Technische Universität Dresden

Fakultät Informatik

Diplomarbeit

zum Thema

Aktionen, Bedingungen und Ressourcen

von
Helko Lehmann
geboren am 28. Juli 1973 in Dresden

Eingereicht am 31. Januar 1997

Betreuer und Verantwortlicher Hochschullehrer: Prof. Dr. S. Hölldobler

Inhaltsverzeichnis

Einleitung

Zentraler Bestandteil jedes Formalismus' zur Ableitung von Aussagen über das Verhalten eines dynamischen Systems ist eine Repräsentationsform von vorhandenem Wissen über dieses System. Ein Formalismus, der die Ableitung von Aussagen über das Verhalten eines dynamischen Systems gestattet, kann z.B. zur Steuerung von Aktivitäten eines mit dem dynamischen System in Wechselwirkung stehenden Agenten genutzt werden.

Da das Wissen über das dynamische System im allgemeinen durch einen Menschen in den Formalismus übertragen wird, aber der Ableitungsmechanismus unabhängig vom Menschen Aussagen zur Steuerung der Aktivitäten des Agenten generieren soll, ergeben sich folgende Anforderungen an die Repräsentationsform ([4]):

- die Repräsentationsform muß zur automatischen Wissensableitung geeignet sein;
- die Repräsentationsform muß eine eindeutige und vollständige Semantik haben;
- Wissen über dynamische Systeme muß leicht durch den Menschen in die Repräsentationsform überführbar sein.

Da es sehr schwierig ist, all diese Anforderungen durch eine Repräsentationsform befriedigend zu erfüllen, ist das folgende Vorgehen bei der Entwicklung einer Repräsentationsform für dynamischer Systeme naheliegend:

1. Untersuchung der zu repräsentierenden Domänen und Definition der möglichen Interpretationen von Beschreibungen dynamischer Systeme;
2. Entwicklung einer leicht verständlichen Sprache, die eine genaue Semantik gemäß den untersuchten Möglichkeiten besitzt;
3. Übersetzung der formalen Beschreibungen von dynamischen Systemen in einen Kalkül, der die automatische Ableitung von Wissen gestattet.

Die in Punkt 2 entwickelte Sprache kann dann zusammen mit dem spezifizierten Übersetzungsvorgang und dem Kalkül aus Punkt 3 als eine den vorstehenden Kriterien genügende Repräsentationsform angesehen werden.

Die Vorgehensweise in dieser Arbeit ist entsprechend den Punkten 1. bis 3. strukturiert.

Im ersten Teil dieser Arbeit werden Semantiken für Beschreibungen von Weltzuständen und deren Veränderungen vorgestellt.

Im Abschnitt 1.1 wird die dieser Arbeit zugrundeliegende Vorstellung eines Universums[1] angegeben. Durch die Verwendung des Begriffs der *Eigenschaft* von Weltzuständen wird in Abschnitt 1.2 von dem Universum selbst abstrahiert und eine *Beschreibung* des Universums erzeugt. Diese Beschreibung enthält als wesentlichen Bestandteil eine Menge von *Kausalbeschreibungen*, die *Zustandsübergänge* beschreiben. Bei der Entwicklung der verschiedenen Interpretationen für Beschreibungen von Universen wird wie folgt vorgegangen:

1. Entwicklung eines Basisbegriffs für Beschreibungen von Universen
2. Erzeugung unterschiedlicher Interpretationen und entsprechende Verfeinerung des Basisbegriffs
3. Vereinigung der Konzepte geeigneter Interpretationen und Zusammenführung der verfeinerten Basisbegriffe

Die im Abschnitt 1.3 angestellten Beobachtungen über reale Universen legen ein Effizienzkriterium zur Bewertung der Interpretationen und der Beschreibungen von Universen nahe. Demnach ist es wünschenswert, mit möglichst wenigen Kausalbeschreibungen viele Zustandsübergänge eines Universums zu modellieren. Dies kann durch die Beschreibung eines Zustandsübergangs durch mehrere Kausalbeschreibungen erfolgen, wobei die Kausalbeschreibungen unabhängig voneinander auch andere Zustandsübergänge beschreiben können. Abschnitt 1.4 geht auf diese Möglichkeit der Interpretation von Kausalbeschreibungen ein.

Besonders effizient lassen sich Universen beschreiben, wenn die Interpretation von Kausalbeschreibungen unter der Annahme von *Rahmenaxiomen* erfolgt. Diese stellen, wie in Abschnitt 1.4.3 gezeigt wird, an die zur Beschreibung von Weltzuständen verwendeten Aussagen besondere Ansprüche.

Eine erweiterte Interpretation der Kausalbeschreibungen erleichtert durch die Verwendung von *exklusiven Bedingungen* die Spezifikation korrekter Beschreibungen von Universen. Diese sogenannten *Kontexte* von Kausalbeschreibungen werden im Abschnitt 1.4.4 untersucht.

In realen Domänen beinhalten Zustandsübergangsbeschreibungen häufig Konsumtions– und Produktionsprozesse. Eine Interpretation von Kausalbeschreibungen, die die besondere Verwendung von Ressourceneigenschaften unter Einbeziehung eines speziellen neuen Rahmenaxioms, gestattet, wird in Abschnitt 1.4.5 angegeben.

Der letzte Abschnitt des ersten Teils der Arbeit (Abschnitt 1.5) gibt schließlich die hier angenommene Semantik eines *Agenten* und der damit verbundenen

[1] Der Begriff „Universum“ wird hier synonym für „dynamisches System“ verwendet.

Begriffe *Aktion* und *Prozeß* wieder. Ein Agent wird demnach als ein Teil einer Beschreibung eines Universums interpretiert, der selbst nicht veränderbar ist, aber dessen Aktionen (Teil–) Ursache eines Zustandsübergangs sein können. Aktionsabhängige Kausalbeschreibungen werden gemäß Abschnitt 1.5 so interpretiert, daß sie auch die Ausführung mehrerer gleichzeitiger Aktionen des Agenten beschreiben können.

Der zweite Teil der Arbeit enthält die Definition der Aktionsbeschreibungssprache $\mathcal{A}_{RNCC}$. Diese auf der sehr eingeschränkten von Gelfond und Lifschitz in [8] vorgestellten Aktionsbeschreibungssprache $\mathcal{A}$ basierende Sprache vereint in [2], [5], [18] realisierte Konzepte des Nichtdeterminismus und der Parallelität von Aktionen. Zusätzlich wird in $\mathcal{A}_{RNCC}$ die Verwendung von Ressourceneigenschaften, exklusiven Bedingungen und die Modellierung nicht aktionsbedingter Zustandsübergänge unterstützt.

Da eine in $\mathcal{A}_{RNCC}$ spezifizierte *Domäne* eine gewisse Endlichkeitseigenschaft besitzt, kann sie als endliches normales logisches Programm mit einer Gleichungstheorie dargestellt werden. Der resultierende Kalkül $\mathcal{FC}_{RNCC}$ wird als eine Variante des *Fluentkalküls* im dritten Teil dieser Arbeit presentiert. Der Fluentkalkül ist ein *Ressourcenorientierter* Ansatz der Logikprogrammierung. Ressourcenorientierte Ansätze, wie sie erstmalig von Bibel in [3] (*Lineare Konnektionsmethode*), später durch Hölldobler und Schneeberger in [11] (*Equational Logic Programming*) und Girard in [9] (*Lineare Logik*) vorgeschlagen wurden, benötigen im Gegensatz zu auf dem Situationskalkül ([15]) basierenden Ansätzen keine Menge von zusätzlichen Rahmenaxiomen. Der in dieser Arbeit verwendete Kalkül basiert auf dem $\mathcal{FC}$ genannten Kalkül, der von Hölldobler und Schneeberger entwickelt wurde.

Kapitel 1

Welten und Weltbeschreibungen

1.1 Zustände und kausale Beziehungen

Die Vorstellung des Menschen von der Welt, in der er lebt, hat sich in den vergangenen hundert Jahren stark verändert. Das mechanistische Bild des Universums, das wohl am eindrucksvollsten im Werk Newtons [16] zum Ausdruck kommt, hat sich bei der Untersuchung sehr kleiner und sehr großer Teilbereiche des Universums als nicht ausreichend erwiesen. Die Bedeutung fundamentaler Begriffe wie *Raum*, *Zeit* oder *Objekt* wurde und wird neu überdacht.

In Größenordnungen, die dem Menschen intuitiv zugänglich sind, hat sich dennoch die *klassische* Vorstellung von Zuständen und Zustandsübergängen[1] als adäquate Beschreibung behaupten können. Nach diesen Vorstellungen *ist* das Universum[2] eine durch eindeutige kausale Abhängigkeiten verbundene Menge von Zuständen. Im Rahmen dieser Arbeit wird ebenfalls dieser klassische Standpunkt eingenommen. Ein Zustand wird dabei als eindeutig durch eine Menge von *Eigenschaften* identifizierbar betrachtet. Entsprechend den Vorstellungen der Newtonschen Mechanik sind Zustände z.B. Mengen von unteilbaren Objekten, die in einer eindeutigen räumlichen Beziehung zueinander stehen.

Definition 1 *Eine* Kausalitätsrelation *K ist eine binäre Relation über einer Menge von Weltzuständen. Eine Menge von Zuständen zusammen mit einer Kausalitätsrelation ist ein* Universum.

Eine Kausalitätsrelation gibt an, welcher Zustand zeitlich einem anderen Zustand folgt.

[1] Ein Zustand ist ein „Schnappschuß“ der Welt zu einem Zeitpunkt. Zwischen zeitlich aufeinanderfolgenden Schnappschüssen gibt es einen Übergang.

[2] Im folgenden werden die Begriffe Welt und Universum bzw. Weltzustand und Zustand synonym verwendet.

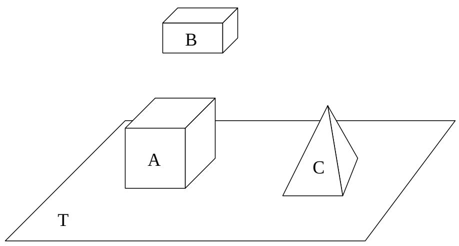
Definition 2 *Sei U ein Universum mit der Kausalitätsrelation K. Ein Element der transitiven Hülle K^{cl} einer Kausalitätsrelation heißt* Zustandsübergang.

Sei $(w_1, w_2) \in K^{cl}$, dann heißt w_1 Ausgangszustand *und w_2* Folgezustand.

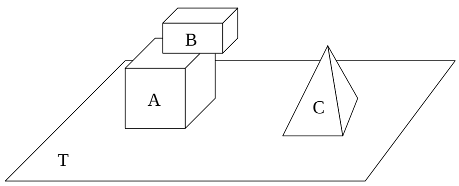
Im folgenden Beispiel wird der Zustandsbegriff illustriert. Strengenommen setzt die Unterscheidung von Objekten in einem Zustand bereits eine Beschreibung dieses Zustandes voraus. In diesem und in folgenden Beispielen werden die Zustandsbeschreibungen, die Objekte und deren räumliche Beziehungen beinhalten, als Zustände betrachtet. Die Schwierigkeit, sprachlich zwischen einem Zustand und der Zustandsbeschreibung unterscheiden zu können, resultiert aus der Tatsache, daß der eigentliche Weltzustand einem Beobachter nur mittels einer Zustandsbeschreibung zugänglich ist.

Beispiel 1 (Klötzchenwelt)
Die Klötzchenwelt besteht nur aus vier Objekten T, A, B und C, deren räumliche Beziehungen zueinander die Struktur eines Zustandes der Klötzchenwelt darstellen. Die Klötzchenwelt besitze zunächst nur zwei Weltzustände:

Zustand 1:



Zustand 2:



Die Kausalitätsrelation enthalte zunächst das Paar $(Zustand\ 1, Zustand\ 2)$, d.h. befindet sich die Welt in $Zustand$ 1, dann geht sie in $Zustand$ 2 über. □

Besitzt jeder Zustand höchstens einen unmittelbaren Folgezustand (w', mit $(w, w') \in K$), dann heißt das Universum *deterministisch*. Gilt für alle Zustandsübergänge (w_1, w_2) (definiert durch K^{cl}) $w_1 \neq w_2$, dann heißt das Universum *irreversibel*.

Die hier vertretene Vorstellung von dynamischen Systemen wurde durch den Begriff des *Universums* präzisiert. In den folgenden Abschnitten wird dargestellt, wie solche dynamischen Systeme *beschrieben* werden können.

1.2 Beschreibungen von Universen

1.2.1 Eigenschaften von Weltzuständen

Eigenschaften sind Aussagen über Zustände, die in einem Zustand entweder wahr oder falsch sein können. Mengen von Eigenschaften können zur Unterscheidung und damit auch zur Beschreibung von Zuständen bzw. Zustandsmengen verwendet werden. Eine Menge von Eigenschaften stellt dabei die Konjunktion der Aussagen dar.

Definition 3 *Sei W die Menge aller Weltzustände eines Universums und $V \subseteq W$. V beschreibt eine* Eigenschaft *p der Menge der Weltzustände V. Die Menge $W \setminus V = \overline{V}$ beschreibt die* komplementäre Eigenschaft *$\overline{p}$.*

Umgekehrt beschreibt jede Eigenschaft p die Menge V von Weltzuständen, in denen p gilt *und $\overline{p}$ die Menge von Weltzuständen $\overline{V}$, in denen p* nicht gilt*.*

Mit $[\![p]\!]$ wird die Menge von Zuständen bezeichnet, in denen p gilt und mit $\langle V \rangle$ die Eigenschaft, die durch eine Menge V von Zuständen beschrieben wird.

Entsprechend dieser Definition ist die Zuordnung von Weltzuständen zu einer Eigenschaft abhängig vom zu beschreibenden Universum $U = (W, K)$. Da im folgenden jedoch immer nur *ein* Universum betrachtet wird, kann auch im folgenden auf die entsprechende Indizierung aller Eigenschaften verzichtet werden.

Man kann Eigenschaften auch als Aussagen interpretieren, die durch *Beobachtung* und *Vergleich* von Zuständen einer Welt gewonnen wurden. Der Beobachter selbst wird dabei als vom Beobachteten unabhängig betrachtet.

Beispiel 2 (Klötzchenwelt)
Die Eigenschaft p_1 sei die Aussage „Das Objekt B liegt auf dem Objekt A.“ Die Eigenschaft p_2 sei die Aussage „Das Objekt B schwebt über dem Objekt A.“ Die Eigenschaft p_3 sei schließlich „Das Objekt C liegt auf dem Objekt T.“

$[\![p_1]\!]$ enthält nur den Zustand 2, $[\![p_2]\!]$ enthält nur den Zustand 1 und $[\![p_3]\!]$ enthält beide möglichen Weltzustände.

p_1 ist in dieser einfachen Welt die komplementäre Eigenschaft zu p_2, und p_2 ist die komplementäre Eigenschaft zu p_1. □

Aus Definition 3 folgt:

Korollar 1 *Sei p die eine Teilmenge V von Weltzuständen W eines Universums beschreibende Eigenschaft, dann gilt:*

$$p = \langle [\![p]\!] \rangle = \langle V \rangle = \left\langle \overline{\overline{V}} \right\rangle = \left\langle W \setminus \overline{V} \right\rangle = \left\langle \overline{[\![\overline{p}]\!]} \right\rangle \tag{1.1}$$

Einer Menge von Eigenschaften kann durch $[\![\,]\!]$ eine Menge von Zuständen, wie folgt zugeordnet werden.

