussagen relativ zu einem anderen Objekt mit dem Prädikat `moves/3`

`stationary(object1,event0).`

> *Das Objekt* `object1` *ist fest, d.h. unbeweglich, beim Ereignis* `event0`*.*

`moves(object1,object2,event0).`

> *Das Objekt* `object1` *bewegt sich aus Sicht des Objektes* `object2` *beim Ereignis* `event0`*.*

Bestimmte Konstellationen von drei Objekten werden mit `between/4` und `invisible/4` ausgedrückt:

`between(object1,object2,object3,state0).`

> *Das Objekt* `object1` *ist zwischen dem Objekt* `object2` *und dem Objekt* `object3` *im Zustand* `state0`*.*

`invisible(object1,object2,object3,state0).`

> *Das Objekt* `object1` *ist wegen des Objektes* `object2` *aus Sicht des Objektes* `object3` *im Zustand* `state0` *nicht sichtbar.*

Ereignisse, bei denen Objekte andere verdecken oder sich hinter ihnen verstecken, werden durch die Prädikate `covers/4`, `hides/4`, `uncovers/4` und `covers/4` repräsentiert:

`covers(object1,object2,object3,event0).`

> *Das Objekt* `object1` *verdeckt das Objekt* `object2` *aus Sicht des Objektes* `object3` *beim Ereignis* `event0`.

`uncovers(object1,object2,object3,event0).`

> *Das Objekt* `object1` *deckt das Objekt* `object2` *auf aus Sicht des Objektes* `object3` *beim Ereignis* `event0`.

`hides(object1,object2,object3,event0).`

> *Das Objekt* `object1` *versteckt sich hinter dem Objekt* `object2` *aus Sicht des Objektes* `object3` *beim Ereignis* `event0`.

`unhides(object1,object2,object3,event0).`

> *Das Objekt* `object1` *kommt hinter dem Objekt* `object2` *hervor aus Sicht des Objektes* `object3` *beim Ereignis* `event0`.

Verschiedene Bewegungen, die zwei Objekte relativ zueinander durchführen können, werden durch `revolves_cw/3`, `revolves_acw/3`, `rotates_cw/3`, `rotates_acw/3` und `returns/3` beschrieben:

`revolves_cw(object1,object2,event0).`

> *Das Objekt* `object1` *dreht sich um das Objekte* `object2` *im Uhrzeigersinn* (cw: clockwise) *beim Ereignis* `event0`.

`revolves_acw(object1,object2,event0).`

> *Das Objekt* `object1` *dreht sich um das Objekte* `object2` *im umgekehrten Uhrzeigersinn* (acw: anticlockwise) *beim Ereignis* `event0`.

`rotates_cw(object1,object2,event0).`

> *Das Objekt* `object1` *dreht sich um sich selbst aus Sicht des Objektes* `object2` *im Uhrzeigersinn* (cw: clockwise) *beim Ereignis* `event0`.

`rotates_acw(object1,object2,event0).`

> *Das Objekt* `object1` *dreht sich um sich selbst aus Sicht des Objektes* `object2` *im umgekehrten Uhrzeigersinn* (acw: anticlockwise) *beim Ereignis* `event0`.

`returns(object1,object2,event0).`

> *Das Objekt* `object1` *kehrt zurück zum Objekte* `object2` *beim Ereignis* `event0`.

Ereignisse, in denen Objekte aus der Sicht anderer Objekte verschwinden oder erscheinen, werden mit `appears/3`, `disappears/3` und `reappears/4` repräsentiert:

`appears(object1,object2,event0).`

> *Das Objekt* `object1` *erscheint aus Sicht des Objektes* `object2` *beim Ereignis* `event0`.

`disappears(object1,object2,event0).`

> *Das Objekt* `object1` *verschwindet aus Sicht des Objektes* `object2` *beim Ereignis* `event0`.

`reappears(object1,object2,event0,event1).`

> *Das Objekt* `object1` *verschwindet aus Sicht des Objektes* `object2` *beim Ereignis* `event0` *und erscheint wieder beim Ereignis* `event1`.

Und schließlich kann durch die Prädikate `day/2`, `night/2` und `day_night_cycle/5` ausgedrückt werden, daß ein Tag, eine Nacht bzw. ein Tag/Nachtzyklus vorliegt:

`day(object1,state0).`

> *Für das Objekt* `object1` *ist im Zustand* `state0` *Tag.*

`night(object1,state0).`

> *Für das Objekt* `object1` *ist im Zustand* `state0` *Nacht.*

`day_night_cycle(object1,state0,event0,state1,event1).`

> *Für das Objekt* `object1` *ist der Zustand* `state0`, *das Ereignis* `event0`, *der Zustand* `state1` *und das Ereignis* `event1` *ein Tag/Nachtzyklus.*

Alle Prädikate sind noch einmal übersichtlich in Tabelle 3.1 dargestellt. Zu jedem Prädikat werden die Benutzersorten angegeben. Diese stehen für Objekte (`<object>`), Regionen (`<area>`), Zustände (`<state>`), Ereignisse (`<event>`) und Zeiten (`<time>`), wobei letztere eine Obermenge von Zuständen und Ereignissen sind.

3.2.2 Regeln

Den Prädikaten wird nun eine formale Definition durch insgesamt 42 verschiedene Regeln gegeben. Durch sie wird eine inferentielle Beziehung zwischen den Prädikaten hergestellt. Obwohl das System MOBAL durch die variable Tiefenbeschränkung nur einen Teil der inferentiellen Hülle der Regelmenge berechnet, müssen bei der Modellierung dennoch der Nutzen einer zusätzlichen Regel sorgfältig gegen die Kosten der Inferenz abgewogen werden. Dies macht sich u.a. bei der Negation von Fakten bemerkbar, so daß in einigen Fällen auf Bedingungen ausgewichen werden mußten, wie im Anschnitt 3.2.3 beschrieben wird.

Im vorhergehenden Abschnitt wurde informell beschrieben, wie durch die Prädikate `next_event`, `next_state`, `state_seq`, `event_seq` und `cycle` die zeitliche Struktur des Sachbereichs repräsentiert wird. Durch die folgenden Regeln wird diese Struktur formal definiert:

appears/3:	<object>,<object>,<event>.
between/4:	<object>,<object>,<object>,<time>.
bigger/2:	<object>,<object>.
complementary/2:	<area>,<area>.
covers/4:	<object>,<object>,<object>,<event>.
cycle/4:	<state>,<event>,<state>,<event>.
day/2:	<object>,<state>.
day_night_cycle/5:	<object>,<state>,<event>,<state>,<event>.
disappears/3:	<object>,<object>,<event>.
event_seq/3:	<event>,<state>,<event>.
hides/4:	<object>,<object>,<object>,<event>.
in/4:	<object>,<area>,<object>,<time>.
infinite/2:	<object>, <area>.
invisible/4:	<object>,<object>,<object>,<time>.
moves/3:	<object>,<object>,<event>.
next_area/2:	<area>,<area>.
next_event/2:	<state>,<event>.
next_state/2:	<event>,<state>.
night/2:	<object>,<state>.
observing/1:	<object>.
on/2:	<object>,<object>.
opaque/1:	<object>.
reappears/4:	<object>,<object>,<event>,<event>.
returns/3:	<object>,<object>,<event>.
revolves_acw/3:	<object>,<object>,<event>.
revolves_cw/3:	<object>,<object>,<event>.
rotates_acw/3:	<object>,<object>,<event>.
rotates_cw/3:	<object>,<object>,<event>.
shining/1:	<object>.
solid/1:	<object>.
state_seq/3:	<state>,<event>,<state>.
stationary/2:	<object>,<time>.
uncovers/4:	<object>,<object>,<object>,<event>.
unhides/4:	<object>,<object>,<object>,<event>.

Tabelle 3.1: Spezifikation der Prädikate (in alphabetischer Reihenfolge)

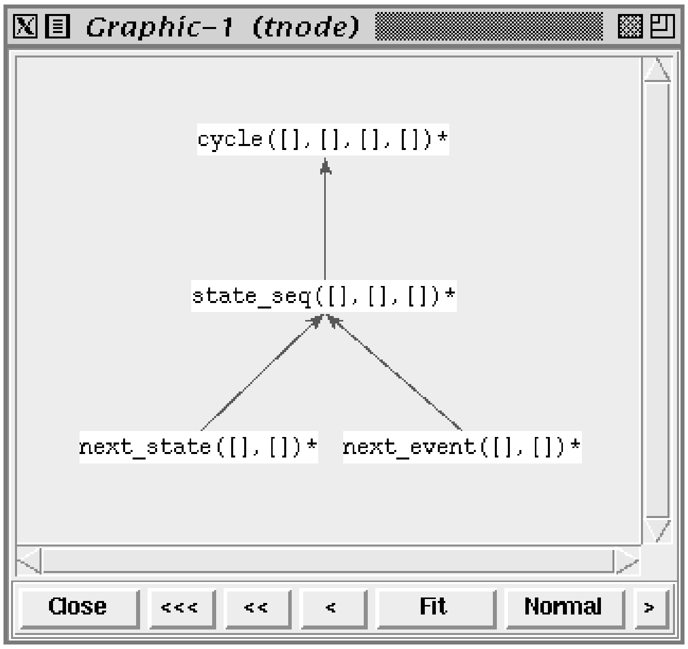


Abbildung 3.13: Topologie der Zeitstruktur des Sachbereichs

```
next_event(S1,E) & next_state(E,S2) → state_seq(S1,E,S2).

next_state(E1,S) & next_event(S,E2) → event_seq(E1,S,E2).

state_seq(S1,E1,S2) & state_seq(S2,E2,S1) → cycle(S1,E1,S2,E2).
```

Die hiermit festgelegten Beziehungen zwischen den Prädikaten stimmen mit denen in Abbildung 3.12 auf Seite 50 überein.

Die systemgenerierte Topologie der obigen drei Regeln über die Zeitstruktur ist in Abbildung 3.13 dargestellt.[2] In dieser kleinen Topologie repräsentiert jeder Knoten außer des mittleren genau ein Prädikat. Der Knoten in der Mitte repräsentiert die zwei Prädikate `state_seq` und `event_seq`. Die Topologie zeigt an, daß `next_event` und `next_state` in den Prämissen von Regeln vorkommen, die `state_seq` oder `event_seq` in der Konklusion haben; und diese wiederum erscheinen in den Prämissen einer Regel mit dem Prädikat `cycle` in der Konklusion.

In gleicher Weise werden durch die übrigen 39 Regeln alle weiteren Prädikate definiert. So gibt es z.B. Regeln über die Unendlichkeit von Objekten, die besonders bei den initialen Modellen 1 bis 4 eine große Rolle spielt:

```
infinite(O,A) & next_event(S,E) → in(O,A,O,E).

infinite(O,A) & next_event(S,E) → in(O,A,O,S).
```

[2]Parametereinstellung bei der Generierung der Topologie: `generate`, `top_down` und `bottom_up`.

Wichtige Begriffe in den Modellen für den Tag/Nachtzyklus sind die Begriffe *dazwischen* und die strengere Form *unsichtbar*, die folgendermaßen definiert sind:

```
in(O1,A1,O2,S) & in(O3,A2,O2,S) & complementary(A1,A2)
    & ne(O1,O2) & ne(O3,O2) → between(O2,O1,O3,S).

in(O1,A1,O2,S) & in(O3,A2,O2,S) & complementary(A1,A3)
    & ne(O1,O3) & ne(A2,A3) → not(between(O2,O1,O3,S)).

between(O1,O2,O3,S) & opaque(O1) & bigger(O1,O3)
    → invisible(O2,O1,O3,S).

between(O1,O2,O3,S) & opaque(O1) & bigger(O1,O3)
    → invisible(O3,O1,O2,S).
```

Aus den Begriffen *dazwischen* und *unsichtbar* zusammen mit der Beweglichkeit eines Objektes leiten sich Begriffe für das Verdecken und Verstecken ab:

```
not(between(O1,O2,O3,S1)) & invisible(O2,O1,O3,S2)
    & state_seq(S1,E,S2) & not(stationary(O1,E))
    → covers(O1,O2,O3,E).

invisible(O2,O1,O3,S1) & not(between(O1,O2,O3,S2))
    & state_seq(S1,E,S2) & not(stationary(O1,E))
    → uncovers(O1,O2,O3,E).

not(between(O1,O2,O3,S1)) & invisible(O2,O1,O3,S2)
    & state_seq(S1,E,S2) & not(stationary(O3,E))
    → hides(O3,O1,O2,E).

invisible(O2,O1,O3,S1) & not(between(O1,O2,O3,S2))
    & state_seq(S1,E,S2) & not(stationary(O3,E))
    → unhides(O3,O1,O2,E).
```

Aus diesen wiederum folgen *verschwinden* und *erscheinen*:

```
covers(O1,O2,O3,E) → disappears(O2,O3,E).

covers(O1,O2,O3,E) → disappears(O3,O2,E).

hides(O1,O2,O3,E) → disappears(O1,O3,E).

hides(O1,O2,O3,E) → disappears(O3,O1,E).

uncovers(O1,O2,O3,E) → appears(O3,O2,E).

uncovers(O1,O2,O3,E) → appears(O2,O3,E).

unhides(O1,O2,O3,E) → appears(O1,O3,E).

unhides(O1,O2,O3,E) → appears(O3,O1,E).
```

Aus dem Verschwinden und Erscheinen von Objekten leiten sich Tag und Nacht ab (vgl. Abschnitt 2.4.5):

```
appears(O1,O2,E) & next_state(E,S) & shining(O1)
    & observing(O2) → day(O2,S).

disappears(O1,O2,E) & next_state(E,S) & shining(O1)
    & observing(O2) → night(O2,S).
```

Für die Ableitung eines Zyklus von Tag und Nacht sind weiterhin noch Regeln über die verschiedenen Bewegungsarten von Objekten notwendig:

```
in(O1,A1,O2,S1) & in(O1,A2,O2,S2) & state_seq(S1,E,S2)
    & ne(A1,A2) & not(stationary(O1,E)) → moves(O1,O2,E).

in(O1,A1,O2,S1) & in(O1,A2,O2,S2) & state_seq(S1,E,S2)
    & ne(A1,A2) & not(stationary(O2,E)) → moves(O2,O1,E).

moves(O1,O2,E) & next_state(E,S2) & in(O1,A1,O2,E)
    & in(O1,A2,O2,S2) & next_area(A1,A2) → revolves_cw(O1,O2,E).

moves(O1,O2,E) & next_state(E,S2) & in(O1,A1,O2,E)
    & in(O1,A2,O2,S2) & next_area(A2,A1) → revolves_acw(O1,O2,E).

moves(O1,O2,E) & next_state(E,S2) & in(O2,A1,O1,E)
    & in(O2,A2,O1,S2) & next_area(A2,A1) → rotates_cw(O1,O2,E).

moves(O1,O2,E) & next_state(E,S2) & in(O2,A1,O1,E)
    & in(O2,A2,O1,S2) & next_area(A1,A2) → rotates_acw(O1,O2,E).
```

Darüberhinaus werden Regeln für *zurückkehren* benötig, einem zentralen Begriff für eine zyklische Bewegung:

```
moves(O1,O2,E1) & moves(O1,O2,E2) & event_seq(E1,S,E2)
    & stationary(O1,S) → returns(O1,O2,S).

revolves_cw(O1,O2,E1) & revolves_cw(O1,O2,E2)
    & event_seq(E1,S,E2) → returns(O1,O2,S).

revolves_acw(O1,O2,E1) & revolves_acw(O1,O2,E2)
    & event_seq(E1,S,E2) → returns(O1,O2,S).

rotates_cw(O1,O2,E1) & rotates_cw(O1,O2,E2)
    & event_seq(E1,S,E2) → returns(O1,O2,S).

rotates_acw(O1,O2,E1) & rotates_acw(O1,O2,E2)
    & event_seq(E1,S,E2) → returns(O1,O2,S).

revolves_cw(O1,O2,E1) & revolves_acw(O1,O2,E2)
    & event_seq(E1,S,E2) & stationary(O1,S) → returns(O1,O2,S).

revolves_acw(O1,O2,E1) & revolves_cw(O1,O2,E2)
    & event_seq(E1,S,E2) & stationary(O1,S) → returns(O1,O2,S).

rotates_cw(O1,O2,E1) & rotates_acw(O1,O2,E2)
    & event_seq(E1,S,E2) & stationary(O1,S) → returns(O1,O2,S).

rotates_acw(O1,O2,E1) & rotates_cw(O1,O2,E2)
    & event_seq(E1,S,E2) & stationary(O1,S) → returns(O1,O2,S).
```

Nun läßt sich der Begriff *wiederauftauchen* mit Hilfe der vorher festgelegten Begriffe definieren:

```
covers(O1,O2,O3,E1) & returns(O1,O2,S2) & uncovers(O1,O2,O3,E2)
    & returns(O1,O2,S1) & cycle(S1,E1,S2,E2)
    → reappears(O2,O3,E1,E2).

hides(O1,O2,O3,E1) & returns(O1,O2,S2) & unhides(O1,O2,O3,E2)
    & returns(O1,O2,S1) & cycle(S1,E1,S2,E2)
    → reappears(O1,O3,E1,E2).

hides(O1,O2,O3,E1) & returns(O1,O3,S2) & unhides(O1,O2,O3,E2)
    & returns(O1,O3,S1) & cycle(S1,E1,S2,E2)
    → reappears(O3,O1,E1,E2).
```

Und schließlich eine Regel für den Begriff *Tag/Nachtzyklus*, repräsentiert durch das Prädikat `day_night_cycle`:

```
reappears(O1,O2,E1,E2) & cycle(S1,E1,S2,E2) & shining(O1)
    & observing(O2) → day_night_cycle(O2,S1,E1,S2,E2).
```

Als Überblick über die Regelmenge ist in Abbildung 3.14 die systemgenerierte Topologie von allen 42 Regeln dargestellt. Man erkennt deutlich, daß die verschiedenen Prädikate durch ein inferentielles Netz miteinander verbunden sind. Durch dieses Netz können Fakten mit dem Prädikat `day_night_cycle` abgeleitet werden, das in der Topologie ganz oben abgebildet ist. Am linken Rand erkennt man die vier Topologieknoten `next_state`, `next_event`, `state_seq` und `cycle` wieder, die separiert von der Gesamttopologie schon in Abbildung 3.13 zu sehen waren.

Auch in dieser Topologie über die gesamte Regelmenge repräsentieren einige Knoten mehrere Prädikate. Deshalb ist in Tabelle 3.2 die Spezifikation der Topologie angegeben: In der Spalte „Prädikate" werden zu jedem Knoten alle Prädikate aufgelistet, die unter diesem Knoten zusammengefaßt werden; in der Spalte „Verweis von Knoten" sind die Verbindungen zwischen den Topologieknoten aufgeführt, die in Abbildung 3.14 als Pfeile zu erkennen sind. Nicht in der Tabelle dargestellt sind die beiden Prädikate `solid` und `on`, da sie in keiner Regel vorkommen (siehe Überblick in Anhang A.1), sondern nur in einigen Bedingungen.

3.2.3 Bedingungen

Zusätzlich zu den 42 Regeln enthalten die operationalen Modelle für den Tag/Nachtzyklus noch 12 verschiedene Bedingungen (*integrity constraints*), denn nicht alle Beziehungen zwischen Prädikaten lassen sich zweckmäßigerweise durch Regeln ausdrücken. So wäre es z.B. günstig, für die Ableitung von `not(between)`, das in den Regeln für *verdecken* und *verstecken* eine wichtige Rolle spielt, Fakten der Art `not(in)` zu haben:

```
in(O1,A1,O2,S) & not(in(O3,A1,O2,S)) → not(between(O3,O1,O2,S)).
```

Negierte `in`–Fakten werden wiederum von der folgenden Regel abgeleitet:

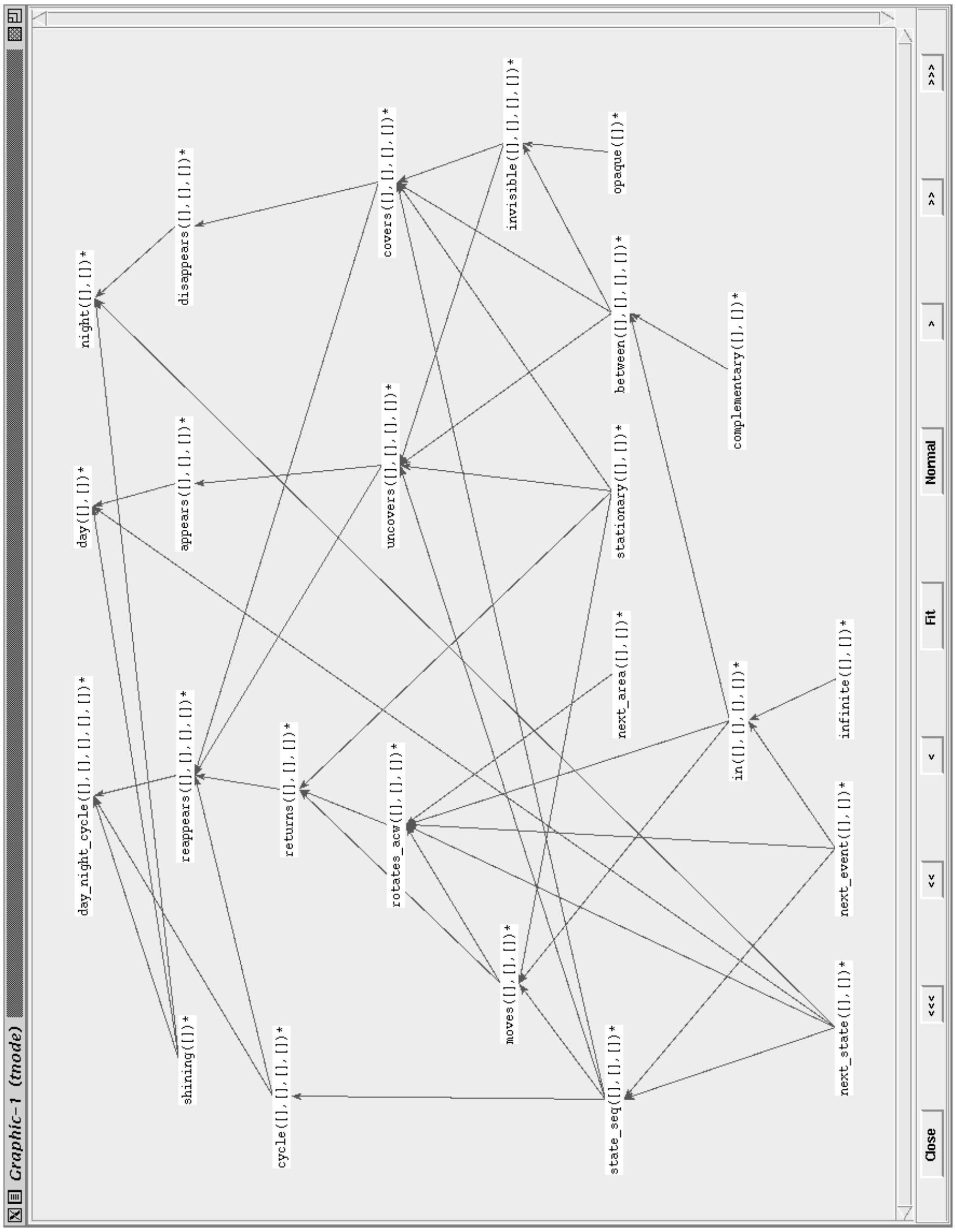


Abbildung 3.14: Topologie des Sachbereichs

Topologieknoten	Prädikate	Verweis von Knoten
`next_state([],[])`	`[next_state]`	
`next_event([],[])`	`[next_event]`	
`infinite([],[])`	`[infinite]`	
`in([],[],[],[])`	`[in]`	`[next_event, infinite]`
`complementary ([],[])`	`[complementary]`	
`state_seq([],[],[])`	`[state_seq]`	`[next_state, next_event]`
`next_area([],[])`	`[next_area]`	
`stationary ([],[])`	`[stationary]`	
`between([],[],[],[])`	`[between]`	`[complementary, in]`
`opaque([])`	`[opaque, bigger]`	
`moves([],[],[])`	`[moves]`	`[stationary, state_seq, in]`
`invisible([],[],[],[])`	`[invisible]`	`[opaque, between]`
`rotates_acw([],[],[])`	`[rotates_acw, rotates_cw, revolves_acw, revolves_cw, event_seq]`	`[moves, next_state, in, next_area, next_event]`
`uncovers([],[],[],[])`	`[uncovers, unhides]`	`[invisible, between, state_seq, stationary]`
`covers([],[],[],[])`	`[covers, hides]`	`[between, invisible, state_seq, stationary]`
`cycle([],[],[],[])`	`[cycle]`	`[state_seq]`
`returns([],[],[])`	`[returns]`	`[rotates_acw, stationary, moves]`
`shining([])`	`[shining, observing]`	
`reappears([],[],[],[])`	`[reappears]`	`[uncovers, covers, cycle, returns]`
`appears([],[],[])`	`[appears]`	`[uncovers]`
`disappears([],[],[])`	`[disappears]`	`[covers]`
`day_night_cycle ([],[],[],[],[])`	`[day_night_cycle]`	`[shining, cycle, reappears]`
`day ([],[])`	`[day]`	`[shining, next_state, appears]`
`night([],[])`	`[night]`	`[shining, next_state, disappears]`

Tabelle 3.2: Spezifikation der Topologieknoten

```
in(O1,A1,O2,T) & next_area(A2,A3) & ne(O1,O2) & ne(A1,A2)
     → not(in(O1,A2,O2,T)).
```

Doch dieses Regel hat einen gravierenden Nachteil. Abhängig von der Anzahl der Regionen leitet sie für jedes positive in–Faktum eine ganze Reihe von not(in)–Fakten ab, die in keinem weiteren Inferenzprozeß benötigt werden, aber laufend auf Konsistenz mit der übrigen Faktenmenge des Prädikates in überprüft werden müssen. Die Konsistenzprüfung hat natürlich ihre Berechtigung, aber man erhält sie auch ohne die Ableitung vieler überflüssiger in–Fakten durch eine Bedingung:

```
in(O1,A1,O2,T) & in(O1,A2,O2,T) & ne(O1,O2) & ne(A1,A2) ⇝ .
```

Sie entspricht der Konsistenzprüfung der oben aufgeführten Regel für not(in), ohne allerdings ein einziges Faktum abzuleiten.

Für die Ableitung von not(between) könnte man einen autoepistemischen Operator einsetzen (siehe Abschnitt 1.2.2), wie in

```
in(O1,A1,O2,S) & opaque(O3) & unknown(in(O3,A1,O2,S))
     → not(between(O3,O1,O2,S)).
```

Abgesehen davon, daß der Einsatz von autoepistemischen Operatoren einen höheren Rechenaufwand mit sich bringt, führt er auch dazu, daß in der obigen Regel das Prädikat opaque unsinnigerweise eingesetzt werden muß, denn es hat keine Bedeutung für die Ableitung von not(between). Das Prädikat opaque dient nur dazu, die Variable O3 zu belegen, bevor der Operator unknown ausgewertet wird. Ersatzweise könnte man ein Prädikat wie object/1: <object> einführen, doch entsteht auf diese Weise Redundanz zu den Sorten. Das Prädikat next_area in der Regel für not(in) (siehe oben) hat die gleiche Funktion wie das Prädikat opaque in der Regel für not(between), es dient lediglich dazu, die Variable A2 zu belegen. Dies ist ein weiterer Grund für den Einsatz der obigen Bedingung für die Konsistenzüberprüfung der in–Fakten.

Für die Ableitung von not(between) ohne Rückgriff auf in–Fakten hat sich im übrigen eine andere Möglichkeit ergeben, die für diesen Sachbereich ausreichend ist (siehe Seite 56). Die not(between)–Fakten repräsentieren eine Relation zwischen drei Objekten und werden deshalb weitaus weniger zahlreich abgeleitet als not(in)–Fakten, die eine allgemeinere Relation zwischen nur zwei Objekten beschreiben. Die Ableitung von not(between)–Fakten kann nicht ersetzt werden durch eine Konsistenzüberprüfung mit Bedingungen, da diese Fakten einer zentralen Platz bei der Inferenz der Fakten mit dem Prädikat day_night_cycle einnehmen.

Der wichtigste Grund für die Verwendung von Bedingungen ist allerdings die Vermeidung von Zyklen in der Regelmenge. Prädikate, die zyklisch miteinander verknüpft sind, werden bei der Topologiebildung zu einem Knoten zusammengefaßt. Dies hat nicht nur Auswirkungen auf die graphische Veranschaulichung der Regelmenge, sondern führt auch zu längeren Rechenzeiten. Vermeidet man im Gegensatz dazu Zyklen, so kann die Rückwärtsinferenz des Systems abgeschaltet werden zugunsten einer weitläufigeren

Vorwärtsinferenz. Dies macht in vielen Fällen umständliche Anfragen an das System (*queries*) überflüssig, da alle relevanten Fakten automatisch abgeleitet werden.

Deshalb sind einige Beziehungen zwischen Prädikaten als Bedingungen repräsentiert. Dies insbesondere für die beiden Prädikate `on` und `solid`, die in keiner Regel vorkommen. So wird etwa durch die Bedingung mit dem Prädikat `on`

```
stationary(O1,T) & not(stationary(O2,T)) & on(O2,O1) ⤳ .

not(stationary(O1,T)) & stationary(O2,T) & on(O2,O1) ⤳ .
```

ausgedrückt, daß wenn ein Objekt *auf* einem anderen ist, dann kann nicht das eine beweglich und das andere unbeweglich sein. Die folgende Bedingung mit dem Prädikat `solid`

```
in(O1,A,O1,T) & in(O2,A,O1,T) & solid(O1) & ne(O2,O1) ⤳ .
```

repräsentiert, daß sich in einer Region, die von einem harten Objekt überdeckt wird, nicht noch ein anderes Objekt befinden kann.

Einige weitere Bedingungen betreffen die Beweglichkeit von Objekten

```
stationary(O,E) & next_state(E,S) & not(stationary(O,S)) ⤳ .

not(stationary(O,S)) & next_event(S,E) & stationary(O,E) ⤳ .

in(O,A,O,T) & not(stationary(O,T)) ⤳ .

not(in(O1,A,O2,S1)) & in(O1,A,O2,S2) & state_seq(S1,E,S2)
    & stationary(O1,E) & stationary(O2,E) ⤳ .
```

oder den Aufenthaltsort von Objekten im Zusammenspiel mit anderen Objekten

```
in(O1,A1,O2,T) & in(O3,A2,O2,T) & complementary(A1,A2)
    & in(O2,A3,O1,T) & in(O3,A4,O1,T) & complementary(A3,A4)
    & ne(O1,O2) & ne(O2,O3) ⤳ .
```

oder drücken einfach aus, daß es einen Tag, eine Nacht und einen Tag/-Nachtzyklus gibt:

```
observing(O) ⤳ (night(O,S)).

observing(O) ⤳ (day(O,S)).

observing(O) ⤳ (day_night_cycle(O,S1,E1,S2,E2)).
```

Ein Nachteil von Bedingungen ist jedoch, daß das System MOBAL nur einen eingeschränkten Zugriff auf sie hat. So gibt es z.B. keine übersichtliche, systemgenerierte Darstellung der Beziehungen zwischen Prädikaten durch Bedingungen, wie die Topologie sie für die Beziehungen durch Regeln bereitstellt. In Anhang A.2 findet sich zumindest eine übersichtliche Auflistung aller verwendeter Bedingungen.

3.2.4 Fakten

Nachdem nun die Begriffsintensionen durch Regeln und Bedingungen modelliert wurden, werden in diesem Abschnitt die Begriffsextensionen beschrieben, die durch Fakten repräsentiert werden. Als Fakten werden Instanzen derjenigen Prädikate in das System MOBAL eingegeben, deren Knoten in der Topologie Blätter des Baumes sind, also keine Vorgänger haben (siehe Abbildung 3.14 auf Seite 59). Mit einer Ausnahme, denn für das Prädikat `in` werden auch Fakten eingegeben, obwohl dessen Topologieknoten zwar weit unten in der Hierarchie steht, aber kein Blatt ist. Aus den eingegebenen Fakten werden, wenn möglich, mit Hilfe der Regeln Fakten für die andere Prädikate abgeleitet, so daß schließlich Fakten für `day`, `night` und `day_night_cycle` das Ergebnis der Vorwärtsinferenzen sind.

Im Gegensatz zu der Menge der Regeln und Bedingungen, die in allen Modellen für den Tag/Nachtzyklus die gleiche ist, sind die Faktenmengen in den Modellen paarweise verschieden. Dennoch gibt es eine Teilmenge von Fakten, die in allen Modellen unverändert vorkommt (siehe Tabelle 3.3). In ihr wird durch Fakten zu `next_area` eine Ordnung über die Regionen `up`, `down`, `left`, `right`, `front` und `back` „im Uhrzeigersinn" angegeben. Durch die `complementary`–Fakten werden bestimmte Regionenpaare als *entgegengesetzt* deklariert. Über die Sonne (`sun`) wird ausgesagt, daß sie leuchtet, und es gibt einen Beobachter `me`. Ähnlich wie für die Regionen wird für die Zeiten, d.h. für die Zustände `state0` und `state1` und für die Ereignisse `event0` und `event1`, eine Abfolge durch `next_event`– und `next_state`–Fakten festgelegt. Als letztes wird eine Ordnung über die Objekte `visual_range`, `sun`, `earth`, `cloud`, `hill` und `me` bezüglich ihrer Größe angegeben.