Definition 4 *Sei U ein Universum und P eine Menge von Eigenschaften von Weltzuständen in U. Dann ist*

$$[\![P]\!] = \bigcap_{p \in P} [\![p]\!] \tag{1.2}$$

die Menge der Weltzustände aus U, in denen alle Eigenschaften aus P gelten.

Beispiel 3 (Klötzchenwelt)
Die Eigenschaft $\langle [\![\{p_1, p_2\}]\!] \rangle = \langle [\![p_1]\!] \cap [\![p_2]\!] \rangle$ ist eine Eigenschaft, die kein Zustand der Klötzchenwelt besitzt, da $[\![p_1]\!] \cap [\![p_2]\!] = \emptyset$.

Hingegen entspricht $\langle [\![\{p_1, p_3\}]\!] \rangle = \langle [\![p_1]\!] \cap [\![p_3]\!] \rangle$ der Eigenschaft p_1, da $[\![p_1]\!] \cap [\![p_3]\!] = [\![p_1]\!]$. □

Da jede Eigenschaft eines Universums ein Komplement besitzt, hat nach Definition 4 auch eine zusammengesetzte Eigenschaft P ein Komplement $\overline{P}$. Entsprechend Definition 3 und 4 folgt für $\overline{P}$:

Korollar 2 *Jede Menge P von Eigenschaften von Weltzuständen eines Universums U definiert eine Eigenschaft von Weltzuständen. Die komplementäre Eigenschaft $\overline{P}$ beschreibt diejenigen Weltzustände aus U, in denen wenigstens eine Eigenschaft aus P nicht gilt:*

$$\left[\!\left[\overline{P}\right]\!\right] = \overline{[\![P]\!]} \tag{1.3}$$

Beispiel 4 (Klötzchenwelt)
Die Eigenschaft $\left\langle \left[\!\left[\overline{\{p_1, p_3\}}\right]\!\right] \right\rangle$ beschreibt die Menge $\overline{[\![\{p_1, p_3\}]\!]}$ von Zuständen, d.h. in der Klötzchenwelt nur den Zustand 1. □

Spezifität von Eigenschaften

Die Teilmengenrelation der Eigenschaften zugeordneten Mengen von Weltzuständen definiert eine logische Abhängigkeit zwischen Eigenschaften. Diese Abhängigkeit ist ebenso wie die Teilmengenrelation eine Ordnungsrelation und beschreibt, wann die Gültigkeit einer Eigenschaft die Gültigkeit einer anderen Eigenschaft nach sich zieht.

Definition 5 *Seien p und q zwei Eigenschaften. Dann ist p genau dann eine* spezifischere *Eigenschaft als q, geschrieben $p \leq q$, wenn*

$$[\![p]\!] \subseteq [\![q]\!]. \tag{1.4}$$

Gilt die Eigenschaft p in einem Zustand, dann gilt in diesem Zustand auch die Eigenschaft q. Betrachtet man p und q als Aussagen, so kann man auch „p impliziert q" sagen. Es werden im folgenden noch die folgenden Fälle unterschieden:

Definition 6 *Seien p und q zwei Eigenschaften.*

$$\begin{aligned} p = q &\iff p \leq q \wedge q \leq p \\ p < q &\iff p \leq q \wedge p \neq q \end{aligned} \tag{1.5}$$

Seien p und q zwei Eigenschaften. Beschreiben p und q die gleichen Zustandsmengen (es gilt $p = q$), dann heißen p und q gleich.

Ist die Zustandsmenge von p echt in der Zustandsmenge von q enthalten (es gilt $p < q$), dann heißt p echt *spezifischer als q.*

Beispiel 5 (Klötzchenwelt)
Sowohl die Eigenschaft p_1 als auch die Eigenschaft p_2 ziehen die Gültigkeit der Eigenschaft p_3 nach sich. Jedoch gibt es je einen Zustand, in dem p_3 gilt aber nicht p_1 bzw. nicht p_2. Die Ordnungsrelation zwischen den geschilderten Eigenschaften p_1, p_2 und p_3 sieht daher wie folgt aus: $\{p_1 < p_3, p_2 < p_3\}$. Außerdem gilt $p_1 = \overline{p_2}$. □

Qualitäten und Quantitäten

Entsprechend ihren logischen Abhängigkeiten von anderen Eigenschaften können Eigenschaften klassifiziert werden. Eigenschaften, zu denen höchstens gleich spezifische Eigenschaften existieren, seien als *Qualitätseigenschaften* bezeichnet, die *Qualitäten* von Weltzuständen beschreiben. Eigenschaften, die entweder echt spezifischer oder echt weniger spezifisch als mindestens eine andere Eigenschaft sind, heißen *Quantitätseigenschaften* und beschreiben *Quantitäten* von Weltzuständen.

Definition 7 *Sei P eine Menge von Eigenschaften. Eine Eigenschaft $p \in P$ ist genau dann eine* Qualitätseigenschaft *in P, wenn*

$$\neg \exists q \in P : q < p \vee p < q \tag{1.6}$$

Definition 8 *Sei P eine Menge von Eigenschaften. Eine Eigenschaft $p \in P$ ist genau dann eine* Quantitätseigenschaft *in P, wenn*

$$\exists q \in P : q < p \vee p < q \tag{1.7}$$

Eine Eigenschaft ist nach Definition 7 und 8 entweder Quantitäts– oder Qualitätseigenschaft in einer Menge P. Existiert in P für eine Eigenschaft $p \in P$ kein größeres Element, dann heiße p *Maximalelement* in P. Existiert kein kleineres Element dann heiße p *Minimalelement* in P. Qualitätseigenschaften aus P sind demzufolge gleichzeitig Minimal– und Maximalelemente in P.

In der Klötzchenwelt sind alle angegebenen Eigenschaften p_1, p_2, p_3 Quantitätseigenschaften in $\{p_1, p_2, p_3\}$, da zu jeder der Eigenschaften eine spezifischere oder eine weniger spezifische Eigenschaft existiert.

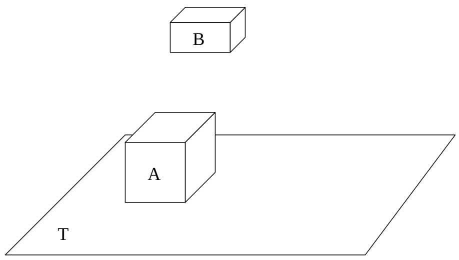
Quantitäten stellen umgangssprachlich Elemente geordneter Eigenschaftsmengen dar, z.B. stellt „Temperatur“ eine Menge von Eigenschaften „Es herrschen mindestens k Grad Celsius.“ ($k \in \mathbb{Z}$) dar, die entsprechend der Spezifität geordnet sind. Die Eigenschaft „Es ist kalt.“, z.B., kann in diesem Sinne nur eine Qualitätseigenschaft sein, wenn sie nicht in einer Menge mit Temperatureigenschaften auftritt.

Beispiel 6 (Klötzchenwelt 2)
Die erweiterte Klötzchenwelt enthält eine unendliche Menge von Zuständen.

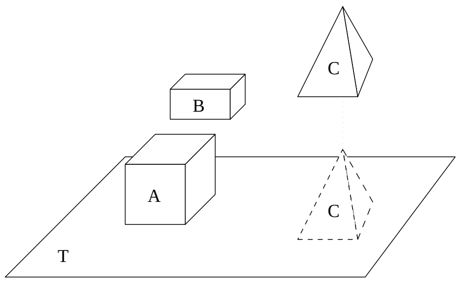
Seien $4+r_1$ *und* $4+r_2$ *zwei beliebige Zustände*[3] *mit* $0 \leq r_1 \leq 1$ *und* $0 \leq r_2 \leq 1$. *Dann sei der Zustand* $4+r_1$ *genau dann ein Zustand, indem Objekt* C *näher zu dem Objekt* T *ist als im Zustand* $4+r_2$, *wenn* $r_2 > r_1$.

Die Punkte zwischen Objekt C *und Objekt* T *deuten die verschiedenen Zustände durch mögliche Positionen des Objektes* C *an:*

Zustand 3*:*



Zustand $4+r$*:*



Die Eigenschaft p_1 *(„Das Objekt* B *liegt auf Objekt* A*“) gilt nur im den Zustand* 2, *die Eigenschaft* p_2 *(„Das Objekt* B *schwebt über Objekt* A*“) in den Zuständen* 1, 3 *und* $4+r$.

Sei C^H *eine Menge von Eigenschaften, die die relative Position des Objektes* C *zu* T *beschreiben. Jeder Eigenschaft* $p^h \in C^H$ *mit* $0 < h \leq 1$ *sei dabei eine Zustandsmenge wie folgt zugeordnet:* $\llbracket p^h \rrbracket = \{\textit{Zustand } 4+r \mid r \leq h \leq 1\}$. *Die Eigenschaft* $p^0 \in C^H$ *beschreibe die Zustände* 1, 2 *und* 4.

Alle Eigenschaften der Menge C^H *sind Quantitätseigenschaften: man kann sie als Beschreibung der Quantität „Nähe“ des Objektes* C *zum Objekt* T *auffassen.*

[3] Für reelle Zahlen hat die Relation $\leq$ ihre übliche Bedeutung.

Die durch eine einzelne Eigenschaft $p^h \in C^H$ *getroffene Aussage über Zustände könnte z.B. lauten: „Das Objekt* C *schwebt höchstens in der Höhe* h *über* T*“. Entsprechend ihrer Spezifität sind die Eigenschaften* p^h *wie folgt geordnet:* $p^{h_1} \leq p^h \leq p^{h_2}$ *gdw.* $0 \leq h_1 \leq h \leq h_2 \leq 1$.

Aus der oben definierten Zuordnung der Zustände:

Eigenschaft	*Zustände*
p_1	2
p_2	1, 3, $4 + r$ $(0 \leq r \leq 1)$
p_3	1, 2, 4
p^0	1, 2, 4
p^h $(0 < h \leq 1)$	1, 2, $4 + r$ $(0 \leq r \leq h)$

folgt, daß nur p_2 *eine Qualitätseigenschaft in* $C^H \cup \{p_1, p_2, p_3\}$ *ist. Alle anderen Eigenschaften sind Quantitätseigenschaften.* p_1 *und* p_2 *sind außerdem Minimalelemente.* p_2 *und* p^1 *sind Maximalelemente.* □

Korollar 3 *Sei* P *eine Menge von Eigenschaften eines Universums* U *und* Q *die Menge der komplementären Eigenschaften zu den Elementen aus* P*. Die komplementäre Eigenschaft einer Qualitätseigenschaft aus* P *ist eine Qualitätseigenschaft in* Q*. Eine komplementäre Eigenschaft einer Quantitätseigenschaft aus* P *ist eine Quantitätseigenschaft in* Q*.*

Beweis 1 (Korollar 3) *Seien* p *und* q *zwei Eigenschaften aus* P *und* W *die Menge aller Weltzustände eines Universums.*

$$\overline{p} \leq \overline{q} \iff W \setminus [\![p]\!] \subseteq W \setminus [\![q]\!] \iff [\![q]\!] \subseteq [\![p]\!] \iff p \leq q$$

Die in der Menge Q *der komplementären Eigenschaften von* P *existierende Ordnung ist also eine zu der Ordnung in* P komplementäre *Ordnung.*

Komplemente der Minimalelemente aus P *sind demzufolge Maximalelemente bzgl. der komplementären Ordnung in* Q *und Komplemente der Maximalelemente in* P *sind Minimalelemente in* Q*.*

Wegen

$$p < q \iff p \leq q \wedge \neg(q \leq p) \iff (\overline{q} \leq \overline{p}) \wedge \neg(\overline{p} \leq \overline{q}) \iff \overline{q} < \overline{p}$$

gilt mit Definition 7 und 8:

wenn q *eine Quantitätseigenschaft in* P *ist, dann existiert ein echt kleineres Element oder/und ein echt größeres Element in* P*. Entsprechend gibt es in der Menge* Q *ein echt größeres oder/und ein echt kleineres Element zu* $\overline{q}$*.* □

Beispiel 7 (Klötzchenwelt 2)
Die Menge D^H *von komplementären Eigenschaften zu* C^H *ist auch eine Menge von Quantitätseigenschaften, die jedoch nicht die „Nähe“, sondern die „Ferne“ von Objekt* C *zu Objekt* T *beschreibt.* □

Wenn zwei beliebige Teilmengen R, S einer Eigenschaftsmenge P nur dann abhängige Eigenschaften ($[\![R]\!] \subseteq [\![S]\!]$ oder $[\![S]\!] \subseteq [\![R]\!]$) beschreiben, wenn R und S selbst in einer Teilmengenrelation stehen, dann ist die Betrachtung der Teilmengenrelation zwischen R und S zur Bestimmung der Spezifitätsrelation zwischen R und S hinreichend:

Definition 9 *Sei P eine Menge von Eigenschaften der Weltzustände eines Universums U. P heißt genau dann* redundanzfrei, *wenn*

$$\forall U, V \subseteq P : [\![U]\!] \subseteq [\![V]\!] \iff V \subseteq U \tag{1.8}$$

Ein anderes Merkmal einiger Mengen von Eigenschaften ist die Widerspruchsfreiheit, die widerspiegelt, daß alle Teilmengen von Eigenschaften nichtleere Zustandsmengen beschreiben:

Definition 10 *Sei P eine Menge von Eigenschaften der Weltzustände eines Universums. P heißt genau dann* widerspruchsfrei, *wenn für jede Teilmenge Q von P gilt:*

$$[\![Q]\!] \neq \emptyset \tag{1.9}$$

Da $\langle[\![P]\!]\rangle$ spezifischer als alle anderen Eigenschaften $\langle[\![Q]\!]\rangle$ mit $Q \subseteq P$ ist (Definition 4 und 6), gilt: P ist genau dann widerspruchsfrei, wenn $\langle[\![P]\!]\rangle \neq \emptyset$.

Eigenschaftsklassen und Ressourceneigenschaften

Einige Ansätze zur Beschreibung von Universen basieren auf sogenannten *Ressourcen* ([3],[9],[11]). Ressourcen werden z.B. zur Beschreibung der Anzahl von Objekten einer bestimmten Objektklasse verwendet. Dabei kommt es nicht auf die Unterscheidbarkeit der einzelnen Objekte voneinander an, d.h. der Beobachter des Universums verfügt möglicherweise nur über die Anzahl von Objekten betreffenden Informationen, nicht jedoch über die tatsächliche Identität eines Objekts.

Die hier verwendete Definition von Ressourcen basiert auf dem Begriff der Eigenschaft und erlaubt auch die Beschreibung von beliebig teilbaren Größen wie z.B. *Energie* als Ressourcen.

Durch die Menge der spezifischeren und allgemeineren Eigenschaften aus P zu einer Eigenschaft $p \in P$ wird eine Klasse zu p definiert. Ressourcen werden hier als Eigenschaftsklassen betrachtet, die aus einer beliebigen widerpruchsfreien und redundanzfreien Menge von Eigenschaften erzeugt werden können.

Definition 11 *Sei P eine Menge von Eigenschaften und $p \in P$ eine Eigenschaft. Die Menge*

$$[p]_{\leq} = \{q | q \in P \wedge (q \leq p \vee p \leq q)\} \tag{1.10}$$

heißt Eigenschaftsklasse von p in P.

Beispiel 8 (Möbelwelt)
Jeder Zustand der Möbelwelt enthält eine unterschiedliche Anzahl von Objekten. Die Zustände werden durch zwei Eigenschaftsmengen beschrieben:

1. $S = \{s^k \mid$ *„Es existieren mindestens k Stühle"*$\}$ *mit* $0 \leq k \leq 10$
2. $T = \{t^k \mid$ *„Es existieren mindestens k Tische"*$\}$ *mit* $0 \leq k \leq 3$

Zwischen den Eigenschaften gelten die folgenden Relationen: $s^{10} < s^9 < \ldots < s^0$ *für* $s^i \in S$, $t^3 < t^2 < \ldots < t^0$ *für* $t^i \in T$.

Jede Eigenschaft $s \in S$ *definiert die Eigenschaftsklasse* $[s]_{\leq} = S$ *und jede Eigenschaft* $t \in T$ *definiert die Eigenschaftsklasse* $[t]_{\leq} = T$. □

Die im vorstehenden Beispiel angegebenen Eigenschaften können durch Kombinationen von widerspruchs– und redundanzfreien Eigenschaftsmengen dargestellt werden, die das Vorkommen eines bestimmten Tisches oder Stuhles beschreiben, z.B. q_i = „Es existiert der Stuhl mit der Identität i." Die Eigenschaft s^1 wird dann dargestellt als $\langle [\![q_1]\!] \cup [\![q_2]\!] \cup \ldots \rangle$ und s^2 als $\langle ([\![\{q_1, q_2\}]\!]) \cup ([\![\{q_1, q_3\}]\!]) \cup ([\![\{q_2, q_3\}]\!]) \cup \ldots \rangle$.
Die Zuordnung von natürlichen Zahlen (hier 1 und 2) zu Eigenschaftskombinationen kann auf die Zuordnung einer nichtnegativen reellen Zahl, verallgemeinert werden. Oben wurde jeder der Kombinationen $\{q_1, q_2\}, \{q_1, q_3\}, \ldots$ die (endliche) Anzahl der auftretenden Eigenschaften als Maß zugeordnet. Für Kombinationen, die unendlich viele Eigenschaften enthalten, ist diese (natürliche) Zuordnung unzureichend.

Definition 12 *Sei* P *eine widerspruchs– und redundanzfreie Menge von Eigenschaften,* P^* *die Potenzmenge von* P *und* $|.|$ *eine beliebige Abbildung, die jeder Teilmenge* r, s *von* P *eine nichtnegative reelle Zahl zuordnet, so daß* $r \subset s \rightarrow |r| < |s|$. *Sei* R^k *die Menge aller Teilmengen aus* P, *so daß gilt:*

$$\forall r \in R^k : |r| = k \wedge \forall p \in P^* \setminus R^k : |p| \neq k \tag{1.11}$$

Dann seien die Eigenschaften r^k *wie folgt definiert:*

$$\left[\!\!\left[r^k \right]\!\!\right] = \bigcup_{r \in R^k} [\![r]\!] \tag{1.12}$$

r^k *heißt* Ressourceneigenschaft der Ordnung k *zu* P.

Eine Menge von Ressourceneigenschaften zu P *beschreibt eine* Ressource.

Aus dieser Definition folgt sofort:

Korollar 4 *Sei* S *eine Menge von Ressourceneigenschaften zu einer widerspruchs– und redundanzfreien Menge* P *von Eigenschaften. Dann bilden die Elemente* r^k *von* S *eine lineare Kette bzgl. der Relation* $<$ *entsprechend ihrer Ordnung* k. *Eine Menge von Ressourceneigenschaften, die mehr als ein Element enthält, ist also auch eine Menge von Quantitätseigenschaften und bildet eine Eigenschaftsklasse, die dann* Ressourcenklasse *heißt.*

Sind zu nichtnegativen reellen Zahlen k_i Ressourceneigenschaften r^{k_i} der Ordnung k_i zu P definiert, dann kann durch Addition der Ordnungen zweier Ressourceneigenschaften eine Ressourceneigenschaft erzeugt werden:

Definition 13 *Sei P eine Menge von widerspruchs– und redundanzfreien Eigenschaften und seien r^k und r^l zwei Ressourceneigenschaften von P, dann wird mit r^k+r^l diejenige Ressourceneigenschaft r^{l+k} bezeichnet, die die Ordnung $l+k$ besitzt.*

Beispiel 9 (Möbelwelt)
Seien P_S und P_T Mengen von widerspruchs– und redundanzfreien Eigenschaften:

1. $P_S = \{p_i \mid$ *„Es existiert der Stuhl i“*$\}$ *mit* $1 \leq i \leq 10$
2. $P_T = \{p_i \mid$ *„Es existiert der Tisch i“*$\}$ *mit* $1 \leq i \leq 3$

Jeder Teilmenge Q von P_S bzw. P_T wird eine Zahl $|.|$ zugeordnet, so daß $|Q|$ der Anzahl der enthaltenen Eigenschaften aus P_S bzw. P_T entspricht. Die Eigenschaftsmengen S und T stellen in der Möbelwelt Ressourcenklassen zu P_S bzw. P_T dar:

Sei $s^k \in S$ die Eigenschaft „Es existieren mindestens k Stühle“, dann repräsentiert $s^2 + s^4$ die Eigenschaft „Es existieren mindestens 6 Stühle“.

Die Eigenschaft $s^4 + s^7 = s^{11}$ ist jedoch keine Eigenschaft aus S. □

Ressourceneigenschaften sind *generische* Eigenschaften, da aus jeder Menge von widerspruchs– und redundanzfreien Eigenschaften und einer Abbildung $|.|$ entsprechend Definition 12 Ressourceneigenschaften erzeugt werden können.

Minimale Eigenschaften

Bestehen Abhängigkeiten zwischen Eigenschaften einer Menge (die Menge ist also nicht redundanzfrei), dann ist es mitunter nicht erforderlich, alle Eigenschaften zu berücksichtigen, d.h. die entsprechende Zustandsmenge kann dann ebenso durch wenige ausgewählte Eigenschaften beschrieben werden:

Theorem 1 *Sei P eine Menge von Eigenschaften. Außerdem sei $\hat{P}$ die Menge aller größten unteren Schranken der Eigenschaftsklassen der Elemente zu P. Wenn $\hat{P} \subseteq P$, dann gilt*

$$[\![P]\!] = \left[\!\!\left[\hat{P}\right]\!\!\right] \tag{1.13}$$

Beweis 2 (Theorem 1) *Sei P eine Menge von Eigenschaften und $Q \subseteq P$ eine Eigenschaftsklasse aus P. Sei außerdem*

$$[\![\hat{q}]\!] = \bigcap_{q \in Q} [\![q]\!].$$

Dann ist $\hat{q}$ *die größte untere Schranke zu* Q, *da* $\forall q \in Q : \hat{q} \leq q$ *und* $\neg\exists q' : \forall q \in Q : q' \neq \hat{q} \wedge \hat{q} < q' \leq q$. *Für die Menge der größten unteren Schranken aller Eigenschaftsklassen* Q *mit* $Q \subseteq P$ *gilt:*

$$\left[\!\left[\hat{P}\right]\!\right] = \bigcap_{Q} [\![\hat{q}]\!] = \bigcap_{Q} \bigcap_{q \in Q} [\![q]\!] = \bigcap_{p \in P} [\![p]\!] = [\![P]\!]$$

□

D.h., sind die größten unteren Schranken der Eigenschaftsklassen zu den Elementen von P selbst Elemente von P, so bestimmen diese die durch P beschriebene Zustandsmenge. Z.B. sind in jeder endlichen Menge von Eigenschaften auch die größten unteren Schranken enthalten. Wird jedoch ein Zustand durch eine unendliche Menge P_u von Eigenschaften beschrieben, sind nicht notwendigerweise alle größten unteren Schranken Elemente von P_u. P_u könnte z.B. eine vollständig bezüglich der Spezifität geordnete Menge von Eigenschaften sein, die kein Minimalelement enthält. Es gibt dann keinen Repräsentanten in P_u, der die gleiche Zustandsmenge wie $\langle [\![P_u]\!] \rangle$ beschreibt.

Obwohl die später eingeführte Beschreibungssprache $\mathcal{A}_{RNCC}$ nicht die Verwendung unendlicher Eigenschaftsmengen zur Beschreibung von Zuständen unterstützt, werden in den folgenden Abschnitten Eigenschaftsmengen weiterhin als möglicherweise unendlich betrachtet. Andere Sprachen könnten z.B. endliche Beschreibungen von unendlichen Eigenschaftsmengen (durch Parameter) verwenden.

1.2.2 Kausalbeschreibungen

Im vorhergehenden Abschnitt wurde die Beschreibung von Zuständen und Zustandsmengen durch deren Eigenschaften dargestellt. Um eine Beschreibung eines Universums zu erhalten, wird noch eine Beschreibung der Kausalitätsrelation benötigt. Diese *Kausalbeschreibung* wird zunächst wie folgt eingeführt und später modifiziert, um die Ausdrucksstärke zu erhöhen.

Definition 14 *Seien* C *und* E *Mengen von Eigenschaften. Dann heißt* (C, E) Kausalbeschreibung. C *wird* Bedingung *und* E Effekt *der Kausalbeschreibung genannt.*

Die Bedingung einer Kausalbeschreibung bestimmt dabei, in welchen Anfangszuständen die Kausalbeschreibung anwendbar ist und der Effekt, welche Eigenschaften der beschriebene Folgezustand hat.

Eine Menge von Eigenschaften zusammen mit einer Menge von Kausalbeschreibungen beschreiben ein Universum U, wenn die Effekte und Bedingungen aller Kausalbeschreibungen nur Eigenschaften von Zuständen aus U enthalten und durch jede Kausalbeschreibung mindestens ein Zustandsübergang aus U beschrieben wird. Ebenso wie Kausalbeschreibungen wird auch eine Beschreibung eines Universums später modifiziert.

Definition 15 *Sei U ein Universum mit den Weltzuständen W und der Kausalitätsrelation K. Außerdem sei P eine Menge von Eigenschaften von Weltzuständen und R eine Menge von Kausalbeschreibungen.*

Ein Paar (P, R) ist genau dann eine Beschreibung des Universums U, *wenn gilt:*

$$\begin{array}{ll} 1. & \forall (C, E) \in R : C \subseteq P \wedge E \subseteq P \\ 2. & \forall p \in P : [\![p]\!] \in W^* \\ 3. & \forall (C, E) \in R : \exists (w_c, w_e) \in K^{cl} : \ w_c \in [\![C]\!] \wedge w_e \in [\![E]\!] \end{array} \tag{1.14}$$

W^* bezeichnet die Potenzmenge von W und K^{cl} die transitive Hülle der Kausalitätsrelation K.

Eine Beschreibung eines Universums stellt eine *Abstraktion* eines Universums dar, da im allgemeinen auch Weltzustände und Zustandsübergänge beschrieben werden, die nicht in U existieren.

Definition 16 *Sei $D = (P, R)$ eine Beschreibung eines Universums $U = (W, K)$. Die Menge von Weltzuständen $W_D = \bigcup_{p \in P} [\![p]\!]$ zusammen mit der durch R auf W_D definierten Relation bilden ein Universum $U_D = (W_D, K_D)$. U_D heißt* das durch D bzgl. U definierte Universum.

Im allgemeinen ist das durch eine Beschreibung definierte Universum *nicht* identisch mit dem beschriebenen Universum. Z.B. sind Elemente von W_D, die Zustände in U_D repräsentieren, möglicherweise keine Zustände in W.

Definition 17 *Seien $U = (W, K)$ und $V = (W_V, K_V)$ Universen, wobei $W_V \subseteq W$ und $K_V \subseteq K^{cl}_{|W_V}$. Sei außerdem $D = (P, R)$ eine Beschreibung von U. D heißt genau dann* vollständig *bzgl. U in V, wenn für das durch D bzgl. U definierte Universum $U_D = (W_D, K_D)$ mit der transitiven Hülle K^{cl}_D $K_V \subseteq K^{cl}_D$ gilt.*

$K^{cl}_{|W_V}$ sei die transitive Hülle von K eingeschränkt auf die Zustände W_V.

Eine vollständige Beschreibung ist eine Abstraktion eines Teiluniversums. Alle Zustandsübergänge dieses Teiluniversums werden durch die Menge der Kausalbeschreibungen beschrieben. Werden außerdem keine Zustandsübergänge beschrieben, die nicht Element der Kausalitätsrelation des Teiluniversums sind, dann heißt die vollständige Beschreibung *korrekt*.

Definition 18 *Sei $D = (P, R)$ eine vollständige Beschreibung eines Universums U in $V = (W_V, K_V)$, wobei $W_V \subseteq W$ und $K_V \subseteq K^{cl}_{|W_V}$. Die Menge der Zustandsübergänge zu D bzgl. U sei K^{cl}_D.*

Die Beschreibung D heißt genau dann korrekt *in V, wenn*

$$\forall (w_c, w_e) \in K^{cl}_D : (w_c, w_e) \in K_V \tag{1.15}$$

1.3 Reale Universen

Bisher wurden noch keine Annahmen über die zu beschreibenden Universen oder deren Teile gemacht. Speziellen Beschreibungen von Universen liegen Aussagen über die *effiziente Beschreibbarkeit* des Universums zugrunde. Im allgemeinen muß jedoch jeder Zustandsübergang, des zu beschreibenden Teiluniversums $V = (W_V, K_V)$ (K_V ist Teilmenge der auf die Zustände des Teiluniversums eingeschränkten Zustandsübergänge des Universums), der nicht durch die Abfolge von anderen Zustandsübergängen darstellbar ist, durch eine Kausalbeschreibung beschrieben werden.

Im folgenden bezeichne der Begriff *reales Universum* ein Universum oder einen Teil eines Universums, dessen Beschreibung im Rahmen menschlicher Tätigkeit sinnvoll ist. Da einem Menschen jedoch nur eine Weltbeschreibung und nicht die Welt selbst zugänglich ist, sind die folgenden Standpunkte nicht beweisbar oder widerlegbar. Der Operator $|.|$ symbolisiert dabei die Anzahl der Elemente einer Menge.