Zusätzlich zu diesen allgemeinen Fakten hat jedes Modell eine individuelle Faktenmenge. In Tabelle 3.4 ist z.B. die Faktenmenge für Modell 1 dargestellt (siehe auch graphische Darstellung von Modell 1 in Abbildung 3.1 auf Seite 44). Durch Fakten zu `infinite` werden Aussagen über die Unendlichkeit der Erde nach unten und zu den Seiten gemacht (vgl. Abschnitt 2.4.3). Durch die `on`–Fakten wird ausgedrückt, daß der Beobachter `me` *auf* der Erde `earth` ist, und diese ist wiederum *auf* der Erde, d.h. *auf* sich selbst (vgl. Seite 44). Die Objekte `me`, `earth`, `sun`, `hill`, `cloud` und `visual_range` werden als *undurchsichtig* beschrieben, und für alle außer den letzten beiden gilt auch, daß sie *hart* sind. Durch die `stationary`–Fakten wird angegeben, ob die Objekte `me`, `earth`, `sun` und `cloud` in den verschiedenen Zuständen und Ereignissen unbeweglich sind oder nicht. Und schließlich werden durch eine ganze Reihe von Fakten mit dem Prädikat `in` die räumlichen Beziehungen der Objekte zueinander dargestellt.

Im Gegensatz zum initialen Modell 1 hat das wissenschaftliche Modell 9 weniger Fakten (siehe Tabelle 3.4 und die graphische Darstellung von Modell 9 in Abbildung 3.9 auf Seite 46). Das liegt daran, daß im wissenschaftlichen Modell die Wolken (`cloud`) keine Rolle mehr für die Entstehung des Tag/Nachtzyklus spielen, sondern Tag und Nacht durch die Drehung der Erde um sich selbst zustandekommt (vgl. Abschnitt 3.1), und deshalb auch keine Fakten zu den Wolken benötigt werden. Man erkennt, daß in der Fak-

```
next_area(up,right).            next_event(state0,event0).
next_area(right,down).          next_state(event0,state1).
next_area(down,left).           next_event(state1,event1).
next_area(left,up).             next_state(event1,state0).
next_area(up,front).
next_area(front,down).          bigger(visual_range,sun).
next_area(down,back).           bigger(visual_range,earth).
next_area(back,up).             bigger(visual_range,cloud).
next_area(right,front).         bigger(visual_range,hill).
next_area(front,left).          bigger(visual_range,me).
next_area(left,back).           bigger(sun,earth).
next_area(back,right).          bigger(sun,cloud).
                                bigger(sun,hill).
complementary(up,down).         bigger(sun,me).
complementary(right,left).      bigger(earth,cloud).
complementary(down,up).         bigger(earth,hill).
complementary(left,right).      bigger(earth,me).
complementary(front,back).      bigger(cloud,hill).
complementary(back,front).      bigger(cloud,me).
                                bigger(hill,me).
shining(sun).
observing(me).
```

Tabelle 3.3: Fakten für alle Modelle

tenmenge für Modell 9 keine `infinite`–Fakten mehr vorhanden sind und daß die Erde nicht länger mehr *auf* der Erde ist (vgl. Abschnitt 2.4.3). In diesem Modell sind die Wolken nicht mehr *undurchsichtig*, repräsentiert durch `not(opaque(cloud))`, und auch die Aussagen über die Beweglichkeit von Objekten und ihre räumlichen Positionen haben sich verändert (`stationary`– und `in`–Fakten). Welche Bedeutung diese Unterschiede in den Faktenmengen für die Erklärung des Tag/Nachtzyklus haben, wird noch ausführlich in Kapitel 4 beschrieben.

Auch die Faktenmengen der anderen sieben Modelle (Abbildung 3.2 bis 3.8 auf den Seiten 44 bis 46) unterscheiden sich von denen der Modelle 1 und 9. Die initialen Modelle 2 bis 4 sind jedoch wie Modell 1 geprägt durch die Unendlichkeit der Erde. In den synthetischen Modelle 5 bis 8 wird die Erde dann aber als ein in alle Richtungen begrenzter Körper dargestellt, so daß verschiedene Bewegungen der Himmelsköper möglich werden. Die Faktenmengen aller Modelle sind in Anhang A.3 aufgeführt.

3.3 Alternative Modellierungen

Wie immer, wenn ein Sachbereich erst einmal strukturiert ist, fällt es nicht leicht, den Zustand der Konfusion wiederaufleben zu lassen. Bei der Modellierung sind all die Fälle der anfänglich ungünstigen Repräsentation aufgetreten, wie sie in [Morik, 1989] beschrieben werden: es gab Regeln mit ungebundenen Variablen, nicht vorhandene, aber benötigte Argumentstel-

```
infinite(earth,down).
infinite(earth,left).
infinite(earth,right).

on(me,earth).
on(earth,earth).

opaque(me).
opaque(earth).
opaque(sun).
opaque(hill).
opaque(cloud).
opaque(visual_range).

solid(me).
solid(earth).
solid(sun).
solid(hill).
not(solid(cloud)).
not(solid(visual_range)).

stationary(me,state0).
stationary(me,event0).
stationary(me,state1).
stationary(me,event1).
stationary(earth,state0).
stationary(earth,event0).
stationary(earth,state1).
stationary(earth,event1).
stationary(sun,state0).
not(stationary(sun,event0)).
stationary(sun,state1).
not(stationary(sun,event1)).
stationary(cloud,state0).
not(stationary(cloud,event0)).
stationary(cloud,state1).
not(stationary(cloud,event1)).

in(me,up,earth,state0).
in(me,up,earth,event0).
in(me,up,earth,state1).
in(me,up,earth,event1).
in(earth,down,me,state0).
in(earth,down,me,event0).
in(earth,down,me,state1).
in(earth,down,me,event1).

in(sun,up,me,state0).
in(sun,up,me,event0).
in(sun,up,me,state1).
in(sun,up,me,event1).
in(me,down,sun,state0).
in(me,down,sun,event0).
in(me,down,sun,state1).
in(me,down,sun,event1).

in(sun,up,earth,state0).
in(sun,up,earth,event0).
in(sun,up,earth,state1).
in(sun,up,earth,event1).
in(earth,down,sun,state0).
in(earth,down,sun,event0).
in(earth,down,sun,state1).
in(earth,down,sun,event1).

in(cloud,up,me,state0).
in(cloud,up,me,event0).
in(cloud,up,me,state1).
in(cloud,up,me,event1).
in(me,left,cloud,state0).
in(me,left,cloud,event0).
in(me,down,cloud,state1).
in(me,down,cloud,event1).

in(cloud,up,earth,state0).
in(cloud,up,earth,event0).
in(cloud,up,earth,state1).
in(cloud,up,earth,event1).
in(earth,down,cloud,state0).
in(earth,down,cloud,event0).
in(earth,down,cloud,state1).
in(earth,down,cloud,event1).

in(cloud,down,sun,state0).
in(cloud,down,sun,event0).
in(cloud,down,sun,state1).
in(cloud,down,sun,event1).
in(sun,left,cloud,state0).
in(sun,left,cloud,event0).
in(sun,up,cloud,state1).
in(sun,up,cloud,event1).
```

Tabelle 3.4: Fakten für Modell 1 (*Wolken verdecken die Sonne.*)

```
on(me,earth).

opaque(me).
opaque(earth).
opaque(sun).
opaque(hill).
not(opaque(cloud)).
opaque(visual_range).

solid(me).
solid(earth).
solid(sun).
solid(hill).
not(solid(cloud)).
not(solid(visual_range)).

not(stationary(me,state0)).
not(stationary(me,event0)).
not(stationary(me,state1)).
not(stationary(me,event1)).
stationary(sun,state0).
stationary(sun,event0).
stationary(sun,state1).
stationary(sun,event1).
not(stationary(earth,state0)).
not(stationary(earth,event0)).
not(stationary(earth,state1)).
not(stationary(earth,event1)).

in(me,up,earth,state0).
in(me,up,earth,event0).
in(me,up,earth,state1).
in(me,up,earth,event1).
in(earth,down,me,state0).
in(earth,down,me,event0).
in(earth,down,me,state1).
in(earth,down,me,event1).

in(sun,up,me,state0).
in(sun,right,me,event0).
in(sun,down,me,state1).
in(sun,left,me,event1).
in(me,down,sun,state0).
in(me,down,sun,event0).
in(me,down,sun,state1).
in(me,down,sun,event1).

in(sun,up,earth,state0).
in(sun,right,earth,event0).
in(sun,down,earth,state1).
in(sun,left,earth,event1).
in(earth,down,sun,state0).
in(earth,down,sun,event0).
in(earth,down,sun,state1).
in(earth,down,sun,event1).
```

Tabelle 3.5: Fakten für Modell 9 (*Die Erde dreht sich um sich selbst.*)

len in Prädikaten, interessante Aspekte repräsentiert als Konstante und fehlende Prädikate. In vielen großen und kleinen Modellierungszyklen wurde mit Hilfe der graphischer Veranschaulichungen und mit Unterstützung des Systems die Repräsentation der kindlichen Erklärungen, soweit möglich, verbessert.

In den folgenden drei Abschnitten werden einige Aspekte der Modellierung III verglichen mit vorhergehenden, alternativen Repräsentationen. In Abschnitt 3.3.1 werden Überlegungen zur Repräsentation von Raum in den Modellen angestellt, und in den Abschnitten 3.3.2 und 3.3.3 werden einige wichtige Punkte der Vorgängermodellierungen Modellierung I bzw. Modellierung II dargestellt.

3.3.1 Räumliche Repräsentation

Am Anfang der Modellierungsarbeit hat es viele Versuche zur Darstellung des räumlichen Schließens gegeben, denn die Konsequenzen, die sich aus bestimmten Konstellationen der Himmelskörper ergeben, spielen eine zentrale Rolle in den Modellen für den Tag/Nachtzyklus. Diese Grundkonstellationen werden repräsentiert durch Fakten mit dem Prädikat `in/4`, wie z.B.

```
in(me,up,earth,state1).

in(sun,down,earth,state1).
```

Ein Vorläufer des vierstelligen Prädikats

```
in/4:  <object>,<area>,<object>,<time>.
```

waren die dreistelligen Prädikate

```
up/3:  <object>,<object>,<time>.

down/3:  <object>,<object>,<time>.

left/3:  <object>,<object>,<time>.

right/3:  <object>,<object>,<time>.

front/3:  <object>,<object>,<time>.

back/3:  <object>,<object>,<time>.
```

Bei diesen Prädikaten fehlt die Argumentstelle für die Region (`<area>`), und die Richtung, in der sich ein anderes Objekt befindet, wird durch die Prädikatsnamen `up`, `down`, `left`, `right`, `front` und `back` ausgedrückt.

Diese Darstellung mag auf den ersten Blick leichter verständlich sein, doch hat sie einen schwerwiegenden Nachteil; denn statt einer einzigen Regel für z.B. *dazwischen* (vgl. Seite 56):

```
in(O1,A1,O2,S) & in(O3,A2,O2,S) & complementary(A1,A2)
    & ne(O1,O2) & ne(O3,O2) → between(O2,O1,O3,S).
```

benötigt man deren sechs:[3]

```
up(O1,O2,S) & down(O3,O2,S) & ne(O1,O2) & ne(O3,O2)
    → between(O2,O1,O3,S).

down(O1,O2,S) & up(O3,O2,S) & ne(O1,O2) & ne(O3,O2)
    → between(O2,O1,O3,S).

left(O1,O2,S) & right(O3,O2,S) & ne(O1,O2) & ne(O3,O2)
    → between(O2,O1,O3,S).

right(O1,O2,S) & left(O3,O2,S) & ne(O1,O2) & ne(O3,O2)
    → between(O2,O1,O3,S).

front(O1,O2,S) & back(O3,O2,S) & ne(O1,O2) & ne(O3,O2)
    → between(O2,O1,O3,S).

back(O1,O2,S) & front(O3,O2,S) & ne(O1,O2) & ne(O3,O2)
    → between(O2,O1,O3,S).
```

Und dies gilt nicht nur für die `between`–Regel, sondern auch für die `not(between)`–Regel

```
in(O1,A1,O2,S) & in(O3,A2,O2,S) & complementary(A1,A3)
    & ne(O1,O3) & ne(A2,A3) → not(between(O2,O1,O3,S)).
```

für die bei der Verwendung der Prädikate `up`, `down`, `left`, `right`, `front` und `back` allein 24 neue Regeln benötigt werden; und dies gilt weiterhin auch für diverse andere Regeln, in denen das Prädikat `in` vorkommt (siehe Seite 57), wie z.B.

```
moves(O1,O2,E) & next_state(E,S2) & in(O1,A1,O2,E)
    & in(O1,A2,O2,S2) & next_area(A1,A2) → revolves_cw(O1,O2,E).

moves(O1,O2,E) & next_state(E,S2) & in(O1,A1,O2,E)
    & in(O1,A2,O2,S2) & next_area(A2,A1) → revolves_acw(O1,O2,E).

moves(O1,O2,E) & next_state(E,S2) & in(O2,A1,O1,E)
    & in(O2,A2,O1,S2) & next_area(A2,A1) → rotates_cw(O1,O2,E).
```

Darüberhinaus müssen alle Regeln, die die Prädikate `up`, `down`, `left`, `right`, `front` und `back` enthalten, bei jeder Verfeinerung oder Vergröberung der räumlichen Darstellung überprüft und eventuell geändert werden. Bei den `in`–Regeln reicht es in solchen Fällen, lediglich einige bereits vorhandene `complementary`–Fakten zu löschen oder Fakten über zusätzliche Regionen wie `up_left`, `down_right`, `down_left` oder `up_right` hinzuzufügen

```
complementary(up_left,down_right).

complementary(down_left,up_right).
```

[3]Die Literale `ne(O1,O2)` und `ne(O3,O2)` in den Regeln für `between` werden übrigens benötigt, um zu verhindern, daß Fakten wie `between(earth,earth,earth,state1).` abgeleitet werden, denn in den Modellen 1 bis 4 gilt wegen der Unendlichkeit der Erde zu den Seiten `in(earth,left,earth,state0).` und `in(earth,right,earth,state0).` bzw. `left(earth,earth,state0).` und `right(earth,earth,state0).`

Gleichzeitig erhält man durch die `complementary`–Fakten eine explizite Darstellung aller *gegenüber*–Beziehungen zwischen den Regionen (siehe Tabelle 3.3).

Das `in`–Prädikat drückt also eine Relation zwischen vier voneinander unabhängigen Argumenten aus. Dies ist ein klassischer Fall für die Notwendigkeit der Verwendung eines Repräsentationsformalismus mit relationaler statt nur aussagenlogischer Ausdrucksfähigkeit, wie er in MOBAL vorhanden ist (siehe Abschnitt 1.2.2). Die Repräsentation des räumlichen Schließens wird wegen ihrer zentralen Rolle in diesem Sachbereich noch einmal Thema im Kapitel 5 sein.

3.3.2 Modellierung I

Die Modellierung I stellt einen ersten wichtigen Punkt in den Bemühungen dar, die kindlichen Erklärungen formal darzustellen [Mühlenbrock, 1994b]. In diesem Abschnitt sollen zwei wesentliche Unterschiede zu Modellierung III angesprochen werden.

Einer der Unterschiede zu Modellierung III ist, daß es in Modellierung I Prädikate gibt, die gleichzeitig die Bewegungsarten und die Verdeckungsmechanismen der Objekte modellieren. In Modellierung III werden durch die dreistelligen Prädikate `moves`, `revolves_cw`, `revolves_acw`, `rotates_cw` und `rotates_acw` die verschiedenen Bewegungen beschrieben, die zwei Objekte relativ zueinander vollführen können. Zusätzlich gibt es die vierstelligen Prädikate `covers`, `uncovers`, `hides` und `unhides`. Durch sie werden bestimmte Konstellationen von drei Objekten beschrieben, in der ein Objekt für ein anderes Objekt durch Mitwirkung eines dritten Objektes verschwindet oder erscheint.

Ganz anders die entsprechenden Prädikate in Modellierung I, die in Tabelle 3.6 dargestellt sind.[4] Sie repräsentieren Bewegungsarten und Verdeckungsmechanismen in einem. So z.B. kann in Modellierung I niemals gleichzeitig gelten:

```
covers_for(earth,sun,me,event0).

rotate_apart(earth,me,sun,event0).
```

Im Gegensatz dazu sind in Modellierung III Bewegungsarten und Verdeckungsmechanismen getrennt, so daß durchaus gleichzeitig

```
covers(earth,sun,me,event0).

rotates(earth,sun,event0).
```

gelten kann (z.B. in Modell 9 *Die Erde dreht sich um sich selbst.*).

Die Trennung von Bewegungsarten und Verdeckungsmechanismen wird auch an der Topologie sehr deutlich. Während in Modellierung I die Prädikate `arrives_for`, `departs_for`, `emerges_for`, `submerges_for`, `covers_for`,

[4] Der feine Unterschied zwischen `revolve_apart_for` und `revolves_apart_for` bzw. `revolve_toward_for` und `revolves_toward_for` ist, daß bei den Prädikaten ohne „s“ sich jeweils zwei Objekte um ein drittes drehen und daß bei den Prädikaten mit „s“ sich immer ein Objekte um zwei andere dreht.

Modellierung III	Modellierung I
moves/3	arrives_for/4
revolves_cw/3	departs_for/4
revolves_acw/3	emerges_for/4
rotates_cw/3	submerges_for/4
rotates_acw/3	covers_for/4
	uncovers_for/4
covers/4	revolve_apart_for/4
uncovers/4	revolve_toward_for/4
hides/4	revolves_apart_for/4
unhides/4	revolves_toward_for/4
	rotate_apart_for/4
	rotate_toward_for/4

Tabelle 3.6: Unterschiede zwischen Modellierung III und Modellierung I

uncovers_for, revolve_apart_for, revolve_toward_for, revolves_apart_for, revolves_toward_for, rotate_apart_for und rotate_toward_for unter einem einzigen Topologieknoten covers_for zusammengefaßt sind (siehe Abbildung 3.15), sind die Knoten der Prädikate der Bewegungsarten, bezeichnet mit rotates_acw([],[],[]), und der Verdeckungsmechanismen, bezeichnet mit uncovers([],[],[],[]) und covers([],[],[],[]), voneinander getrennt (siehe Abbildung 3.14 auf Seite 59).

Der Vorteil der Trennung liegt darin, daß die Gemeinsamkeiten der Modelle sehr viel deutlicher werden. So ist z.B. das Prädikat covers_for in Modellierung I so sehr auf das Modell 1 *Wolken verdecken die Sonne.* spezialisiert, daß das Faktum

```
covers_for(earth,sun,me,event0).
```

überhaupt nur abgeleitet werden kann, wenn sich der Beobachter me nicht auf der Erde befindet, was tatsächlich in keinem der neun Modelle vorkommt. Jedes der Prädikate ist also immer nur in genau einem Modell gültig, es steht gleichsam für genau ein Modell. Doch es ist nicht einzusehen, warum nicht auch in einem der anderen Modelle, wie z.B. Modell 9 (siehe oben),

```
covers_for(earth,sun,me,event0).
```

gültig sein kann, obwohl der Beobachter auf der Erde ist. Deshalb wurde das etwas allgemeinere covers eingeführt. Der Nachteil der Trennung ist, daß einer Faktenmenge nicht mehr so leicht anzusehen ist, welches Modell sie repräsentiert. Auf dieses Problem wird noch näher in Abschnitt 4.2.2 eingegangen.

Ein zweiter wichtiger Unterschied zwischen Modellierung III und Modellierung I besteht darin, daß es in Modellierung I Prädikate gab zur Darstellung von Positionsveränderungen eines Objektes bezüglich der Regionen eines anderen Objektes, nämlich gets_in und stays_in:[5]

[5]Die Kleinbuchstaben an Argumentpositionen stellen in dieser älteren MOBAL-Version

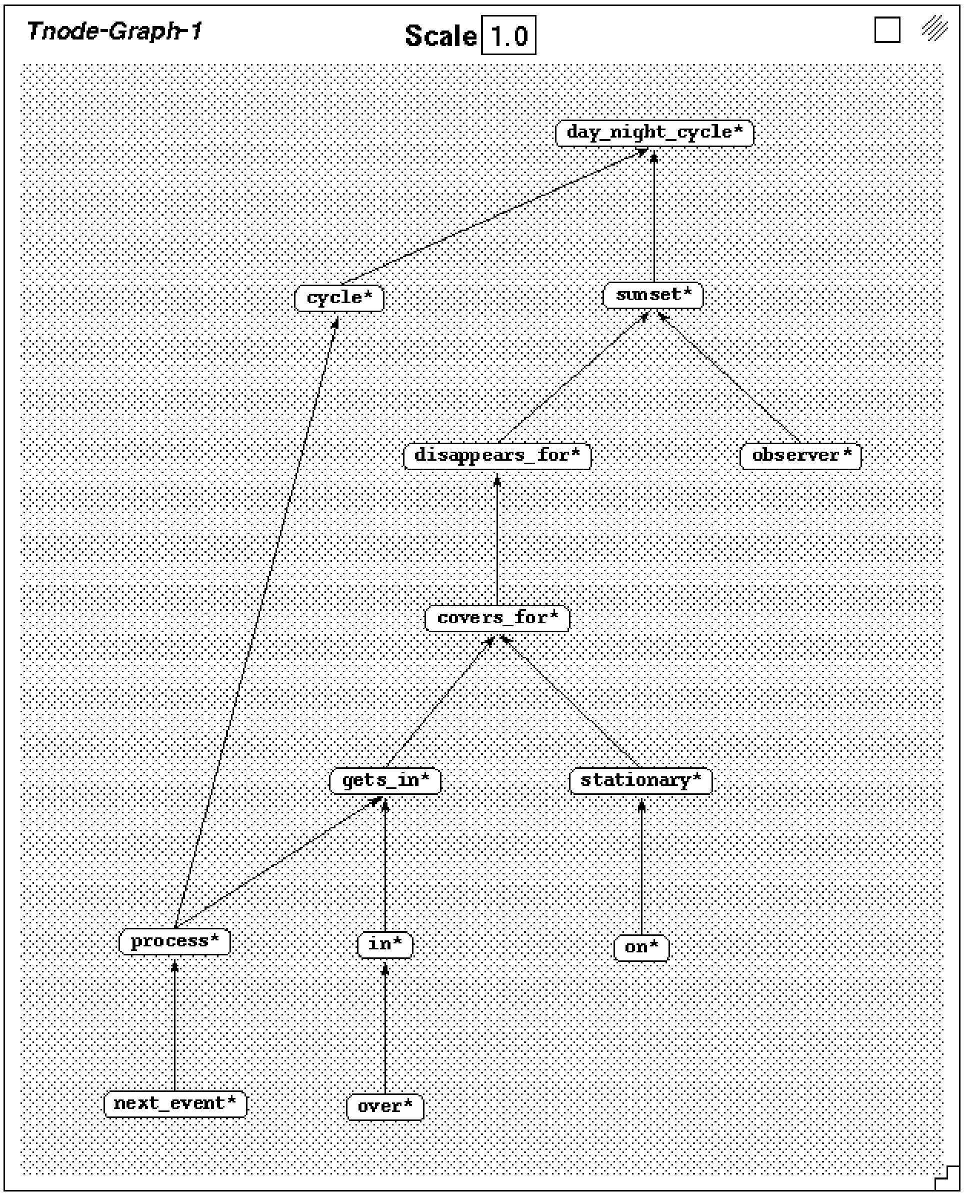


Abbildung 3.15: Topologie in Modellierung I [Mühlenbrock, 1994b, S. 11]

```
not(in(o,a,p,s1)) & in(o,a,p,s2) & process(s1,e,s2)
    → gets_in(o,a,p,e).

in(o,a,p,s1) & in(o,a,p,s2) & process(s1,e,s2)
    → stays_in(o,a,p,e).

not(in(o,a,p,s1)) & not(in(o,a,p,s2)) & process(s1,e,s2)
    → not(gets_in(o,a,p,e)).

in(o,a,p,s1) & not(in(o,a,p,s2)) & process(s1,e,s2)
    → not(stays_in(o,a,p,e)).
```

Obwohl diese Regeln und Prädikate gut geeignet waren, andere Prädikate, wie die in Abbildung 3.15, zu definieren, hatten sie den Nachteil, negierte `in`–Fakten in den Prämissen zu benötigen (vgl. Abschnitt 3.2.3) und gelegentlich kontraintuitive Fakten zu inferieren. So leiteten sie z.B.

```
gets_in(sun,down,earth,event0).
```

ab, obwohl galt

```
stationary(sun).
```

denn wie man sieht, machen die oben dargestellten Regeln für `gets_in` und `stays_in` keine Referenz auf die Beweglichkeit von Objekten. Diese kam erst mit der Ableitung von z.B. `covers_for` oder `revolves_apart_for` ins Spiel (siehe auch Abbildung 3.15):

```
stays_in(o1,a2,o2,e) & stays_in(o2,a1,o1,e) & gets_in(o3,a2,o2,e)
    & gets_in(o3,a1,o1,e) & stationary(o1,e) & stationary(o2,e)
    → covers_for(o3,o2,o1,e).

stays_in(o1,a1,o2,e) & not(stays_in(o3,a1,o1,e))
    & not(stays_in(o3,a1,o2,e)) & gets_in(o3,a2,o1,e)
    & gets_in(o3,a2,o2,e) & stationary(o2,e)
    & not(stationary(o3,e))
    → revolves_apart_for(o3,o2,o1,e).
```

Aus diesen beiden Gründen wurden die Prädikate `gets_in` und `stays_in` in den darauffolgenden Modellierungen nicht mehr verwendet. Allerdings haben in Modellierung III zwei Regeln Eingang gefunden, die eine günstige Kombination aus den vier `gets_in`– und `stays_in`–Regeln und dem Prädikat `stationary` darstellen (vgl. Seite 57):

```
in(O1,A1,O2,S1) & in(O1,A2,O2,S2) & state_seq(S1,E,S2)
    & ne(A1,A2) & not(stationary(O1,E)) → moves(O1,O2,E).

in(O1,A1,O2,S1) & in(O1,A2,O2,S2) & state_seq(S1,E,S2)
    & ne(A1,A2) & not(stationary(O2,E)) → moves(O2,O1,E).
```

Mit Hilfe von `moves` werden dann Regeln für andere Prädikate, wie z.B. `revolves_acw`, definiert:

keine Konstanten, sondern Variablen dar, und das Prädikat `process` wurde später umbenannt in `event_seq`.

Modellierung III	Modellierung II
`infinite(earth,down).`	`in(earth,left,earth,state0).`
`infinite(earth,left).`	`in(earth,left,earth,event0).`
`infinite(earth,right).`	`in(earth,left,earth,state1).`
	`in(earth,left,earth,event1).`
	`in(earth,down,earth,state0).`
	`in(earth,down,earth,event0).`
	`in(earth,down,earth,state1).`
	`in(earth,down,earth,event1).`
	`in(earth,right,earth,state0).`
	`in(earth,right,earth,event0).`
	`in(earth,right,earth,state1).`
	`in(earth,right,earth,event1).`

Tabelle 3.7: Unterschiede zwischen Modellierung III und Modellierung II

```
moves(O1,O2,E) & next_state(E,S2) & in(O1,A1,O2,E)
    & in(O1,A2,O2,S2) & next_area(A2,A1) → revolves_acw(O1,O2,E).
```

Es fällt auf, daß diese Regel für `revolves_acw` kürzer ist als die ursprüngliche Regel für `revolves_apart_for`, denn sie hat nur fünf statt sieben Prämissen. Das liegt zum einen daran, daß der Aspekt der Beweglichkeit (`stationary`) in Modellierung III schon in die Regeln für `moves` eingeht, zum anderen daran, daß `revolves_apart_for/4` im Gegensatz zu `revolves_acw/3` die Bewegungen von *drei* Objekten berücksichtigt.

3.3.3 Modellierung II

Mit Modellierung II wurde ein nächster wichtiger Schritt gemacht, bei dem die Erkenntnisse, die sich bei der Erstellung und Anwendung von Modellierung I ergeben haben, ausgewertet und zusammengefaßt wurden [Mühlenbrock, 1994a]. Modellierung II stimmt schon in vielen Punkten mit Modellierung III überein, doch ein wesentlicher Unterschied soll in diesem Abschnitt untersucht werden.

In Modellierung II stehen die Fakten, die darstellen sollen, daß sich die Erde in den Modellen 1 bis 4 nach unten und zu den Seiten unendlich ausdehnt, noch unverbunden nebeneinander (siehe Tabelle 3.7). Doch es ist offensichtlich, daß zwischen diesen Fakten eine starke Verbindung besteht. Es gibt nun verschiedene Möglichkeiten, diese Beziehungen zwischen den `in`–Fakten zu repräsentieren. So kann man z.B. durch eine Bedingung ausdrücken, daß ein Objekt sich entweder zu jeder Zeit oder gar nicht unendlich ausdehnt:

```
in(O,A,O,T1) & not(in(O,A,O,T2)) ⇝ .
```

Oder man beschreibt das gleiche durch vier Regeln, wobei auf die Problematik der negierten `in`–Fakten schon in Abschnitt 3.2.3 hingewiesen wurde:

```
in(O,A,O,S) & next_event(S,E) →  in(O,A,O,E).

in(O,A,O,E) & next_state(E,S) →  in(O,A,O,S).

not(in(O,A,O,S)) & next_event(S,E) →  not(in(O,A,O,E)).

not(in(O,A,O,E)) & next_state(E,S) →  not(in(O,A,O,S)).
```

Diese Regeln haben im Gegensatz zu der Bedingung oben den Vorteil, daß sie auch Fakten ableiten können.

Eine Alternative, Beziehungen zwischen den `in`–Fakten ohne die Verwendung von `not(in)` herzustellen, ist die folgende Bedingung in Verbindung mit dem Prädikat `stationary`, die beschreibt, daß sich ein bewegliches Objekt nicht unendlich ausdehnen kann:

```
in(O,A,O,T) & not(stationary(O,T)) ⇝ .
```

Oder man drückt in Verbindung mit dem Prädikat `on` aus, daß ein Objekt entweder *auf* sich selbst ist oder sich nicht unendlich ausdehnt:

```
not(on(O,O) & in(O,A,O,T) ⇝ .
```

In Modellierung III wurde eine weitere Möglichkeit angewendet, nämlich die Einführung eines neuen Prädikates, das explizit die Unendlichkeit eines Objektes darstellen kann. Dieses Prädikat `infinite/2` wird durch zwei Regeln in Verbindung mit dem Prädikat `in` gebracht (vgl. Seite 55):

```
infinite(O,A) & next_event(S,E) → in(O,A,O,E).

infinite(O,A) & next_event(S,E) → in(O,A,O,S).
```

Zusammen mit den drei neuen Fakten für `infinite` in Modellierung III leiten diese beiden Regeln alle `in`–Fakten ab, die die unendliche Ausdehnung der Erde betreffen (siehe Tabelle 3.7). Deshalb ist in der Topologie von Modellierung III (Abbildung 3.14 auf Seite 59) der Topologieknoten `in([],[],[],[])`, im Gegensatz zum `in`–Knoten in der Topologie von Modellierung II (Abbildung 3.16), nicht mehr länger ein Blatt des Baumes, sondern hat den Knoten `infinite([],[])` als Sohn.

3.4 Diskussion

In diesem Kapitel wurde beschrieben, wie die Erklärungen der Kinder graphisch und prädikatenlogisch formalisiert wurden. Dabei sind neun operationale Modelle für den Tag/Nachtzyklus entstanden. Doch wie eingeschränkt ist die Repräsentationssprache? Wie fixiert ist sie auf die Ableitung eines Tag/Nachtzyklus, der durch ganz bestimmte Fakten repräsentiert wird? Kann z.B. die prädikatenlogische Repräsentation so erweitert werden, daß sie darstellt, daß auf der anderen Seite der Erde Nacht ist, wenn auf dieser Seite der Erde Tag ist?