Standpunkt 1 *Für ein reales Universum $U = (W, K)$ existiert eine vollständige und korrekte Beschreibung $D = (P, R)$ in $V = U$ mit $|P| \ll |W^*|$ und $|R| \ll |K^{cl}|$.*

Dieser Standpunkt kann noch weiter verschärft werden:

Standpunkt 2 *Für ein reales Universum $U = (W, K)$ existiert eine vollständige und korrekte Beschreibung $D = (P, R)$ in $V = U$ mit $|P| \ll |W|$ und $|R| \ll |K|$.*

Entsprechend diesen Annahmen kann das Ziel einer *effizienten* vollständigen und korrekten Beschreibung eines Universums sein, mit einer kleinen Menge von Eigenschaften durch wenige Kausalbeschreibungen die Zustandsübergänge des zu beschreibenden Teils eines Universums darzustellen.

Definition 19 *Seien $D_1 = (P_1, R_1)$ und $D_2 = (P_2, R_2)$ zwei vollständige und korrekte Beschreibungen eines Universums in V, D_1 heißt genau dann* mindestens so effizient in *V wie D_2, wenn $|R_1| \leq |R_2|$ und $|P_1| \leq |P_2|$.*

Effiziente Beschreibungen können erzeugt werden, wenn eine Kausalbeschreibung mehrere Zustandsübergänge beschreibt. Die Bedingung einer Kausalbeschreibung muß dann für eine Menge von Zuständen gültig sein. Eine Kausalbeschreibung kann auch als eine *Regel* interpretiert werden, die in bestimmten Zuständen angewendet werden kann.

Definition 20 *Sei $D = (P, R)$ eine Beschreibung eines Universums und $[\![Q]\!]$ mit $Q \subseteq P$ eine Menge von Zuständen. Dann ist eine Kausalbeschreibung $c = (C_c, E_c) \in R$ genau dann in jedem Zustand $w \in [\![Q]\!]$* anwendbar, *wenn $Q \leq C_c$.*

Beschreibt der Effekt einer Kausalbeschreibung einen Zustand S' eindeutig, dann geht jeder durch die Bedingung dieser Kausalbeschreibung beschriebene Zustand S in genau diesen Zustand S' über. Zu jedem möglichen Folgezustand im Universum muß dann also mindestens eine Kausalbeschreibung existieren, die die Übergänge in diesen Zustand beschreibt.

Im Gegensatz dazu kann ein Zustandsübergang auch durch mehrere Kausalbeschreibungen dargestellt werden, d.h. die Effekte mehrerer im Ausgangszustand S anwendbarer Kausalbeschreibungen bestimmen zusammen den Folgezustand S'. In diesem Fall muss der Effekt einer Kausalbeschreibung Mengen von Zuständen beschreiben.

Sind mehrere Kausalbeschreibungen in einer Menge von Zuständen anwendbar, dann müssen im allgemeinen zusätzliche Annahmen über die Menge der Kausalbeschreibungen gemacht werden, um der Menge eindeutig eine Kausalitätsrelation zuordnen zu können, da es Interaktionen zwischen Kausalbeschreibungen geben kann:

Definition 21 *Sei $D = (P, R)$ eine Beschreibung eines Universums. Sei $[\![Q]\!]$ eine Zustandsmenge mit $Q \subseteq P$ und $R_Q \subseteq R$ die Menge der in $[\![Q]\!]$ anwendbaren Kausalbeschreibungen.*

Es existieren genau dann Bedingungsinteraktionen *in R_Q, wenn R_Q mindestens zwei Elemente enthält.*

Es existieren genau dann Effektinteraktionen *in R_Q, wenn R_Q mindestens zwei Elemente $f = (C_f, E_f)$ und $g = (C_g, E_g)$ enthält, so daß $E_f \neq E_g$.*

1.4 Beschreibungen realer Universen

Zusätzliche Annahmen über Kausalbeschreibungen oder Eigenschaftsmengen einer Beschreibung eines Universums sind Interpretationen dieser Beschreibung. Die in den folgenden Abschnitten angegebenen Interpretationen werden mitunter auch eine Modifizierung der syntaktischen Struktur von Beschreibungen von Universen fordern. An diesen Stellen wird explizit darauf hingewiesen, welche Interpretation für welche Elemente der Beschreibung gelten soll.

Wie bereits erwähnt, steht dem Menschen nur eine Beschreibung der Welt zur Verfügung und nur durch Anwendung der Regeln seiner Beschreibung kann herausgefunden werden, ob und für welchen Teil der von ihm beobachteten Welt seine Beschreibung eine vollständige und korrekte Beschreibung darstellt.

Standpunkt 3 *Sei D eine vollständige Beschreibung eines Universums in V. Im allgemeinen ist nicht entscheidbar, ob D eine korrekte Beschreibung in V ist.*

Da die Verifikation der Korrektheit von Kausalbeschreibungen nur durch Prüfung in einem Universum erfolgen kann, wird im folgenden davon ausgegangen, daß jede Beschreibung eines Universums U eine korrekte Teilbeschreibung in $V = (W_V, K_V)$ *ist.* Kausalbeschreibungen sollen jedoch um Ausdrucksmittel erweitert werden, so daß für eine Menge von Zuständen W eines Universums, beschrieben durch Eigenschaften, entschieden werden kann, ob $W \subseteq W_V$ ist.

In den nächsten Abschnitten werden *Konflikte* bei der Anwendung von Kausalbeschreibungen definiert. Ein Zustand S ist dann Element der beschriebenen Welt, wenn die Kausalbeschreibungen, die in S *gültig* sind, keinen Konflikt verursachen.

1.4.1 Gültigkeit von Kausalbeschreibungen

Sind in einem durch eine Menge von Eigenschaften beschriebenen Zustand mehrere Kausalbeschreibungen einer Beschreibung D anwendbar, so existieren nach Definition 21 Bedingungsinteraktionen zwischen den anwendbaren Kausalbeschreibungen. Diese anwendbaren Kausalbeschreibungen besitzen eine Ordnung entsprechend der Spezifität ihrer Bedingungsteile. Anhand dieser Spezifitätsrelation wird die Gültigkeit einer Kausalbeschreibung definiert. Nur gültige Kausalbeschreibungen bestimmen den Folgezustand eines Zustandsübergangs. Die Spezifität von Bedingungen wird häufig in Beschreibungen von Universen in der hier angegebenen oder einer sehr ähnlichen Weise genutzt (siehe [18] und [12]). Die Interpretation der Gültigkeit von Kausalbeschreibungen in der hier angegebenen Weise wird im folgenden mit $I_\vee$ bezeichnet.

Spezifität von Kausalbeschreibungen

Entsprechend der hier bezogenen Standpunkte beschreibt eine Kausalbeschreibung einen *kausalen Zusammenhang* vollständig. Ist C der Bedingungsteil einer Kausalbeschreibung $H = (C, E)$, dann beschreibt der Effekt E *alle* Eigenschaften, die unter dieser Bedingung im Folgezustand gelten.

Standpunkt 4 *In Beschreibungen von Zustandsübergängen in Universen existieren häufig Spezifitätsrelationen zwischen Kausalbeschreibungen. Spezifischere Kausalbeschreibungen stellen Ausnahmen von allgemeineren Kausalbeschreibungen dar.*

Definition 22 *Sei $D = (P, R)$ eine Beschreibung eines Universums und $R_Q \subseteq R$ die Menge der Kausalbeschreibungen, die in $[\![Q]\!]$ anwendbar sind mit $Q \subseteq P$. Außerdem sei $B_{R_Q} = \{B \,|\, (B, E) \in R_Q\}$ die Menge der Bedingungen der anwendbaren Kausalbeschreibungen.*

Dann heißt eine Kausalbeschreibung $f = (B_f, E_f) \in R_Q$ genau dann gültig *in $[\![Q]\!]$, wenn $B_f \in \hat{B}_{R_Q}$. Dabei bezeichnet $\hat{B}_{R_Q}$ die Menge der Minimalelemente aus B_{R_Q} bezüglich der Spezifität von Eigenschaften.*

Eine Menge R_Q kann mehrere gültige Kausalbeschreibungen enthalten. Wenn $e, f \in R_Q$, so daß $B_e, B_f \in \hat{B}_{C_Q}$, dann gilt entweder $B_e = B_f$ oder $B_e \not\lesssim B_f$ und $B_f \not\lesssim B_f$.

Standpunkt 5 *In Beschreibungen von realen Universen stellen Kausalbeschreibungen, die in den gleichen Mengen von Zuständen gelten, nichtdeterministische alternative Zustandsübergänge dar.*

Beschreibungen von Universen können demnach ebenso wie Universen selbst entsprechend ihrer kausalen Beziehungen unterschieden werden:

Definition 23 *Eine Beschreibung $D = (P, R)$ eines Universums heißt* deterministisch, *wenn es keine zwei Kausalbeschreibungen (C_1, E_1) und (C_2, E_2) in D gibt, so daß $C_1 = C_2$.*

Wann immer zwei Kausalbeschreibungen mit dem gleichen Bedingungsteil existieren, sind sie auch in den gleichen Zuständen gültig.

Definition 24 *Seien $e = (B_e, E_e), f = (B_f, E_f)$ zwei gültige Kausalbeschreibungen in $[\![Q]\!]$. e und f heißen genau dann* alternative *Kausalbeschreibungen in $[\![Q]\!]$, wenn $B_e = B_f$.*

Standpunkt 6 *In Beschreibungen von realen Universen stellen Kausalbeschreibungen unabhängig voneinander Effekte dar, wenn die Gültigkeit keiner der Kausalbeschreibungen Voraussetzung für die Gültigkeit einer anderen ist.*

Definition 25 *Seien $e = (B_e, E_e), f = (B_f, E_f)$ zwei gültige Kausalbeschreibungen in $[\![Q]\!]$. e und f beschreiben genau dann* Teileffekte *in $[\![Q]\!]$, wenn $B_e \not\leq B_f$ und $B_f \not\leq B_e$.*

Demnach beschreiben nur diejenigen Kausalbeschreibungen zusammen einen Zustandsübergang, wenn ihre Bedingungen logisch unabhängig voneinander sind.

Allgemeine Kausalbeschreibungen

Mitunter werden kausale Beziehungen ohne die Verwendung einer Spezifitätsrelation der Bedingungen von Kausalbeschreibungen modelliert oder es werden nur einige Eigenschaften bei der Bestimmung der Spezifität betrachtet. Bornscheuer und Thielscher schlagen z.B. in [5] vor, nur spezielle Eigenschaften, Aktionsausführungen eines Agenten, zur Bestimmung der Spezifität zu verwenden. Welche der unterschiedlichen Interpretationen ($I_\vee$ oder eine andere) effizientere Beschreibungen liefert, hängt ausschließlich von den zu verwendenden Eigenschaften einer Beschreibung ab, da die Eigenschaften die Menge der Zustände eines Universums partitionieren.

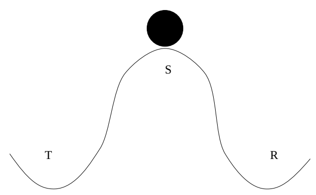
1.4.2 Prozeßbeschreibungen

Es wird hier vorausgesetzt, daß für jede Interpretation der Anwendbarkeit und der Gültigkeit von Kausalbeschreibungen (mit oder ohne Spezifitätsrelation) eine Relation zwischen Kausalbeschreibungen existiert, die angibt, wann sie alternativ sind, d.h. wann sie einen nichtdeterministischen Zustandsübergang beschreiben.

Definition 26 *Sei C eine Menge von Kausalbeschreibungen. $|$ bezeichnet diejenige zweistellige Äquivalenzrelation über C, welche für $e, f \in C$ genau dann $e \,|\, f$ enthält, wenn e und f alternative Kausalbeschreibungen sind.*

Nach Interpretation $\mathcal{I}_\vee$, entsprechend Definition 24 sind alle gleichspezifischen Kausalbeschreibungen alternativ, die Relation $|$ entspricht also der Gleichspezifität von Bedingungsteilen der Kausalbeschreibungen.

Beispiel 10 (Kugelwelt)



Bestehe die Kugelwelt aus einer Menge von Zuständen. Die (nicht logisch unabhängigen) Eigenschaften k_R, k_S und k_T beschreiben Teilmengen der Zustände, wobei k_i mit $i \in \{R, S, T\}$ die Eigenschaft „Die Kugel befindet sich an Position i." repräsentiert.

Eine Menge von nichtdeterministischen Kausalbeschreibungen sei z.B.:

$$K = \{(k_S, k_R), (k_S, k_T), (k_S, k_S)\}$$

Diese Kausalbeschreibungen drücken (nach Interpretation $I_\vee$) aus, daß die Kugel sich von Position S in die Positionen R oder T bewegt oder in S liegen bleibt.

Stelle die Eigenschaft w außerdem die Menge von Zuständen dar, in denen eine Störung (z.B. Wind) auf die Kugel einwirkt. Die Menge der Kausalbeschreibungen wird um die Beschreibungen $(\{w, k_S\}, k_R)$ und $(\{w, k_S\}, k_T)$ ergänzt. Befindet sich die Kugel an Position S und wirkt eine Störung auf die Kugel, dann ist der Zustandsübergang spezifischer durch die Bedingungen $\{w, k_S\}$ dargestellt. Die spezifischeren Kausalbeschreibungen beschreiben nun, daß die Kugel sich nun nur entweder in Position R oder in Position T bewegen kann. □

Definition 27 *Sei C_Q die Menge aller gültigen Kausalbeschreibungen in einer durch Q gegebenen Zustandsmenge. Dann heißt die Äquivalenzklassenzerlegung von C_Q bezüglich der Relation $|$* Prozeßbeschreibung *in Q.*

Durch die Bezeichnung Prozeßbeschreibung wird eine vollständige gültige Menge von Kausalbeschreibungen von einer einzelnen Kausalbeschreibung unterschieden. Ist eine Prozeßbeschreibung für einen Zustand bekannt, werden keine weiteren Kausalbeschreibungen zur Beschreibung der Zustandsübergänge benötigt. In den Zuständen $[\![\{k_S, w\}]\!]$ aus obigem Beispiel ist $\{\{(\{k_S, w\}, k_R), (\{k_S, w\}, k_T)\}\}$ die hier nur eine Äquivalenzklasse enthaltende Prozeßbeschreibung.

Definition 28 *Eine Menge M^{C_Q} heißt genau dann* spezielle Prozeßbeschreibung *zu einer Prozeßbeschreibung Z^{C_Q}, wenn sie aus jeder Äquivalenzklasse in Z^{C_Q} genau ein Element enthält:*

$$M^{C_Q} = \bigcup_{x \in Z^{Q_C}} \{f \quad mit \quad f \in x\} \tag{1.16}$$

Ein spezieller möglicher Zustandsübergang wird durch eine spezielle Prozeßbeschreibung beschrieben. Eine spezielle Prozeßbeschreibung in den Zuständen $[\![\{k_S, w\}]\!]$ des vorgenannten Beispiels ist z.B. $\{(\{k_S, w\}, k_R)\}$.

Definition 29 *Sei M eine* spezielle Prozeßbeschreibung. *Dann heißt*

$$C^M = \bigcup_{(C,E) \in M} C \tag{1.17}$$

der Bedingungsteil *von M und*

$$E^M = \bigcup_{(C,E) \in M} E \tag{1.18}$$

der Effektteil *von M.*

Die im Rahmen dieser Arbeit bevorzugte Interpretation $\mathcal{I}_\vee$ liefert, da alle speziellen Prozeßbeschreibungen gleiche Bedingungsteile haben, außerdem:

Korollar 5 *Sei C^M Bedingungsteil und E^M Effektteil einer speziellen Prozeßbeschreibung. Die Kausalbeschreibung (C^M, E^M) ist eine Kausalbeschreibung für die Zustandsmenge $[\![C^M]\!]$.*

Da k Kausalbeschreibungen, die für viele Zustandsübergänge gültig sein können, zu mehr als k speziellen Prozeßbeschreibungen kombinierbar sind, können Beschreibungen von Universen mit der Interpretation $I_\vee$ effizienter sein, als Beschreibungen, die keine Gültigkeit definieren.

1.4.3 Effekte und das Rahmenproblem

Der Bedingungsteil einer speziellen Prozeßbeschreibung enthält Eigenschaften eines Ausgangszustands eines Elements einer Kausalitätsrelation. Entsprechend enthält der Effektteil Eigenschaften eines Folgezustands eines Elements einer Kausalitätsrelation.

Definition 30 *Sei $D = (P, R)$ eine Beschreibung eines Universums und E^M eine Effektmenge einer speziellen Prozeßbeschreibung M. Eine Eigenschaft $e \in P$ ist genau dann eine* Effekt von M, *wenn $e \in E^M$.*

Enthält eine Effektmenge Quantitätseigenschaften, dann ist es mitunter hinreichend nur einen Teil der Eigenschaften zu betrachten um die durch eine Prozeßbeschreibung gegebenen Eigenschaften eines Folgezustands entsprechend Theorem 1 zu bestimmen.

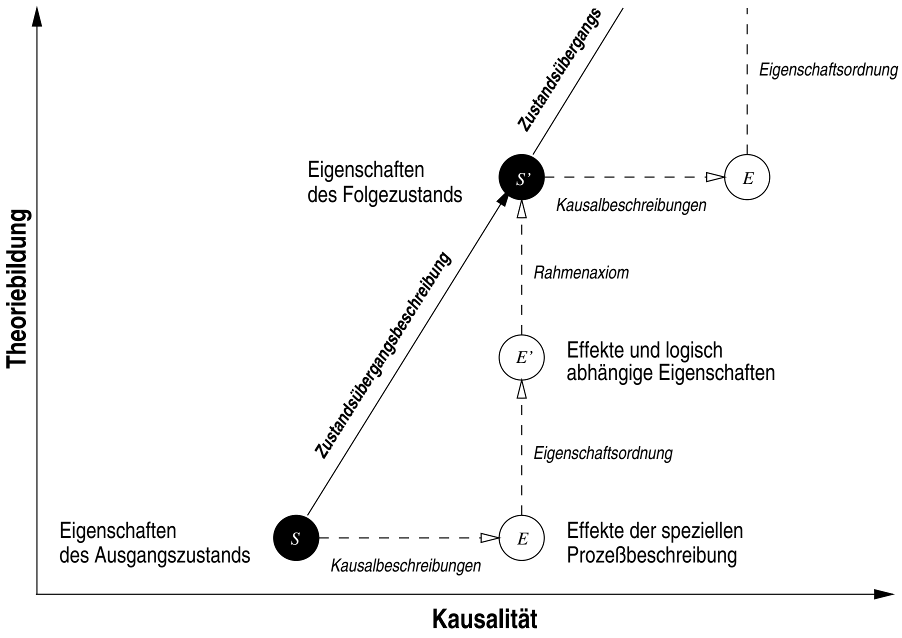
Definition 31 *Sei M eine spezielle Prozeßbeschreibung mit der Effektmenge E^M. Eine Menge von Effekten e von M ist genau dann* bestimmend, *wenn $e \in \hat{E}^M$, wobei $\hat{E}^M$ die Menge aller größten unteren Schranken von E^M darstellt.*

Das Rahmenproblem

Wird jeder mögliche Folgezustand ausschließlich durch die Effekte einer speziellen Prozeßbeschreibung gemäß $I_\vee$ beschrieben, dann muß für alle Kombinationen von Kausalbeschreibungen, die spezielle Prozeßbeschreibungen M bilden können, sichergestellt sein, daß die Effekte von M den Folgezustand *vollständig* beschreiben. Vollständig heißt, daß alle Eigenschaften, die im Folgezustand gelten, logisch aus den Effekten folgen. Sind die entsprechend der zu beschreibenden Kausalitätsrelation aufeinanderfolgenden Zustände im allgemeinen durch ähnliche Eigenschaftsmengen identifizierbar, d.h. die Eigenschaftsmengen enthalten viele gemeinsame Eigenschaften, dann können effizientere Beschreibungen durch erweiterte Interpretationen von $I_\vee$ erzielt werden.

In [15] wird die Möglichkeit diskutiert, Eigenschaften, die im Ausgangszustand gelten, auch im Folgezustand als gültig zu betrachten, wenn keiner der Effekte diesen Eigenschaften widerspricht, anstatt die obige Annahme der Vollständigkeit der Effektmenge einer speziellen Prozeßbeschreibung zu treffen.

Lifschitz schlägt in [14] vor, explizit zwischen Eigenschaften zu unterscheiden, die auch wenn sie nicht direkt durch Effekte bestimmt werden, im Folgezustand gelten, und Eigenschaften, die nicht gelten, wenn sie nicht direkt durch Effekte bestimmt werden. In dieser Arbeit wird diese Unterscheidung jedoch nicht getroffen. Das weitere Vorgehen ist anhand der folgenden Skizze erkennbar:



Nachdem aus der Zustandsbeschreibung S und der Menge der Kausalbeschreibungen die Effekte E einer speziellen Prozeßbeschreibung gemäß $I_\vee$ gewonnen wurden, werden die logisch von diesen Effekten abhängigen Eigenschaften bestimmt, die zusammen mit der Menge E die Menge E' bilden. Anschließend wird festgestellt, welche Eigenschaften von S nicht in Widerspruch zu den Eigenschaften aus E' stehen. Die nicht widersprüchlichen Eigenschaften aus S stellen zusammen mit E' die Beschreibung S' des Folgezustands dar. Diese aus $I_\vee$ erweiterte Interpretation $I_{\vee F}$ schränkt, wie im weiteren gezeigt wird, die Menge der Eigenschaften ein, die zur Zustandsbeschreibung verwendet werden können.

Gibt es in einer Beschreibung eines Universums nur Eigenschaften, die in der im folgenden beschriebenen Weise eingeschränkt logisch voneinander abhängen, dann kann anhand der Menge der Effekte jeder speziellen Prozeßbeschreibung *eindeutig* entschieden werden, welche Eigenschaften, die den Ausgangszustand beschreiben, im Folgezustand nicht gelten können, da sie mit den Effekten im Widerspruch stehen.

Definition 32 *Sei P eine Menge von Eigenschaften eines Universums U. P heißt genau dann* relativ unabhängig, *wenn gilt:*

$$\forall U, V \subseteq P : U \leq V \iff \forall v \in V : \exists u \in U : u \leq v \tag{1.19}$$

Nach dieser Definition ist eine Menge von Eigenschaften relativ unabhängig, wenn eine Eigenschaft, definiert durch die Teilmenge V, genau dann spezifischer als eine Eigenschaft, definiert durch die Teilmenge U, ist, wenn jedes Element aus V spezifischer als ein Element von U ist. Eine relativ unabhängige Menge kann also Eigenschaften und deren Komplemente oder auch quantitative Eigenschaften enthalten. Sie darf jedoch keine k Eigenschaften $p_1, p_2, \ldots, p_k$

($k > 2$) enthalten, für die paarweise $p_i \not\leq p_j$ gilt ($1 \leq i,j \leq k$), aber $\{p_1, p_2, \ldots, p_{k-1}\} \leq p_k$. Werden Eigenschaften dieser Form zugelassen dann kann im allgemeinen nicht mehr eindeutig entschieden werden, welche Eigenschaften des Ausgangszustandes auch im Folgezustand gelten. Wird z.B. ein Ausgangszustand durch $p_1, \ldots, p_{k-1}$ beschrieben und die spezielle Prozeßbeschreibung enthält $\overline{p_k}$ als Effekt, dann ist unklar, welche der $k-1$ Eigenschaften des Ausgangszustandes im Folgezustand noch gelten und welche nicht.

In [8] und anderen Arbeiten werden nur redundanzfreie Mengen (siehe Definition 9) von Eigenschaften betrachtet. Redundanzfreie Eigenschaftsmengen sind immer relativ unabhängig, da $V \subseteq U \iff \forall v \in V : \exists u \in U : v = u$. Im allgemeinen erlauben relativ unabhängige Eigenschaftsmengen P hingegen auch die Berücksichtigung von Quantitäten, insbesondere von Abhängigkeiten zwischen Ressourceneigenschaften einer Klasse, $r^k \leq r^l \iff k \geq l$. Z.B. sind Eigenschaftsmengen, die nicht mehrere Elemente einer Ressourcenklasse und ansonsten nur qualitative Eigenschaften enthalten, redundanzfrei nach Definition 9 und 10, vorausgesetzt jede Menge von Eigenschaften unterschiedlicher Eigenschaftsklassen ist relativ unabhängig.

Das folgende Rahmenaxiom bestimmt, daß nur diejenigen Eigenschaften im Folgezustand gelten, die im Ausgangszustand gelten und deren Gültigkeit durch die Effekte der Kausalbeschreibung nicht beeinflußt wird:

Definition 33 *Sei P eine relativ unabhängige Menge von Eigenschaften und $S \subseteq P$ eine Beschreibung einer Menge von Zuständen und E die Effektmenge einer speziellen Prozeßbeschreibung zu Q. P enthalte von jeder Eigenschaft auch das zugehörige Komplement. Außerdem sei*

$$E' = \{e \mid \exists f \in E : f \leq e \wedge e \in P\}$$

die Menge der logisch von den Effekten abhängigen Eigenschaften und

$$\tilde{E} = \{\overline{e} \mid e \in E'\}$$

die Menge der Eigenschaften, die auf keinen Fall im Folgezustand gelten dürfen. Dann gilt für die Folgezustände $[\![S']\!]$ von $[\![S]\!]$:

$$S' = (S \setminus \tilde{E}) \cup E' \tag{1.20}$$

Ist S eine Zustandsbeschreibung, die alle Eigenschaften enthält, die logisch aus den Elementen von S folgen, dann enthält gemäß dem obigen Rahmenaxiom jede Folgezustandsbeschreibung S' auch alle logisch von den Elementen aus S' abhängigen Eigenschaften.

Mit Interpretation $I_{\vee F}$ wird im folgenden die um Gleichung 1.20 erweiterte Interpretation $I_{\vee}$ bezeichnet.

Beispiel 11 (Kugelwelt)
Die Eigenschaften $\{k_R, k_S, k_T, w\}$ *sind relativ unabhängig, da* $[\![k_R]\!] \cap [\![k_S]\!] = \emptyset$, $[\![k_R]\!] \cap [\![k_T]\!] = \emptyset$ *und* $[\![k_S]\!] \cap [\![k_T]\!] = \emptyset$. *Wird die Menge der Kausalbeschreibungen unter Verwendung des Rahmenaxioms 1.20 mit Interpretation* $I_{\vee F}$ *interpretiert, dann ist die Beschreibung des Folgezustandes vom durch* $\{w, k_S\}$ *beschriebenen Ausgangszustand nun entweder* $\{w, k_R\}$ *oder* $\{w, k_T\}$. *Unabhängig davon, ob die Kugel also in die linke oder in die rechte Mulde rollt, in jedem Fall wird dadurch nicht das Wehen des Windes beeinflußt.* □

1.4.4 Kontext– und Effektkonflikte

Sei $D = (P, R)$ eine Beschreibung eines Universums mit der Interpretation $I_\vee$ oder $I_{\vee F}$ und $V = (W_V, K_V)$ das durch D definierte Universum. Die Beschreibung D enthält dann noch keine Ausdrucksmittel, die eine Unterscheidung zwischen Zuständen, in denen keine Zustandsübergänge in K_V existieren, und Zuständen, die nicht in W_V enthalten sind, gestatten.

Standpunkt 7 *Für die durch die Beschreibung* $D = (P, R)$ *eines Universums definierte Menge von Zuständen* $W_P = \{w \mid w \in [\![P_W]\!] \wedge P_W \subseteq P\}$ *gilt im allgemeinen* $W_V \subset W_P$ *anstelle von* $W_V = W_P$.

Dieses Problem resultiert aus der Tatsache, daß es in einem realen Universum im allgemeinen unmöglich ist, eine Menge von Eigenschaften zu finden, so daß alle Kombinationen der Eigenschaften Weltzustände des zu beschreibenden Universums darstellen. Wenn Eigenschaftsmengen in diesem Sinne kombinierbar sind, dann sind sie im allgemeinen nicht mächtig genug um einen für eine Problemlösung hinreichende Beschreibung des Universums zu liefern. Sei z.B. eine Eigenschaft p ein Element einer Menge M von widerspruchsfreien Eigenschaften, dann darf das komplementäre Element $\overline{p}$ nicht in M enthalten sein und daher auch in keinem Bedingungs– oder Effektteil einer Kausalbeschreibung auftauchen.

Um diese Schwierigkeit zu umgehen ohne die Ausdrucksstärke stark einzuschränken oder unrealistische Anforderungen an die Eigenschaftsmenge zu machen, wird das Auftreten eines *Konfliktes* definiert. Es werden im folgenden zwei Arten von Konflikten unterschieden – Kontextkonflikte und Effektkonflikte.

Kontexte und Kontextkonflikte

Zunächst werden die in Definition 14 eingeführten Kausalbeschreibungen um ein Ausdrucksmittel erweitert. Die nachfolgend eingeführte neue Interpretation von Kausalbeschreibungen wird durch $I_{\vee CF}$ oder $I_{\vee C}$ bezeichnet, je nachdem ob sie mit oder ohne Rahmenaxiom 1.20 die Beschreibung des Folgezustands durch die Effekte der speziellen Prozeßbeschreibung bestimmen.

Werden Beschreibungen von Universen im weiteren durch $I_{\vee CF}$ oder $I_{\vee C}$ interpretiert, dann wird implizit vorausgesetzt, daß die Kausalbeschreibungen dieser Beschreibungen von Universen kontextabhängig sind.