In Abbildung 3.17 ist eine graphische Repräsentation von *Tag hier und Nacht auf der anderen Seite der Erde.* zu sehen. Die Fakten in Tabelle 3.8

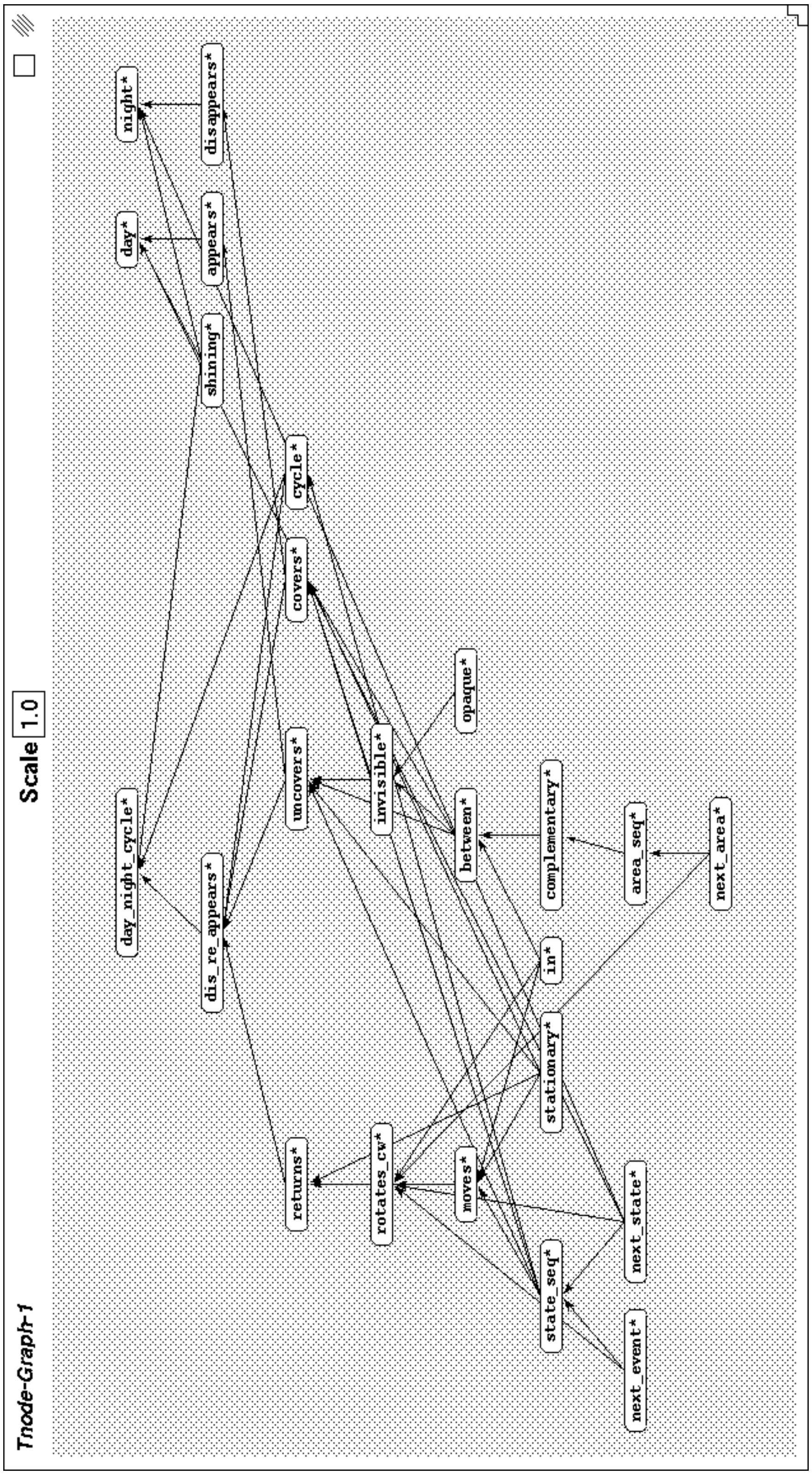


Abbildung 3.16: Topologie in Modellierung II [Mühlenbrock, 1994a, S. 6]

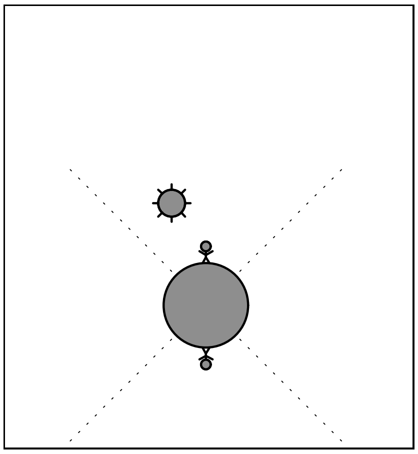


Abbildung 3.17: *Tag hier und Nacht auf der anderen Seite der Erde.*

reichen aus, um zusätzlich zum Beobachter `me` einen weiteren Beobachter `him` auf der anderen Seite der Erde zu repräsentieren. Diese Fakten können jedem der neun Modelle hinzugefügt werden. Die initialen Modelle 1 bis 4 reagieren darauf mit der Anzeige eines Widerspruchs. Die synthetischen Modelle 5 bis 8 und das wissenschaftliche Modell 9 aber leiten für den Beobachter `him` einen Tag/Nachtzyklus ab, der genau entgegengesetzt zu dem des Beobachters `me` läuft, wie in Abschnitt 4.3 noch gezeigt werden wird.

Doch die Repräsentationssprache ist so gewählt, daß nicht nur verschiedene Erklärungen für den Tag/Nachtzyklus dargestellt werden können, sondern auch Mechanismen für das Verschwinden und Erscheinen von Objekten in ganz alltäglichen Situationen (vgl. Abschnitt 2.4.5). So kann z.B. durch

```
covers(hand,picture,tom,afternoon).
```

ausgedrückt werden, daß Tom am nachmittag ein Bild mit der Hand verdeckt oder durch

```
hides(tim,wall,pam,1215).
```

daß Tim sich um 12^{15} Uhr hinter einer Mauer vor Pam versteckt oder durch

```
rotates_cw(merry_go_round,child,event13).
```

daß sich ein Karussel um sich selbst im Uhrzeigersinn für ein Kind beim Ereignis 13 dreht.

```
on(him,earth).

opaque(him).

solid(him).

not(stationary(him,state0)).
not(stationary(him,event0)).
not(stationary(him,state1)).
not(stationary(him,event1)).

observing(him).

bigger(visual_range,him).
bigger(sun,him).
bigger(earth,him).
bigger(cloud,him).
bigger(hill,him).
```

```
in(him,down,earth,state0).
in(him,down,earth,event0).
in(him,down,earth,state1).
in(him,down,earth,event1).
in(earth,up,him,state0).
in(earth,up,him,event0).
in(earth,up,him,state1).
in(earth,up,him,event1).

in(sun,down,him,state0).
in(sun,left,him,event0).
in(sun,up,him,state1).
in(sun,right,him,event1).
in(him,down,sun,state0).
in(him,down,sun,event0).
in(him,down,sun,state1).
in(him,down,sun,event1).
```

Tabelle 3.8: Fakten für *Tag hier und Nacht auf der anderen Seite der Erde.*

Kapitel 4

Experimente mit den Modellen

Es ist offensichtlich nicht leicht, die wissenschaftliche Erklärung für den Tag/Nachtzyklus zu lernen. Sonst gäbe es nicht die synthetischen Erklärungen für den Tag/Nachtzyklus. Läßt sich denn ein Maß für die Schwierigkeit angeben, eine bestimmte Erklärung zu erlernen? Und von welchen Faktoren hängt dieses Maß ab? Ein Bild zur Verdeutlichung: Wer einen See durchschwimmen will, macht gerne auf einer Insel Pause, besonders wenn die Seeufer weit auseinanderliegen. Für den sicheren Halt zwischendurch ist auch ein kleiner Umweg akzeptabel. Wieviele Schwimmzüge man schließlich bis zum Ziel braucht, hängt vom Startplatz, von der Strömung, von der eigenen Fitness und von anderen Dingen ab.

Die Modellierung der kindlichen Erklärungen ist ein erster Schritt auf dem Weg zur Bestimmung einer *Distanz* zwischen verschiedenen Erklärungen. Die operationalen Modelle können auf die gleichen Fragen, die den Kindern gestellt wurden, antworten. Natürlich in ihrer eigenen, der formalen Sprache. Und die Antworten, die sie geben, sind denen der Kinder vergleichbar. Damit bilden die initialen Modelle so etwas wie das diesseitige Seeufer, das wissenschaftliche Modell stellt das jenseitige Ufer dar und die synthetischen Modelle repräsentieren Inseln in einem See aus widersprüchlichen oder unvollständigen Fakten- und Regelmengen.

Der nächste Schritt besteht darin, die initialen und synthetischen Modelle mit wissenschaftlichen Fakten zu konfrontieren, ähnlich wie Kinder in der Schule, durch Eltern oder durch die Medien neue Informationen bekommen, die ihren eigenen Erklärungen widersprechen. Dabei könnte die Menge der wissenschaftlichen Fakten, die mindestens nötig ist, ein anderes Modell zu erreichen, ein Indikator für die *Schwierigkeit* eines Lernvorganges sein, ähnlich der Anzahl der Schwimmzüge bei der Seedurchquerung. Es lassen sich auch Vermutungen darüber anstellen, ob die Eingabe bestimmter Informationen kritisch ist für eine bestimmte Reihenfolge von Modellen.

Abschnitt 4.1 Fragen Die Fragen, die den Kindern Über ihre Vorstellungen zum Tag/Nachtzyklus gestellt wurden, werden nun den operationalen Modellen gestellt und die Antworten ausgewertet.

Abschnitt 4.2 Neue Informationen Die operationalen Modelle werden mit neuen wissenschaftlichen Informationen konfrontiert und die Reaktionen untersucht.

Abschnitt 4.3 Diskussion Es werden verschiedene Maße für den Übergang von einem Modell zu einem anderen Modell vorgeschlagen

4.1 Fragen

In der Studie wurden den 60 Kindern 13 verschiedene Fragen nach ihren Vorstellungen zum Tag/Nachtzyklus gestellt. In Kapitel 2 wurden einige Beispielantworten und -zeichnungen der Kinder präsentiert und eine Abstraktion aller Antworten, die Erklärungen, ausführlich vorgestellt. Diese Erklärungen wurden auf einem Rechner formal repräsentiert. In Kapitel 3 wurde die Struktur dieser operationalen Modelle dargelegt.

Die ersten vier der 13 Fragen beschäftigen sich mit dem Verschwinden der Sonne in der Nacht, die Fragen 5 und 6 untersuchen direkt die Erklärungen für den Tag/Nachtzyklus, und in den Fragen 7 bis 10 und 11 bis 13 geht es um die Bewegung des Mondes bzw. um das Verschwinden der Sterne am Tag (Abschnitt 2.3.1). Da die Sterne und der Mond keine große Rolle bei den Erklärungen für den Tag/Nachtzyklus spielten, wurden sie in den formalen Modellen nicht repräsentiert (siehe Abschnitt 3.1). Also bleiben die Fragen 1 bis 6 übrig, welche lauten

Frage 1 „Wo ist die Sonne nachts?“

Frage 2 „Wie passiert das?“

Frage 3 „Bewegt sich die Erde?“

Frage 4 „Bewegt sich die Sonne?“

Frage 5 „Jetzt mache es so, daß es Tag für die Person ist. Gut! Jetzt mache es so, daß es Nacht für die Person ist.“

Frage 6 „Sag’ mir noch einmal wie das passiert.“

Diese Fragen sollen nun auch den operationalen Modellen gestellt werden. Die Fragen 1, 3 und 4 beschäftigen sich mit dem Faktenwissen der Kinder (Abschnitt 2.3.1). Die Fragen können als Anfrage (*queries*) den operationalen Modellen gestellt werden, und diese antworten auch mit Fakten, wie in Abschnitt 4.1.1 beschrieben wird. Die Fragen 2, 5 und 6 sind generative Fragen, die die Kinder dazu veranlassen sollten, Phänomene zu erklären (Abschnitt 2.3.1). Die operationalen Modelle können Phänomene durch die Ableitung der entsprechenden Fakten erklären. Diese Ableitungsbäume werden in Abschnitt 4.1.2 untersucht.

4.1.1 Fakten

Die Fragen 1, 3 und 4 müssen zunächst einmal in die formale Sprache, wie sie in Kapitel 3 entwickelt wurde, übersetzt werden, bevor sie den operationalen Modellen gestellt werden können. Die Frage 1 („Wo ist die Sonne nachts?") wird übersetzt in

```
in(sun,X,Y,Z) & night(me,Z)
```

und kann nun als Anfrage (*query*) an die Modelle gerichtet werden. Die Buchstaben `X`, `Y` und `Z` stehen für Variablen, so daß `in(sun,X,Y,Z)` nach allen Positionen der Sonne (`X`) relativ zu anderen Objekten (`Y`) in einer Zeit (`Z`) fragt, für die auch `night(me,Z)` gilt.

Die Antworten der neun Modelle sind in Tabelle 4.1 aufgeführt, wobei das Faktum `night(me,state1).` bei jeder Antwort weggelassen wurde. Modell 1 (*Wolken verdecken die Sonne.*) antwortet, daß die Sonne am Tag oberhalb der Wolken (`cloud`), der Erde (`earth`) und des Beobachters (`me`) ist. In Modell 3 (*Die Sonne geht hinter Hügel.*) ist die Sonne tagüber auch oberhalb der Erde, jedoch ist sie rechts vom Beobachter und auch rechts der Hügel (`hill`). Eine weitere Anfrage an dieses Modell zeigt, daß die Hügel auch rechts vom Beobachter sind,

```
in(hill,right,me,state1).
```

so daß sie sich zwischen der Sonne und dem Beobachter befinden

```
between(hill,sun,me,state1).
```

Modell 4 (*Die Sonne geht weit weg.*) sagt, daß die Sonne oberhalb der Erde und des Beobachters und oberhalb des Sichtbarkeitsbereiches (`visual_range`) ist. Damit wird ausgedrückt, daß die Sonne *ganz weit weg* ist, und zwar so weit weg, daß sie nicht mehr gesehen werden kann. In den Modellen 2, 5, 6, 7, 8 und 9 ist die Sonne schließlich unterhalb der Erde und unterhalb des Beobachters, also auf der anderen Seite der Erde.

Die nächste Frage, Frage 3 („Bewegt sich die Erde?"), lautet übersetzt

```
stationary(earth,X)
```

Die Variable `X` steht für eine beliebige Zeit und die Modelle können auf diese Anfrage sowohl mit positiven als auch mit negierten Fakten antworten. Alle initialen Modelle (Modelle 1 bis 4) und zwei der synthetischen Modelle (Modelle 5 und 6) sagen aus, daß die Erde zu jeder Zeit fest oder unbeweglich ist (siehe Tabelle 4.2). In Modell 8 (*Die Erde dreht sich hin und her.*) ist die Erde in den Zuständen `state0` und `state1` fest, aber bei den Ereignissen `event0` und `event1` bewegt sie sich. Das liegt daran, daß sich die Erde bei den Ereignissen dreht und in den Zuständen anhalten muß, um sich in die entgegengesetzte Richtung weiterzudrehen. Und in den Modellen 7 (*Die Erde dreht sich um die Sonne.*) und 9 (*Die Erde dreht sich um sich selbst.*) steht die Erde zu keiner Zeit still.

Die letzte der drei Fragen nach dem Faktenwissen, Frage 4 („Bewegt sich die Sonne?"), sieht als Anfrage an das System folgendermaßen aus:

„Wo ist die Sonne nachts?“	`in(sun,X,Y,Z) & night(me,Z)`
Modell 1	`in(sun,up,cloud,state1).` `in(sun,up,earth,state1).` `in(sun,up,me,state1).`
Modell 3	`in(sun,right,hill,state1).` `in(sun,right,me,state1).` `in(sun,up,earth,state1).`
Modell 4	`in(sun,up,earth,state1).` `in(sun,up,me,state1).` `in(sun,up,visual_range,state1).`
Modell 2, 5, 6, 7, 8, 9	`in(sun,down,earth,state1).` `in(sun,down,me,state1).`

Tabelle 4.1: Frage 1 – „Wo ist die Sonne nachts?“

„Bewegt sich die Erde?“	`stationary(earth,X)`
Modell 1, 2, 3, 4, 5, 6	`stationary(earth,state0).` `stationary(earth,event0).` `stationary(earth,state1).` `stationary(earth,event1).`
Modell 8	`stationary(earth,state0).` `not(stationary(earth,event0)).` `stationary(earth,state1).` `not(stationary(earth,event1)).`
Modell 7, 9	`not(stationary(earth,state0)).` `not(stationary(earth,event0)).` `not(stationary(earth,state1)).` `not(stationary(earth,event1)).`

Tabelle 4.2: Frage 3 – „Bewegt sich die Erde?“

„Bewegt sich die Sonne?“	`stationary(sun,X)`
Modell 1, 2, 3, 4, 5	`stationary(sun,state0).` `not(stationary(sun,event0)).` `stationary(sun,state1).` `not(stationary(sun,event1)).`
Modell 6	`not(stationary(sun,state0)).` `not(stationary(sun,event0)).` `not(stationary(sun,state1)).` `not(stationary(sun,event1)).`
Modell 7, 8, 9	`stationary(sun,state0).` `stationary(sun,event0).` `stationary(sun,state1).` `stationary(sun,event1).`

Tabelle 4.3: Frage 4 – „Bewegt sich die Sonne?“

```
stationary(sun,X)
```

In allen initialen Modellen und dem Modell 5 (*Die Sonne geht auf die andere Seite der Erde.*) ist die Sonne während der Zustände `state0` und `state1` fest und bewegt sich bei den Ereignissen `event0` und `event1` (siehe Tabelle 4.3). Auf die Sonne in diesen Modellen trifft das gleiche zu wie für die Erde in Modell 8 bei der vorherigen Frage. In Modell 5 z.B. dreht sich die Sonne beim Ereignis `event0` *entgegen dem Uhrzeigersinn* um die Erde

```
revolves_acw(sun,earth,event0).
```

Im darauffolgenden Zustand `state1` muss sie anhalten, um nachfolgend beim Ereignis `event1` wieder zurückzukehren, d.h. sich *im Uhrzeigersinn* um die Erde zu drehen

```
revolves_cw(sun,earth,event1).
```

um schließlich im Zustand `state0` wieder anzuhalten. In Modell 6 (*Die Sonne dreht sich um die Erde.*) ist die Sonne zu keiner Zeit fest, und in den Modellen 7, 8 und 9 ist sie immer unbeweglich.

Damit repräsentieren die Fakten, die die Modelle auf Anfragen liefern, die Antworten der Kinder. Und noch etwas mehr: Statt eines einfachen „Ja.“ oder „Nein.“ auf die Fragen 3 „Bewegt sich die Erde?“ und 4 „Bewegt sich die Sonne?“, antworten die operationalen Modelle diese Fragen differenziert nach den verschiedenen Zeiten, also z.B. mit „Ja, bei den Ereignissen `event0` und `event1`.“ und „Nein, in den Zuständen `state0` und `state1`.“. Diese Detailliertheit war notwendig für die formale Darstellung der kindlichen Erklärungen. Sie beruht jedoch zum Teil auf (plausiblen) Vermutungen, und es wäre wichtig und interessant, Kinder noch einmal nach diesen Details zu fragen, z.B. als Ergänzung zur Frage 4 („Bewegt sich die Sonne?“)

Frage 4′ „Bewegt sich die Sonne in der Nacht?“

Frage 4″ „Bleibt die Sonne in der Nacht stehen?“

Frage 4‴ „Bewegt sich die Sonne am Tag?“

Frage 4⁗ „Bleibt die Sonne am Tag stehen?“

Auf das Problem der Validierung der formalen Modelle wird noch näher in der abschließenden Diskussion in Abschnitt 5.1.1 eingegangen.

4.1.2 Ableitungen

Auf die generative Fragen 2, 5 und 6, die die Kinder dazu veranlassen sollten, das Verschwinden der Sonne in der Nacht zu erklären, können die operationalen Modelle durch die Ableitung der entsprechenden Fakten antworten. Die Ableitungsbäume, die dabei entstehen, repräsentieren somit die Erklärung für den Tag/Nachtzyklus. Eine Ableitung kommt zustande, indem das System MOBAL durch die Regeln (Abschnitt 3.2.2) aus den Fakten für alle Modellen und aus den individuellen Fakten der Modelle (Abschnitt 3.2.4) neue Fakten ableitet, bis schließlich Fakten für die Prädikate `day`, `night` und `day_night_cycle` abgeleitet werden (Abschnitt 3.2.1). Dabei achtet das System darauf, ob bei diesen Ableitungen Widersprüche in der Faktenmenge auftreten oder Bedingungen (Abschnitt 3.2.3) verletzt werden.

Als Beispiel soll hier die Repräsentation der Erklärung für den Tag/-Nachtzyklus in Modell 9 betrachtet werden. In Abbildung 4.1 ist der Ableitungsbaum für das Faktum

```
day_night_cycle(me,state0,event0,state1,event1).
```

in Modell 9 dargestellt.[1] Der Ableitungsbaum zeigt an, aus welchen Fakten und mit welchen Regeln andere Fakten abgeleitet wurden. Er hat eine gewisse Ähnlichkeit mit der Topologie der Regelmenge (siehe Abbildung 3.14 auf Seite 59), und dies nicht zufällig, denn die Topologie stellt eine Abstraktion aller mit einer Regelmenge möglichen Ableitungen dar. In Anhang B.1 ist zusätzlich noch eine detaillierere, textuelle Darstellung dieser Ableitung enthalten. Für diese textuelle Darstellung wurde eine besondere Notation entwickelt, die helfen soll, den Überblick zu behalten.

Sowohl die graphische wie auch die textuelle Darstellung des Ableitungsbaumes von Modell 9 lassen erkennen, daß die Ableitung des Faktums mit dem Prädikat `day_night_cycle` beruht auf einer Drehung der Erde (`earth`) um sich selbst aus Sicht der Sonne (vgl. Abbildung 4.1 und Anhang B.1, Ableitungen 7 und 8):

[1] Das System MOBAL wurde hauptsächlich für die direkte Interaktion mit einem Benutzer entwickelt. Deshalb konnte dieser schon recht unübersichtliche Ableitungsbaum nur mit einem kleinen Trick auf eine Bildschirmseite gebannt und aufgenommen werden. Dabei wurde die Anzahl der Knoten halbiert und die Anzahl der Pfeile um etwa ein Drittel verringert. Die Knoten der Regeln mit den Regelnummern und die Knoten der Eingabefakten mit den Faktennummern wurden nämlich von Hand direkt an die dazugehörenden Knoten der Fakten geschoben, und dadurch verschwanden auch alle Verbindungspfeile zwischen diesen.

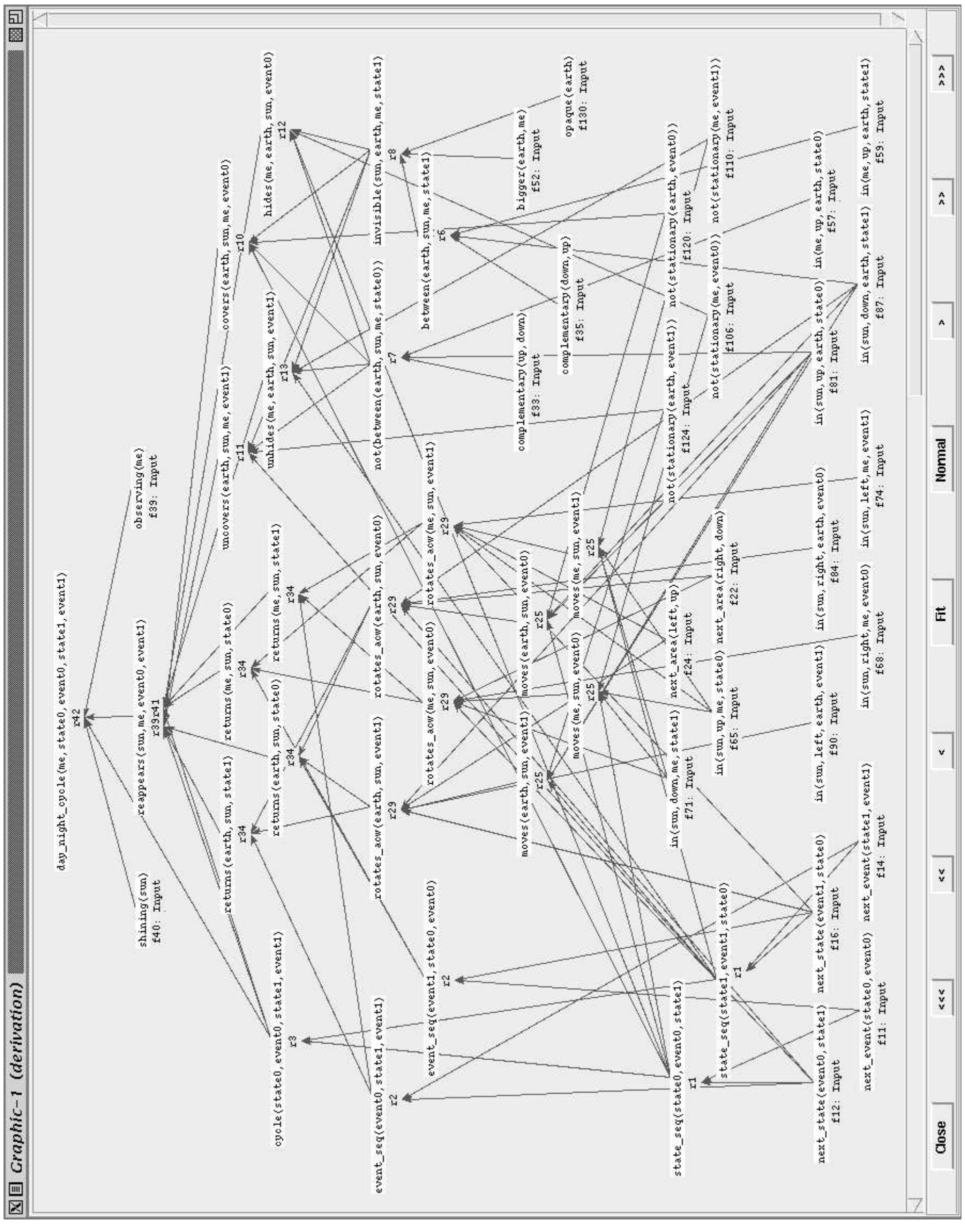


Abbildung 4.1: Ableitungsbaum von Modell 9

```
rotates_acw(earth,sun,event0).

rotates_acw(earth,sun,event1).
```

Da sich die Erde um sich selbst dreht, dreht sich der Beobachter (`me`) mit, und deshalb finden sich in dem Ableitungsbaum auch die Fakten

```
rotates_acw(me,sun,event0).

rotates_acw(me,sun,event1).
```

(vgl. Anhang B.1, Ableitungen 15 und 16).

Neben diesen Bewegungen der Objekte leitet sich das `day_night_cycle`–Faktum auch aus einem bestimmten Verdeckungsmechanismus ab. In Modell 9 verdeckt die Erde die Sonne für den Beobachter bzw. deckt sie wieder auf

```
covers(earth,sun,me,event0).

uncovers(earth,sun,me,event1).
```

(vgl. Anhang B.1, Ableitungen 3 und 11). Gleichzeitig versteckt sich der Beobachter aber auch hinter der Erde bzw. kommt hinter ihr hervor

```
hides(me,earth,sun,event0).

unhides(me,earth,sun,event1).
```

(vgl. Anhang B.1, Ableitungen 14 und 17). Aus diesen Fakten und der Aussage über die zyklische Verbundenheit der genannten Zustände und Ereignisse durch

```
cycle(state0,event0,state1,event1).
```

(vgl. Anhang B.1, Ableitung 13) wird inferiert, daß die Sonne für den Beobachter in den Ereignissen `event0` und `event1` verschwindet und wiederauftaucht

```
reappears(sun,me,event0,event1).
```

(vgl. Anhang B.1, Ableitung 2) Zusammen mit der expliziten Feststellung, daß das Objekt `sun` leuchtet und das Objekt `me` ein Beobachter ist, wird schließlich

```
day_night_cycle(me,state0,event0,state1,event1).
```

abgeleitet (vgl. Anhang B.1, Ableitung 1).

In den anderen acht Modellen werden auf eine ähnliche Weise Fakten mit dem Prädikat `day_night_cycle` abgeleitet, nur repräsentieren in ihnen andere abgeleitete Fakten, den Modellen entsprechend, die Bewegungsarten und Verdeckungsmechanismen:

Modell 1 *Wolken verdecken die Sonne.*

```
covers(cloud,sun,me,event0).            moves(cloud,sun,event0).
uncovers(cloud,sun,me,event1).          moves(cloud,sun,event1).

hides(sun,cloud,me,event0).
unhides(sun,cloud,me,event1).
```

Modell 2 *Die Sonne geht runter in den Boden.*

```
hides(sun,earth,me,event0).      revolves_acw(sun,earth,event0).
unhides(sun,earth,me,event1).     revolves_cw(sun,earth,event1).
```

Modell 3 *Die Sonne geht hinter Hügel.*

```
hides(sun,hill,me,event0).         revolves_cw(sun,hill,event0).
unhides(sun,hill,me,event1).      revolves_acw(sun,hill,event1).
```

Modell 4 *Die Sonne geht weit weg.*

```
hides(sun,visual_range,me,event0).
                                 moves(sun,visual_range,event0).
unhides(sun,visual_range,me,event1).
                                 moves(sun,visual_range,event1).
```

Modell 5 *Die Sonne geht auf die andere Seite der Erde.*

```
hides(sun,earth,me,event0).      revolves_acw(sun,earth,event0).
unhides(sun,earth,me,event1).     revolves_cw(sun,earth,event1).
```

Modell 6 *Die Sonne dreht sich um die Erde.*

```
hides(sun,earth,me,event0).      revolves_acw(sun,earth,event0).
unhides(sun,earth,me,event1).    revolves_acw(sun,earth,event1).
```

Modell 7 *Die Erde dreht sich um die Sonne.*

```
covers(earth,sun,me,event0).     revolves_acw(earth,sun,event0).
uncovers(earth,sun,me,event1).   revolves_acw(earth,sun,event1).
                                   rotates_cw(earth,sun,event0).
                                   rotates_cw(earth,sun,event1).

hides(me,earth,sun,event0).         revolves_acw(me,sun,event0).
unhides(me,earth,sun,event1).       revolves_acw(me,sun,event1).
                                      rotates_cw(me,sun,event0).
                                      rotates_cw(me,sun,event1).
```

Modell 8 *Die Erde dreht sich hin und her.*

```
covers(earth,sun,me,event0).      rotates_acw(earth,sun,event0).
uncovers(earth,sun,me,event1).     rotates_cw(earth,sun,event1).

hides(me,earth,sun,event0).          rotates_acw(me,sun,event0).
unhides(me,earth,sun,event1).         rotates_cw(me,sun,event1).
```

Modell 9 *Die Erde dreht sich um sich selbst.*

```
covers(earth,sun,me,event0).        rotates_acw(earth,sun,event0).
uncovers(earth,sun,me,event1).      rotates_acw(earth,sun,event1).

hides(me,earth,sun,event0).         rotates_acw(me,sun,event0).
unhides(me,earth,sun,event1).       rotates_acw(me,sun,event1).
```

Wie schon im vorhergehenden Abschnitt 4.1.1 stellt sich auch hier die Frage nach der Validierung der Modelle. Sind sich die Kinder z.B. bewußt, daß die Drehung der Erde nicht nur bedeutet, daß die Erde die Sonne für den Beobachter verdeckt, sondern auch, daß sich der Beobachter gleichzeitig hinter der Erde versteckt, wie oben geschildert wurde? Wie weit erkennen die Kinder die Konsequenzen ihrer Erklärungen? Dieses Thema wird in Kapitel 5 noch einmal angesprochen.

4.2 Neue Informationen

Die Reaktion auf neue Informationen stellt eine große Herausforderung sowohl für die Kinder wie auch für die operationalen Modelle dar. Denn neue, wissenschaftliche Informationen, die im Widerspruch zu bereits vorhandenen Begriffsintensionen und -extensionen stehen, können Teile einer Erklärung ungültig machen und damit die gesamte Erklärung in ihrer bis dahin gültigen Form zum Scheitern bringen. Dabei spielen noch andere Faktoren eine Rolle wie die Glaubwürdigkeit oder Autorität der Informationsquelle und die Art des Informationsmediums, d.h. ob es sich um verbale oder textuelle Informationen oder um perzeptuelle Erfahrungen wie Beobachtungen oder Hörerlebnisse handelt. Von diesen Einflußfaktoren wird an dieser Stelle zunächst einmal abstrahiert.

In den operationalen Modellen stellen die Fakten von Modell 9 die wissenschaftlichen Informationen zum Tag/Nachtzyklus dar. Prinzipiell können auch Regeln die Rolle wissenschaftlicher Informationen einnehmen, doch da alle Modelle die gleichen Regelmengen haben (vgl. Seite 48), stellen sie in dieser Modellierung keine neuen Informationen dar. Durch die Eingabe wissenschaftlicher Fakten in die anderen acht Modelle können Widersprche zu der vorhandenen Faktenmenge oder Verletzungen von Bedingungen auftreten. Das System MOBAL listet alle Widersprüche in einer Agenda auf, wo sie dann vom Benutzer sofort oder zu einem späteren Zeitpunkt behandelt werden können (siehe Abschnitt 1.2.2). Diese Widersprüche, die zwischen dem wissenschaftlichen Modell für den Tag/Nachtzyklus und den initialen und synthetischen Modellen auftreten, werden in Abschnitt 4.2.1 beschrieben.

Der nächste Schritt besteht in einer geeigneten Reaktion auf die Widersprüche, so daß wieder eine gültig Erklärung möglich wird, d.h. daß wieder Fakten für das Prädikat `day_night_cycle` abgeleitet werden. Die einfachste Form, auf einen direkten Widerspruch zwischen zwei Fakten zu reagieren, besteht darin, das bisherige Faktum zu löschen und durch das neue zu ersetzen. Wird eine Bedingung verletzt, so ist eine geeignete Auswahl von zu löschenden Fakten zu treffen. Werden Fakten gelöscht, die von einer Regel abgeleitet wurden, kann es zu einer Revision der Fakten- und Regelmenge

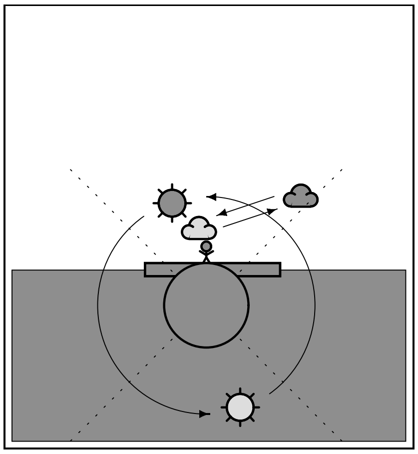


Abbildung 4.2: Modell 1 und Modell 6

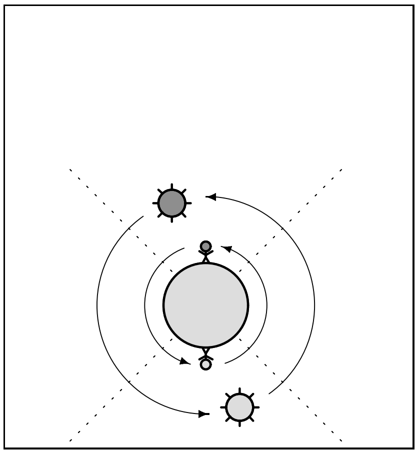


Abbildung 4.3: Modell 6 und Modell 9

kommen (siehe Abschnitt 1.2.2). Bei diesen Operationen kann es geschehen, daß eine bis dahin durch die Faktenmenge gerechtfertigte Ableitung eines `day_night_cycle`–Faktums nicht mehr länger möglich ist. Doch es können durch die hinzugefügten Fakten auch wieder neue Ableitungen entstehen, so daß die Faktenbasis anschließend ein anderes Modell repräsentiert. Für die systematische Untersuchung solcher Übergänge von einem Modell zu einem anderen wurden Regeln zur Klassifikation sich verändernder Faktenmengen entwickelt, die in Abschnitt 4.2.2 beschrieben werden. Die möglichen Übergänge zwischen den verschiedenen Modellen durch die Eingabe wissenschaftlicher Informationen werden anschließend in Abschnitt 4.2.3 vorgestellt.

4.2.1 Widersprüche

Die Widersprüche, die zwischen den verschiedenen Modellen auftreten, lassen sich schon anhand ihrer graphischen Repräsentationen erahnen. Als Beispiele sollen in diesem und dem folgenden Abschnitt 4.2.3 die Modelle 1, 6 und 9 dienen, wobei sie ein initiales, ein synthethisches respektive das wissenschaftliche Modell repräsentieren. In Abbildung 4.2 sind gleichzeitig das initiale Modell 1 und das synthetische Modell 6 dargestellt. Man erkennt, daß die um die Erde kreisende Sonne in Konflikt tritt mit dem unendlichen Untergrund. Abbildung 4.3 zeigt das synthetische Modell 6 und das wissenschaftliche Modell 9, und es läßt erahnen, daß die simultane Drehung der Erde um sich selbst und die Drehung der Sonne um die Erde zu keiner Erklärung für den Tag/Nachtzyklus führt. Abbildung 4.4 macht schließlich den starken Widerspruch zwischen einer festen, unbeweglichen und unendlichen Erde im initialen Modell 1 und der zu allen Seiten begrenzten und ständig sich bewegenden Erde im wissenschaftlichen Modell 9 deutlich.

Die graphischen Modelle haben, wie schon in Abschnitt 3.1 dargelegt, den Nachteil, daß sie weder einen Widerspruch explizit anzeigen noch auf

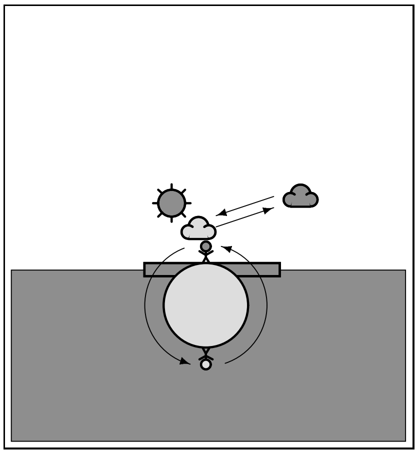


Abbildung 4.4: Modell 1 und Modell 9

ihn in der Art der operationalen Modelle reagieren können. In den operationalen Modellen werden alle Widersprüche in eine Agenda geschrieben. In den Abbildungen 4.5 bis 4.7 sind die Widersprüche, die sich direkt aus den Fakten ergeben, paarweise für die Modelle 1, 6 und 9 dargestellt.[2] In den Abbildungen 4.8 bis 4.10 werden die Widersprüche angezeigt, die indirekt aus den Fakten durch die Bedingungen (siehe Abschnitt 3.2.3) hervorgerufen werden. Durch die Agenden wird deutlich, wo genau die Widersprüche zwischen den Modellen liegen.

Zwischen den Agenden scheinen Teilmengenbeziehungen zu existieren. Es sieht so aus, als ob z.B. die Menge der Agendaeinträge in den Abbildungen 4.5 und 4.6 Teilmengen seien der Agendaeinträge in der Abbildungen 4.7. Das hieße, daß das synthetische Modell 6 „auf halbem Weg“ zwischen dem initialen Modell 1 und dem wissenschaftlichen Modell 9 liegt.[3] Wären die Mengen der Widersprüche zwischen den Modelle 1 und 6 und 6 und 9 keine Teilmengen der Widersprüche der Modelle 1 und 9, dann enthielte das Modell 6 zusätzliche Fakten, die nicht wissenschaftlich sind.[4] Diese Teilmengenbeziehung wird noch deutlicher in Abschnitt 4.2.3, in dem sich zeigen wird, daß ein Übergang vom initialen Modell 1 zum synthetischen Modell 6 und weiter zum wissenschaftlichen Modell 9 allein durch die Eingabe nur wissenschaftlicher Fakten möglich ist.

Bei näherem Hinsehen stellt man jedoch fest, daß es zwei Einträge in den Agenden in den Abbildungen 4.5 und 4.6 gibt, die nicht in den Agendaeinträge in der Abbildungen 4.7 vorkommen, und zwar

```
stationary(sun,state0) - [1000,1000]
```

[2]Da das System MOBAL Widersprüche, die sich aus nichtabgeleiteten Fakten ergeben, sofort durch das Löschen dieser Fakten behebt, erscheinen die Widersprüche zwischen den `in`–, `opaque`– und `stationary`–Fakten nur aufgrund einer eigens dafür entwickelten regelbasierten Umrepräsentation aus `in_tmp`–, `opaque_tmp`– und `stationary_tmp`–Fakten.

[3]In der Metapher der Seeüberquerung bedeutet dies, daß die Insel auf einer Linie zwischen dem Start- und dem Zielpunkt liegt.

[4]In diesem Fall müßte man für die Pause auf der Insel einen Umweg in Kauf nehmen.

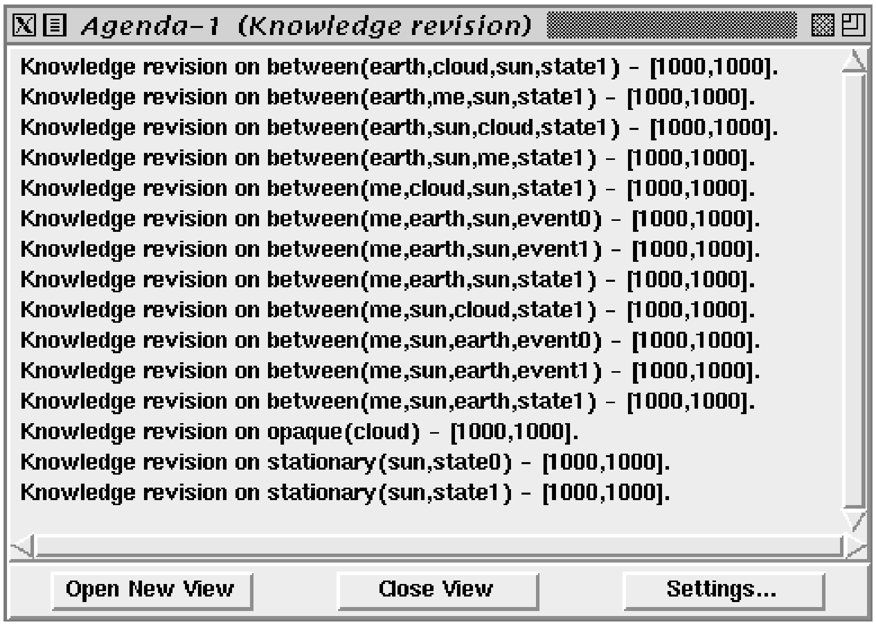


Abbildung 4.5: Widersprüche durch Fakten zwischen Modell 1 und Modell 6

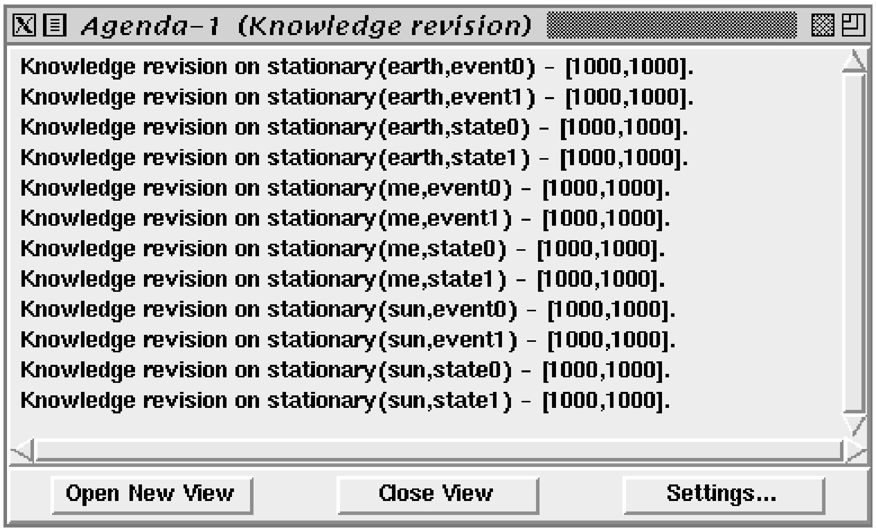


Abbildung 4.6: Widersprüche durch Fakten zwischen Modell 6 und Modell 9

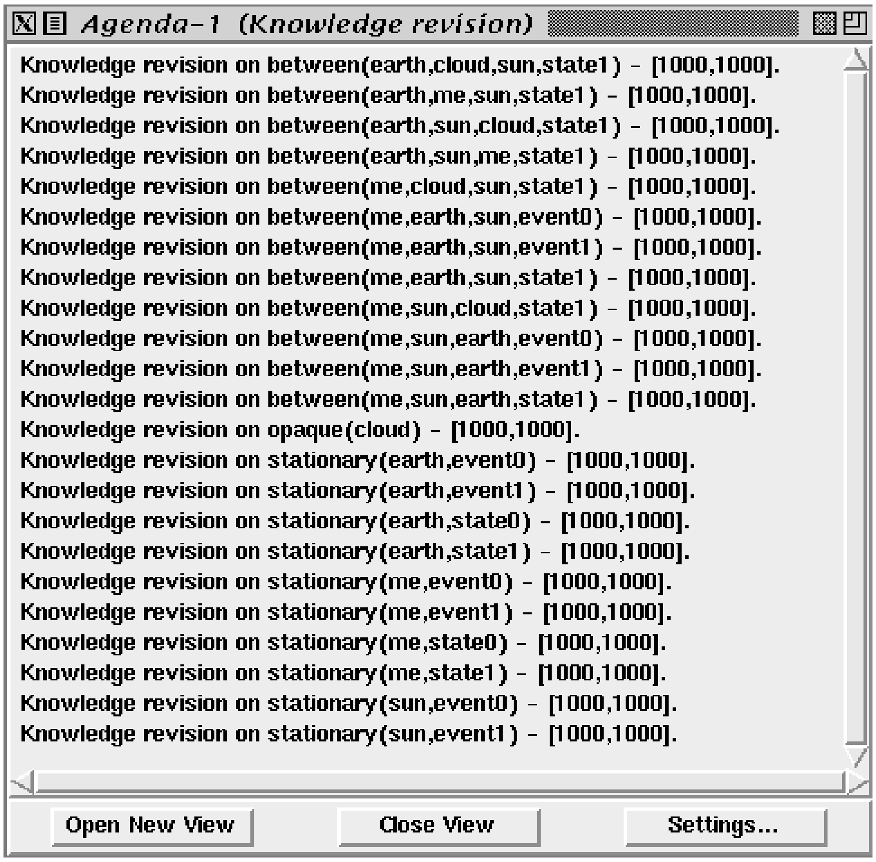


Abbildung 4.7: Widersprüche durch Fakten zwischen Modell 1 und Modell 9

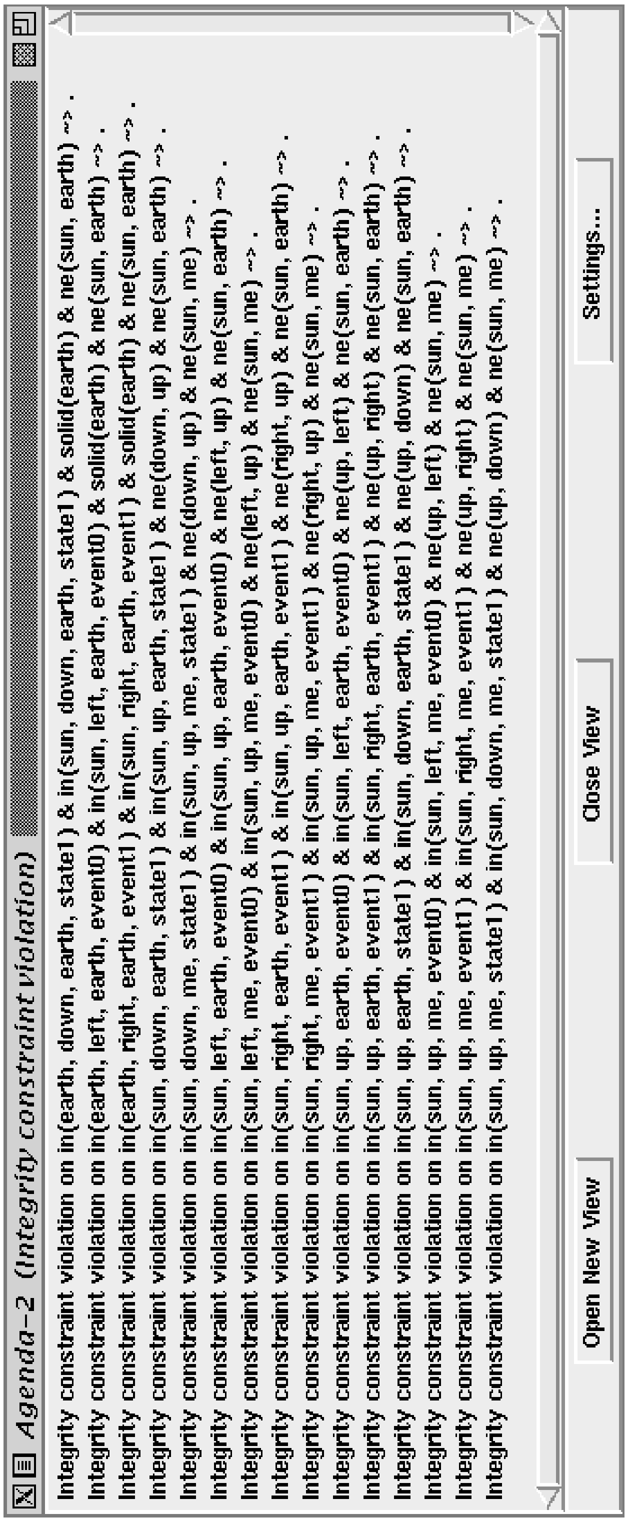


Abbildung 4.8: Widersprüche durch Bedingungen zwischen Modell 1 und Modell 6

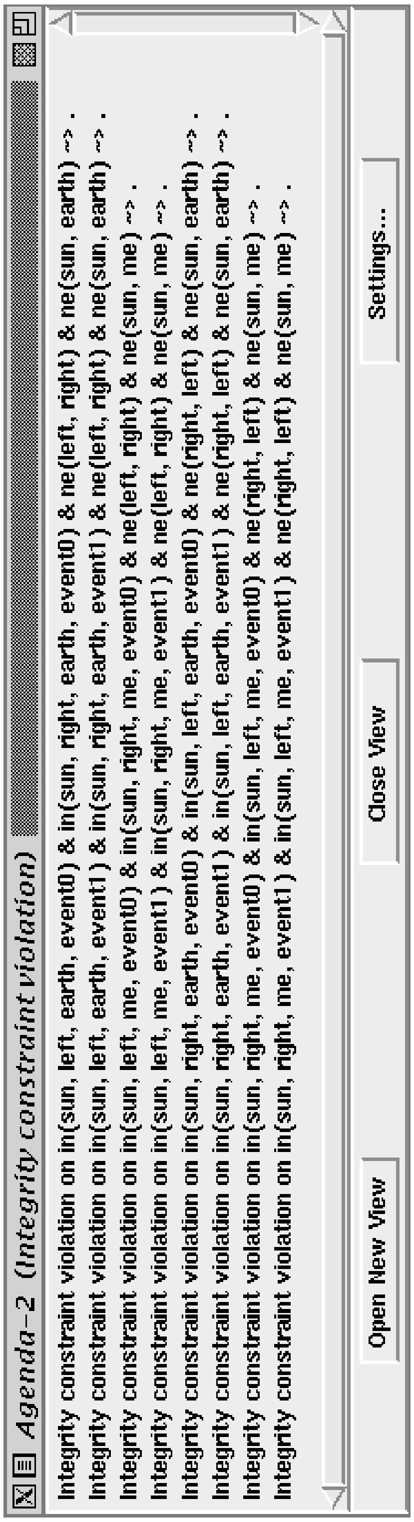


Abbildung 4.9: Widersprüche durch Bedingungen zwischen Modell 6 und Modell 9

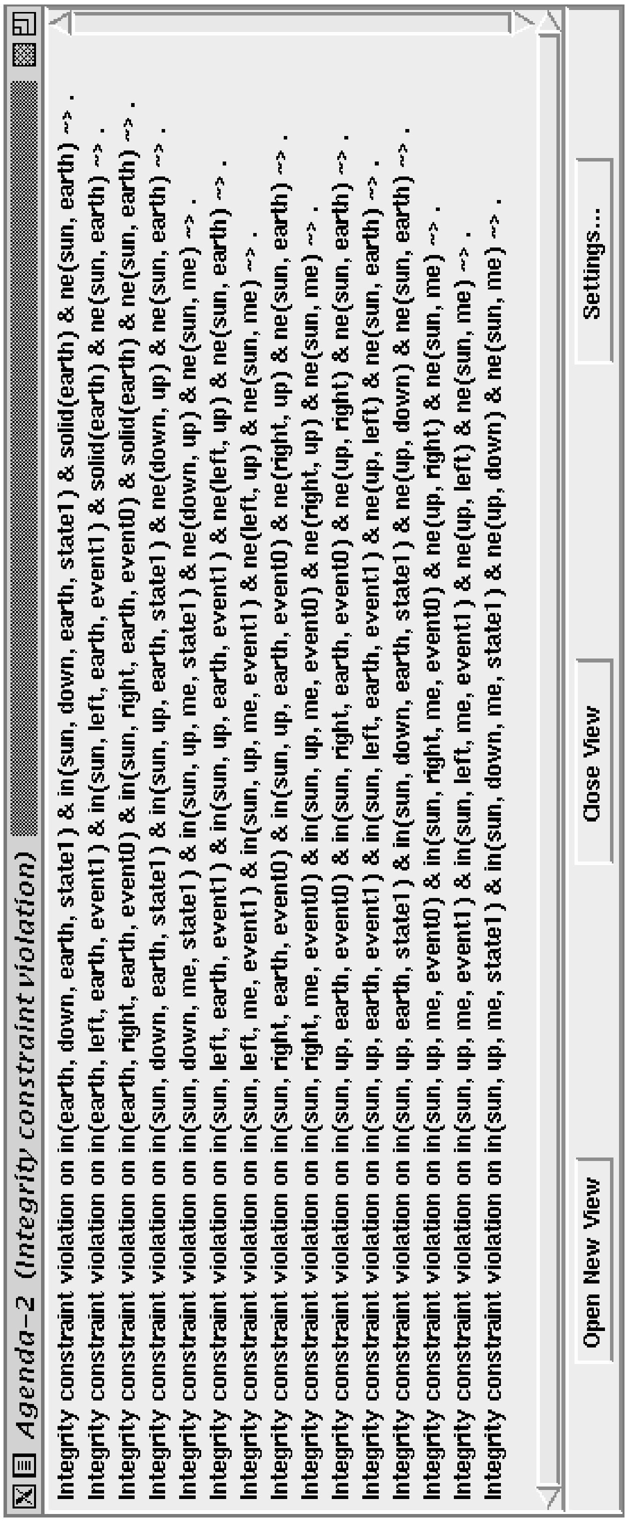


Abbildung 4.10: Widersprüche durch Bedingungen zwischen Modell 1 und Modell 9

```
stationary(sun,state1) - [1000,1000]
```

Diese Widersprüche ergeben sich dadurch, daß die Sonne in den Modellen 1 und 9 in den Zuständen `state0` und `state1` fest (unbeweglich) ist, in Modell 6 aber nicht.[5] Allerdings ist Modell 6 mit

```
not(stationary(sun,state0)).

not(stationary(sun,state1)).
```

überspezifiert (vgl. Anhang A.3.7), denn das `day_night_cycle`–Faktum wird auch ohne diese beiden Fakten abgeleitet. Bei der Inferenz in Modell 6 (*Die Sonne dreht sich um die Erde.*) ist es unerheblich, ob die Sonne in den Zuständen `state0` und `state1` fest ist oder nicht, wenn sie sich nur bei den beiden Ereignissen `event0` und `event1` in *gleicher Richtung* um die Erde dreht. Im Gegensatz dazu wird in Modell 5 (*Die Sonne geht auf die andere Seite der Erde.*) ein `day_night_cycle`–Faktum nur dann abgeleitet, wenn die Sonne in den Zuständen `state0` und `state1` stehenbleibt, denn sie bei den beiden Ereignissen `event0` und `event1` eine unterschiedliche Drehrichtung (vgl. Seiten 81 und 83). Der Versuch, die Modelle bezüglich des repräsentierten Sachbereiches zu vervollständigen und sie untereinander vergleichbarer zu machen, hat in Modell 6 zu einer Überspezifizierung der Faktenmenge geführt.

Eine Überspezifizierung anderer Art wird in den Agenden der Abbildungen 4.8 bis 4.10 deutlich. So ist zwar die Menge der Bedingungsverletzungen (*integrity constraint violations*) zwischen Modell 1 und 6 (Abbildung 4.8) eine Teilmenge der Menge der Bedingungsverletzungen zwischen Modell 1 und 9 (Abbildung 4.10), jedoch findet sich in letzterer nicht eine der Bedingungsverletzungen zwischen Modell 6 und 9 (Abbildung 4.9) Das liegt an einer Differenzierung der Regionen, die für die Unterscheidung einiger Modelle notwendig ist, die jedoch so spezifisch ist, daß sie bestimmte räumliche Symmetrieeigenschaften expliziert. Das bedeutet, daß die Agenda in Abbildung 4.9 leer wäre bei dem Vergleich mit dem symmetrischen Modell 9′ mit genau entgegengesetzter Drehrichtung der Erde. Auf das Problem der Symmetrie beim räumlichen Schließens wird im folgenden Abschnitt noch ausführlicher eingegangen.

4.2.2 Kriterien

Bei der Weiterentwicklung von Modellierung I zu Modellierung II hat es eine Veränderung in der Regelmenge gegeben, die Auswirkungen hat auf die Untersuchung der möglichen Übergänge zwischen den verschiedenen Modellen. In Modellierung I gab es für jedes Modell ein spezifisches Prädikat, und man konnte an einer Faktenbasis sofort ansehen, welches Modell sie repräsentierte. Denn es reichte aus, nach Fakten zu suchen, die für diese spezifischen Prädikate abgeleitet worden waren (siehe Abschnitt 3.3.2). Doch es sollte sich bald zeigen, daß es bei einigen Modelle sehr viel schwieriger war, solche

[5] Es scheint doch ein Umweg zu sein.

modellspezifischen Prädikate anzugeben und zu definieren, als bei anderen. Der Grund dafür ist, daß die Modelle, paarweise betrachtet, an zentralen Stellen viele Gemeinsamkeiten haben, die von den spezifischen Prädikaten ignoriert wurden.

Durch die Aufspaltung in verschiedenstellige Prädikate zur Darstellung von Bewegungsarten und Verdeckungsmechanismen wurde es möglich, diese Gemeinsamkeiten auch zu repräsentieren (Abschnitt 3.3.2). Und nun wird auch deutlich, warum es schwierig war, für einige Modelle spezifische Prädikate zu benennen. So sind z.B. bei den Ableitungen für den Tag/Nachtzyklus in den Modellen 7, 8 und 9 die Fakten für die Prädikate `covers`, `uncovers`, `hides` und `unhides` völlig identisch (vgl. Seite 87):

Modell 7 *Die Erde dreht sich um die Sonne.*

```
covers(earth,sun,me,event0).      revolves_acw(earth,sun,event0).
uncovers(earth,sun,me,event1).    revolves_acw(earth,sun,event1).
                                    rotates_cw(earth,sun,event0).
                                    rotates_cw(earth,sun,event1).

hides(me,earth,sun,event0).          revolves_acw(me,sun,event0).
unhides(me,earth,sun,event1).        revolves_acw(me,sun,event1).
                                       rotates_cw(me,sun,event0).
                                       rotates_cw(me,sun,event1).
```

Modell 8 *Die Erde dreht sich hin und her.*

```
covers(earth,sun,me,event0).       rotates_acw(earth,sun,event0).
uncovers(earth,sun,me,event1).      rotates_cw(earth,sun,event1).

hides(me,earth,sun,event0).           rotates_acw(me,sun,event0).
unhides(me,earth,sun,event1).          rotates_cw(me,sun,event1).
```

Modell 9 *Die Erde dreht sich um sich selbst.*

```
covers(earth,sun,me,event0).       rotates_acw(earth,sun,event0).
uncovers(earth,sun,me,event1).     rotates_acw(earth,sun,event1).

hides(me,earth,sun,event0).           rotates_acw(me,sun,event0).
unhides(me,earth,sun,event1).         rotates_acw(me,sun,event1).
```

Doch sie unterscheiden sich sehr wohl in den Fakten für die Prädikate `revolves_acw`, `rotates_acw` und `rotates_cw`. Diese Gemeinsamkeiten und Unterschiede in den Modellen durch jeweils nur ein spezifisches Prädikat auszudrücken, ist umständlich und führt zu Regeln mit vielen Prämissen. Auch deshalb, weil sich diese Prädikate auch noch von den spezifischen Prädikaten aller anderen Modelle unterscheiden müssen, z.B. von Modell 1 (vgl. Seite 87):

Modell 1 *Wolken verdecken die Sonne.*

```
covers(cloud,sun,me,event0).           moves(cloud,sun,event0).
uncovers(cloud,sun,me,event1).         moves(cloud,sun,event1).

hides(sun,cloud,me,event0).
unhides(sun,cloud,me,event1).
```

Doch die Aufspaltung in Prädikate für Bewegungsarten und Verdeckungsmechanismen bringt auch einen Nachteil mit sich bei der systematischen Untersuchung von Modellübergängen: einer Faktenmenge ist nicht mehr so leicht anzusehen, welches Modell sie gerade repräsentiert. Deshalb wurden nachvollziehbare und überprüfbare Kriterien aufgestellt, um entscheiden zu können, ob eine vorliegende Faktenbasis einem bestimmten Modell entspricht. Diese Kriterien sind gegeben in Form weiterer Regeln, die Fakten für die spezifischen Prädikate `model1` bis `model9` ableiten (siehe Anhang C). Die Regeln stellen also eine explizite Charakterisierung der Modelle dar.

Die Kriterien weisen zudem auf eine Eigenart der Repräsentation des räumlichen Schließens in dieser Modellierung hin. Wegen der expliziten Unterscheidung der Regionen (*areas*) `left` und `right`, die z.B. für die Differenzierung von Modell 5 (*Die Sonne geht auf die andere Seite der Erde.*) und Modell 6 (*Die Sonne dreht sich um die Erde.*) notwendig ist, verdoppelt sich die Anzahl der Regeln für die Prädikate `model2` und `model3` und für `model5` bis `model9`. Denn durch Achsensymmetrien gibt es jeweils zwei Varianten bezüglich der Drehrichtung, nämlich „im Uhrzeigersinn“ und „entgegen dem „Uhrzeigersinn“ (`cw`: *clockwise* und `acw`: *anticlockwise*), wie in Anhang C zu sehen ist. Und schließlich gibt es für die Prädikate `model7` bis `model9` noch Verdeckungs- und Versteckungsvarianten.

4.2.3 Übergänge

Die Agenden in Abschnitt 4.2.1 zeigen die Widersprüche zwischen dem initialen, dem synthetischen und dem wissenschaftlichen Modell an. Es sind alle Widersprüche, die sich aus den gesamten Faktenmengen, sowohl eingegebenen wie auch durch Regeln abgeleiteten, und aus den Verletzungen von Bedingungen ergeben. Diese Auflistung aller Widersprüche ist ein Gewinn, den die operationale Modellierung mit sich bringt.

In einer Lernsituation ist es jedoch gewöhnlich so, daß nicht alle Details einer Erklärung vermittelt oder erfahren werden, sondern nur ein kleiner Ausschnitt aller möglichen wissenschaftlichen Informationen inklusiver deren Konsequenzen auf eine initiale oder synthetische Erklärung treffen. Durch die Modellierung ist es nun möglich, den Einfluß von neuen Informationen auf ein gegebenes Modell zu untersuchen und diesen Vorgang auch wiederholbar zu machen. Hierbei spielt die Auswahl von Eingabefakten und deren Reihenfolge eine große Rolle bei den Übergängen zwischen den verschiedenen Modellen.

Die Modelle 1, 6 und 9 sollen hier, wie schon in Abschnitt 4.2.1, als Vertreter für initiale, synthetische bzw. das wissenschaftliche Modell stehen. Die prinzipiell möglichen Übergänge zwischen diesen drei Modellen sind in Abbildung 4.11 dargestellt: vom initialen Modell zum synthetischen, vom synthetischen Modell zum wissenschaftlichen oder vom initialen direkt zum wissenschaftlichen Modell ohne Umweg über das synthetische Modell. Für die Untersuchung dieser Übergänge werden dem initialen und dem synthetischen Modell wissenschaftliche Fakten eingegeben, also Fakten aus dem Modell 9. Tritt dabei ein Widerspruch auf, so wird dieser in der Agenda

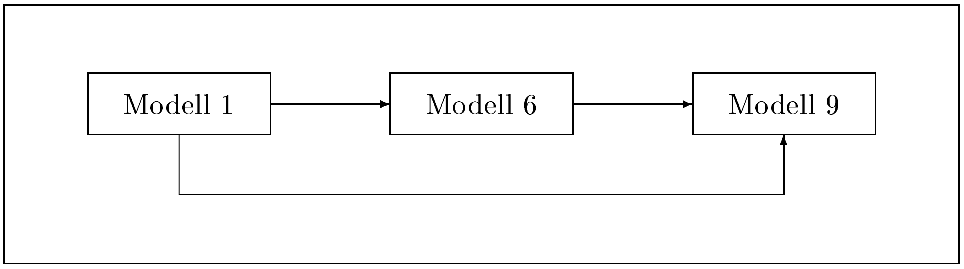


Abbildung 4.11: Übergänge zwischen den Modellen 1, 6 und 9

angezeigt und kann dort behandelt werden (siehe Abschnitt 1.2.2). Dadurch kann es entweder zum Löschen eines oder mehrerer Fakten kommen oder zu einer Wissensrevision, in deren Verlauf auch die Löschung bereits vorhandener Fakten möglich ist, um die Ableitung anderer, widersprüchlicher Fakten zu verhindern.

Um von Modell 1 zu Modell 6 zu gelangen, muß zunächst einmal das wissenschaftliche Faktum

```
not(opaque(cloud)).
```

eingegeben werden (siehe auch ausführlichere Darstellung in Anhang D.1). Dadurch wird eine `day_night_cycle`–Ableitung in der Form von Modell 1 verhindert. Dies ist auch leicht daran zu erkennen, daß das bis dahin vorhandene Faktum für das Prädikat `model1`

```
model1(me,state0,event0,state1,event1).
```

(siehe Abschnitt 4.2.2) gelöscht wird.

Ein großer Unterschied zwischen Modell 1 und Modell 6 sind die Positionen der Sonne. Während die Sonne in Modell 1 zu jeder Zeit oberhalb der Erde ist, geht sie in Modell 6 nachts auf die andere Seite der Erde. Durch die Eingabe der wissenschaftlichen Fakten

```
in(sun,down,earth,state1).

in(sun,left,earth,event0).

in(sun,right,earth,event1).
```

kommt es zu umfangreichen Lösch- und Revisionsoperationen (siehe Anhang D.1), an deren Ende es zu der Ableitung der Fakten

```
day_night_cycle(me,state0,event0,state1,event1).

model6(me,state0,event0,state1,event1).
```

kommt. Die in diesem Beispiel eingegebenen Fakten stellen eine minimale Menge dar, um zuerst eine Ableitung nach Modell 1 zu verhindern und anschließend eine Ableitung nach Modell 6 zu erhalten. Die Unendlichkeit der Erde, repräsentiert durch `infinite`–Fakten, wird damit zum entscheidenden Unterschied zwischen Modell 1 und Modell 6.

Um von Modell 6 zu Modell 9 zu gelangen, gibt man durch

```
stationary(sun,event0).
```

ein, daß die Sonne beim Ereignis `event0` fest, also unbeweglich ist (siehe Anhang D.2). Damit ist eine weitere Ableitung nach Modell 6 nicht mehr möglich. In dem wissenschaftlichen Modell bewegt sich jedoch die Erde, so daß durch die Eingabe von

```
not(stationary(earth,event0)).

not(stationary(earth,event1)).
```

eine Ableitung nach Modell 9 ergibt. Auch diese Eingabemenge ist minimal bezüglich der Verhinderung von Modell 6 und dem Übergang zu Modell 9, wie man durch eine systematische Untersuchung mit allen wissenschaftlichen Eingabemengen gleicher oder geringerer Kardinalität feststellen kann. Sie ergibt sich aber auch aus den Modellen, denn der große Unterschied zwischen Modell 6 und Modell 9 ist eben die Beweglichkeit der Erde.

Der Übergang von Modell 1 direkt zu Modell 9 läßt sich durch die Vereinigung der beiden Eingabemengen von Modell 1 zu Modell 6 und von Modell 6 zu Modell 9 erreichen. Werden die Fakten in der oben angegebenen Reihenfolge eingegeben wird zwischendurch Modell 6 erreicht, bei anderen Permutationen der Faktenmenge wird Modell 6 nicht erreicht, aber auch kein anderes Modell. Deshalb ist diese Menge minimal bezüglich des Übergangs von Modell 1 zu Modell 9. Dies bestätigt die Vermutung in Abschnitt 4.2.1, daß das Modell 6 auf „direkter Linie“ zwischen dem initialen und dem wissenschaftlichen Modell liegt und keinen Umweg darstellt.