Definition 34 *Seien C, K, E Mengen von Eigenschaften. Ein Tupel (C, K, E) heißt* kontextabhängige *Kausalbeschreibung.*

C ist die Bedingung, *K der* Kontext *und E der* Effekt *einer kontextabhängigen Kausalbeschreibung.*

Mit jeder kontextabhängigen Kausalbeschreibung ist die (kontextfreie) Kausalbeschreibung (C, E) assoziiert.

Eine kontextabhängige Kausalbeschreibung ist genau dann gültig, *wenn die assoziierte kontextfreie Kausalbeschreibung gültig ist.*

Entsprechend den Definitionen 27 und 28 wird auch der Begriff der Prozeßbeschreibung um Kontextabhängigkeit erweitert:

Definition 35 *Sei Q eine Menge von Eigenschaften und Q_C^K eine Menge von in Q gültigen kontextabhängigen Kausalbeschreibungen. Die Äquivalenzklassenzerlegung von Q_C^K bezüglich einer Relation $\mid$ heißt* kontextabhängige Prozeßbeschreibung.

Eine Menge von gültigen kontextabhängigen Kausalbeschreibungen, die aus jeder Äquivalenzklasse genau ein Element enthält, heißt kontextabhängige spezielle Prozeßbeschreibung.

Im Gegensatz zur Bedingung einer (kontextabhängigen) Kausalbeschreibung stellt der Kontext eine Menge von *exklusiven* Eigenschaften dar. Exklusive Eigenschaften einer Kausalbeschreibung F sind Eigenschaften, die nur durch F im Kontext verwendet werden können. Ist Q eine Zustandsbeschreibung und p eine Eigenschaft aus dem Kontext einer Kausalbeschreibung einer speziellen Prozeßbeschreibung zu Q, dann muß p auch eine Eigenschaft von $[\![Q]\!]$ sein, $[\![Q]\!] \subseteq [\![p]\!]$. Die Eigenschaften von Kontexten anderer Kausalbeschreibungen dieser speziellen Prozeßbeschreibung müssen dann jedoch auch für Zustandsmengen gelten, in denen die Eigenschaft p nicht gilt. Im allgemeinen kann aus Q und p eine Zustandsbeschreibung Q_p nicht eindeutig so ermittelt werden, daß p nicht in $[\![Q_p]\!]$ gilt. Z.B. könnten die Eigenschaften p_1, p_2 in $[\![Q]\!]$ gelten mit $[\![p_1]\!] \cap [\![p_2]\!] = [\![p]\!]$. Dann ist unklar, ob in $[\![Q_p]\!]$ auch p_1 oder p_2 gilt, da die exklusive Verwendung von p lediglich beschreibt, daß die durch $\{p_1, p_2\}$ definierte Eigenschaft in $[\![Q_p]\!]$ nicht gilt. Dieses „Kontextproblem“ kann analog zur hier vorgestellten Lösung des Rahmenproblems behandelt werden, d.h. die Eigenschaftsmenge der Beschreibung wird als relativ unabhängig vorausgesetzt.

Enthält der Kontext einer in einer Ausgangszustandsbeschreibung gültigen speziellen Prozeßbeschreibung im Ausgangszustand ungültige Eigenschaften oder verwenden mehrere Kausalbeschreibungen der gültigen speziellen Prozeßbeschreibung voneinander abhängige Eigenschaften im Kontext, dann wird der Zustandsübergang gemäß $I_{\vee CF}$ bzw. $I_{\vee C}$ als „nicht beschrieben“ betrachtet.

Definition 36 *Sei M eine kontextabhängige spezielle Prozeßbeschreibung. Dann heißt*

$$C^M = \bigcup_{(C,K,E)\in M} C \quad \textit{der } \text{Bedingungsteil} \textit{ von } M, \tag{1.21}$$

$$K^M = \bigcup_{(C,K,E)\in M} K \quad \textit{der } \text{Kontextteil} \textit{ von } M, \tag{1.22}$$

$$E^M = \bigcup_{(C,K,E)\in M} E \quad \textit{der } \text{Effektteil} \textit{ von } M. \tag{1.23}$$

Daß ein Zustandsübergang durch eine Beschreibung eines Universums nicht beschreibbar ist, wird neben der noch zu definierenden Effektkonsistenz durch *Kontextkonsistenz* einer speziellen Prozeßbeschreibung ausgedrückt:

Definition 37 *Sei $D = (P, R)$ eine Beschreibung eines Universums und P eine relativ unabhängige Menge von Eigenschaften. Eine kontextabhängige spezielle Prozeßbeschreibung $M \subseteq R$ zu einer Zustandsbeschreibung $Q \subseteq P$ ist genau dann* kontextkonsistent *in Q, wenn*

$$\forall (C_1, K_1, E_1), (C_2, K_2, E_2) \in M : \forall k_1 \in K_1, k_2 \in K_2 : k_1 \not\leq k_2 \tag{1.24}$$

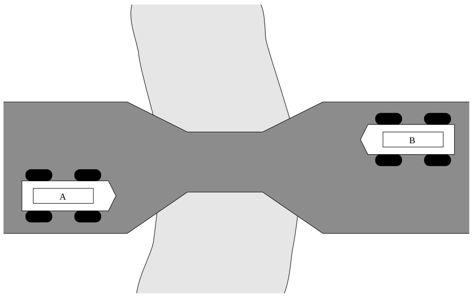
und für den Kontextteil K^M von M

$$Q \leq K^M \tag{1.25}$$

gilt.

Definition 38 *Eine kontextabhängige Prozeßbeschreibung verursacht genau dann einen* Kontextkonflikt*, wenn eine der zugehörigen speziellen Prozeßbeschreibungen nicht kontextkonsistent ist.*

Beispiel 12 (Brücke)



Seien f die Eigenschaft „Die Brücke ist frei.", p_A die Eigenschaft „Auto A hat den Fluß überquert." und p_B die Eigenschaft „Auto B hat den Fluß überquert."

Die in der betrachteten Beschreibung der Welt gültigen kontextabhängigen Kausalbeschreibungen (mit Interpretation $I_{\vee C}$) für den im Bild dargestellte Zustand, beschrieben durch $\{f, \overline{p_A}, \overline{p_B}\}$, seien

$$\{(\{f, \overline{p_A}\}, f, \{\overline{f}, p_A\}), (\{f, \overline{p_B}\}, f, \{\overline{f}, p_B\})\}.$$

Da die einzige spezielle Prozeßbeschreibung beide Kausalbeschreibungen enthält, kommt es zum Kontextkonflikt; beide Kausalbeschreibungen verwenden die Eigenschaft f exklusiv. Der Zustandsübergang von $\{f, \overline{p_A}, \overline{p_B}\}$ ist also in der angegebenen Weltbeschreibung als nicht beschrieben zu interpretieren. □

Effektkonflikte

Effekte spezieller Prozeßbeschreibungen können auch widersprüchlich sein. Das ist der Fall, wenn die durch die Effekte beschriebene Zustandsmenge des Universums leer ist.

Definition 39 *Sei M eine (kontextabhängige) spezielle Prozeßbeschreibung zu einer Menge Q von Eigenschaften, wobei E^M der Effektteil von M ist. M ist genau dann* effektkonsistent, *wenn $\left[\!\left[E^M\right]\!\right] \neq \emptyset$.*

Ebenso wie bei Kontextkonflikten, werden hier Zustandsübergangsbeschreibungen als nicht definiert betrachtet, wenn irgendeine der speziellen Prozeßbeschreibungen einen Effektkonflikt verursacht:

Definition 40 *Eine (kontextabhängige) Prozeßbeschreibung verursacht genau dann einen* Effektkonflikt, *wenn eine der zugehörigen speziellen Prozeßbeschreibungen nicht effektkonsistent ist.*

Entsprechend Standpunkt 7 wird nun definiert, welche Zustände eines Universums im Rahmen einer Beschreibung dieses Universums, unter Verwendung der Interpretation $I_{\vee C}$ oder $I_{\vee CF}$, Ausgangszustände von Zustandsübergängen sein können:

Definition 41 *Sei $D = (P, R)$ eine Beschreibung eines Universums. Eine Zustandsbeschreibung $Q \subseteq P$ heißt genau dann* definiert in D, *wenn die Zustandsbeschreibung eine nichtleere Zustandsmenge beschreibt ($[\![Q]\!] \neq \emptyset$) und die (kontextabhängige) Prozeßbeschreibung zu Q keinen Kontextkonflikt und keinen Effektkonflikt verursacht.*

Ist $D = (P, R)$ eine Beschreibung eines Universums, P eine relativ unabhängige Menge von Eigenschaften und R eine Menge von kontextabhängigen Kausalbeschreibungen, dann ist entsprechend der Defintion 5 anhand der Spezifitätsrelation der Eigenschaften aus P definiert, ob eine (kontextabhängige) Prozeßbeschreibung Kontextkonflikte verursacht oder nicht. Die Kenntnis der Spezifitätsrelation definiert jedoch allein noch nicht ausreichend, ob die Prozeßbeschreibung einen Effektkonflikt verursacht. Für das Erkennen von Effektkonflikten in

Teilmengen von relativ unabhängigen Eigenschaftsmengen P ist es notwendig, von zwei Eigenschaften p, q zu wissen, ob $p \leq \overline{q}$ gilt. Im allgemeinen wird vorausgesetzt, daß zu allen Eigenschaften p aus P auch $\overline{p}$ Element von P ist, so daß die Kenntnis der Spezifitätsrelation über P Wissen über die Abhängigkeiten von Komplementen mit einschließt.

Sind Eigenschaftsmengen redundanzfrei nach Definition 9, dann ist es in einigen Domänen sinnvoll (siehe [5]), nicht effektkonsistente spezielle Prozeßbeschreibungen so zu interpretieren, daß widersprüchliche Effekte (z.B. $p, \overline{p}$) als Unsicherheit über die Eigenschaften des Folgezustands angesehen werden. Bornscheuer und Thielscher betrachten in [5] demzufolge alle größten widerspruchsfreien Teilmengen des (widersprüchlichen) Effektteils einer speziellen Prozeßbeschreibung als mögliche Folgezustandsbeschreibungen.

1.4.5 Verwendung von Ressourceneigenschaften

Ressourceneigenschaften repräsentieren in Kausalbeschreibungen entsprechend Definition 12 die Gültigkeit einer Menge von Eigenschaften, auf deren konkrete Ausprägung es nicht ankommt. Zwei Ressourceneigenschaften der gleichen Klasse können daher völlig verschiedene Eigenschaftsmengen repräsentieren. Taucht eine Ressourceneigenschaft r^k in dem Kontext einer Kausalbeschreibung auf und r^l im Kontext einer anderen Kausalbeschreibung, dann wäre nach Definition 37 (Interpretation $I_{\vee C}$ oder $I_{\vee CF}$) keine beide Kausalbeschreibungen enthaltende spezielle Prozeßbeschreibung kontextkonsistent.

Die im folgenden beschriebenen erweiterten Interpretationen $I_{\vee RC}$ bzw. $I_{\vee RCF}$ setzen eine strikte Trennung zwischen Ressourceneigenschaften und Eigenschaften, die keine Ressourcen beschreiben, voraus. Wird im folgenden von einer Beschreibung eines Universums gesprochen, dessen Kausalbeschreibungen *Konsumtionen* oder *Produktionen* beschreiben, dann wird vorausgesetzt, daß die Beschreibung eines Universums durch eine Struktur $((P, T), R)$ dargestellt wird (im Gegensatz zu Definition 15). P stellt dabei eine Menge von Eigenschaften wie in früheren Interpretationen dar und T ist eine Menge von Ressourceneigenschaften.

Definition 42 *Eine kontextabhängige Kausalbeschreibung* (C, K, R) *beschreibt genau dann die* Konsumtion *einer Ressource* r*, wenn* K *Ressourceneigenschaften enthält, die* r *beschreiben.*

Ein ähnliches Problem wie oben für Kontexte beschrieben taucht bei der Betrachtung von Ressourceneigenschaften in Effekten auf.

Definition 43 *Eine kontextabhängige Kausalbeschreibung* (C, K, R) *beschreibt genau dann die* Produktion *einer Ressource* r*, wenn* R *Ressourceneigenschaften enthält, die* r *beschreiben.*

Die Konsumtion und Produktion von Ressourcen wird im Gegensatz zu Definition 36 gemäß Interpretation $I_{\vee CF}$ oder $I_{\vee C}$ dann nicht idempotent abhängig von Klasse und Ordnung der Ressourceneigenschaft unter Benutzung von Definition 13 beschrieben:

Definition 44 *Sei $D = ((P,T),R)$ eine Beschreibung eines Universums mit Interpretation $I_{\vee RC}$. Neben der relativen Unabhängigkeit von $P \cup T$ gelte außerdem:*

$$\forall r \in T : \forall p \in (P \cup T) \setminus [r]_{\leq} : r \not\leq p \wedge p \not\leq r$$

Sei M eine kontextabhängige spezielle Prozeßbeschreibung zu einer Menge $[\![Q]\!]$ von Zuständen mit $Q \subseteq (P \cup T)$. Sei S die Menge aller Klassen von Ressourceneigenschaften aus T. Dann heißt

$$K_{+}^{M} = \bigcup_{[r]_{\leq} \in S} \; \sum_{(C,K,E) \in M} \; \sum_{r^k \in [r]_{\leq} \wedge r^k \in K} r^k \tag{1.26}$$

der nicht idempotente Kontextteil *und*

$$E_{+}^{M} = \bigcup_{[r]_{\leq} \in S} \; \sum_{(C,K,E) \in M} \; \sum_{r^k \in [r]_{\leq} \wedge r^k \in E} r^k \tag{1.27}$$

der nicht idempotente Effektteil *von M.*
Für die idempotenten Kontext- und Effektteile gilt (gemäß $I_{\vee C}$ oder $I_{\vee CF}$):

$$K^{M} = \bigcup_{(C,K,E) \in M} K \cap P \tag{1.28}$$

ist der idempotente Kontextteil *von M,*

$$E^{M} = \bigcup_{(C,K,E) \in M} E \cap P \tag{1.29}$$

ist der idempotente Effektteil *von M.*
Für den Bedingungsteil gilt wie in allen vorherigen Interpretationen, nun jedoch für $C \subseteq (P \cup T)$:

$$C^{M} = \bigcup_{(C,K,E) \in M} C \quad \textit{ist der } \text{Bedingungsteil } \textit{von } M, \tag{1.30}$$

Eine kontextabhängige spezielle Prozeßbeschreibung, deren Kausalbeschreibungen die Konsumtion und/oder Produktion von Ressourcen beschreiben (gemäß Interpretation $I_{\vee RC}$, enthält somit neben Bedingungsteil, Kontextteil, Effektteil auch den nicht idempotenten Effektteil (Produktion) und den nicht idempotenten Kontextteil (Konsumtion). Eigenschaften der nicht idempotenten Teile einer speziellen Prozeßbeschreibung sind nicht notwendigerweise Eigenschaften einer Beschreibung eines Universums (siehe Beispiel 9):

Definition 45 *Sei $D = ((P,T), R)$ eine Beschreibung eines Universums gemäß Interpretation $I_{\vee RC}$. Sei M eine spezielle Prozeßbeschreibung, deren Kausalbeschreibungen Konsumtionen und Produktionen enthalten, für einen durch $Q \subseteq (P \cup T)$ beschriebenen Zustand, wobei K_+^M der nicht idempotente Kontextteil und E_+^M der nicht idempotente Effektteil ist.*

M ist genau dann kontextkonsistent unter Berücksichtigung von Ressourcen, *wenn M ohne K_+^M kontextkonsistent ist und gilt:*

$$Q \leq K_+^M \tag{1.31}$$

M ist genau dann effektkonsistent unter Berücksichtigung von Ressourcen, *wenn M ohne E_+^M effektkonsistent ist und gilt:*

$$\left[\!\left[E_+^M\right]\!\right] \neq \emptyset \tag{1.32}$$

Beispiel 13 (Möbelwelt 2)
Eine Holzverarbeitungsfabrik enthalte zwei Produktionsstrecken, die aus einem gemeinsamen Holzlager beliefert werden und deren Produkte, Tische und Stühle, in einem Zwischenlager von beschränkter Kapazität gelagert werden. Die folgenden Kausalbeschreibungen beschreiben die Produktionsstrecken:

$$\{(holz^{10}, holz^{10}, \{stuhl^5, tisch^7\}), (holz^6, holz^6, \{stuhl^3, tisch^4\})\}$$

Die Eigenschaft $holz^k$ beschreibt die Verfügbarkeit von k Holzeinheiten im Holzlager, $stuhl^l$, $tisch^m$ die Lagerung von l Stühlen bzw. m Tischen im Zwischenlager.