Die Ergebnisse der Untersuchung der Übergänge zwischen den anderen Modellen sind in den Tabellen 4.4 bis 4.5 dargestellt. Sie geben Auskunft darüber, ob ein Übergang zwischen Modellen aufgrund wissenschaftlicher Informationen möglich ist ($\rightarrow$) oder nicht ($\nrightarrow$), welche Eingabefakten nötig sind für den Übergang und wieviele Lösch- ($\varnothing$) und Revisionsoperationen ($\circlearrowright$) dabei durchgeführt wurden und auch welche Eingabefakten für einen Übergang nötig wären (!!), jedoch nicht wissenschaftlich sind. In Tabelle 4.4 werden die Übergänge von den initialen zu den synthetischen Modellen analysiert, in Tabelle 4.5 die Übergänge von den initialen Modellen zum wissenschaftlichen Modell und schließlich in Tabelle 4.6 die Übergänge zwischen den synthetischen Modellen untereinander und hin zum wissenschaftlichen Modell.

Faßt man die drei Tabellen einmal zusammen, so stellt man fest, daß die folgende Teilmenge des wissenschaftlichen Modell 9 alle Übergänge bewerkstelligt, die zwischen den Modellen möglich sind:

```
solid(earth).

not(opaque(cloud)).

in(sun,down,earth,state1).

in(sun,left,earth,event0).

in(sun,right,earth,event1).
```

Übergang[a]	Fakten	Operationen[b]
$1 \not\to 5$ $3 \not\to 5$ $4 \not\to 5$ $1 \not\to 8$ $3 \not\to 8$ $4 \not\to 8$	`in(sun,left,earth,event0).` `in(sun,left,earth,event1).`	!!
$2 \to 5$	`solid(earth).`	$2 \varnothing 2 \circlearrowright$
$1 \to 6$	`not(opaque(cloud)).` `in(sun,down,earth,state1).` `in(sun,left,earth,event0).` `in(sun,right,earth,event1).`	– $4 \varnothing 1 \circlearrowright$ $2 \varnothing 1 \circlearrowright$ $2 \varnothing 1 \circlearrowright$
$2 \to 6$	`solid(earth).` `in(sun,right,earth,event1).`	$2 \varnothing 2 \circlearrowright$ $2 \varnothing 1 \circlearrowright$
$3 \not\to 6$ $4 \not\to 6$	`not(stationary(sun,state0)).` `not(stationary(sun,state1)).` `not(stationary(sun,state0)).` `not(stationary(sun,state0)).`	!! !! !! !!
$1 \not\to 7$ $2 \not\to 7$ $3 \not\to 7$ $4 \not\to 7$	`in(earth,up,sun,state1).` `in(earth,right,sun,event0).` `in(earth,left,sun,event1).`	!! !! !!
$2 \to 8$	`stationary(sun,event0).` `not(stationary(earth,event0)).` `not(stationary(earth,event1)).`	– $4 \varnothing 3 \circlearrowright$ $1 \varnothing$

[a] Das Zeichen $\to$ steht für einen möglichen und das Zeichen $\not\to$ für einen unmöglichen Übergang durch wissenschaftliche Fakten.

[b] Das Zeichen $\varnothing$ steht für das Löschen und das Zeichen $\circlearrowright$ für das Revidieren von Fakten. Das Zeichen !! markiert notwendige unwissenschaftliche Fakten und das Zeichen – markiert Fakten, die eine Ableitung zerstören.

Tabelle 4.4: Übergänge von den initialen zu den synthetischen Modellen

Übergang	Fakten	Operationen
$1 \to 9$	`not(opaque(cloud)).`	–
	`in(sun,down,earth,state1).`	$4 \varnothing 1 \circlearrowright$
	`in(sun,left,earth,event0).`	$2 \varnothing 1 \circlearrowright$
	`in(sun,right,earth,event1).`	$2 \varnothing 1 \circlearrowright$
	`stationary(sun,event0).`	
	`not(stationary(earth,event0)).`	$1 \varnothing$
	`not(stationary(earth,event1)).`	$1 \varnothing$
$2 \to 9$	`solid(earth).`	$2 \varnothing 2 \circlearrowright$
	`in(sun,right,earth,event1).`	$2 \varnothing 1 \circlearrowright$
	`stationary(sun,event0).`	
	`not(stationary(earth,event0)).`	$1 \varnothing$
	`not(stationary(earth,event1)).`	$1 \varnothing$
$3 \to 9$	`stationary(sun,event0).`	–
	`not(stationary(earth,event0)).`	$5 \varnothing 3 \circlearrowright$
	`not(stationary(earth,event1)).`	$2 \varnothing$
	`in(sun,down,earth,state1).`	$1 \varnothing$
	`in(sun,left,earth,event0).`	$1 \varnothing$
	`in(sun,right,earth,event1).`	$1 \varnothing$
$4 \to 9$	`stationary(sun,event0).`	–
	`not(stationary(earth,event0)).`	$4 \varnothing 3 \circlearrowright$
	`not(stationary(earth,event1)).`	$1 \varnothing$
	`in(sun,right,earth,event1).`	$1 \varnothing$
	`in(sun,left,earth,event0).`	$1 \varnothing$
	`in(sun,down,earth,state1).`	$2 \varnothing$

Tabelle 4.5: Übergänge von den initialen zum wissenschaftlichen Modell

Übergang	Fakten	Operationen
$5 \rightarrow 6$	`in(sun,right,earth,event1).`	1 ∅
$8 \rightarrow 9$		
$5 \nrightarrow 7$	`in(earth,up,sun,state1).`	!!
$6 \nrightarrow 7$	`in(earth,right,sun,event0).`	!!
$8 \nrightarrow 7$	`in(earth,left,sun,event1).`	!!
$5 \nrightarrow 8$	`in(sun,right,earth,event0).`	!!
$6 \nrightarrow 8$	`in(sun,right,earth,event0).`	
$7 \nrightarrow 8$		
$6 \nrightarrow 5$	`in(sun,left,earth,event0).`	!!
$7 \nrightarrow 5$	`in(sun,left,earth,event0).`	
$5 \rightarrow 9$	`in(sun,right,earth,event1).`	2 ∅ 1 ↻
	`stationary(sun,event0).`	
	`not(stationary(earth,event0)).`	1 ∅
	`not(stationary(earth,event1)).`	1 ∅
$6 \rightarrow 9$	`stationary(sun,event0).`	–
	`not(stationary(earth,event0)).`	1 ∅
	`not(stationary(earth,event1)).`	1 ∅
$8 \nrightarrow 5$	`not(stationary(sun,event0)).`	!!
	`not(stationary(sun,event0)).`	!!
$8 \nrightarrow 6$	`not(stationary(sun,state0)).`	!!
$7 \nrightarrow 6$	`not(stationary(sun,state1)).`	!!
	`not(stationary(sun,state0)).`	!!
	`not(stationary(sun,state0)).`	!!
$7 \rightarrow 9$	`in(earth,down,sun,state1).`	2 ∅

Tabelle 4.6: Übergänge zwischen den synthetischen Modellen und zum wissenschaftlichen Modell

```
not(stationary(earth,event0)).

not(stationary(earth,event1)).

stationary(sun,event0).

in(earth,down,sun,state1).
```

Die folgenden Fakten stellen eine Menge dar, die alle weiteren Übergänge möglich machen würde, jedoch keine wissenschaftlichen Informationen enthält:

```
in(sun,left,earth,event0).    in(sun,left,earth,event1).

in(sun,right,earth,event0).    in(sun,right,earth,event1).

not(stationary(sun,state0)).

not(stationary(sun,state1)).

not(stationary(sun,state0)).

not(stationary(sun,state0)).

in(earth,up,sun,state1).

in(earth,right,sun,event0).

in(earth,left,sun,event1).
```

Die beiden ersten Faktenpaare bilden nur gemeinsam unwissenschaftliche Informationen, denn die Sonne geht nicht da auf, wo sie untergegangen ist, sondern auf der gegenüberliegenden Seite.

Die mit Eingabe wissenschaftlicher Fakten zu bewerkstelligen Übergänge sind in Abbildung 4.12 im Überblick dargestellt. Man erkennt, daß nur ein Teil aller prinzipiell möglichen Übergänge durch die Eingabe wissenschaftlicher Fakten erreichbar ist. Insbesondere Modell 7 ist von keinem der anderen Modelle aus unter Eingabe wissenschaftlicher Fakten zu erreichen. Zur Erinnerung, Modell 7 ist das Modell, bei dem sich die Erde um die Sonne dreht (siehe Abbildung 3.7 auf Seite 46). Modell 7 unterscheidet sich von allen anderen Modellen darin, daß sich die Position der Erde zur Sonne verändert, und nicht die Position der Sonne zur Erde. Deshalb ist es nur unter Eingabe der drei unwissenschaftlichen Fakten

```
in(earth,up,sun,state1).

in(earth,right,sun,event0).

in(earth,left,sun,event1).
```

von den anderen Modellen aus zu erreichen.

Es stellt sich nun die Frage, wie es überhaupt zu Modell 7 als Erklärung für den Tag/Nachtzyklus kommen kann. Denkbar wäre es, daß wissenschaftliche Informationen über die Drehung der Erde um die Sonne im *Jahresrythmus* interpretiert wurden als Informationen über die Drehung der Erde um die Sonne im *Tagesrythmus*. Diese Frage wird in Kapitel 5 beim Thema der Validierung der formalen Modelle noch einmal angesprochen.

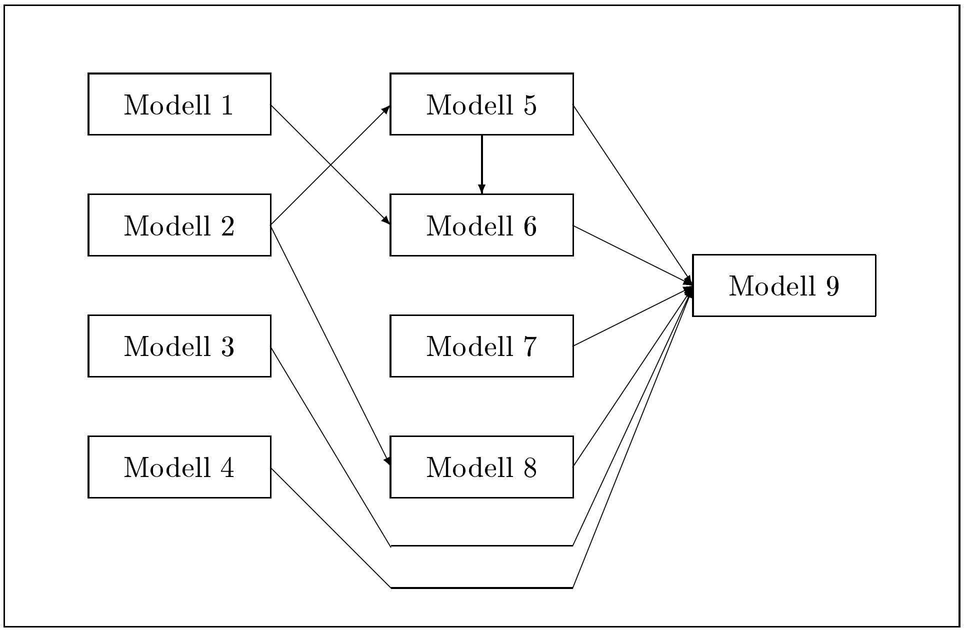


Abbildung 4.12: Mögliche Übergänge zwischen den Modellen

4.3 Diskussion

Bei der Untersuchung der Modellübergänge in Abschnitt 4.2 wurde als Maß für die Distanz zwischen zwei Modellen die kleinste Anzahl von Fakten zugrundegelegt, die für einen Übergang mindestens notwendig ist. Dies ist ein klares und einfach zu berechnendes Maß für die Schwierigkeit eines Übergangs. Doch auch komplexere Distanzmaße sind denkbar, die Auswirkungen neuer Fakten auf die vorhandene Faktenmenge unter Beachtung der Lösch- und Revisionsoperationen in Betracht ziehen. Denn die Veränderungen, die durch wissenschaftliche Informationen hervorgerufen werden, können von Modell zu Modell unterschiedlich tiefgreifend sein.

Am Beispiel der schon bekannten drei Modelle 1, 6 und 9 sollen verschiedene Maße einmal untersucht werden. In Tabelle 4.7 sind die wichtigsten Daten der genannten Modelle und der Übergänge 1$\rightarrow$ 6, 6 $\rightarrow$ 9 und 1 $\rightarrow$ 9 aufgelistet. Beim Übergang von Modell 1 zu Modell 6 (1$\rightarrow$ 6) gab es 195 Ausgangsfakten und 4 Eingabefakten, die zu 11 Behandlungen, d.h. Lösch- und Revisionsoperationen, führten (vgl. Abschnitt 4.2.3 und Anhang D.1). Nach dem Übergang blieben 244 Endfakten, von denen 215 gleich waren mit Fakten vor Durchführung der Lösch- und Revisionsoperationen.[6] Insgesamt wurden bei dem Übergang 80 Fakten gelöscht, und 29 Fakten kamen neu hinzu.

Man erkennt, daß die Eingabe von „nur“ vier Fakten zur Löschung von 80 vorhandenen Fakten führte. Dies liegt daran, daß durch das Löschen

[6]Da das System MOBAL zwar Statistiken führt über die Verwendung einzelner Fakten und Regeln, nicht aber über Fakten- oder Regelmengen, mußte die Anzahl der gleichen Fakten zweier Modelle durch einen Trick berechnet werden, bei dem bestimmte Systeminformationen beim Ladevorgang (*trace window*) „per Hand“ gezählt wurden.

Übergänge	$1 \to 6$	$6 \to 9$	$1 \to 9$
Ausgangsfakten	295	244	295
Eingabefakten	4	3	7
Behandlungen[a]	11	2	13
Endfakten	244	250	250
gleiche Fakten	215	233	210
gelöschte Fakten[b]	80	11	85
neue Fakten[c]	29	17	40
Auswirkung[d]	2,75	0,67	1,86
Löschung[e]	20	3,67	12,14
Erneuerung[f]	7,25	5,67	5,71

[a] Lösch- (∅) und Revisionsoperationen (↻)
[b] Ausgangsfakten − gleiche Fakten
[c] Endfakten − gleiche Fakten
[d] Behandlungen / Eingabefakten
[e] gelöschte Fakten / Eingabefakten
[f] neue Fakten / Eingabefakten

Tabelle 4.7: Kosten der Übergänge

von Fakten Inferenzen, die nur durch das Vorhandensein ebendieser Fakten möglich waren, zurückgenommen werden müssen und dadurch weitere Fakten gelöscht werden. Genausogut können aber eingegebene Fakten auch neue Ableitungen ermöglichen. Beim Übergang $1 \to 6$ ergab solche Ableitungen 29 neue Fakten, wobei die vier Eingabefakten mitgezählt sind. Auch bei den beiden anderen Übergängen $6 \to 9$ und $1 \to 9$ zieht die Eingabe von drei bzw. vier Fakten ein Vielfaches an gelöschten und neuen Fakten nach sich (siehe Tabelle 4.7).

Dieser Einfluß von Eingabefakten auf die vorhandene Faktenmenge durch inferentielle Beziehungen soll durch die Maße *Auswirkung*, *Löschung* und *Erneuerung* erfaßt werden. Die Auswirkung, d.h. die Anzahl der Behandlungen pro Eingabefakten, ist beim Übergang $1 \to 6$ am höchsten, gefolgt von den Auswirkungen der Übergänge $6 \to 9$ und $1 \to 9$. Die gleiche Reihenfolge ergibt sich deutlich bei der Löschung (Anzahl gelöschter Fakten pro Eingabefakten) und weniger deutlich bei der Erneuerung (Anzahl neuer Fakten pro Eingabefakten). Das deutet darauf hin, daß der Übergang vom initialen Modell 1 zum synthetischen Modell 6 viel schwieriger ist als der anschließende Übergang vom synthetischen Modell 6 zum wissenschaftlichen Modell 9. Dies scheint plausibel, denn bei dem ersten Übergang muß das Bild von der Erde komplett revidiert werden. Dadurch erst wird der Übergang von einer unbeweglichen Erde hin zu einer sich bewegenden Erde, wie im zweiten Übergang, überhaupt möglich.

Bei der Untersuchung der Übergänge wurden allein Fakten für Prädikate der unteren Topologieebenen eingegeben (vgl. Abbildung 3.14 auf Seite 59). Doch die Agenden zeigen auch Widersprüche zwischen Fakten höherer Topologieebenen, z.B. Widersprüche zwischen `between`–Fakten (siehe Abbildungen 4.5 bis 4.7 auf den Seiten 91 bis 92). Es ist durchaus möglich, einen Übergang von Modell 1 zu Modell 6 durch die Fakten

```
not(opaque(cloud)).

hides(sun,earth,me,event0).

unhides(sun,earth,me,event1).

revolves_cw(sun,earth,event0).

revolves_cw(sun,earth,event1).
```

zu bekommen. Fraglich ist nur, wie dieser Übergang zu werten ist, denn es entsteht ein Modell mit einem Ableitungsbaum von wesentlich geringerer Tiefe als in den anderen Modellen.

Die Eingabe zusätzlicher Fakten für einen weiteren Beobachter auf der anderen Seite der Erde, wie sie in Abschnitt 3.4 vorgeschlagen wurde, führt übrigens in den synthetischen und dem wissenschaftlichen Modell zu Ableitungen von `day`–, `night`– und `day_night_cycle`–Fakten mit einer Phasenverschiebung, die genau den Erwartungen entspricht. Während es für den Beobachter (`me`) auf dieser Seite der Erde Tag ist

```
day(me,state0).

night(me,state1).

day_night_cycle(me,state0,event0,state1,event1).
```

ist es für den Beobachter (`him`) auf der anderen Seite der Erde Nacht

```
day(him,state1).

night(him,state0).

day_night_cycle(him,state1,event1,state0,event0).
```

und umgekehrt.

Bei den initialen Modellen treten Widersprüche zwischen den vorhandenen und den zusätzlichen Fakten auf, so daß für den Beobachter auf der anderen Seite der Erde keine Fakten für `day`, `night` oder `day_night_cycle` abgeleitet werden. Modell 3 (*Die Sonne geht hinter Hügel.*) kann jedoch als Versuch aufgefaßt werden, das Phänomen *Tag hier und Nacht woanders.* zu erklären, ohne die Vorstellung von einer festen unendlichen Erde aufgeben zu müssen (vgl. Fakten von Modell 3 in Anhang A.3.4). Ein zweiter Beobachter `her` auf dieser Seite der Erde

```
in(her,up,earth,state0).

in(her,up,earth,event0).

in(her,up,earth,state1).

in(her,up,earth,event1).
```

aber jenseits der Hügel

```
in(her,right,hill,state0).
in(her,right,hill,event0).
in(her,right,hill,state1).
in(her,right,hill,event1).
```

hat Nacht, wenn hier Tag ist

```
day(her,state1).
night(her,state0).
day_night_cycle(her,state1,event1,state0,event0).
```

In Modell 3 wird also die Region `up` der Erde in die Regionen `left` und `right` der Hügel aufgeteilt, so daß auch hier eine Erklärung für *Tag hier und Nacht woanders.* möglich wird. Auf diesen Punkt wird in Kapitel 5 noch einmal eingegangen.

Kapitel 5

Diskussion

Sometimes the snow comes down in June,
Sometimes the sun goes round the moon.

Vanessa Williams, „Save the best for last“

In dieser Arbeit wurde dargestellt, wie verschiedene Erklärungen für den Tag/Nachtzyklus als operationale Modelle repräsentiert und zur Durchführung von Experimente verwendet wurden. Als Grundlage des Modellierungsprozesses fanden die Ergebnisse einer entwicklungspsychologischen Studie Verwendung, in der 60 Kinder nach ihren Vorstellungen von den Himmelskörper und dem Wechsel von Tag und Nacht befragt wurden (Kapitel 2). Die Erklärungen der Kinder wurden als prädikatenlogische operationale Modelle mit dem System MOBAL repräsentiert (Kapitel 3). Anschließend wurden den operationalen Modellen die gleichen Fragen wie den Kindern gestellt und die Übergänge zu anderen Modellen aufgrund neuer, widersprüchlicher Informationen systematisch untersucht (Kapitel 4).

Die Modelle wurden entwickelt im Spannungsfeld dreier einflußreicher Faktoren. Die Modelle sollten möglichst viele relevante Beziehungen zwischen den Begriffen bei tolerierbaren Rechenzeiten repräsentieren (*Effizienz*). Sie sollten verständliche und vergleichbare Antworten auf die Fragen nach dem Verschwinden der Sonne in der Nacht geben (*Beobachtungsadäquatheit*). Sie sollten ähnliche Erklärungen für den Tag/Nachtzyklus liefern können und unter dem Einfluß wissenschaftlicher Informationen Übergänge vollziehen wie bei den Kindern vermutet (*Beschreibungsadäquatheit*). Die Entwicklung der Modelle ist gekennzeichnet durch eine inkrementelle zyklische Annäherung an diese Faktoren, unterstützt durch ein kooperierendes System.

Das Ergebnis des Modellierungsprozesses sind neun verschiedene, ausführlich dokumentierte operationale Modelle. Sie bilden die formalisierte Darstellung eines Lernprozesses und stellen eine explizite Diskussionsgrundlage und eine reale Ausgangsbasis für weitere Untersuchungen dar. Der Modellierungsprozeß hat weiterhin Erkenntnisse zutage gefördert, die über einen Transfer hinausgehen, und die notwendige Klarheit für eine anschauliche Präsentation relevanter Aspekte geschaffen. Einige dieser relevanten

Aspekte sollen in diesem Kapitel noch einmal durchleuchtet und mit konstruktiver Kritik versehen werden.

Abschnitt 5.1 Aspekte menschlichen Lernens Es werden Implikationen beschrieben, die sich aus den operationalen Modellen für die Untersuchung menschlichen Lernens ergeben können.

Abschnitt 5.2 Aspekte maschinellen Lernens Mögliche Auswirkungen auf die maschinelle Repräsentation menschlichen Lernens werden dargestellt.

Abschnitt 5.3 Zusammenfassung Ein Überblick über die wichtigsten Punkte als Ausblick.

5.1 Aspekte menschlichen Lernens

Das Ziel dieser Arbeit war es, ein wenig zum Vergleich von menschlichem und maschinellem Lernen beizutragen (vgl. Kapitel 1). Nachdem nun der Weg von der Untersuchung eines natürlichen Lernvorgangs bis hin zu einer formalen Modellierung und deren Auswertung einmal vollständig durchlaufen wurde, ist es an der Zeit, nach Implikationen für die Untersuchung menschlichen Lernens zu fragen.

Bei der Modellierung der kindlichen Erklärungen durch Fakten, Regeln und Bedingungen war es des öfteren nötig, fehlende Informationen durch plausible Vermutungen zu ersetzen, um zu der Ableitung eines Tag/Nachtzyklus zu gelangen. Dies führte an einigen Stellen zu einer höheren Genauigkeit und zu einer feineren Körnung der Repräsentation im Vergleich zur Vorlage. Auch wenn die eingesetzten Vermutungen plausibel erscheinen, sollten sie doch durch geeignete Untersuchungen validiert werden. Vorschläge dafür werden in Abschnitt 5.1.1 gemacht.

Mit der Untersuchung alternativer Vorstellungen bei Kindern und Erwachsenen wird von Fachdidaktikern auch ganz entschieden die Verbesserung von Unterrichtssituationen verfolgt, um Lernprobleme im praktischen Umfeld zu mindern. Denn es erweist sich oft als schwierig, Schüler von ihren individuellen Vorstellungen zu den wissenschaftlichen zu führen. Denn individuelle Vorstellungen können hartnäckig sein und sich als resistent gegenüber offensichtlicher empirischer Gegenevidenz zeigen, wenn sie sich erst einmal bewährt haben. Mit dem Problem der Wissensvermittlung beschäftigt sich Abschnitt 5.1.2.

5.1.1 Validierung

In Abschnitt 4.1.1 wurde gezeigt, daß die operationalen Modelle auf die Fragen „Bewegt sich die Erde?“ und „Bewegt sich die Sonne?“ nicht nur mit „Ja.“ oder „Nein.“ antworten, sondern daß sie ihre Antworten differenzieren nach den verschiedenen Zeiten. Sie geben also Antworten wie „Ja, bei den Ereignissen `event0` und `event1`.“ und „Nein, in den Zuständen `state0` und `state1`.“. Diese Detailliertheit ergab sich aus der formalen Darstellung der kindlichen Erklärungen. Es wäre nun auch interessant, Kinder noch einmal nach diesen Details zu fragen. So könnte man z.B. als Ergänzung zur Frage 4 („Bewegt sich die Sonne?“) die folgenden Fragen stellen (vgl. Seite 83):

Frage 4′ „Bewegt sich die Sonne in der Nacht?“

Frage 4″ „Bleibt die Sonne in der Nacht stehen?“

Frage 4‴ „Bewegt sich die Sonne am Tag?“

Frage 4⁗ „Bleibt die Sonne am Tag stehen?“

Doch nicht nur die Granularität der zeitlichen, sondern auch die der räumlichen Repräsentation sollte Anlaß für weitere Untersuchungen sein (vgl. [Bialystok and Olson, 1987, Forbus, 1983, Heth and Cornell, 1983]).

Bei der Darstellung der Konstellationen der Himmelskörper in den Modellen hat sich die Aufteilung des Raumes in vier Regionen (*areas*) als optimal zur Beschreibung aller relevanten Details des Tag/Nachtzyklus erwiesen (siehe Abschnitt 3.2.1). Inwieweit stimmt diese formale Repräsentation mit den Vorstellungen der Kinder überein? Um dies zu untersuchen, ist die Revalidierung der formalen Modelle für den Tag/Nachtzyklus notwendig und darüberhinaus die Validierung der zeitlichen und räumlichen Repräsentation bei Vorstellungen in anderen Sachbereichen, in denen Phänomene des Verschwindens und Erscheinens auftreten (vgl. Abschnitt 2.4.5). Dabei wird sich herausstellen, ob die Repräsentation von Raum und Zeit tatsächlich alle relevanten Aspekte der Erklärungen für den Tag/Nachtzyklus darstellen kann und ob sie geeignet ist, auch Erklärungen für andere Phänomene des Verschwindens und Erscheinens zu erfassen.

Bei der Validierung der Modelle zum Tag/Nachtzyklus rückt besonders die räumliche Repräsentation von *unendlich*, dargestellt durch das Prädikat `infinite`, in den Vordergrund. Es wird u.a. definiert durch die Regel

```
infinite(O,A) & next_event(S,E) → in(O,A,O,S).
```

(siehe Seite 55), die in den initialen Modellen aus den Fakten

```
infinite(earth,down).

infinite(earth,left).

infinite(earth,right).
```

die Fakten

```
in(earth,down,earth,state0).

in(earth,left,earth,state0).

in(earth,right,earth,state0).
```

ableitet, und noch einige mehr, denn das Prädikat `infinite` war gerade auch deshalb eingeführt worden, um den Zusammenhang zwischen verschiedenen `in`–Fakten besser darzustellen (vgl. Abschnitte 3.3.3).

Daraus ergeben sich für die Validierung der Repräsentation, insbesondere für die Untersuchung, welche der Objekte `earth` (`ground`), `hill` und `me` jeweils den kindliche Begriff von der *Erde* ausmachen, die Fragen

Frage „Was ist unterhalb der Erde?“

Frage „Was ist links oder rechts (seitlich) von der Erde?“

Allerdings erweisen sich diese Fragen als wenig informativ, wenn sie zu Beginn eines Interviews gestellt werden. Denn dann werden sie von den meisten Kindern aus der Perspektive einer flachen und unendlichen Erde beantwortet, auch von denen mit einer synthetischen oder wissenschaftlichen Erklärung für den Tag/Nachtzyklus [Vosniadou and Brewer, 1992b, S. 544].

Anlaß zu einer genaueren Untersuchung sollte aus der Repräsentation des Phänomens *Tag hier, Nacht woanders.* erwachsen (siehe Abschnitte 3.4 und 4.3). Welche Vorstellungen sind geeignet, zu erklären, warum es an einer Stelle der Erde Tag sein kann, während an einer anderen Stelle zur gleichen Zeit Nacht ist? Man könnte die Kinder z.B. fragen, *wie* die Sonne es schafft, daß es auf der Erde Tag wird. Dadurch kann man eventuell zwischen Erklärungen unterscheiden, die sich auf das passive *Beobachten* der Sonne (`observing`) oder auf das aktive *Scheinen* der Sonne (`shining`) beziehen. Läßt man die Kinder ihre Zeichnungen (siehe Abbildungen 2.1 bis 2.3 auf den Seiten 28 bis 31) ergänzen durch bildhafte Lichtstrahlen, so kommt es zu einer Einteilung des Raumes in beleuchtete und unbeleuchtete Regionen, ähnlich der räumlichen Repräsentation in den formalen Modellen.

In Abschnitt 2.4.4 wurde argumentiert, daß zwischen wissenschaftlichen Informationen für den Tag/Nachtzyklus und wissenschaftlichen Informationen für andere astronomische Phänomene unterschieden werden sollte. So ist z.B. die Aussage *Die Erde dreht sich um die Sonne.* eine unwissenschaftliche bezüglich der Erklärung des Tag/Nachtzyklus, aber eine wissenschaftliche bezüglich der Erklärung der Jahreszeiten (vgl. Abschnitt 4.2.3). Dies wird in der formalen Repräsentation sehr deutlich, denn für den Zeitraum *ein Jahr* müßte eine völlig neue Zeit (*time*) eingeführt werden, wie z.B. `state67`:

```
revolves_cw(earth,sun,state67).
```

Dies sollte z.B. beachtet werden bei der Frage 4: „Bewegt sich die Sonne?“ (siehe oben), indem Nachfragen nach dem Zeitraum (ein Tag, ein Jahr ...) gestellt werden. Denn in der Tat, die Sonne bewegt sich, nur nicht relativ zum unserem Sonnensystem, sondern relativ zur Milchstraße (vgl. Studie 9 in Tabelle 2.2 auf Seite 16).

Ein wesentliches Merkmal der Modellierung III ist die Differenzierung von Bewegungsarten und Verdeckungsmechanismen (siehe Abschnitte 3.3.2, 4.1.2 und 4.2.2). Durch diese Trennung wird die große Bedeutung *kreisförmiger* Bewegungsarten deutlich (`revolves_cw`, `revolves_acw`, `rotates_cw`, `rotates_acw`). Dies führt zu der Frage: „Was bewegt eigentlich die Himmelskörper?“ mit dem Hintergrund der Energieerhaltung bei reibungslosen Drehbewegungen. Die Untersuchung dieser Frage wird eventuell erleichtert, wenn den Versuchspersonen Darstellungsmöglichkeiten gegeben werden, die über das Anfertigen einer Zeichnung hinausgehen. In verschiedenen anderen Studien wurden Demonstrationsobjekte wie kleine Figuren, Bälle oder Knetmasse benutzt[1] (vgl. Tabellen 2.1 bis 2.6). Denn die Analogie zwischen Himmelsköpern und Bällen ist weitverbreitet, nicht zuletzt wegen der Eigenschaft geworfener Bälle, wenigstens für kurze Augenblicke ohne die augenscheinliche Unterstützung durch andere Objekte, wie den Boden, auszukommen.

So wie durch die Bewegungsarten ergeben sich auch Fragestellungen durch die Verdeckungsmechanismen, die zum Verschwinden und Erscheinen von Objekten führen. Für das Verschwinden gibt es nämlich einige Randbedingungen, die sich in den Regeln in einer sehr einfachen Form niederschlagen (vgl. Seite 113):

```
between(O1,O2,O3,S) & opaque(O1) & bigger(O1,O3)
    → invisible(O2,O1,O3,S).

between(O1,O2,O3,S) & opaque(O1) & bigger(O1,O3)
    → invisible(O3,O1,O2,S).
```

Die Prädikate `opaque` und `bigger` stellen Voraussetzungen für *verstecken* oder *verdecken* dar. Zu der Undurchsichtigkeit von z.B. Wolken sind die Kinder in der zugrundegelegten Studie [Vosniadou and Brewer, 1994] nicht befragt worden, und zu den Größenverhältnissen im Weltraum nur im Zusammenhang mit einer anderen Studie (siehe Tabelle 5.1), so daß sich keine direkten Verbindungen zu den Erklärungen für den Tag/Nachtzyklus herstellen lassen. Doch zumindest die Zeichnungen der Kinder in den Abbildungen 2.1 bis 2.3 auf den Seiten 28 bis 31 lassen unterschiedliche Vorstellungen von den Größenverhältnissen zwischen Sonne und Erde auch bei den Erklärung für den Tag/Nachtzyklus erahnen. Aufgrund der fehlenden Informationen sind die `bigger`–Fakten erstmal in allen neun Modellen identisch (vgl. Abschnitt 3.2.4 und Tabelle 3.3 auf Seite 64).

Die Übergänge, die bei den Experimenten mit den operationalen Modellen in Abschnitt 4.2.3 gefunden wurden, stellen eine Hypothese für Lerntrajektorien dar (siehe auch Abschnitt 1.1), die über die Klassifikation initiale Modelle, synthetische Modelle und wissenschaftliches Modelles hinausgehen. Sie bedürfen einer empirischen Validierung. Dazu sollte geprüft werden, ob nicht diese Lerntrajektorien durch geeignete Längsschnittstudien untersucht werden können. In der Längsschnittstudie von Nussbaum und Novak [Nussbaum and Novak, 1976], die Anfang des Abschnitts 2.1 vorgestellt wurde, konnten zwar keine signifikanten Unterschiede bei den Vorstellungen der Kinder von der Erde vor und nach einer audio–tutoriellen Unterrichtsserie zu diesem Thema festgestellt werden. Allerdings war diese

[1] Vielleicht könnte man auch, und zwar gerade bei Kindern, realistische Computeranimationen einsetzen, so daß die Übertragungsleistung Knetmasse/Erde entfällt.

	erste Klasse	dritte Klasse	fünfte Klasse
Erde	75 %	27 %	13 %
Sonne	19 %	53 %	50 %
Mond	0 %	13 %	37 %
Sterne	6 %	7 %	0 %

Tabelle 5.1: Frage „Wer (was) ist am größten: die Erde, die Sonne, der Mond oder die Sterne?“ (*„Which is the biggest: the earth, the sun, the moon, or the stars?“*) [Vosniadou, 1991a]

Unterrichtsserie nur sehr kurz und spiegelt nicht die Erfahrung der beiden Autoren mit dieser Art Untersuchung in anderen Sachbereichen wieder.