Die Zustände, die durch $holz^n$ mit $10 \leq n < 16$ beschrieben werden, gehören nicht zur beschriebenen Welt, da die Prozeßbeschreibungen einen Kontextkonflikt verursachen. Ist $n \geq 16$, befinden sich im Folgezustand 8 Stühle und 11 Tische im Zwischenlager. Wäre $stuhl^8$ keine Eigenschaft der Beschreibung (da die Kapazität des Lagers z.B. höchstens $stuhl^7$ zuläßt), dann wird ein Effektkonflikt verursacht. □

Würde man in obigem Beispiel das Rahmenaxiom 1.20 nach Interpretation $I_{\vee CF}$ für Ressourceneigenschaften anwenden, dann enthielte die Beschreibung des Folgezustands nicht nur die Eigenschaften $stuhl^8$ und $tisch^{11}$ sondern auch $holz^n$ (mit $n \geq 0$). In vielen Beschreibungen von Universen, die Ressourceneigenschaften verwenden, ist die Anwendung des Rahmenaxioms 1.20 auf Ressourcen unangemessen. Eine entsprechend der nicht idempotenten Berechnung der ressourcenabhängigen Effekte und Kontexte angebrachteres Rahmenaxiom für Ressourcen ist das folgende. Die damit verbundene erweiterte Interpretation von $I_{\vee RC}$ wird dann mit $I_{\vee RCF}$ bezeichnet.

Definition 46 *Sei $D = ((P,T), R)$ eine Beschreibung eines Universums gemäß Interpretation $I_{\vee RC}$. Sei W die Menge aller Klassen von Ressourceneigenschaften aus T, $S \subseteq (P \cup T)$ eine Zustandsbeschreibung und M eine spezielle Prozeßbeschreibung zu S mit dem nicht idempotenten Kontextteil K_+ und dem nicht* *idempotenten Effektteil E_+. Sei $S_+ \subseteq S$ die Menge von Ressourceneigenschaften aus S. Die Operation $-$ bezeichne die Umkehroperation zu $+$ aus Definition 13. Dann wird der Folgezustand von S durch $S' \cup S'_+$ beschrieben, wobei S' entsprechend Definition 33 für den idempotenten Effektteil bestimmt wird und für S'_+ gilt:*

$$S'_+ = \bigcup_{[r]_\leq \in W} (S^r_+ - K^r_+) + E^r_+ \tag{1.33}$$

Dabei sei mit A^r_+ die spezifischste Ressourceneigenschaft (d.h. die Ressourceneigenschaft mit der größten Ordnung) der Klasse r aus der Menge A_+ bezeichnet.

Beispiel 14 (Möbelwelt 2)
Ist $\{holz^{18}, stuhl^3, tisch^0\}$ die Beschreibung des Ausgangszustandes, dann liefern die Kausalbeschreibungen interpretiert mit $I_{\vee RCF}$ die Beschreibung des Folgezustands:

$$\{holz^2, stuhl^{11}, tisch^{11}\}$$

□

1.5 Agenten

1.5.1 Agenten, Aktionen, Prozesse

Die vorangegangenen Abschnitte haben Möglichkeiten zur effizienten Beschreibung realer Universen unter Verwendung bestimmter Interpretationen dargestellt. Mitunter (z.B. [8], [15]) soll die Beschreibung des dynamischen Systems außerdem die möglichen Interaktionen eines Agenten mit dem dynamischen System beinhalten. In Planungssystemen werden diese Interaktionen oft als einseitig vorausgesetzt, d.h. nur der Agent wirkt auf Zustände des dynamischen Systems ein während das dynamische System keinen Einfluß auf Zustände des Agenten hat. Diese einseitigen Einwirkungen des Agenten auf Systemzustände werden im allgemeinen als *Aktionen* oder *Aktionsausführungen* bezeichnet. Die Agenten eines Multiagentensystems, indem jeder Agent in jedem Zustand eine elementare Aktion ausführt oder nicht ausführt, können auch als ein *universeller Agent* betrachtet werden, der jede beliebige Teilmenge seiner elementaren Aktionen parallel ausführen kann. Eine solche Teilmenge sei hier im Gegensatz zur elementaren Aktion mit *Aktion* bezeichnet.

Die Aktionsausführungen eines Agenten werden in dieser Arbeit als spezielle Eigenschaften von Zuständen betrachtet. Aus der Annahme, daß der universelle Agent in jedem Zustand eine beliebige Aktion ausführen kann, ergeben sich Einschränkungen für die Verwendung von Aktionen in Zustands– und Kausalbeschreibungen. Die neue Interpretation, die hier unabhängig von den früheren eigeführt wird, heiße I_A und kann als Erweiterung der Interpretationen $I_{\vee X}$ verwendet werden.

Da jede Aktion unabhängig vom Zustand ausführbar sein soll[4] und damit jede Kombination von Zustandsbeschreibung und Aktion möglich sein muß, ist es sinnvoll die Zustandsbeschreibung von der die Aktion beschreibenden Menge von Eigenschaften zu trennen:

Definition 47 *Sei $D = (P, R)$ eine Beschreibung eines Universums unter Verwendung von I_A und $A_D \subseteq P$ eine Menge von Eigenschaften der Zustände des durch D beschriebenen Universums, die elementare Aktionen darstellen.*

Eine Zustandsbeschreibung $Q \subseteq (P \setminus A_D)$ zusammen mit einer Aktion $A \subseteq A_D$, (Q, A), heißt Prozeß.

Die Menge A_D heißt universeller Agent.

Da die Ausführung einer Aktion nur vom Agenten abhängig ist, darf eine Aktion nicht Effekt einer Kausalbeschreibung sein. Anderenfalls wäre die Ausführung einer Aktion im Folgezustand nicht mehr vom Agenten abhängig. In dieser Arbeit werden Aktionen als Intentionen von Agenten betrachtet, d.h. Konflikte bei der Ausführung von Aktionen sind keine Konflikte in den Intentionen des Agenten, sondern in den kausalen Folgen der Aktion. Entsprechend dürfen Aktionen auch nicht in Kontexten von Kausalbeschreibungen verwendet werden. Daß Zustandsbeschreibungen, Effekte und Kontexte nur durch Eigenschaften beschrieben werden können, die die Ausführung von Aktionen nicht beeinflussen wird formal folgendermaßen ausgedrückt (die Redundanzfreiheit des universellen Agenten besagt, daß keine Ausführung einer Teilmenge von elementaren Aktionen des Agenten die Ausführung einer anderen Aktion nach sich zieht):

Definition 48 *Sei $D = (P, R)$ eine Beschreibung eines Universums unter Verwendung der Interpretation I_A und $A_D \subseteq P$ ein universeller Agent. A_D sei außerdem redundanzfrei.*

$$\forall G \subseteq (P \setminus A_D) : \forall a \in A_D : G \not\leq A_D \tag{1.34}$$

Kausalbeschreibungen, die von Aktionen des Agenten abhängen, können von Kausalbeschreibungen, die nicht von Eigenschaften des Agenten abhängen unterschieden werden:

Definition 49 *Sei D eine Beschreibung eines Universums unter Verwendung der Interpretation I_A und A_D der universelle Agent zu D. Eine Kausalbeschreibung (C, K, E) heißt genau dann* Effektbeschreibung *einer Aktion B, wenn $B \subseteq A_D$ und $B \subseteq C$.*

Beispiel 15 (Möbelwelt 2)
Die Holzverarbeitungsfabrik aus Beispiel 13 und 14 wird als Agent dargestellt, der zwei Aktionen $prod_1$ und $prod_2$ ausführen kann, die durch folgende als

[4] Als Aktion wird hier die Intention, irgend etwas zu tun, bezeichnet, nicht das Erzielen eines Effekts.

Effektbeschreibungen modifizierte Kausalbeschreibungen dargestellt werden, die nach der Interpretation $I_{\vee ARCF}$ ($I_{\vee RCF}$ zusammen mit I_A) interpretiert werden:

$$\begin{array}{ll} \{ & (\{prod_1, holz^{10}\}, holz^{10}, \{stuhl^5, tisch^7\}) \\ & (\{prod_2, holz^6\}, holz^6, \{stuhl^3, tisch^4\}) \quad \} \end{array} \tag{1.35}$$

Die erste Effektbeschreibung beschreibt die Produktion auf der einen Produktionsstrecke und die zweite die Produktion auf der anderen Produktionsstrecke. Ein Agent kann nun durch Ausführung einer Aktion den Zustandsübergang beeinflussen. Der Prozeß

$$(prod_1, \{holz^{15}, stuhl^3, tisch^0\})$$

liefert (mit dem modifizierten Rahmenaxiom):

$$\{holz^8, stuhl^8, tisch^7\}.$$

Wählt der Agent beide Aktionen $prod_1$ und $prod_2$, dann gibt es den im Beispiel 13 dargestellten Kontextkonflikt, da es nicht genügend Holz für die Ausführung beider Aktionen gibt. □

1.5.2 Aktionsabhängige Kausalitätsbeschreibungen

Durch eine Sequenz von Aktionen wird eine Sequenz von Zustandsübergängen dargestellt. Ist eine der Aktionen leer, dann wird der zugehörige Zustandsübergang ausschließlich durch aktionsunabhängige Kausalbeschreibungen beschrieben. Aussagen über die Folgezustände von Aktionssequenzen heißen *Ergebnisaussagen.*

Definition 50 *Sei $D = (P, R)$ eine Beschreibung eines Universums unter Verwendung der Interpretation I_A und $A_D \subseteq P$ ein universeller Agent. Ein Paar (Q, S) heißt genau dann* Ergebnisaussage *zu D, wenn $Q \subseteq (P \setminus A_D)$ und $S = A_1, A_2, \ldots$ eine Sequenz von Aktionen von A_D ist, also $A_i \subseteq A_D$ $(i = 1, 2, \ldots)$.*

Ist S leer ($S = []$), dann heißt $(Q^0, [])$ Beschreibung des Initialzustandes.

Aus einer Beschreibung einer Kausalitätsrelation läßt sich ableiten, welche Ergebnisaussagen wahr sind und welche nicht. Eine Beschreibung einer Kausalitätsrelation ist dabei wie folgt definiert:

Definition 51 *Sei $D = (P, R)$ eine Beschreibung eines Universums unter Verwendung von I_A und $A_D \subseteq P$ ein universeller Agent. Eine Menge von dreistelligen Tupeln (Q_c, B, Q_e) ist eine* aktionsabhängige Beschreibung von Kausalitäten *Φ_D, wenn für alle (Q_c, B, Q_e) $Q_e \subseteq (P \setminus A_D)$, $Q_c \subseteq (P \setminus A_D)$ und $B \subseteq A_D$.*

Korollar 6 *Sei $D = (P, R)$ eine Beschreibung eines Universums unter Verwendung der Interpretation $I_{\vee ACF}$ und $A_D \subseteq P$ ein universeller Agent. Die aktionsabhängige Kausalitätsrelation $\Phi_{D,I_{\vee ACF}}$ ist dann wie folgt definiert:*

Ein Tupel (Q_c, B, Q_e) ist genau dann Element von $\Phi_{D,I_{\vee ACF}}$, wenn $Q_c \cup B$ entsprechend Definition 41 definiert ist und eine spezielle Prozeßbeschreibung M in $Q_c \cup B$ existiert, so daß Q_e der durch die Effekte von M und das Rahmenaxiom 1.20 beschriebene Folgezustand ist.

Im Rahmen der Vorstellung einer Aktionsbeschreibungssprache im nächsten Kapitel wird diese Beschreibung einer Kausalitätsrelation durch Verwendung von Ressourceneigenschaften nach Abschnitt 1.4.5 erweitert. Die folgenden Begriffe der Struktur und des Modells sind von der konkreten Ausprägung der Kausalitätsbeschreibung jedoch nicht betroffen.

Ein Element einer aktionsabhängigen Beschreibung Φ von Kausalitäten gibt an, welche Aktionsausführung von welchem Ausgangszustand in welchen Folgezustand führen kann (nicht eindeutig bei Nichtdeterminismus). In einem Ausgangszustand, beschrieben durch ϕ^0, führen k verschiedene Aktionen entsprechend Φ zu möglicherweise k verschiedenen Folgezuständen, beschrieben durch $\phi([A_i])$ mit $0 \leq i \leq k$. In jedem dieser Folgezustände kann wiederum jede der k Aktionen ausgeführt werden usw. Die Funktion $\phi(x)$, wobei x eine Aktionssequenz ist, repräsentiert genau einen der Zustände, die nach Ausführung der Folge x von Aktionen in dem Anfangszustand ϕ^0 entsprechend der aktionsabhängigen Beschreibung von Kausalitäten Φ (abhängig von nichtdeterministischen Zustandsübergängen) erreicht werden können Ein Tripel aus ϕ^0, Φ und ϕ beschreibt für jede Aktionssequenz genau eine mögliche Weltentwicklung: Befindet sich das dynamische System nach der Aktionssequenz $A_1, A_2, \ldots, A_m$ im Zustand S, dann muß das dynamische System auch nach den ersten m Aktionen der Sequenz $A_1, A_2, \ldots, A_n$ im Zustand S sein $(n > m)$.