Der Ausdehnung solch einer Längsschnittstudie auf einen wesentlich längeren Zeitraum bis hin zu einigen Jahren steht natürlich deren erheblicher Aufwand entgegen. Auch sollte man nicht den Einfluß der Befragung selbst auf die auf die Ergebnisse übersehen, der in Längsschnittstudien wegen der Wiederholungen größer ausfällt als in Querschnittstudien. Es sollte jedoch zumindest überlegt werden, ob nicht Kinder eines höheren Alters, wie z.B. in den Studien von Baxter und Sadler (siehe Einträge 2 und 19 in den Tabelle 2.1 und 2.4) [Baxter, 1989, Sadler, 1987], befragt werden sollten, um so eventuell den Anteil schlüssiger Erklärungen zu erhöhen (vgl. Abschnitt 2.3.2). Auch wäre es in diesem Zusammenhang einmal interessant, die Auswirkungen der Umgangssprache auf die kindlichen Vorstellungen und ihre verbalen Äußerungen zu untersuchen, denn Sätze wie „Die Sonne geht auf.“ oder „Die Sonne geht unter.“, in denen sich die initialen Modelle widerspiegeln, legen die Vermutung nahe, die Bewegung der Sonne spiele eine wesentliche Rolle beim Tag/Nachtzyklus.

5.1.2 Wissensvermittlung

The most important single factor influencing learning is what the learner already knows. Ascertain this and teach him accordingly.

[Ausubel et al., 1978]

Die Einsicht in das Vorhandensein individueller, alternativer Vorstellungen bringt Konsequenzen für die Ausbildung von Menschen mit sich. Neben dem Versuch, Schülern ein metakognitives Verständnis, d.h. eine Vorstellung von den eigenen Lernprozessen, zu vermitteln (vgl. [Wellman, 1990]), und der Betonung, daß wissenschaftliche Erkenntnisse keine ewigen Wahrheiten sind, sondern einem Revisionsprozeß duch neue empirische Evidenz und theoretische Einsichten unterliegen (vgl. Abschnitt 1.1.2), kommen Lehrstrategien zum Zuge, die explizit auf alternative Vorstellungen eingehen, indem sie Widersprüche zwischen wissenschaftlichen und individuellen Erklärungen deutlich machen (vgl. [Duit, 1991]).

Im praktischen Unterricht zeigt sich jedoch oft eine gewisse Robustheit der alternativer Vorstellungen. Sie beruht sicherlich auf einer generellen emotionalen Resistenz gegenüber dem Neuen [Hashweh, 1986], und diese führt in Kooperation mit individuellen Vorstellungen zu einer Ignoranz gegenüber Widersprüchen. So berichten z.B. Gunstone und White von einer Unterrichtssituation, in der durch einen eigens konstruierten Versuchsaufbau bei Schülern mit alternativen Vorstellungen über die Gravitation ein kognitiver Konflikt hervorgerufen werden sollte (siehe auch Eintrag 5 in Tabelle 2.1 auf Seite 15) [Gunstone and White, 1981]. Doch auch offensichtliche empirische Evidenz konnte einige Schüler nicht überzeugen, und sie argumentierten mit besonderen Eigenheiten des Versuchsaufbaus.

Allerdings führt die varierte Wiederholungen von Gegenevidenz in Verbindung mit der Darbietung der wissenschaftlichen Erklärung häufig zu einem Umdenken. Lightman und Sadler berichten z.B. von einer Unterrichtsreihe, in der ein Wetterballon mit vier Meter Durchmesser eine zentrale Rolle einnahm [Lightman and Sadler, 1988]. In verschiedenen Experimenten gewannen die Kinder nach und nach ein Verständnis dafür, daß runde Objekte, wie z.B. die Erde, auch flach *aussehen* können, wenn sie nur groß genug sind und man nah genug herangeht. Da die Wiederholungsrate individuell verschieden und abhängig von den alternativen Vorstellungen ist, bietet es sich an, den üblichen Frontalunterricht zu ergänzen durch benutzersensitive Lernprogramme auf Computern. Bei der Entwicklung solcher tutoriellen Systeme könnten formal repräsentierte alternative Vorstellungen hilfreich sein zur Benutzermodellierung und zur Erstellung geeigneter Mensch/Maschine–Schnittstellen.

Lehrer sollten sich bewußt machen, daß die Antworten der Schüler in Relation zu ihren individuellen Vorstellungen interpretiert werden müssen [Duit, 1991]. Operationale Modelle können helfen, bei Lehrpersonen ein Verständnis für die alternativen Schülervorstellungen zu erwecken, gerade auch durch die Möglichkeit, die eigenen Vorstellungen als neue Informationen den Modellen hinzuzufügen und deren Reaktion beobachten zu können. Denn nicht jede wissenschaftliche Information löst bei jeder alternativen Vorstellungen die gleichen Widersprüche aus (vgl. Abschnitt 4.2). Vosniadou zeigt z.B. anhand eines Auszuges aus einem Lehrbuch, der bei Kindern mit der initialen Vorstellung von einer flachen Erde einen kognitiven Konflikt auslösen soll, daß nicht immer ein Widerspruch zu diesen initialen Vorstellungen hervorgerufen wird. Die Nichtbeachtung dieser Abhängigkeiten kann dazu führen, daß Lehrpersonen sich überrrascht und *schockiert* über die „wilden“ Ansichten ihrer eigenen Schüler zeigen (vgl. Eintrag 19 in Tabelle 2.7 auf Seite 23) [Sadler, 1987].

5.2 Aspekte maschinellen Lernens

Die in Kapitel 3 vorgestellte formale Repräsentation der kindlichen Erklärungen zum Tag/Nachtzyklus ist natürlich nicht die einzig mögliche und kann nur ein erster Vorstoß sein zur umfassenden Darstellung individueller

Lernprozesse in der Astronomie. Nichtsdestotrotz bildet sie eine lauffähige Modellierung, die ergänzt und verfeinert werden kann.

Die Repräsentation räumlichen Schließens hatte bei der Modellierung der kindlichen Erklärungen einen hohen Stellenwert und gibt in Abschnitt 5.2.1 Anlaß zu einem Ausblick auf denkbare Erweiterungen der Repräsentation. Die offensichtlichen Gemeinsamkeiten zwischen dem Begriff des Verschwindens in den Erklärungen zum Tag/Nachtzyklus und in Erklärungen zu alltäglichen Phänomenen ist Thema des Abschnitts 5.2.2. Und schließlich bringt die intensive Arbeit mit dem Modellierungssystem MOBAL Vorschläge zu dessen Erweiterung mit sich, die in Abschnitt 5.2.3 erläutert werden.

Um zu allgemeingültigeren Aussagen durch die operationale Darstellung menschlichen Lernens zu gelangen, ist es sicherlich noch notwendig, die Entwicklung individueller Erkärungen in anderen Sachbereichen zu modellieren. Hier bieten sich Untersuchungen von Schülervorstellungen in der Mechanik (Kraft, Bewegung, Arbeit, Energie, Beschleunigung, Geschwindigkeit ...) oder in der Optik (Licht, Lichtausbreitung, Sehen ...) an (siehe [Pfundt and Duit, 1991]), da sie in Zusammenhang stehen mit Aspekten der Erklärungen zum Tag/Nachtzyklus. Sogar die Untersuchung individueller Vorstellungen in der Teilchenphysik (Struktur der Materie, Atomvorstellungen, Radioaktivität) könnte zu interessanten Ergebnissen führen, denn im Unterricht wird bei der Erklärung des Bohr'schen Atommodells gerne die Analogie zu *Planetenbewegungen im Sonnensystem* gebraucht.

5.2.1 Räumliches Schließen

In Abschnitt 3.3.1 wurde beschrieben, wie sich die räumlichen Objektkonstellationen beim Tag/Nachtzyklus entweder durch die dreistelligen Prädikate

```
up/3:  <object>,<object>,<time>.

down/3:  <object>,<object>,<time>.

left/3:  <object>,<object>,<time>.

right/3:  <object>,<object>,<time>.

front/3:  <object>,<object>,<time>.

back/3:  <object>,<object>,<time>.
```

oder durch das vierstelligen Prädikats

```
in/4:  <object>,<area>,<object>,<time>.
```

darstellen lassen, wobei das Prädikat `in` eine größere Ausdrucksmöglichkeiten bietet als alle sechs Prädikate `up`, `down`, `left`, `right`, `front` und `back` zusammen. Die Beziehungen zwischen den dreistelligen Prädikaten und dem vierstelligen können durch die Regeln

```
up(O1,O2,T) → in(O1,up,O2,T).
```

```
down(O1,O2,T) → in(O1,down,O2,T).

left(O1,O2,T) → in(O1,left,O2,T).

right(O1,O2,T) → in(O1,right,O2,T).

front(O1,O2,T) → in(O1,front,O2,T).

back(O1,O2,T) → in(O1,back,O2,T).
```

repräsentiert werden. Die kleingeschriebenen `up`, `down`, `left`, `right`, `front` und `back` in den Konklusionen sind Konstante, so daß aus

```
up(sun,earth,state0).
```

abgeleitet wird

```
in(sun,up,earth,state0).
```

In gleicher Weise lassen sich Regeln für die Ableitung in Gegenrichtung aufstellen

```
in(O1,up,O2,T) → up(O1,O2,T).

in(O1,down,O2,T) → down(O1,O2,T).

in(O1,left,O2,T) → left(O1,O2,T).

in(O1,right,O2,T) → right(O1,O2,T).

in(O1,front,O2,T) → front(O1,O2,T).

in(O1,back,O2,T) → back(O1,O2,T).
```

Darüberhinaus sind auch zweistellige Prädikate wie

```
up/2:  <object>,<time>.

down/2:  <object>,<time>.
```

möglich, die Objektpositionen nicht *relativ* zu einem anderen Objekt, sondern *absolut* angeben. Und tatsächlich gibt es Hinweise darauf, daß beim Erlernen der wissenschaftlichen Erklärung für den Tag/Nachtzyklus auch ein Übergang von absoluten zu relationalen Raumvorstellungen notwendig ist:

> *The idea that up–down directions are not* absolute*, pointing to "space's bottom", but are determined by the Earth's centre as the frame of reference, is central to the scientific conception.*
>
> [Nussbaum, 1985, S. 172]

Die zweistelligen Prädikate können so verstanden werden, daß sie implizit die Erde als Bezugssystem (*frame of reference*) verwenden, und zwar hauptsächlich mit der Vorstellung von der Erde als unendlicher Boden (*ground*) (vgl. Seite 44). Die Beziehungen zu den anderen räumlichen Prädikaten lassen sich durch die Regeln

```
up(O,T) → up(O,earth,T).

down(O,T) → down(O,earth,T).

up(O,earth,T) → up(O,T).

down(O,earth,T) → down(O,T).
```

oder durch die Regeln

```
up(O,T) → in(O,up,earth,T).

down(O,T) → in(O,down,earth,T).

in(O,up,earth,T) → up(O,T).

in(O,down,earth,T) → down(O,T).
```

herstellen.

Bei der Modellierung der kindlichen Erklärungen erwies es sich als sinnvoll, nur die Faktenmengen, nicht aber die Prädikat- und Regelmengen der neun Modelle zu variieren, um einen direkten Vergleich zwischen den Modellen zu ermöglichen und der Annahme zu entsprechen, daß beim Erlernen des Tag/Nachtzyklus die entsprechenden Begriffsintensionen schon vorhanden sind und sich nur die Begriffsextensionen ändern (vgl. Seite 48). Durch die Repräsentation des räumlichen Schließens ergibt sich nun eine Hypothese darfür, wie sich auch Begriffsintensionen verändern könnten:

- Es gibt einen Übergang von einer absoluten Raumvorstellung, repräsentiert durch `up/2` oder `down/2`, hin zu einer relationen Raumvorstellung, repräsentiert durch `up/3` oder `down/3` oder auch `in/4` (siehe oben).

- Es gibt einen Übergang von speziellen Regeln für z.B. `between` wie

  ```
  up(O1,O2,S) & down(O3,O2,S) & ne(O1,O2) & ne(O3,O2)
      →  between(O2,O1,O3,S).
  down(O1,O2,S) & up(O3,O2,S) & ne(O1,O2) & ne(O3,O2)
      →  between(O2,O1,O3,S).
  left(O1,O2,S) & right(O3,O2,S) & ne(O1,O2) & ne(O3,O2)
      →  between(O2,O1,O3,S).
  right(O1,O2,S) & left(O3,O2,S) & ne(O1,O2) & ne(O3,O2)
      →  between(O2,O1,O3,S).
  front(O1,O2,S) & back(O3,O2,S) & ne(O1,O2) & ne(O3,O2)
      →  between(O2,O1,O3,S).
  back(O1,O2,S) & front(O3,O2,S) & ne(O1,O2) & ne(O3,O2)
      →  between(O2,O1,O3,S).
  ```

  hin zu generelleren Regeln wie

  ```
  in(O1,A1,O2,S) & in(O3,A2,O2,S) & complementary(A1,A2)
      & ne(O1,O2) & ne(O3,O2) → between(O2,O1,O3,S).
  ```

  (siehe Abschnitt 3.3.1).

Damit hätten die initialen Modelle zwar nicht weniger Fakten (vgl. Abschnitt 3.2.4), sie hätten jedoch mehr Fakten mit geringerer Stelligkeit. Zu den Übergängen von den initialen zun den synthetischen Modellen und zum wissenschaftlichen Modell durch neue Fakten, wie sie in Abschnitt 4.2 dargestellt wurden, käme das Erlernen der Regeln für die Beziehungen zwischen absoluten und relativen Raumkonstellationen und der allgemeineren Regeln für z.B. *dazwischen*. Die initialen Modelle in Modellierung III stellten somit die Repräsentation der initialen Erklärungen aus der Sicht der wissenschaftlichen Erklärung dar und unterschieden sich von den initialen Erklärungen ohne Sicht auf die wissenschaftiche. Das hieße, beim Erlernen der wissenschaftlichen Erklärung für den Tag/Nachtzyklus gäbe es neben der schwachen auch eine starke Restrukturierung (vgl. Abschnitt 1.1.1).

Sinnvoll für die räumlichen Repräsentation wären nicht nur Prädikate mit einer reduzierten Stelligkeit, es gibt auch gute Gründe für eine Höherdimensionierung. In den Agenden mit den Widersprüche in Abschnitt 4.2.1 und in den Kriterien zur Charakterisierung der Modelle in Abschnitt 4.2.2 zeigten sich durch die explizite Unterscheidung zwischen den Regionen `left` und `right` Achsensymmetrien, die mit dem Prädikat `in/4` nicht hinreichend beschrieben werden können. Es sollte also dargestellt werden können, daß eine Drehung „im Uhrzeigersinn“ aus der entgegengesetzten Perspektive einen Drehung „entgegen dem Uhrzeigersinn“ ist. Das kann durch ein fünfstelliges Prädikat

```
in/5:  <object>,<area>,<object>,<area>,<time>.
```

erreicht werden, wobei die zusätzliche Argumentenstelle eine Perspektive angibt. Das Faktum

```
in(sun,left,earth,front,event0).
```

könnte z.B. bedeuten, daß sich die Sonne links von der Erde befindet aus der Vorderperspektive. Durch die Symmetrieregel

```
in(O1,A1,O2,A2,T) & complementary(A1,A3) & complementary(A2,A4)
     → in(O1,A3,O2,A4,T).
```

wird das Faktum

```
in(sun,right,earth,back,event0).
```

abgeleitet, d.h. daß sich aus der Rückperspektive die Sonne zur gleichen Zeit rechts von der Erde befindet.

Unterschiedliche Stelligkeiten von Raumprädikaten lassen sich nicht nur innerhalb der Modelle finden, sondern auch außerhalb bei der Darstellung verbaler Kommunikation zum Tag/Nachtzyklus. So gibt es für das Wort „rund“ zwei mögliche Interpretationen, nämlich *rund wie ein Kreis* oder *rund wie eine Kugel*. Dieser Unterschied kann repräsentiert werden durch die beiden Prädikate

```
round/3:  <object>,<area>,<area>.

round/4:  <object>,<area>,<area>,<area>.
```

wobei für die Argumente mit der Sorte `<area>` orthogonale Regionen eingesetzt werden. Nun läßt sich darstellen, wie die wissenschaftliche Information „Die Erde ist rund.“ mißverstanden durch

```
round(earth,right,back).
```

und nicht durch

```
round(earth,right,back,up).
```

beschrieben wird. Die Repräsentation des räumlichen Schließens mit dem System MOBAL stößt allerdings wegen des prädikatenlogischen Repräsentationsformalismus und der weitläufigen Propagierung von Änderungen (vgl. Abschnitt 1.2.1) schnell an ihre Grenzen.

Für die Verarbeitung räumlichen Wissens sind besondere Formalismen entwickelt worden (für einen Überblick siehe [Habel et al., 1993] oder [Freksa and Habel, 1987] für eine kognitionswissenschaftliche Ausrichtung). Erste Ansätze zum räumlichen Schließen ergaben sich aus Arbeiten zum qualitativen zeitlichen Schließen [Allen, 1984], die zur Verarbeitung räumlicher Relationen erweitert wurden [Guesgen, 1989]. Ein kleines Inventar an Basisrelationen hält dabei den Rechenaufwand in Grenzen. Einen stärkeren Bezug zu kognitiven Raumvorstellungen haben Formalismen, die topologische Beziehungen und Orientierungen als Basisrelationen verwenden, welche durch Bezugssysteme überlagert werden [Hernández, 1992]. Die Orientierungrelationen ähneln sehr der hier verwendeten Raumrepräsentation durch das Prädikat `in`, von den topologischen Relationen ist hier allerdings nur die Tangentialbeziehung (*tangency*) durch das Prädikat `on` vertreten.

Bei der natürlichsprachlichen Kommunikation ergibt sich die Wahl eines Bezugssystems häufig aus der intrinsischen, deiktischen oder extrinsischen Verwendung räumlicher Präpositionen [Retz-Schmidt, 1988]. Die intrinsische Orientierung der Erde in den initialen Modellen durch `up/2` und `down/2`, weiter oben auch als absolut bezeichnet, wird in den syntethischen Modellen und dem wissenschaftlichen Modell durch eine extrinsische Orientierung durch die Prädikate `up/3`, `down/3` oder `in/4` und den Beziehungen zu einem Beobachter `me` ersetzt. Bei der Befragung kommt noch eine deiktische Orientierung zur gezeichneten Erde hinzu. Doch auch die wissenschaftliche Erde bekommt eine intrinsische Orientierungrelation durch ihr Magnetfeld, nun jedoch nicht mehr mit „oben“, „unten“, „rechts“ und „links“ bezeichnet, sondern mit „Norden“, „Süden“, „Westen“ und „Osten“ (vgl. [Yong, 1993]).

5.2.2 Alternative Schlußweisen

Das zentrale Prinzip der Erklärungen für den Tag/Nachtzyklus, das Verschwinden und Erscheinen von Objekten, ist schon für sehr junge Kinder ein geläufiges und aus dem alltäglichen Leben bekanntes Phänomen (Abschnitt 2.4.5). Die in dieser Arbeit vorgestellte Repräsentationssprache ist in der Lage, auch Fakten über alltägliche Situationen des Verschwindens und Erscheinens darzustellen und weitere Fakten daraus abzuleiten (Abschnitt 3.4).

```
opaque(tim).
opaque(pam).
opaque(wall).

solid(tim).
solid(pam).
solid(wall).

stationary(tim,1214).
not(stationary(tim,1215)).
stationary(tim,1216).
stationary(pam,1214).
stationary(pam,1215)).
stationary(pam,1216).
stationary(wall,1214).
stationary(wall,1215)).
stationary(wall,1216).

bigger(wall,tim).
bigger(wall,pam).

next_event(1214,1215).
next_state(1215,1216).
```

```
observing(pam).

in(tim,front,pam,1214).
in(tim,left,pam,1215).
in(tim,left,pam,1216).
in(pam,front,tim,1214).
in(pam,front,tim,1215).
in(pam,front,tim,1216).

in(wall,left,pam,1214).
in(wall,left,pam,1215).
in(wall,left,pam,1216).
in(pam,front,wall,1214).
in(pam,front,wall,1215).
in(pam,front,wall,1216).

in(wall,front,tim,1214).
in(wall,front,tim,1215).
in(wall,front,tim,1216).
in(tim,right,wall,1214).
in(tim,back,wall,1215).
in(tim,back,wall,1216).
```

Tabelle 5.2: Fakten für eine alltägliche Situation des Verschwindens

In Tabelle 5.2 sind Fakten zur Beschreibung einer alltäglichen Situation aufgelistet, in der Tim sich um 12^{15} Uhr hinter einer Mauer vor Pam versteckt (vgl. Seite 76). Diese Fakten führen zusammen mit den Regeln aus Abschnitt 3.2.2 zur Ableitung von

```
hides(tim,wall,pam,1215).

disappears(tim,pam,1215).
```

Das zweite Faktum drückt aus, daß Tim um 12^{15} Uhr aus Sicht von Pam verschwindet.

Man kann nun sich vorstellen, daß die Regeln zur Beschreibung des Verschwindens und Erscheinens von Objekten beim Tag/Nachtzyklus aus sehr vielen verschiedenen alltäglichen Situationen des Versteckens oder Verdeckens gelernt werden. Dies läßt sich darstellen durch die Anwendung eines induktiven Schlusses, bei dem aus Fakten, die Beispiele für solche Situationen darstellen, Regeln gelernt werden (vgl. [Holland et al., 1987]). Dieses Regeln können dann, instantiiert mit den Fakten, die den Tag/Nachtzyklus beschreiben, verwendet werden (siehe Abbildung 5.1). Dadurch entsteht einen Analogie zwischen bestimmten alltäglichen Situationen, die Fälle für Verschwinden und Erscheinen sind, und einer Erklärung für den Wechsel von Tag und Nacht (vgl. [Vosniadou, 1989a]).

Es kann allerdings sein, wie in Abbildung 5.1 angedeutet, daß die Beschreibung der astronomischen Situation nicht ausreicht, alle Prämissen der

Regeln so zu instantiieren, daß Fakten für die Prädikate `disappears`, `appears` und `reappears` abgeleitet werden. Um dennoch zu einer Erklärung für den Tag/Nachtzyklus zu gelangen, ist es denkbar, daß zweckgerichtet unvollständige Informationen durch plausible Annahmen so ergänzt werden, daß sich die Ableitung eines Faktums für `day_night_cycle` ergibt. Da es sich hierbei um Annahmen handelt, sollte es für diese Fakten eher möglich sein, bei später auftretenden Widersprüchen in einer Revision durch neue Fakten ersetzt zu werden.

Durch eine differenziertere Vergabe von Evidenzpunkten über die Werte `[1000,0]`, `[0,1000]`, `[1000,1000]` und `[0,0]` hinaus, welche den Wahrheitswerten `true`, `false`, `both` bzw. `unknown` entsprechen (siehe Abschnitt 1.2.1), können Fakten und Annahmen verschieden gewichten werden. So kommt es zu einer Repräsentation von *Glaubwürdigkeit*, die auch auf den Unterschied zwischen persönlichen Beobachtungen und Mitteilungen von Informationen durch andere Personen, möglicherweise differenziert nach deren individuelle Autorität, ausgedehnt werden kann.

Im Gegensatz zu verschiedenen Verfahren zum induktiven Schließen enthält das System MOBAL kein Verfahren zur Vervollständigung von Ableitungen durch abduktives Schließen. Mit einem abduktiven Verfahren ließen sich jedoch weitere Übergänge zwischen den operationalen Modellen realisieren. So kam z.B. der Übergang von Modell 1 zu Modell 5 nicht zustande, weil die Eingabe der beiden Fakten

```
in(sun,left,earth,event0).

in(sun,left,earth,event1).
```

nicht wissenschaftlich ist, da die Sonne nicht auf der gleichen Seite aufgeht, wo sie untergegeangen ist (siehe Abschnitt 4.2.3 und Tabelle 4.4 auf Seite 101). Der Übergang 1 $\rightarrow$ 5 wird möglich, wenn nur das erste Faktum eingegeben wird und das zweite mittels Abduktion und der Heuristik „Normalerweise gehen Objekte den gleichen Weg zurück, den sie gekommen sind.“ abgeleitet wird.

5.2.3 Erweiterung des Systems

Das System MOBAL, hauptsächlich zur Wissensakquisition in technischen Sachbereichen entwickelt, hat sich als durchaus geeignet erwiesen zur kognitiven Modellierung von kindlichen Erklärungen für den Tag/Nachtzyklus. Neben der in Abschnitt 5.2.2 kognitiv begründeten Ergänzung des Systems um eine abduktive Komponente sollen in diesem Abschnitt Erweiterungen der Benutzerunterstützung bei der Modellierung (*balanced cooperative modeling*) diskutiert werden (vgl. Abschnitt 1.2.2).

Unter den für die Repräsentation der kindlichen Erklärungen wichtigen MOBAL–Komponenten waren die Inferenzmaschine zur Ableitung von Fakten und Beantwortung von Anfragen, die Prädikatenstrukturierung zur Erzeugung einer Topologie, die Wissensrevision zur Auflösung von Wider-

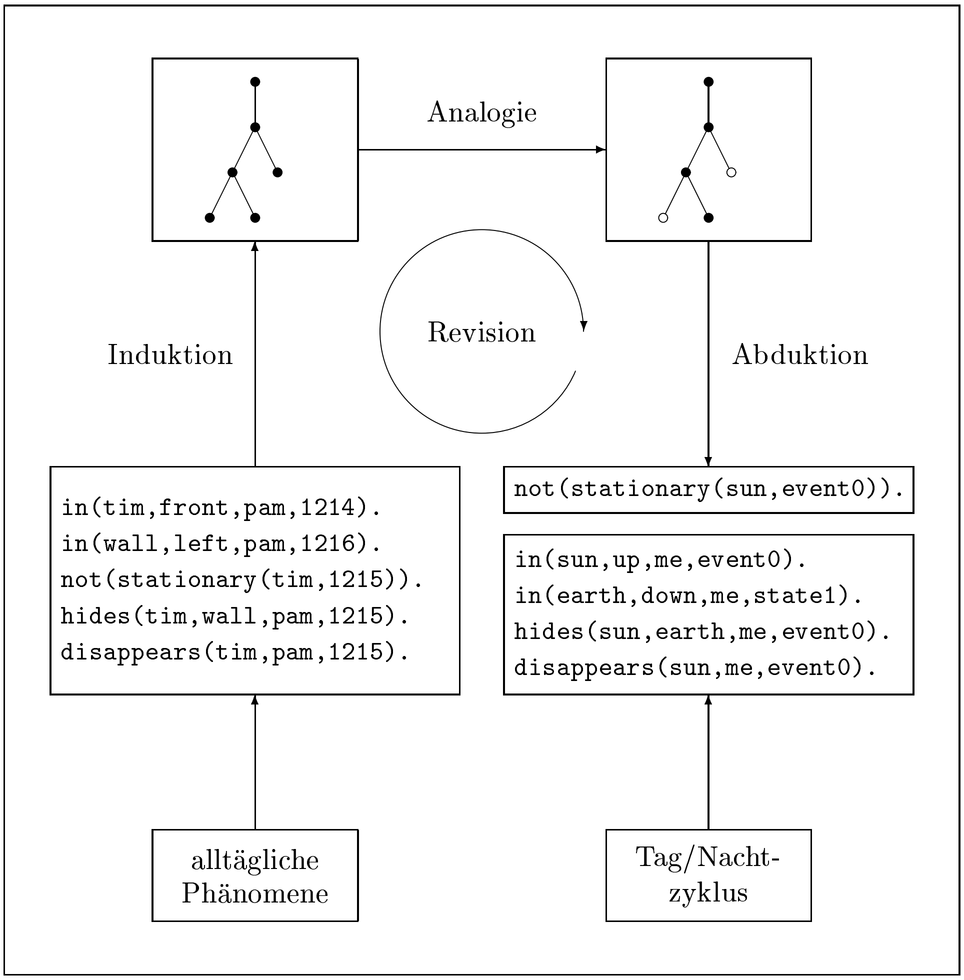


Abbildung 5.1: Schlüsse beim Erlernen einer Erklärung für den Tag/Nacht-zyklus.

sprüchen und die Bedingungsüberprüfung[2] zur Vermeidung von Zyklen in der Regelmenge. Für die Modellierung verschiedener Erklärungen für das gleiche Phänomen wäre eine zusätzliche Koordinationskomponente hilfreich, denn die *domain*–Struktur von MOBAL ist bisher auf die Verwaltung einzelner, unabhängiger Modelle ausgerichtet (vgl. Abschnitt 1.2.2).

Die Modelle zum Tag/Nachtzyklus sind durch eine gemeinsame Regelmenge und unterschiedliche Faktenmengen gekennzeichnet. Bei der inkrementellen Verbesserung der Modellierung (*sloppy modeling*) erwies es sich als umständlich, die probeweise veränderte Regelmenge eines Modelles auf ihre Konsequenzen in allen anderen Modellen zu testen. Eine offenere Handhabung der *domains* mit der Möglichkeit, bestimmte Teile eines Modelles, wie z.B. die Regelmenge, als invariant bei Ladeoperationen zu konfigurieren, könnte hier eventuell Abhilfe schaffen. So eine Konfigurationsstruktur, die noch viele weitere Systemeinstellungen wie Fensterpositionen oder -fokussierungen umfassen kann, sollte von den Modellen separierbar sein und bei Bedarf oder automatisch geladen werden können.

Zur Gewinnung von Orientierung und Überblick zweckmäßig wäre es, verschiedene Modelle gleichzeitig in die MOBAL–Wissensbasis laden zu können, wobei die Individuenkonstanten automatisch mit einem Modellindex versehen werden. Dies wäre auch hilfreich bei der Zusammenstellung von Beispielmengen zum induktiven Schließen in alltäglichen Situationen (vgl. Abschnitt 5.2.2). Die graphische Veranschaulichung von umfangreichen Ableitungen würde unterstützt durch die Möglichkeit zur Abstraktion von Regelinformationen in den Ableitungsgraphen (siehe Abbildung 4.1 auf Seite 85). Weiterhin würde die Auflistung aller Widersprüche zwischen zwei Modellen erleichtert durch die Möglichkeit, die Bearbeitung von Widersprüchen, die sich aus nichtabgeleiteten Fakten ergeben, zu verzögern und sie in der Agenda anzeigen zu lassen (siehe Abbildungen 4.5 bis 4.7 auf den Seiten 91 bis 92).

Für die systematische Durchführung von Experimenten wäre eine konfigurierbare Testumgebung sinnvoll, die neue Informationen aus einer Datei entweder im Einzelschrittmodus oder in verschiedenen Permutationen einlesen und auswerten kann. Sie sollte dabei Zwischenergebnisse bei Bedarf abspeichern und die Erstellung von Statistiken wie in Tabelle 4.7 auf Seite 106 unterstützen.

5.3 Zusammenfassung

Die kognitive Modellierung der kindlichen Erklärungen wirft Fragen auf nach einer genaueren Untersuchung der Begriffe *unendlich*, *Tag hier – Nacht woanders*, *Antrieb* und *symmetrisch* im Zusammenhang mit dem Tag/Nachtzyklus und der Begriffe *leuchtend*, *beobachtend*, *undurchsichtig* und *größer* in Erklärungen auch zu anderen Phänomenen des Verschwindens und Er-

[2]Die Bedingungsüberprüfung (*integrity constraint checker*) kam mit der Version MOBAL 2.2 hinzu und wurde durch die Modellierung der kindlichen Erklärungen für den Tag/Nachtzyklus auch auf mögliche Fehler im Programmcode getestet.

scheinens unter der differenzierteren Betrachtung wissenschaftlicher Informationen und der Verfolgung von Lerntrajektorien.

Gleichzeitig ergeben sich Fragen nach der Relativität und Effizienz der Raumrepräsentation, nach der Implementierung analoger Schlußweisen und heuristisch gestützter abduktiver Schlußweisen und der verbesserten Benutzerunterstützung durch neue Möglichkeiten zur Systemkonfigurierung und durch Testumgebungen zur systematischen Durchführung von Experimenten.

Damit haben sich durch die Modellierung eines menschlichen Lernprozesses Anregungen für psychologische Untersuchungen und Vorschläge für die Erweiterung eines Systems zum maschinellen Lernen ergeben, um wiederum die Entwicklung von Begriffsstrukturen beim Menschen etwas besser darstellen zu können. So schließt sich an dieser Stelle der Kreis.

Danksagung

Diese Arbeit enstand im Rahmen des Programms *Learning in Humans and Machines* der European Science Foundation und wurde zum Teil von der Europäischen Gemeinschaft durch ESPRIT Basic Research Action 6020 (Inductive Logic Programming) unterstützt. Ich danke Stella Vosniadou, daß sie die Ergebnisse ihrer Studie zur Verfügung gestellt hat.

Mein besonderer Dank gilt Katharina Morik. Sie hat die Grundidee dieses Vorhabens definiert, die ersten Vorstellungen dazu entwickelt und über die Inhalte häufiger mit mir diskutiert, auch unter den erschwerten Bedingungen nach der Geburt ihres Sohnes Marco. Sie hat mir die Unterstützung und Gelegenheit gegeben, mich selbstständig in ein neues Anwendungsgebiet einzuarbeiten und meine Arbeiten zu präsentieren.

Ich danke Joachim Hertzberg für die wertvollen Anregungen, die er mir zu einer früheren Version dieser Arbeit gegeben hat. Ich danke den Mitgliedern des Lehrstuhl Informatik VIII an der Universität Dortmund für die hilfreichen Diskussionen.

Ich danke den Mitgliedern des Aikikai Dortmund dafür, daß sie mir die Struktur von Lernprozessen begreifbarer gemacht haben. Ich danke Melanie Mühlenbrock, die immer an mich geglaubt hat. Ich danke Andrea Kehden für den großen Rückhalt, den sie mir gegeben hat.

Anhang A

Formale Modelle

A.1 Regeln

```
next_event(S1,E) & next_state(E,S2) → state_seq(S1,E,S2).

next_state(E1,S) & next_event(S,E2) → event_seq(E1,S,E2).

state_seq(S1,E1,S2) & state_seq(S2,E2,S1) → cycle(S1,E1,S2,E2).

infinite(O,A) & next_event(S,E) → in(O,A,O,E).

infinite(O,A) & next_event(S,E) → in(O,A,O,S).

in(O1,A1,O2,S) & in(O3,A2,O2,S) & complementary(A1,A2)
    & ne(O1,O2) & ne(O3,O2) → between(O2,O1,O3,S).

in(O1,A1,O2,S) & in(O3,A2,O2,S) & complementary(A1,A3)
    & ne(O1,O3) & ne(A2,A3) → not(between(O2,O1,O3,S)).

between(O1,O2,O3,S) & opaque(O1) & bigger(O1,O3)
    → invisible(O2,O1,O3,S).

between(O1,O2,O3,S) & opaque(O1) & bigger(O1,O3)
    → invisible(O3,O1,O2,S).

not(between(O1,O2,O3,S1)) & invisible(O2,O1,O3,S2)
    & state_seq(S1,E,S2) & not(stationary(O1,E))
    → covers(O1,O2,O3,E).

invisible(O2,O1,O3,S1) & not(between(O1,O2,O3,S2))
    & state_seq(S1,E,S2) & not(stationary(O1,E))
    → uncovers(O1,O2,O3,E).

not(between(O1,O2,O3,S1)) & invisible(O2,O1,O3,S2)
    & state_seq(S1,E,S2) & not(stationary(O3,E))
    → hides(O3,O1,O2,E).

invisible(O2,O1,O3,S1) & not(between(O1,O2,O3,S2))
    & state_seq(S1,E,S2) & not(stationary(O3,E))
    → unhides(O3,O1,O2,E).

covers(O1,O2,O3,E) → disappears(O2,O3,E).
```

```
covers(O1,O2,O3,E) → disappears(O3,O2,E).

hides(O1,O2,O3,E) → disappears(O1,O3,E).

hides(O1,O2,O3,E) → disappears(O3,O1,E).

uncovers(O1,O2,O3,E) → appears(O3,O2,E).

uncovers(O1,O2,O3,E) → appears(O2,O3,E).

unhides(O1,O2,O3,E) → appears(O1,O3,E).

unhides(O1,O2,O3,E) → appears(O3,O1,E).

disappears(O1,O2,E) & next_state(E,S) & shining(O1)
    & observing(O2) → night(O2,S).

appears(O1,O2,E) & next_state(E,S) & shining(O1)
    & observing(O2) → day(O2,S).

in(O1,A1,O2,S1) & in(O1,A2,O2,S2) & state_seq(S1,E,S2)
    & ne(A1,A2) & not(stationary(O1,E)) → moves(O1,O2,E).

in(O1,A1,O2,S1) & in(O1,A2,O2,S2) & state_seq(S1,E,S2)
    & ne(A1,A2) & not(stationary(O2,E)) → moves(O2,O1,E).

moves(O1,O2,E) & next_state(E,S2) & in(O1,A1,O2,E)
    & in(O1,A2,O2,S2) & next_area(A1,A2) → revolves_cw(O1,O2,E).

moves(O1,O2,E) & next_state(E,S2) & in(O1,A1,O2,E)
    & in(O1,A2,O2,S2) & next_area(A2,A1) → revolves_acw(O1,O2,E).

moves(O1,O2,E) & next_state(E,S2) & in(O2,A1,O1,E)
    & in(O2,A2,O1,S2) & next_area(A2,A1) → rotates_cw(O1,O2,E).

moves(O1,O2,E) & next_state(E,S2) & in(O2,A1,O1,E)
    & in(O2,A2,O1,S2) & next_area(A1,A2) → rotates_acw(O1,O2,E).

moves(O1,O2,E1) & moves(O1,O2,E2) & event_seq(E1,S,E2)
    & stationary(O1,S) → returns(O1,O2,S).

revolves_cw(O1,O2,E1) & revolves_cw(O1,O2,E2)
    & event_seq(E1,S,E2) → returns(O1,O2,S).

revolves_acw(O1,O2,E1) & revolves_acw(O1,O2,E2)
    & event_seq(E1,S,E2) → returns(O1,O2,S).

rotates_cw(O1,O2,E1) & rotates_cw(O1,O2,E2)
    & event_seq(E1,S,E2) → returns(O1,O2,S).

rotates_acw(O1,O2,E1) & rotates_acw(O1,O2,E2)
    & event_seq(E1,S,E2) → returns(O1,O2,S).

revolves_cw(O1,O2,E1) & revolves_acw(O1,O2,E2)
    & event_seq(E1,S,E2) & stationary(O1,S) → returns(O1,O2,S).

revolves_acw(O1,O2,E1) & revolves_cw(O1,O2,E2)
    & event_seq(E1,S,E2) & stationary(O1,S) → returns(O1,O2,S).
```

```
rotates_cw(O1,O2,E1) & rotates_acw(O1,O2,E2)
    & event_seq(E1,S,E2) & stationary(O1,S) → returns(O1,O2,S).

rotates_acw(O1,O2,E1) & rotates_cw(O1,O2,E2)
    & event_seq(E1,S,E2) & stationary(O1,S) → returns(O1,O2,S).

covers(O1,O2,O3,E1) & returns(O1,O2,S2) & uncovers(O1,O2,O3,E2)
    & returns(O1,O2,S1) & cycle(S1,E1,S2,E2)
    → reappears(O2,O3,E1,E2).

hides(O1,O2,O3,E1) & returns(O1,O2,S2) & unhides(O1,O2,O3,E2)
    & returns(O1,O2,S1) & cycle(S1,E1,S2,E2)
    → reappears(O1,O3,E1,E2).

hides(O1,O2,O3,E1) & returns(O1,O3,S2) & unhides(O1,O2,O3,E2)
    & returns(O1,O3,S1) & cycle(S1,E1,S2,E2)
    → reappears(O3,O1,E1,E2).

reappears(O1,O2,E1,E2) & cycle(S1,E1,S2,E2) & shining(O1)
    & observing(O2) → day_night_cycle(O2,S1,E1,S2,E2).
```

A.2 Bedingungen

```
in(O1,A1,O2,T) & in(O1,A2,O2,T) & ne(O1,O2) & ne(A1,A2) ⇝ .

in(O1,A,O1,T) & in(O2,A,O1,T) & solid(O1) & ne(O2,O1) ⇝ .

stationary(O,E) & next_state(E,S) & not(stationary(O,S)) ⇝ .

not(stationary(O,S)) & next_event(S,E) & stationary(O,E) ⇝ .

stationary(O1,T) & not(stationary(O2,T)) & on(O2,O1) ⇝ .

not(stationary(O1,T)) & stationary(O2,T) & on(O2,O1) ⇝ .

in(O,A,O,T) & not(stationary(O,T)) ⇝ .

not(in(O1,A,O2,S1)) & in(O1,A,O2,S2) & state_seq(S1,E,S2)
    & stationary(O1,E) & stationary(O2,E) ⇝ .

in(O1,A1,O2,T) & in(O3,A2,O2,T) & complementary(A1,A2)
    & in(O2,A3,O1,T) & in(O3,A4,O1,T) & complementary(A3,A4)
    & ne(O1,O2) & ne(O2,O3) ⇝ .

observing(O) ⇝ (night(O,S)).

observing(O) ⇝ (day(O,S)).

observing(O) ⇝ (day_night_cycle(O,S1,E1,S2,E2)).
```

A.3 Fakten

A.3.1 Allgemeine Fakten

```
next_area(up,right).
next_area(right,down).
next_area(down,left).
next_area(left,up).
next_area(up,front).
next_area(front,down).
next_area(down,back).
next_area(back,up).
next_area(right,front).
next_area(front,left).
next_area(left,back).
next_area(back,right).

complementary(up,down).
complementary(right,left).
complementary(down,up).
complementary(left,right).
complementary(front,back).
complementary(back,front).

observing(me).
shining(sun).

next_event(state0,event0).
next_state(event0,state1).
next_event(state1,event1).
next_state(event1,state0).

bigger(visual_range,sun).
bigger(visual_range,earth).
bigger(visual_range,cloud).
bigger(visual_range,hill).
bigger(visual_range,me).
bigger(sun,earth).
bigger(sun,cloud).
bigger(sun,hill).
bigger(sun,me).
bigger(earth,cloud).
bigger(earth,hill).
bigger(earth,me).
bigger(cloud,hill).
bigger(cloud,me).
bigger(hill,me).
```

A.3.2 Fakten für Modell 1

```
infinite(earth,down).
infinite(earth,left).
infinite(earth,right).

on(me,earth).
on(earth,earth).

opaque(me).
opaque(earth).
opaque(sun).
opaque(hill).
opaque(cloud).
opaque(visual_range).

solid(me).
solid(earth).
solid(sun).
solid(hill).
not(solid(cloud)).
not(solid(visual_range)).

stationary(me,state0).
stationary(me,event0).
stationary(me,state1).
stationary(me,event1).
stationary(earth,state0).
stationary(earth,event0).
stationary(earth,state1).
stationary(earth,event1).
stationary(sun,state0).
not(stationary(sun,event0)).
stationary(sun,state1).
not(stationary(sun,event1)).
stationary(cloud,state0).
not(stationary(cloud,event0)).
stationary(cloud,state1).
not(stationary(cloud,event1)).

in(me,up,earth,state0).
in(me,up,earth,event0).
in(me,up,earth,state1).
in(me,up,earth,event1).
in(earth,down,me,state0).
in(earth,down,me,event0).
```

```
in(earth,down,me,state1).
in(earth,down,me,event1).

in(sun,up,me,state0).
in(sun,up,me,event0).
in(sun,up,me,state1).
in(sun,up,me,event1).
in(me,down,sun,state0).
in(me,down,sun,event0).
in(me,down,sun,state1).
in(me,down,sun,event1).

in(sun,up,earth,state0).
in(sun,up,earth,event0).
in(sun,up,earth,state1).
in(sun,up,earth,event1).
in(earth,down,sun,state0).
in(earth,down,sun,event0).
in(earth,down,sun,state1).
in(earth,down,sun,event1).

in(cloud,up,me,state0).
in(cloud,up,me,event0).
in(cloud,up,me,state1).
in(cloud,up,me,event1).
in(me,left,cloud,state0).
in(me,left,cloud,event0).
in(me,down,cloud,state1).
in(me,down,cloud,event1).

in(cloud,up,earth,state0).
in(cloud,up,earth,event0).
in(cloud,up,earth,state1).
in(cloud,up,earth,event1).
in(earth,down,cloud,state0).
in(earth,down,cloud,event0).
in(earth,down,cloud,state1).
in(earth,down,cloud,event1).

in(cloud,down,sun,state0).
in(cloud,down,sun,event0).
in(cloud,down,sun,state1).
in(cloud,down,sun,event1).
in(sun,left,cloud,state0).
in(sun,left,cloud,event0).
in(sun,up,cloud,state1).
in(sun,up,cloud,event1).
```

A.3.3 Fakten für Modell 2

```
infinite(earth,down).
infinite(earth,left).
infinite(earth,right).

on(me,earth).
on(earth,earth).

opaque(me).
opaque(earth).
opaque(sun).
opaque(hill).
not(opaque(cloud)).
opaque(visual_range).

solid(me).
not(solid(earth)).
solid(sun).
solid(hill).
not(solid(cloud)).
not(solid(visual_range)).

stationary(me,state0).
stationary(me,event0).
stationary(me,state1).
stationary(me,event1).
stationary(earth,state0).
stationary(earth,event0).
stationary(earth,state1).
stationary(earth,event1).
stationary(sun,state0).
not(stationary(sun,event0)).
stationary(sun,state1).
not(stationary(sun,event1)).

in(me,up,earth,state0).
in(me,up,earth,event0).
in(me,up,earth,state1).
in(me,up,earth,event1).
in(earth,down,me,state0).
in(earth,down,me,event0).
in(earth,down,me,state1).
in(earth,down,me,event1).

in(sun,up,me,state0).
in(sun,up,me,event0).
in(sun,left,me,state1).
in(sun,left,me,event1).
```

```
in(me,down,sun,state0).
in(me,down,sun,event0).
in(me,down,sun,state1).
in(me,down,sun,event1).

in(sun,up,earth,state0).
in(sun,left,earth,event0).
in(sun,down,earth,state1).
in(sun,left,earth,event1).
in(earth,down,sun,state0).
in(earth,down,sun,event0).
in(earth,down,sun,state1).
in(earth,down,sun,event1).
```

A.3.4 Fakten für Modell 3

```
infinite(earth,down).
infinite(earth,left).
infinite(earth,right).

on(me,earth).
on(hill,earth).
on(earth,earth).

opaque(me).
opaque(earth).
opaque(sun).
opaque(hill).
not(opaque(cloud)).
opaque(visual_range).

solid(me).
solid(earth).
solid(sun).
solid(hill).
not(solid(cloud)).
not(solid(visual_range)).

stationary(me,state0).
stationary(me,event0).
stationary(me,state1).
stationary(me,event1).
stationary(earth,state0).
stationary(earth,event0).
stationary(earth,state1).
stationary(earth,event1).
stationary(sun,state0).
not(stationary(sun,event0)).
stationary(sun,state1).
not(stationary(sun,event1)).
stationary(hill,state0).
stationary(hill,event0).
stationary(hill,state1).
stationary(hill,event1).

in(me,up,earth,state0).
in(me,up,earth,event0).
in(me,up,earth,state1).
in(me,up,earth,event1).
in(earth,down,me,state0).
in(earth,down,me,event0).
in(earth,down,me,state1).
in(earth,down,me,event1).

in(sun,up,me,state0).
in(sun,up,me,event0).
in(sun,right,me,state1).
in(sun,right,me,event1).
in(me,down,sun,state0).
in(me,down,sun,event0).
in(me,down,sun,state1).
in(me,down,sun,event1).

in(sun,up,earth,state0).
in(sun,up,earth,event0).
in(sun,up,earth,state1).
in(sun,up,earth,event1).
in(earth,down,sun,state0).
in(earth,down,sun,event0).
in(earth,down,sun,state1).
in(earth,down,sun,event1).

in(hill,right,me,state0).
in(hill,right,me,event0).
in(hill,right,me,state1).
in(hill,right,me,event1).
in(me,left,hill,state0).
in(me,left,hill,event0).
in(me,left,hill,state1).
in(me,left,hill,event1).

in(hill,up,earth,state0).
in(hill,up,earth,event0).
in(hill,up,earth,state1).
in(hill,up,earth,event1).
in(earth,down,hill,state0).
```

```
in(earth,down,hill,event0).
in(earth,down,hill,state1).
in(earth,down,hill,event1).

in(hill,down,sun,state0).
in(hill,down,sun,event0).
in(hill,down,sun,state1).
in(hill,down,sun,event1).
in(sun,left,hill,state0).
in(sun,left,hill,event0).
in(sun,right,hill,state1).
in(sun,right,hill,event1).
```

A.3.5 Fakten für Modell 4

```
infinite(earth,down).
infinite(earth,left).
infinite(earth,right).
infinite(visual_range,left).
infinite(visual_range,right).

on(me,earth).
on(earth,earth).

opaque(me).
opaque(earth).
opaque(sun).
opaque(hill).
not(opaque(cloud)).
opaque(visual_range).

solid(me).
solid(earth).
solid(sun).
solid(hill).
not(solid(cloud)).
not(solid(visual_range)).

stationary(me,state0).
stationary(me,event0).
stationary(me,state1).
stationary(me,event1).
stationary(earth,state0).
stationary(earth,event0).
stationary(earth,state1).
stationary(earth,event1).
stationary(sun,state0).
not(stationary(sun,event0)).
stationary(sun,state1).
not(stationary(sun,event1)).
stationary(visual_range,state0).
stationary(visual_range,event0).
stationary(visual_range,state1).
stationary(visual_range,event1).

in(me,up,earth,state0).
in(me,up,earth,event0).
in(me,up,earth,state1).
in(me,up,earth,event1).
in(earth,down,me,state0).
in(earth,down,me,event0).
in(earth,down,me,state1).
in(earth,down,me,event1).

in(sun,up,me,state0).
in(sun,up,me,event0).
in(sun,up,me,state1).
in(sun,up,me,event1).
in(me,down,sun,state0).
in(me,down,sun,event0).
in(me,down,sun,state1).
in(me,down,sun,event1).

in(sun,up,earth,state0).
in(sun,up,earth,event0).
in(sun,up,earth,state1).
in(sun,up,earth,event1).
in(earth,down,sun,state0).
in(earth,down,sun,event0).
in(earth,down,sun,state1).
in(earth,down,sun,event1).

in(visual_range,up,me,state0).
in(visual_range,up,me,event0).
in(visual_range,up,me,state1).
in(visual_range,up,me,event1).
in(me,down,visual_range,state0).
in(me,down,visual_range,event0).
in(me,down,visual_range,state1).
in(me,down,visual_range,event1).

in(visual_range,up,sun,state0).
in(visual_range,up,sun,event0).
in(visual_range,down,sun,state1).
in(visual_range,down,sun,event1).
in(sun,down,visual_range,state0).
```

```
in(sun,down,visual_range,event0).
in(sun,up,visual_range,state1).
in(sun,up,visual_range,event1).
```

A.3.6 Fakten für Modell 5

```
on(me,earth).

opaque(me).
opaque(earth).
opaque(sun).
opaque(hill).
not(opaque(cloud)).
opaque(visual_range).

solid(me).
solid(earth).
solid(sun).
solid(hill).
not(solid(cloud)).
not(solid(visual_range)).

stationary(me,state0).
stationary(me,event0).
stationary(me,state1).
stationary(me,event1).
stationary(earth,state0).
stationary(earth,event0).
stationary(earth,state1).
stationary(earth,event1).
stationary(sun,state0).
not(stationary(sun,event0)).
stationary(sun,state1).
not(stationary(sun,event1)).

in(me,up,earth,state0).
in(me,up,earth,event0).
in(me,up,earth,state1).
in(me,up,earth,event1).
in(earth,down,me,state0).
in(earth,down,me,event0).
in(earth,down,me,state1).
in(earth,down,me,event1).

in(sun,up,me,state0).
in(sun,left,me,event0).
in(sun,down,me,state1).
in(sun,left,me,event1).
in(me,down,sun,state0).
in(me,down,sun,event0).
in(me,down,sun,state1).
in(me,down,sun,event1).

in(sun,up,earth,state0).
in(sun,left,earth,event0).
in(sun,down,earth,state1).
in(sun,left,earth,event1).
in(earth,down,sun,state0).
in(earth,down,sun,event0).
in(earth,down,sun,state1).
in(earth,down,sun,event1).
```

A.3.7 Fakten für Modell 6

```
on(me,earth).

opaque(me).
opaque(earth).
opaque(sun).
opaque(hill).
not(opaque(cloud)).
opaque(visual_range).

solid(me).
solid(earth).
solid(sun).
solid(hill).
not(solid(cloud)).
not(solid(visual_range)).

stationary(me,state0).
stationary(me,event0).
stationary(me,state1).
stationary(me,event1).
stationary(earth,state0).
stationary(earth,event0).
stationary(earth,state1).
stationary(earth,event1).
not(stationary(sun,state0)).
not(stationary(sun,event0)).
not(stationary(sun,state1)).
not(stationary(sun,event1)).

in(me,up,earth,state0).
in(me,up,earth,event0).
```

```
in(me,up,earth,state1).
in(me,up,earth,event1).
in(earth,down,me,state0).
in(earth,down,me,event0).
in(earth,down,me,state1).
in(earth,down,me,event1).

in(sun,up,me,state0).
in(sun,left,me,event0).
in(sun,down,me,state1).
in(sun,right,me,event1).
in(me,down,sun,state0).
in(me,down,sun,event0).
in(me,down,sun,state1).
in(me,down,sun,event1).

in(sun,up,earth,state0).
in(sun,left,earth,event0).
in(sun,down,earth,state1).
in(sun,right,earth,event1).
in(earth,down,sun,state0).
in(earth,down,sun,event0).
in(earth,down,sun,state1).
in(earth,down,sun,event1).
```

A.3.8 Fakten für Modell 7

```
on(me,earth).

opaque(me).
opaque(earth).
opaque(sun).
opaque(hill).
not(opaque(cloud)).
opaque(visual_range).

solid(me).
solid(earth).
solid(sun).
solid(hill).
not(solid(cloud)).
not(solid(visual_range)).

not(stationary(me,state0)).
not(stationary(me,event0)).
not(stationary(me,state1)).
not(stationary(me,event1)).
stationary(sun,state0).
stationary(sun,event0).
stationary(sun,state1).
stationary(sun,event1).
not(stationary(earth,state0)).
not(stationary(earth,event0)).
not(stationary(earth,state1)).
not(stationary(earth,event1)).

in(me,up,earth,state0).
in(me,up,earth,event0).
in(me,up,earth,state1).
in(me,up,earth,event1).
in(earth,down,me,state0).
in(earth,down,me,event0).
in(earth,down,me,state1).
in(earth,down,me,event1).

in(sun,up,me,state0).
in(sun,left,me,event0).
in(sun,down,me,state1).
in(sun,right,me,event1).
in(me,down,sun,state0).
in(me,right,sun,event0).
in(me,up,sun,state1).
in(me,left,sun,event1).

in(sun,up,earth,state0).
in(sun,left,earth,event0).
in(sun,down,earth,state1).
in(sun,right,earth,event1).
in(earth,down,sun,state0).
in(earth,right,sun,event0).
in(earth,up,sun,state1).
in(earth,left,sun,event1).
```

A.3.9 Fakten für Modell 8

```
on(me,earth).

opaque(me).
opaque(earth).
opaque(sun).
opaque(hill).
not(opaque(cloud)).
opaque(visual_range).

solid(me).
solid(earth).
```

```
solid(sun).
solid(hill).
not(solid(cloud)).
not(solid(visual_range)).

stationary(me,state0).
not(stationary(me,event0)).
stationary(me,state1).
not(stationary(me,event1)).
stationary(sun,state0).
stationary(sun,event0).
stationary(sun,state1).
stationary(sun,event1).
stationary(earth,state0).
not(stationary(earth,event0)).
stationary(earth,state1).
not(stationary(earth,event1)).

in(me,up,earth,state0).
in(me,up,earth,event0).
in(me,up,earth,state1).
in(me,up,earth,event1).
in(earth,down,me,state0).
in(earth,down,me,event0).
in(earth,down,me,state1).
in(earth,down,me,event1).

in(sun,up,me,state0).
in(sun,right,me,event0).
in(sun,down,me,state1).
in(sun,right,me,event1).
in(me,down,sun,state0).
in(me,down,sun,event0).
in(me,down,sun,state1).
in(me,down,sun,event1).

in(sun,up,earth,state0).
in(sun,right,earth,event0).
in(sun,down,earth,state1).
in(sun,right,earth,event1).
in(earth,down,sun,state0).
in(earth,down,sun,event0).
in(earth,down,sun,state1).
in(earth,down,sun,event1).
```

A.3.10 Fakten für Modell 9

```
on(me,earth).

opaque(me).
opaque(earth).
opaque(sun).
opaque(hill).
not(opaque(cloud)).
opaque(visual_range).

solid(me).
solid(earth).
solid(sun).
solid(hill).
not(solid(cloud)).
not(solid(visual_range)).
not(stationary(me,state0)).
not(stationary(me,event0)).
not(stationary(me,state1)).
not(stationary(me,event1)).
stationary(sun,state0).
stationary(sun,event0).
stationary(sun,state1).
stationary(sun,event1).
not(stationary(earth,state0)).
not(stationary(earth,event0)).
not(stationary(earth,state1)).
not(stationary(earth,event1)).

in(me,up,earth,state0).
in(me,up,earth,event0).
in(me,up,earth,state1).
in(me,up,earth,event1).
in(earth,down,me,state0).
in(earth,down,me,event0).
in(earth,down,me,state1).
in(earth,down,me,event1).

in(sun,up,me,state0).
in(sun,right,me,event0).
in(sun,down,me,state1).
in(sun,left,me,event1).
in(me,down,sun,state0).
in(me,down,sun,event0).
in(me,down,sun,state1).
in(me,down,sun,event1).

in(sun,up,earth,state0).
```

```
in(sun,right,earth,event0).
in(sun,down,earth,state1).
in(sun,left,earth,event1).
in(earth,down,sun,state0).
in(earth,down,sun,event0).
in(earth,down,sun,state1).
in(earth,down,sun,event1).
```

Anhang B

Ableitungen

Notation: Fakten sind zusammen mit ihren Ableitungen geklammert. Öffnende und schließende Klammern mit der *gleichen Anzahl von Punkten* gehören paarweise zusammen. Bei mehrmals vorkommenden Fakten wird auf die Stelle ihrer ersten Ableitung verwiesen.

B.1 Ableitung in Modell 9

```
┌──────────────────────── . ────────────────────────┐
day_night_cycle(me,state0,event0,state1,event1)              (1)
day_night_cycle(O2,S1,E1,S2,E2)
←  reappears(O1,O2,E1,E2) & cycle(S1,E1,S2,E2) & shining(O1)
   & observing(O2)
┌──────────────────────── .. ───────────────────────┐
reappears(sun,me,event0,event1)                              (2)

reappears(O2,O3,E1,E2)
←  covers(O1,O2,O3,E1) & returns(O1,O2,S2) & uncovers(O1,O2,O3,E2)
   & returns(O1,O2,S1) & cycle(S1,E1,S2,E2)
┌──────────────────────── ... ──────────────────────┐
covers(earth,sun,me,event0)                                  (3)

covers(O1,O2,O3,E)
←  not(between(O1,O2,O3,S1)) & invisible(O2,O1,O3,S2)
   & state_seq(S1,E,S2) & not(stationary(O1,E))
┌──────────────────────── .... ─────────────────────┐
not(between(earth,sun,me,state0))                            (4)

not(between(O2,O1,O3,S))
←  in(O1,A1,O2,S) & in(O3,A2,O2,S) & complementary(A1,A3)
   & ne(O1,O3) & ne(A2,A3)

in(sun,up,earth,state0) ←
in(me,up,earth,state0) ←
complementary(up,down) ←
└──────────────────────── .... ─────────────────────┘
┌──────────────────────── .... ─────────────────────┐
invisible(sun,earth,me,state1)                               (5)

invisible(O2,O1,O3,S)
←  between(O1,O2,O3,S) & opaque(O1) & bigger(O1,O3)
```

```
┌──────────────────── ..... ────────────────────┐
between(earth,sun,me,state1)

between(O2,O1,O3,S)
←  in(O1,A1,O2,S) & in(O3,A2,O2,S) & complementary(A1,A2)
   & ne(O1,O2) & ne(O3,O2)

in(sun,down,earth,state1) ←
in(me,up,earth,state1) ←
complementary(down,up) ←
└──────────────────── ..... ────────────────────┘
opaque(earth) ←
bigger(earth,me) ←
└──────────────────── .... ─────────────────────┘
┌──────────────────── .... ─────────────────────┐
state_seq(state0,event0,state1)                          (6)

state_seq(S1,E,S2)
←  next_event(S1,E) & next_state(E,S2)

next_event(state0,event0) ←
next_state(event0,state1) ←
└──────────────────── .... ─────────────────────┘
not(stationary(earth,event0)) ←
└──────────────────── ... ──────────────────────┘
┌──────────────────── ... ──────────────────────┐
returns(earth,sun,state1)

returns(O1,O2,S)
←  rotates_acw(O1,O2,E1) & rotates_acw(O1,O2,E2)
   & event_seq(E1,S,E2)
┌──────────────────── .... ─────────────────────┐
rotates_acw(earth,sun,event0)                            (7)

rotates_acw(O1,O2,E)
←  moves(O1,O2,E) & next_state(E,S2) & in(O2,A1,O1,E)
   & in(O2,A2,O1,S2) & next_area(A1,A2)
┌──────────────────── ..... ────────────────────┐
moves(earth,sun,event0)

moves(O2,O1,E)
←  in(O1,A1,O2,S1) & in(O1,A2,O2,S2) & state_seq(S1,E,S2)
   & ne(A1,A2) & not(stationary(O2,E))

in(sun,up,earth,state0) ←
in(sun,down,earth,state1) ←
state_seq(state0,event0,state1)      (siehe Ableitung (6) auf Seite 139)
not(stationary(earth,event0)) ←
└──────────────────── ..... ────────────────────┘
next_state(event0,state1) ←
in(sun,right,earth,event0) ←
in(sun,down,earth,state1) ←
next_area(right,down) ←
└──────────────────── .... ─────────────────────┘
┌──────────────────── .... ─────────────────────┐
rotates_acw(earth,sun,event1)                            (8)

rotates_acw(O1,O2,E)
```

```
←  moves(O1,O2,E) & next_state(E,S2) & in(O2,A1,O1,E)
   & in(O2,A2,O1,S2) & next_area(A1,A2)
```

.....

```
moves(earth,sun,event1)

moves(O2,O1,E)
←  in(O1,A1,O2,S1) & in(O1,A2,O2,S2) & state_seq(S1,E,S2)
   & ne(A1,A2) & not(stationary(O2,E))

in(sun,down,earth,state1) ←
in(sun,up,earth,state0) ←
```

......

```
state_seq(state1,event1,state0)                                   (9)

state_seq(S1,E,S2)
←  next_event(S1,E) & next_state(E,S2)

next_event(state1,event1) ←
next_state(event1,state0) ←
```

......

```
not(stationary(earth,event1)) ←
```

.....

```
next_state(event1,state0) ←
in(sun,left,earth,event1) ←
in(sun,up,earth,state0) ←
next_area(left,up) ←
```

....

....

```
event_seq(event0,state1,event1)                                   (10)

event_seq(E1,S,E2)
←  next_state(E1,S) & next_event(S,E2)

next_state(event0,state1) ←
next_event(state1,event1) ←
```

....

...

```
uncovers(earth,sun,me,event1)                                     (11)

uncovers(O1,O2,O3,E)
←  invisible(O2,O1,O3,S1) & not(between(O1,O2,O3,S2))
   & state_seq(S1,E,S2) & not(stationary(O1,E))
```

`invisible(sun,earth,me,state1)` (*siehe Ableitung* (5) *auf Seite* 138)

`not(between(earth,sun,me,state0))` (*siehe Ableitung* (4) *auf Seite* 138)

`state_seq(state1,event1,state0)` (*siehe Ableitung* (9) *auf Seite* 140)

```
not(stationary(earth,event1)) ←
```

...

...

```
returns(earth,sun,state0)

returns(O1,O2,S)
←  rotates_acw(O1,O2,E1) & rotates_acw(O1,O2,E2)
   & event_seq(E1,S,E2)
```

`rotates_acw(earth,sun,event1)` (*siehe Ableitung* (8) *auf Seite* 139)

`rotates_acw(earth,sun,event0)` (*siehe Ableitung* (7) *auf Seite* 139)

```
event_seq(event1,state0,event0)                                    (12)
event_seq(E1,S,E2)
←  next_state(E1,S) & next_event(S,E2)
next_state(event1,state0) ←
next_event(state0,event0) ←
```

```
cycle(state0,event0,state1,event1)                                 (13)
cycle(S1,E1,S2,E2)
←  state_seq(S1,E1,S2) & state_seq(S2,E2,S1)
state_seq(state0,event0,state1)     (siehe Ableitung (6) auf Seite 139)
state_seq(state1,event1,state0)     (siehe Ableitung (9) auf Seite 140)
```

```
reappears(O3,O1,E1,E2)
←  hides(O1,O2,O3,E1) & returns(O1,O3,S2) & unhides(O1,O2,O3,E2)
   & returns(O1,O3,S1) & cycle(S1,E1,S2,E2)
```

```
hides(me,earth,sun,event0)                                         (14)
hides(O3,O1,O2,E)
←  not(between(O1,O2,O3,S1)) & invisible(O2,O1,O3,S2)
   & state_seq(S1,E,S2) & not(stationary(O3,E))
not(between(earth,sun,me,state0))   (siehe Ableitung (4) auf Seite 138)
invisible(sun,earth,me,state1)      (siehe Ableitung (5) auf Seite 138)
state_seq(state0,event0,state1)     (siehe Ableitung (6) auf Seite 139)
not(stationary(me,event0)) ←
```

```
returns(me,sun,state1)
returns(O1,O2,S)
←  rotates_acw(O1,O2,E1) & rotates_acw(O1,O2,E2)
   & event_seq(E1,S,E2)
```

```
rotates_acw(me,sun,event0)                                         (15)
rotates_acw(O1,O2,E)
←  moves(O1,O2,E) & next_state(E,S2) & in(O2,A1,O1,E)
   & in(O2,A2,O1,S2) & next_area(A1,A2)
```

```
moves(me,sun,event0)
moves(O2,O1,E)
←  in(O1,A1,O2,S1) & in(O1,A2,O2,S2) & state_seq(S1,E,S2)
   & ne(A1,A2) & not(stationary(O2,E))
in(sun,up,me,state0) ←
```

in(sun,down,me,state1) ←

state_seq(state0,event0,state1) *(siehe Ableitung* (6) *auf Seite* 139)

not(stationary(me,event0)) ←

.....

next_state(event0,state1) ←
in(sun,right,me,event0) ←
in(sun,down,me,state1) ←
next_area(right,down) ←

....
....

rotates_acw(me,sun,event1) (16)

rotates_acw(O1,O2,E)
← moves(O1,O2,E) & next_state(E,S2) & in(O2,A1,O1,E)
& in(O2,A2,O1,S2) & next_area(A1,A2)

.....

moves(me,sun,event1)

moves(O2,O1,E)
← in(O1,A1,O2,S1) & in(O1,A2,O2,S2) & state_seq(S1,E,S2)
& ne(A1,A2) & not(stationary(O2,E))

in(sun,down,me,state1) ←
in(sun,up,me,state0) ←

state_seq(state1,event1,state0) *(siehe Ableitung* (9) *auf Seite* 140)

not(stationary(me,event1)) ←

.....

next_state(event1,state0) ←
in(sun,left,me,event1) ←
in(sun,up,me,state0) ←
next_area(left,up) ←

....

event_seq(event0,state1,event1) *(siehe Ableitung* (10) *auf Seite* 140)

...
...

unhides(me,earth,sun,event1) (17)

unhides(O3,O1,O2,E)
← invisible(O2,O1,O3,S1) & not(between(O1,O2,O3,S2))
& state_seq(S1,E,S2) & not(stationary(O3,E))

invisible(sun,earth,me,state1) *(siehe Ableitung* (5) *auf Seite* 138)

not(between(earth,sun,me,state0)) *(siehe Ableitung* (4) *auf Seite* 138)

state_seq(state1,event1,state0) *(siehe Ableitung* (9) *auf Seite* 140)

not(stationary(me,event1)) ←

...
...

returns(me,sun,state0)

returns(O1,O2,S)
← rotates_acw(O1,O2,E1) & rotates_acw(O1,O2,E2)
& event_seq(E1,S,E2)

....

```
rotates_acw(me,sun,event1)
rotates_acw(O1,O2,E)
←  moves(O1,O2,E) & next_state(E,S2) & in(O2,A1,O1,E)
   & in(O2,A2,O1,S2) & next_area(A1,A2)
                              .....
moves(me,sun,event1)
moves(O2,O1,E)
←  in(O1,A1,O2,S1) & in(O1,A2,O2,S2) & state_seq(S1,E,S2)
   & ne(A1,A2) & not(stationary(O2,E))
in(sun,down,me,state1) ←
in(sun,up,me,state0) ←
state_seq(state1,event1,state0)        (siehe Ableitung (9) auf Seite 140)
not(stationary(me,event1)) ←
                              .....
next_state(event1,state0) ←
in(sun,left,me,event1) ←
in(sun,up,me,state0) ←
next_area(left,up) ←
                              ....
                              ....
rotates_acw(me,sun,event0)
rotates_acw(O1,O2,E)
←  moves(O1,O2,E) & next_state(E,S2) & in(O2,A1,O1,E)
   & in(O2,A2,O1,S2) & next_area(A1,A2)
                              .....
moves(me,sun,event0)
moves(O2,O1,E)
←  in(O1,A1,O2,S1) & in(O1,A2,O2,S2) & state_seq(S1,E,S2)
   & ne(A1,A2) & not(stationary(O2,E))
in(sun,up,me,state0) ←
in(sun,down,me,state1) ←
state_seq(state0,event0,state1)        (siehe Ableitung (6) auf Seite 139)
not(stationary(me,event0)) ←
                              .....
next_state(event0,state1) ←
in(sun,right,me,event0) ←
in(sun,down,me,state1) ←
next_area(right,down) ←
                              ....
event_seq(event1,state0,event0)        (siehe Ableitung (12) auf Seite 141)
                              ...
cycle(state0,event0,state1,event1)     (siehe Ableitung (13) auf Seite 141)
                              ..
cycle(state0,event0,state1,event1)     (siehe Ableitung (13) auf Seite 141)
shining(sun) ←
observing(me) ←
                              .
```

Anhang C

Modelldefinitionen

```
covers(Object,sun,me,Time1) & uncovers(Object,sun,me,Time2)
    & moves(Object,me,Time1) & moves(Object,me,Time2)
    & day_night_cycle(me,Time3,Time1,Time4,Time2)
    → model1(me,Time3,Time1,Time4,Time2).

hides(sun,earth,me,Time1) & unhides(sun,earth,me,Time2))
    & revolves_acw(sun,me,Time1) & revolves_cw(sun,me,Time2))
    & not(solid(earth))
    & day_night_cycle(me,Time3,Time1,Time4,Time2)
    → model2(me,Time3,Time1,Time4,Time2).

hides(sun,earth,me,Time1) & unhides(sun,earth,me,Time2))
    & revolves_cw(sun,me,Time1) & revolves_acw(sun,me,Time2))
    & not(solid(earth))
    & day_night_cycle(me,Time3,Time1,Time4,Time2)
    → model2(me,Time3,Time1,Time4,Time2).

hides(sun,Object,me,Time1) & unhides(sun,Object,me,Time2)
    & revolves_acw(sun,me,Time1) & revolves_cw(sun,me,Time2)
    & on(Object,earth) & on(me,earth) & solid(Object)
    & day_night_cycle(me,Time3,Time1,Time4,Time2)
    → model3(me,Time3,Time1,Time4,Time2).

hides(sun,Object,me,Time1) & unhides(sun,Object,me,Time2)
    & revolves_cw(sun,me,Time1) & revolves_acw(sun,me,Time2))
    & on(Object,earth) & on(me,earth) & solid(Object)
    & day_night_cycle(me,Time3,Time1,Time4,Time2)
    → model3(me,Time3,Time1,Time4,Time2).

hides(sun,Object,me,Time1) & unhides(sun,Object,me,Time2)
    & moves(sun,Object,Time1) & moves(sun,Object,Time2))
    & infinite(Object,Area1) & infinite(Object,Area2)
    & complementary(Area1,Area2)
    & day_night_cycle(me,Time3,Time1,Time4,Time2)
    → model4(me,Time3,Time1,Time4,Time2).

hides(sun,earth,me,Time1) & unhides(sun,earth,me,Time2))
    & revolves_acw(sun,earth,Time1) & revolves_cw(sun,earth,Time2))
    & solid(earth)
```

```
    & day_night_cycle(me,Time3,Time1,Time4,Time2)
    → model5(me,Time3,Time1,Time4,Time2).

hides(sun,earth,me,Time1) & unhides(sun,earth,me,Time2))
    & revolves_cw(sun,earth,Time1) & revolves_acw(sun,earth,Time2))
    & solid(earth)
    & day_night_cycle(me,Time3,Time1,Time4,Time2)
    → model5(me,Time3,Time1,Time4,Time2).

hides(sun,earth,me,Time1) & unhides(sun,earth,me,Time2))
    & revolves_acw(sun,earth,Time1) & revolves_acw(sun,earth,Time2))
    & day_night_cycle(me,Time3,Time1,Time4,Time2)
    → model6(me,Time3,Time1,Time4,Time2).

hides(sun,earth,me,Time1) & unhides(sun,earth,me,Time2))
    & revolves_cw(sun,earth,Time1) & revolves_cw(sun,earth,Time2))
    & day_night_cycle(me,Time3,Time1,Time4,Time2)
    → model6(me,Time3,Time1,Time4,Time2).

covers(earth,sun,me,Time1) & uncovers(earth,sun,me,Time2))
    & revolves_acw(earth,sun,Time1) & revolves_acw(earth,sun,Time2))
    & day_night_cycle(me,Time3,Time1,Time4,Time2)
    → model7(me,Time3,Time1,Time4,Time2).

hides(me,earth,sun,Time1)& unhides(me,earth,sun,Time2)
    & revolves_acw(earth,sun,Time1) & revolves_acw(earth,sun,Time2))
    & day_night_cycle(me,Time3,Time1,Time4,Time2)
    → model7(me,Time3,Time1,Time4,Time2).

covers(earth,sun,me,Time1) & uncovers(earth,sun,me,Time2))
    & revolves_cw(earth,sun,Time1) & revolves_cw(earth,sun,Time2))
    & day_night_cycle(me,Time3,Time1,Time4,Time2)
    → model7(me,Time3,Time1,Time4,Time2).

hides(me,earth,sun,Time1)& unhides(me,earth,sun,Time2)
    & revolves_cw(earth,sun,Time1) & revolves_cw(earth,sun,Time2))
    & day_night_cycle(me,Time3,Time1,Time4,Time2)
    → model7(me,Time3,Time1,Time4,Time2).

covers(earth,sun,me,Time1) & uncovers(earth,sun,me,Time2))
    & rotates_acw(earth,sun,Time1) & rotates_cw(earth,sun,Time2))
    & in(earth,Area,sun,Time3) & in(earth,Area,sun,Time4)
    & day_night_cycle(me,Time3,Time1,Time4,Time2)
    → model8(me,Time3,Time1,Time4,Time2).

hides(me,earth,sun,Time1)& unhides(me,earth,sun,Time2)
    & rotates_acw(earth,sun,Time1) & rotates_cw(earth,sun,Time2))
    & in(earth,Area,sun,Time3) & in(earth,Area,sun,Time4)
    & day_night_cycle(me,Time3,Time1,Time4,Time2)
    → model8(me,Time3,Time1,Time4,Time2).

covers(earth,sun,me,Time1) & uncovers(earth,sun,me,Time2))
    & rotates_cw(earth,sun,Time1) & rotates_acw(earth,sun,Time2))
    & in(earth,Area,sun,Time3) & in(earth,Area,sun,Time4)
    & day_night_cycle(me,Time3,Time1,Time4,Time2)
    → model8(me,Time3,Time1,Time4,Time2).
```

```
hides(me,earth,sun,Time1)& unhides(me,earth,sun,Time2)
    & rotates_cw(earth,sun,Time1) & rotates_acw(earth,sun,Time2))
    & in(earth,Area,sun,Time3) & in(earth,Area,sun,Time4)
    & day_night_cycle(me,Time3,Time1,Time4,Time2)
    → model8(me,Time3,Time1,Time4,Time2).

covers(earth,sun,me,Time1) & uncovers(earth,sun,me,Time2))
    & rotates_acw(earth,sun,Time1) & rotates_acw(earth,sun,Time2))
    & in(earth,Area,sun,Time3) & in(earth,Area,sun,Time4)
    & day_night_cycle(me,Time3,Time1,Time4,Time2)
    → model9(me,Time3,Time1,Time4,Time2).

hides(me,earth,sun,Time1)& unhides(me,earth,sun,Time2)
    & rotates_acw(earth,sun,Time1) & rotates_acw(earth,sun,Time2))
    & in(earth,Area,sun,Time3) & in(earth,Area,sun,Time4)
    & day_night_cycle(me,Time3,Time1,Time4,Time2)
    → model9(me,Time3,Time1,Time4,Time2).

covers(earth,sun,me,Time1) & uncovers(earth,sun,me,Time2))
    & rotates_cw(earth,sun,Time1) & rotates_cw(earth,sun,Time2))
    & in(earth,Area,sun,Time3) & in(earth,Area,sun,Time4)
    & day_night_cycle(me,Time3,Time1,Time4,Time2)
    → model9(me,Time3,Time1,Time4,Time2).

hides(me,earth,sun,Time1)& unhides(me,earth,sun,Time2)
    & rotates_cw(earth,sun,Time1) & rotates_cw(earth,sun,Time2))
    & in(earth,Area,sun,Time3) & in(earth,Area,sun,Time4)
    & day_night_cycle(me,Time3,Time1,Time4,Time2)
    → model9(me,Time3,Time1,Time4,Time2).
```

Anhang D

Übergänge

Notation:

+ markiert eine Eingabe durch den Benutzer

∅ markiert das Löschen eines Faktums bei der Behandlung eines Agendaeintrages

↻ markiert das Löschen eines Faktums bei einer Wissensrevision

D.1 Übergang von Modell 1 zu Modell 6

+ `not(opaque(cloud)).`

```
Integrity constraint violation on
    observing(me) ⇝ (day(me,_)).
    observing(me) ⇝ (day_night_cycle(me,_,_,_,_)).
    observing(me) ⇝ (night(me,_)).
```

+ `in(sun,down,earth,state1).`

```
Knowledge revision on
    between(earth,cloud,sun,state1) - [1000,1000].
    between(earth,me,sun,state1) - [1000,1000].
    between(earth,sun,cloud,state1) - [1000,1000].
    between(earth,sun,me,state1) - [1000,1000].
Integrity constraint violation on
    in(cloud,up,earth,state1) & in(sun,down,earth,state1)
      & complementary(up,down) & in(earth,down,cloud,state1)
      & in(sun,up,cloud,state1) & complementary(down,up)
      & ne(earth,sun) & ne(cloud,earth) ⇝ .
    in(earth,down,cloud,state1) & in(sun,up,cloud,state1)
      & complementary(down,up) & in(cloud,up,earth,state1)
      & in(sun,down,earth,state1) & complementary(up,down)
      & ne(cloud,sun) & ne(earth,cloud) ⇝ .
    in(earth,down,earth,state1) & in(sun,down,earth,state1)
      & solid(earth) & ne(sun,earth) ⇝ .
    in(earth,down,me,state1) & in(sun,up,me,state1)
      & complementary(down,up) & in(me,up,earth,state1)
```

```
      & in(sun,down,earth,state1) & complementary(up,down)
      & ne(me,sun) & ne(earth,me) ⇝ .
     in(me,up,earth,state1) & in(sun,down,earth,state1)
      & complementary(up,down) & in(earth,down,me,state1)
      & in(sun,up,me,state1) & complementary(down,up)
      & ne(earth,sun) & ne(me,earth) ⇝ .
     in(sun,down,earth,state1) & in(sun,up,earth,state1)
      & ne(down,up) & ne(sun,earth) ⇝ .
     in(sun,up,earth,state1) & in(sun,down,earth,state1)
      & ne(up,down) & ne(sun,earth) ⇝ .
     observing(me) ⇝ (day(me,_)).
     observing(me) ⇝ (day_night_cycle(me,_,_,_,_)).
     observing(me) ⇝ (night(me,_)).

   ∅ in(earth,down,earth,state1).
   ⥁ infinite(earth,down).
   ∅ in(sun,up,me,state1).
   ∅ in(sun,up,earth,state1).
   ∅ in(sun,up,cloud,state1).

+ in(sun,left,earth,event0).

   Integrity constraint violation on
     in(earth,left,earth,event0) & in(sun,left,earth,event0)
      & solid(earth) & ne(sun,earth) ⇝ .
     in(sun,left,earth,event0) & in(sun,up,earth,event0)
      & ne(left,up) & ne(sun,earth) ⇝ .
     in(sun,up,earth,event0) & in(sun,left,earth,event0)
      & ne(up,left) & ne(sun,earth) ⇝ .
     observing(me) ⇝ (day(me,_)).
     observing(me) ⇝ (day_night_cycle(me,_,_,_,_)).
     observing(me) ⇝ (night(me,_)).

   ∅ in(earth,left,earth,event0).
   ⥁ infinte(earth,left).
   ∅ in(sun,up,earth,event0).

+ in(sun,right,earth,event1).

   Integrity constraint violation on
     in(earth,right,earth,event1) & in(sun,right,earth,event1)
      & solid(earth) & ne(sun,earth) ⇝ .
     in(sun,right,earth,event1) & in(sun,up,earth,event1)
      & ne(right,up) & ne(sun,earth) ⇝ .
     in(sun,up,earth,event1) & in(sun,right,earth,event1)
      & ne(up,right) & ne(sun,earth) ⇝ .

   ∅ in(earth,right,earth,event1).
   ⥁ infinite(earth,left).
   ∅ in(sun,up,earth,event1).
```

D.2 Übergang von Modell 6 zu Modell 9

```
+ stationary(sun,event0).

    Integrity constraint violation on
        observing(me) ⇝ (day_night_cycle(me,_,_,_,_)).
        observing(me) ⇝ (night(me,_)).

+ not(stationary(earth,event0)).

    Integrity constraint violation on
        not(stationary(earth,event0)) & stationary(me,event0)
          & on(me,earth) ⇝ .
        observing(me) ⇝ (day_night_cycle(me,_,_,_,_)).

     ∅ stationary(me,event0).

+ not(stationary(earth,event1)).

    Integrity constraint violation on
        not(stationary(earth,event1)) & stationary(me,event1)
          & on(me,earth) ⇝ .
        observing(me) ⇝ (day_night_cycle(me,_,_,_,_)).

     ∅ stationary(me,event1).
```

Literaturverzeichnis

[Allen, 1984] Allen, J. F. (1984). Towards a general theory of action and time. *Artificial Intelligence*, 23:123–154.

[Ausubel et al., 1978] Ausubel, D. P., Novak, J. D., and Hanesian, H. (1978). *Educational Psychology: A Cognitive View.* Holt, Rinehart and Winston, New York.

[Bar et al., 1994] Bar, V., Zinn, B., Goldmuntz, R., and Sneider, C. (1994). Children's concepts about weight and free fall. *Science Education*, 78(2):149–169.

[Baxter, 1989] Baxter, J. (1989). Children's understanding of familiar astronomical events. *International Journal of Science Education*, 11:502–513.

[Bialystok and Olson, 1987] Bialystok, E. and Olson, D. R. (1987). Spatial categories: The perception and conceptualization of spatial relations. In Harnard, S., editor, *Categorial Perception*, chapter 18, pages 511–531. Cambridge University Press, Cambridge, NY.

[Brown, 1973] Brown, R. (1973). *A First Language: The Early Stages.* Harvard University Press, Cambridge, MA.

[Carey, 1985a] Carey, S. (1985a). Are children fundamentally different kind of thinkers and learners than adults? In Chipman, S. F., Segal, J. W., and Glaser, R., editors, *Thinking and Learning Skills: Research and Open Questions*, volume 2, pages 485–517. Lawrence Erlbaum, Hillsdale, NJ.

[Carey, 1985b] Carey, S. (1985b). *Conceptual Change in Childhood.* MIT Press, Cambridge, MA.

[Carey, 1986] Carey, S. (1986). Cognitive science and science education. *American Psychologist*, 41(10):1123–1130.

[Carey, 1990] Carey, S. (1990). Cognitive development. In Osherson, D. N. and Smith, E. E., editors, *An Invitation to Cognitive Science: Thinking*, volume 3, pages 147–172. MIT Press, Cambridge, MA.

[Carey, 1991] Carey, S. (1991). Knowledge acquisition: Enrichment or conceptual change. In Carey, S. and Gelman, R., editors, *The Epigenesis of Mind: Essays on Biology and Cognition*, pages 257–291. Lawrence Erlbaum, Hillsdale, NJ.

[Chi et al., 1981] Chi, M. T. H., Feltovich, P. J., and Glaser, R. (1981). Categorization and representation of physics problems by experts and novices. *Cognitive Science*, 5:121–152.

[Chi et al., 1982] Chi, M. T. H., Glaser, R., and Rees, E. (1982). Expertise in problem solving. In Sternberg, R. J., editor, *Advances in the Psychology of Human Intelligence*, volume 1, chapter 1, pages 7–75. Erlbaum, Hillsdale, NJ.

[Clancey, 1989] Clancey, W. J. (1989). The knowledge level reinterpreted: Modeling how systems interact. *Machine Learning*, 4:285–291.

[de Vecchi, 1986] de Vecchi, G. (1986). Comment on voit l'espace quand on est un enfant qui a les pieds sur terre. In Giordan, A. and Martinand, J. L., editors, *Education scientifique et vie quotidienne*, pages 421–425. Instaprint, Paris.

[Dietterich, 1986] Dietterich, T. G. (1986). Learning at the knowledge level. *Machine Learning*, 1:287–315.

[Driver, 1989] Driver, R. (1989). Students' conceptions and the learning of science. *International Journal of Science Education*, 11:481–490.

[Driver and Erickson, 1983] Driver, R. and Erickson, G. (1983). Theories–in–action: Some theoretical and empirical issues in the study of students' conceptual frameworks in science. *Studies in Science Education*, 10:37–60.

[Duit, 1991] Duit, R. (1991). Students' conceptual frameworks: Consequences for learning science. In Glynn, S. M., Yeanny, R. H., and Britton, B. K., editors, *The Psychology of Learning Science*, pages 65–85. Lawrence Erlbaum, Hillsdale, NJ.

[Dupré et al., 1984] Dupré, F., Noce, G., and Vicentini-Missoni, M. (1984). Die Gestalt der Erde und die Schwerkraft: Common–Sense Wissen von Erwachsenen. *physica didactica*, 11:3–21.

[Elio and Anderson, 1984] Elio, R. and Anderson, J. R. (1984). The effects of information order and learning mode on schema abstraction. *Memory & Cognition*, 12(1):20–30.

[Emde, 1991] Emde, W. (1991). *Modellbildung, Wissensrevision und Wissensrepräsentation im Maschinellen Lernen*. Subreihe Künstliche Intelligenz. Springer.

[Flavell et al., 1993] Flavell, J. H., Miller, P. H., and Miller, S. A. (1993). *Cognitive Development*. Prentice–Hall, Englewood Cliffs, NJ, 3rd edition.

[Forbus, 1983] Forbus, K. D. (1983). Qualitative reasoning about space and motion. In Gentner, D. and Stevens, A. L., editors, *Mental Models*, Cognitive Science, chapter 4, pages 53–73. Erlbaum, Hillsdale, NJ.

[Freksa and Habel, 1987] Freksa, C. and Habel, C., editors (1987). *Repräsentation und Verarbeitung Räumlichen Wissens.* Number 245 in Informatik–Fachberichte. Springer, Berlin.

[Gärdenfors, 1992] Gärdenfors, P. (1992). Belief revision: An introduction. In Gärdenfors, P., editor, *Belief Revision*, chapter 1, pages 1–28. Cambridge University Press.

[Gentner and Gentner, 1983] Gentner, D. and Gentner, D. R. (1983). A conceptual model discussed by galileo and used intuitively by physics students. In Gentner, D. and Stevens, A. L., editors, *Mental Models*, Cognitive Science, chapter 14, pages 325–340. Erlbaum, Hillsdale, NJ.

[Gilbert and Watts, 1983] Gilbert, J. K. and Watts, D. M. (1983). Concepts, misconceptions and alternative conceptions: Changing perspectives in science education. *Studies in Science Education*, 10:61–98.

[Guesgen, 1989] Guesgen, H. W. (1989). Spatial reasoning based on Allen's temporal logic. Technical Report TR-89-049, International Computer Science Institute, Berkeley.

[Gunstone and White, 1980] Gunstone, R. F. and White, R. T. (1980). A matter of gravity. *Research in Science Education*, 10:35–44.

[Gunstone and White, 1981] Gunstone, R. F. and White, R. T. (1981). Understanding of gravity. *Science Education*, 65(3):291–299.

[Habel et al., 1993] Habel, C., Herweg, M., and Pribbenow, S. (1993). Wissen über Raum und Zeit. In Görz, G., editor, *Künstliche Intelligenz*, chapter 1.4, pages 139–204. Addison–Wesley.

[Habimbola, 1988] Habimbola, I. O. (1988). The problem of terminology in the study of student conceptions in science. *Science Education*, 72(2):175–184.

[Hashweh, 1986] Hashweh, M. Z. (1986). Toward an explanation of conceptual change. *European Journal of Science Education*, 8(3):229–249.

[Hernández, 1992] Hernández, D. (1992). Diagrammatical aspects of qualitative representations of space. In *Proceedings of the AAAI Spring Symposium on Reasoning with Diagrammatic Representations*, pages 225–228, Stanford.

[Heth and Cornell, 1983] Heth, C. D. and Cornell, E. H. (1983). A learning analysis of spatial concept development in infancy. In Bisanz, J., Bisanz, G. L., and Kail, R., editors, *Learning in Children – Progress in Cognitive Development Research*, Series in Cognitive Development, chapter 3, pages 61–84. Springer, New York.

[Hobbs, 1985] Hobbs, J. R. (1985). Granularity. In *Proceedings of the 9th International Joint Conference on Artificial Iintelligence IJCAI*, pages 432–435, Los Angeles, CA.

[Holland et al., 1987] Holland, J. H., Holyoak, K. J., Nisbett, R. E., and Thagard, P. R. (1987). *Induction – Processes of Inference, Learning, and Discovery.* Computational Models of Cognition and Perception. MIT Press, Cambridge, MA.

[Jones et al., 1987] Jones, B., Lynch, P. P., and Reesink, C. (1987). Children's conceptions of the earth, sun and moon. *International Journal of Science Education*, 9(1):43–53.

[Klein, 1982] Klein, C. A. (1982). Children's concepts of the earth and the sun: A cross cultural study. *Science Education*, 65(1):95–107.

[Krupa et al., 1985] Krupa, M. P., Selman, R. L., and Jaquette, D. S. (1985). The development of science explanations in children and adolescents: A structural approach. In Chipman, S. F., Segal, J. W., and Glaser, R., editors, *Thinking and Learning Skills – Research and Open Questions*, volume 2, chapter 19, pages 427–455. Erlbaum, Hillsdale, NJ.

[Lightman et al., 1987] Lightman, A. P., Miller, J. D., and Leadbeater, B. J. (1987). Contemporary cosmological beliefs. In Novak, J. D., editor, *Second International Seminar on Misconceptions and Educational Strategies in Science and Mathematics*, volume III, pages 309–321, Ithaca, NY. Cornell University.

[Lightman and Sadler, 1988] Lightman, A. P. and Sadler, P. (1988). The earth is round? who are you kidding? *Science and Children*, 25(5):24–26.

[MacGregor, 1988] MacGregor, J. N. (1988). The effects of order on learning classifications by example: Heuristics for finding the optimal order. *Artificial Intelligence*, 34:361–370.

[Mali and Howe, 1979] Mali, G. B. and Howe, A. (1979). Development of earth and gravity concepts among Nepali children. *Science Education*, 63(5):685–691.

[Mayer, 1987] Mayer, M. (1987). Common sense knowledge versus scientific knowledge: The case of pressure, weight and gravity. In Novak, J. D., editor, *Second International Seminar on Misconceptions and Educational Strategies in Science and Mathematics*, volume I, pages 299–310, Ithaca, NY. Cornell University.

[Morik, 1989] Morik, K. (1989). Sloppy modeling. In Morik, K., editor, *Knowledge Representation and Organization in Machine Learning*, number 347 in Lecture Notes in Artificial Intelligence, pages 107–134. Springer, Berlin.

[Morik, 1992] Morik, K. (1992). Einführung in die Künstliche Intelligenz. Lecture script, University of Dortmund.

[Morik, 1993] Morik, K. (1993). Balanced cooperative modeling. *Machine Learning*, 11:217–235.

[Morik and Sommer, 1991] Morik, K. and Sommer, E. (1991). Balanced cooperative modelling using MOBAL 1.0: User guide. ESPRIT 2154 Deliverable 4.3.1/G, GMD, St. Augustin.

[Morik et al., 1993] Morik, K., Wrobel, S., Kietz, J.-U., and Emde, W. (1993). *Knowledge Acquisition and Machine Learning – Theory, Methods, and Applications.* Academic Press, London.

[Mühlenbrock, 1993] Mühlenbrock, M. (1993). Modeling explanations of the day/night cycle. unpublished report.

[Mühlenbrock, 1994a] Mühlenbrock, M. (1994a). Computational models of learning in astronomy. Research Report 11, University of Dortmund, Lehrstuhl Informatik VIII. Paper presented at *Computational Models of Cognition and Cognitive Function*, AISB 1994 Workshop Series, Leeds.

[Mühlenbrock, 1994b] Mühlenbrock, M. (1994b). Modellieren von Erklärungen für den Tag/Nacht–Zyklus. In Fensel, D. and Nakhaeizadeh, G., editors, *17. Deutsche Jahrestagung für Künstliche Intelligenz KI–93, Workshop Maschinelles Lernen: Theoretische Ansätze und Anwendungsaspekte*, pages 131–148. University of Karlsruhe.

[Murphy, 1993] Murphy, G. L. (1993). Theories and concept formation. In Mechelen, I. V., Hampton, J., Michalski, R. S., and Theuns, P., editors, *Categories and Concepts: Theoretical Views and Inductive Data Analysis*, pages 145–173. Academic Press, London.

[Murphy and Medin, 1985] Murphy, G. L. and Medin, D. L. (1985). The role of theories in conceptual coherence. *Psychological Review*, 92(3):289–316.

[Nebel, 1991] Nebel, B. (1991). Belief revision and default reasoning: Syntax–based approaches. In Allen, Fikes, and Sandewall, editors, *Principles of Knowledge Representation and Reasoning: Proceedings of the Second International Conference*. Morgan Kaufmann, San Mateo, CA.

[Nersessian, 1992] Nersessian, N. J. (1992). How do scientists think? capturing the dynamics of conceptual change in science. In Giere, R. N., editor, *Cognitive Models of Science*, volume XV of *Minnesota Studies in the Philosophy of Science*, pages 3–44. University of Minnesota Press, Minneapolis, MN.

[Noce and Vicentini, 1988] Noce, G. and Vicentini, M. (1988). The floating of objects on the moon: Prediction from a theory or experimental facts? *International Journal of Science Education*, 10(1):61–70.

[Novak, 1988] Novak, J. D. (1988). Learning science and the science of learning. *Studies in Science Education*, 15:77–101.

[Nussbaum, 1979] Nussbaum, J. (1979). Children's conceptions of the earth as a cosmic body: A cross age study. *Science Education*, 63(1):83–93.

[Nussbaum, 1985] Nussbaum, J. (1985). The earth as a cosmic body. In Driver, R., Guesne, E., and Tiberghien, A., editors, *Children's Ideas in Science*, chapter 9, pages 170–192. Open University Press, Milton Keynes.

[Nussbaum, 1986] Nussbaum, J. (1986). Students' perceptions of astronomical concepts. In Hunt, J. J., editor, *GIREP–86: Cosmos – An Educational Challenge*, pages 87–97, Nordwijk. European Space Agency.

[Nussbaum, 1989] Nussbaum, J. (1989). Classroom conceptual change: Philosophical perspectives. *International Journal of Science Education*, 11:530–540.

[Nussbaum and Novak, 1976] Nussbaum, J. and Novak, J. D. (1976). An assessment of children's concepts of the earth utilizing structured interviews. *Science Education*, 60(4):535–550.

[Nussbaum and Novak, 1978] Nussbaum, J. and Novak, J. D. (1978). Interviews zur Beurteilung der Vorstellungen von Kindern über die Erde. *physica didactica*, 5:33–51.

[Nussbaum and Sharoni-Dagan, 1983] Nussbaum, J. and Sharoni-Dagan, N. (1983). Changes in second grade children's preconceptions about the earth as a cosmic body resulting from a short series of audio–tutorial lessons. *Science Education*, 67(1):99–114.

[Ogar, 1986] Ogar, J. (1986). Ideas about physical phenomena in spaceships among students and pupils. In Hunt, J. J., editor, *GIREP–86: Cosmos – An Educational Challenge*, pages 375–378, Nordwijk. European Space Agency.

[Ogunniyi, 1987] Ogunniyi, M. B. (1987). Conceptions of traditional cosmological ideas among literate and nonliterate Nigerians. *Journal of Research in Science Teaching*, 24(2):107–117.

[Osborne and Wittrock, 1985] Osborne, R. and Wittrock, M. (1985). The generative learning model and its implications for science education. *Studies in Science Education*, 12:59–87.

[Pazzani, 1991] Pazzani, M. J. (1991). Influence of prior knowledge on concept acquisition: Experimental and computational results. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory and Cognition*, 17(3):416–432.

[Pazzani, 1994] Pazzani, M. J. (1994). Introduction to special issue on computational models of human learning. *Machine Learning*, 16:7–9.

[Pfundt and Duit, 1991] Pfundt, H. and Duit, R. (1991). *Bibliography: Students' Alternative Frameworks and Science Education.* IPN, Kiel, Germany, 3rd edition.

[Piaget, 1973] Piaget, J. (1973). *The Child and Reality.* Grossman, New York.

[Posner et al., 1982] Posner, G. J., Strike, K. A., Hewson, P. W., and Gertzog, W. A. (1982). Accomodation of a scientific conception: Toward a theory of conceptual change. *Science Education*, 66(2):211–227.

[Rabinowitz et al., 1987] Rabinowitz, F. M., Grant, M. J., and Dingley, H. L. (1987). Computer simulation, cognition, and development: An introduction. In Bisanz, J., Brainerd, C. J., and Kail, R., editors, *Formal Methods in Developmental Psychology – Progress in Cognitive Development Research*, Series in Cognitive Development, chapter 8, pages 263–301. Springer.

[Retz-Schmidt, 1988] Retz-Schmidt, G. (1988). Various views on spatial prepositions. *AI Magazine*, 9(2):95–105.

[Rosch, 1978] Rosch, E. (1978). Principles of categorization. In Rosch, E. and Lloyd, B. B., editors, *Cognition and Categorization*, pages 27–49. Erlbaum, Hillsdale, NJ.

[Ruggiero et al., 1985] Ruggiero, S., Cartelli, A., Dupré, F., and Vicentini-Missoni, M. (1985). Weight, gravity and air pressure: Mental representations by Italian middle school pupils. *European Journal of Science Education*, 7(2):181–194.

[Sadler, 1987] Sadler, P. M. (1987). Misconceptions in astronomy. In Novak, J. D., editor, *Second International Seminar on Misconceptions and Educational Strategies in Science and Mathematics*, volume III, pages 422–424, Ithaca, NY. Cornell University.

[Shrager and Langley, 1990] Shrager, J. and Langley, P. (1990). Computational approaches to scientific discovery. In Shrager, J. and Langley, P., editors, *Computational Models of Scientific Discovery and Theory Formation*, pages 1–26. Morgan Kaufmann, San Mateo, CA.

[Siegler, 1991] Siegler, R. S. (1991). *Children's Thinking.* Prentice–Hall, Englewood Cliffs, NJ, 2nd edition.

[Simon and Kaplan, 1989] Simon, H. A. and Kaplan, C. A. (1989). Foundations of cognitive science. In Posner, M. I., editor, *Foundations of Cognitive Science*, pages 1–47. MIT Press, Cambridge, MA.

[Smith and Treagust, 1986] Smith, C. L. and Treagust, D. F. (1986). Learning and the acquisition of a knowledge structure for the discipline of astronomy. In Hunt, J. J., editor, *GIREP–86: Cosmos – An Educational Challenge*, pages 375–378, Nordwijk. European Space Agency.

[Smith and Treagust, 1988] Smith, C. L. and Treagust, D. F. (1988). Not understanding gravity limits: Students' comprehension of astronomy concepts. *Australian Science Teachers Journal*, 33:21–24.

[Smith and Medin, 1981] Smith, E. E. and Medin, D. L. (1981). *Categories and Concepts.* Harvard University Press, Cambridge, MA.