Definition 52 *Sei $D = (P, R)$ eine Beschreibung eines Universums unter Verwendung der Interpretation I_A mit dem universellen Agenten A_D und Φ_D eine aktionsabhängige Beschreibung von Kausalitäten. Ein Tripel (ϕ^0, Φ, ϕ) ist eine* Struktur *zu D, wobei für ϕ gilt:*

$$\begin{array}{ll} 1. & \phi([]) = \phi^0 \quad \text{und} \\ 2. & (\phi([A_1, A_2, \ldots, A_n]), A_{n+1}, \phi([A_1, A_2, \ldots, A_n, A_{n+1}])) \in \Phi \end{array} \tag{1.36}$$

Eine Ergebnisaussage ist in einer Welt wahr, wenn die Zustandsbeschreibung der Ergebnisaussage tatsächlich nach Ausführung der Aktionssequenz auf den erreichten Weltzustand zutrifft. Umgekehrt ist eine Welt, repräsentiert durch eine Struktur, ein Modell einer Beschreibung D, wenn alle Ergebnisaussagen zu D in der Struktur wahr sind:

Definition 53 *Sei Φ_D eine aktionsabhängige Beschreibung von Kausalitäten zu einer Beschreibung D mit dem Agenten A_D gemäß der Interpretation*

I_A. *Eine Ergebnisaussage* $(Q, [A_1, \ldots, A_n])$ *ist genau* erfüllt *in einer Struktur* (ϕ^0, Φ_D, ϕ), *wenn* $Q \geq \phi([A_1, \ldots A_n])$.

Eine Struktur ist ein Modell *der Beschreibung* D, *wenn alle Ergebnisaussagen zu* D *erfüllt sind. Eine Ergebnisaussage* v *wird genau dann* gestützt *durch* D, *wenn* v *in jedem Modell von* D *erfüllt ist.*

Kapitel 2

Die Sprache $\mathcal{A}_{RNCC}$

Im vorangegangenen Kapitel wurden Beschreibungen von Universen behandelt. Wie gezeigt wurde, können unter bestimmten Annahmen über Abhängigkeiten der Eigenschaften, die Zustände des dynamischen Systems beschreiben, Klassen von dynamische Systeme effizient beschrieben werden. In der vorangegangenen Diskussion beeinflußten folgende Konzepte in Form von Interpretationen die Effizienz von Beschreibungen von Universen:

1. Eine Kausalbeschreibung beschreibt im Allgemeinen mehrere unterschiedliche Zustandsübergänge (Anwendbarkeit und Gültigkeit von Kausalbeschreibungen, Prozeßbeschreibungen).

2. Eigenschaften des Ausgangszustandes, die nicht durch Effekte einer speziellen Prozeßbeschreibung beeinflußt werden, bleiben auch im Folgezustand erhalten (Rahmenaxiome).

3. Bestimmte durch quantitative Eigenschaften beschriebene Effekte werden nicht idempotent verrechnet (Ressourceneigenschaften).

Durch die Verwendung exklusiver Eigenschaften in Kontexten von Kausalbeschreibungen wird bestimmt, zu welchen durch Eigenschaftsmengen realisierbaren Zustandsbeschreibungen keine korrekten Zustandsübergangsbeschreibungen existieren.

Die im folgenden vorgestellte *Aktionsbeschreibungssprache* $\mathcal{A}_{RNCC}$ enthält all diese Konzepte. Jedoch erlaubt die Sprache nur zwei Formen der Abhängigkeit von Eigenschaften untereinander, die Komplementbeziehung und eine spezielle Art von Ressourceneigenschaften.

$\mathcal{A}_{RNCC}$ stammt von der Sprache $\mathcal{A}$ ab, die erstmals von Lifschitz in [7] vorgestellt wurde. $\mathcal{A}$ arbeitet ausschließlich mit redundanzfreien Mengen von Eigenschaften, üblicherweise als Fluenten bezeichnet. Die von Baral und Gelfond in [2] erweiterte Sprache $\mathcal{A}_C$ unterstützt die Beschreibung nebenläufiger Aktionen. Nichtdeterministische Effekte und die Interpretation von widersprüchlichen Effekten als impliziten Nichtdeterminismus wurden von Bornscheuer und Thielscher in [5] angegeben. In [13] wurden die Verwendung indirekter Effekte untersucht. Indirekte Effekte sind von Eigenschaften des Effektteils abhängige Eigenschaften.

$\mathcal{A}_{RNCC}$ unterstützt die Verwendung von Fluenten und Ressourceneigenschaften (R), die Beschreibung nichtdeterministischer Zustandsübergänge (N), die Kombination nebenläufiger Prozesse (C) und den Gebrauch von Kontexten (C). In $\mathcal{A}_{RNCC}$ können außerdem, im Gegensatz zu den erwähnten $\mathcal{A}$–Varianten auch nicht durch Aktionen (d.h. durch die leere Aktion) verursachte Zustandsübergänge dargestellt werden.

2.1 Domänenbeschreibungen

Durch Domänenbeschreibungen werden in $\mathcal{A}_{RNCC}$ Beschreibungen von Universen dargestellt. Es gibt in Domänenbeschreibungen drei verschiedene Arten von Eigenschaften: *Einzelaktionsnamen*, *Ressourcennamen* und *Fluentnamen*. *Effektpropositionen* repräsentieren Kausalbeschreibungen, die insbesondere auch gemäß Interpretation I_A aktionsabhängig sein können. Ergebnisaussagen zu Beschreibungen von Universen werden als zu Domänenbeschreibungen gehörig betrachtet und durch *Wertpropositionen* repräsentiert.

Definition 54 *Eine Domänenbeschreibung D besteht aus einer endlichen Menge von* Fluentnamen *F_D, einer endlichen Menge von* Ressourcennamen *R_D, einer endlichen Menge von* Einzelaktionen *A_D, einer endlichen Menge von* Effektpropositionen *E_D und einer endlichen Menge von Wertpropositionen V_D. F_D, R_D und A_D sind disjunkt.*

$L_{F_D} = \{\overline{f} \mid f \in F_D\} \cup F_D$ *heißt die Menge der* Fluentliterale.

$L_{R_D} = \{\overline{r} \mid r \in R_D\} \cup R_D$ *heißt die Menge der* Ressourcenliteralklassen.

Weiter ist R_D^* jene Multimenge, die unendlich viele Elemente jedes Ressourcennamens aus R_D enthält.

Im weiteren werde unter Fluentnamen, Fluentliteralen, Ressourcennamen, Ressourcenliteralen, Einzelaktionen, Effektpropositionen und Wertpropositionen die entsprechende Menge bezüglich der gerade betrachteten Domäne D verstanden.

2.1.1 Einzelaktionsnamen, Fluent– und Ressourcennamen

Einzelaktionsnamen aus A_D und Fluentnamen aus F_D representieren qualitative Eigenschaften nach Definition 7. Ressourcennamen R_D bezeichnen entsprechend Definition 12 Ressourcenklassen.

Die Eigenschaften aus A_D, F_D, die Komplemente der Elemente von F_D und alle Eigenschaften jeder Ressourcenklasse sowie deren Komplemente seien Eigenschaften von Weltzuständen W des beschriebenen Universums:

$$\begin{array}{ll} 1. & \forall a \in A_D : [\![a]\!] \subseteq W \\ 2. & \forall f \in F_D : [\![f]\!] \subseteq W \wedge \left[\!\left[\overline{f}\right]\!\right] = W \setminus [\![f]\!] \\ 3. & \forall r \in R_D : \forall s \in [r]_{\leq} : [\![s]\!] \subseteq W \wedge [\![\overline{s}]\!] = W \setminus [\![s]\!] \end{array} \tag{2.1}$$

Jede aus Einzelaktionsnamen, Fluentliteralen und Ressourceneigenschaften aller unterschiedlicher Klassen gebildete Menge von Eigenschaften sei redundanzfrei nach Definition 9. D.h. mit

$$M = A_D \cup L_{F_D} \cup \bigcup_{r \in L_{R_D}} \{p \quad \text{mit} \quad p \in [r]_{\leq}\} \tag{2.2}$$

gelte:

$$\forall A, B \subseteq M : [\![A]\!] \subseteq [\![B]\!] \iff B \subseteq A \tag{2.3}$$

Jede Ressourcenklasse $[r]_{\leq}$ mit $r \in R_D$ sei ordnungsisomorph zu den natürlichen Zahlen mit der Relation $<$. Jede Menge $[r]_{\leq}$ besitzt daher ein kleinstes Element r_0 und es existiert eine Funktion $succ$, so daß gilt:

$$\forall s \in [r]_{\leq} : succ(succ(\ldots succ(r_0)\ldots)) = succ^k(r_0) = s \quad \text{mit} \quad 0 \leq k \tag{2.4}$$

Definition 55 *Sei $s \in [r]_{\leq}$ mit $r \in R_D$ eine Eigenschaft und $s = succ^k(r_0)$, dann beschreibt s das* mindestens k–malige Auftreten von r. *Die komplementäre Eigenschaft $\overline{s} \in [\![\overline{r}]\!]$ mit $\overline{r} \in L_{R_D}$ beschreibt das* höchstens $k-1$–malige Auftreten von r.

Die Eigenschaften s und $\overline{s}$ werden wie folgt dargestellt:

$$s = \{\!|\underbrace{r, r, \ldots, r}_{k-mal}|\!\} \quad und \quad \overline{s} = \overline{\{\!|\underbrace{r, r, \ldots, r}_{k-mal}|\!\}} \tag{2.5}$$

Die natürliche Zahl $k = |s|$ wird als Ordnung der Eigenschaft *s bezeichnet, wobei $k = |\emptyset| = 0$.*

Die natürliche Zahl $k = |\overline{s}|$ wird als Ordnung der komplementären Eigenschaft *$\overline{s}$ bezeichnet, wobei $k = |\emptyset| = \infty$.*

Da jede endliche Teilmenge der natürlichen Zahlen ein größtes Element besitzt, hat auch jede endliche Teilmenge S einer Ressourcenklasse, die ordnungsisomorph zu den natürlichen Zahlen ist, ein größtes Element. Dieses größte Element s ist gleichzeitig die kleinste obere Schranke $\hat{S}$ von S:

Korollar 7 *Jede endliche Menge von Eigenschaften $S = \{s_1, s_2, \ldots, s_n\}$ mit $s_i \in [r]_{\leq}$ und $r \in R_D$ $(1 \leq i \leq n)$ besitzt ein Element s_{max}, so daß gilt:*

$$\forall s \in S : |s| \leq |s_{max}| \quad mit \quad s_{max} = \hat{S} \tag{2.6}$$

Da jede endliche Teilmenge S einer zu den natürlichen Zahlen ordnungsisomorphen Ressourcenklasse $[r]_\leq$ ein größtes Element s_{max} besitzt, hat die Menge S' der komplementären Eigenschaften zu den Elementen aus S entsprechend Korollar 3 ein kleinstes Element, das auch die größte untere Schranke darstellt:

Korollar 8 *Jede endliche Menge von komplementären Eigenschaften* $S' = \{\overline{s_1}, \overline{s_2}, \ldots, \overline{s_n}\}$ *mit* $s_i \in [r]_\leq$ *und* $r \in R_D$ $(1 \leq i \leq n)$ *besitzt ein Element* $\overline{s}_{min}$*, so daß gilt:*

$$\forall \overline{s} \in S' : |\overline{s}_{min}| \leq |\overline{s}| \quad mit \quad \overline{s}_{min} = \hat{S}' \tag{2.7}$$

2.1.2 Zustandsbeschreibungen und Prozesse

Eine Zustandsbeschreibung wird in $\mathcal{A}_{RNCC}$ durch ein Paar aus einer Menge von Fluenten und einer Multimenge von Ressourcennamen dargestellt. Analog zu Definition 46 wird die Teilmenge X einer Multimenge, die eine Ressourceneigenschaft einer Klasse $[r]_\leq$ beschreibt, als X_r bezeichnet:

Definition 56 *Sei D eine Domäne und X eine Multimenge, die nur Elemente aus R_D enthält. Mit X_r wird die größte Teilmenge von X bezeichnet, in der ausschließlich der Ressourcenname r vorkommt. Die Ordnung von X_r wird mit $|X_r|$ angegeben.*

Die Menge Q in einer Zustandsbeschreibung (Q, R) enthält alle Fluentliterale, die im Zustand gültige Eigenschaften repräsentieren, d.h. von allen $\{f, \overline{f}\}$–Paaren der Fluentliterale genau ein Element.

Eine andere Möglichkeit, qualitative Eigenschaften in Zustandsbeschreibungen zu bilden, besteht darin, nur diejenigen Fluentnamen darzustellen, die im Zustand gültige Eigenschaften repräsentieren. Eigenschaften, deren zugeordnete Fluentnamen nicht in einer Zustandsbeschreibung dargestellt sind, werden dann als nicht gültig definiert (d.h. die komplementären Eigenschaften sind gültig). Ein Vorteil der hier gewählten Repräsentationsform ist die Möglichkeit, die Gültigkeit von Eigenschaften und deren Komplemente in Zustandsbeschreibungen durch die $\subseteq$–Beziehung zwischen Fluentliteralmengen ausdrücken zu können.

Definition 57 *Sei D eine Domäne mit der Menge der Fluentnamen F_D und der Menge der Ressourcennamen R_D. Eine* Zustandsbeschreibung σ in D *ist ein Paar (Q, R), wobei $Q \subseteq L_{F_D}$ eine Menge von qualitativen Eigenschaften und R eine endliche Multimenge von Ressourcennamen aus R_D ist. Dabei gilt:*

$$\forall f \in F_D : (f \in Q \vee \overline{f} \in Q) \wedge \{f, \overline{f}\} \not\subseteq Q \tag{2.8}$$

Die Menge der in einer Zustandsbeschreibung $\sigma = (Q, R)$ der Domäne D gültigen Eigenschaften ist durch σ wie folgt eindeutig bestimmt:

Definition 58 *Sei $\sigma = (Q, R)$ eine Zustandsbeschreibung.*

Eine qualitative Eigenschaft $f \in L_{F_D}$ gilt *in σ genau dann, wenn $f \in Q$.*

Eine Ressourceneigenschaft $s \in [r]_\leq$ mit $r \in R_D$ gilt *in σ genau dann, wenn $|s| \leq |R_r|$. Die Ressource r heißt dann auch $|s|$–*mal verfügbar *in σ.*

Eine komplementäre Ressourceneigenschaft $\overline{s}$ mit $s \in [r]_\leq$ und $r \in R_D$ gilt *in σ genau dann, wenn $|s| > |R_r|$. r heißt dann* nicht $|\overline{s}|$–mal verfügbar.

Die Menge A_D bildet den universellen Agenten von D nach Definition 47 und eine Zustandsbeschreibung σ, gemäß Definition 58, kann zusammen mit einer Einzelaktionsmenge $A \subseteq A_D$ als Prozeß (ebenfalls Definition 47, Interpretation I_A) interpretiert werden.

2.2 Kausalbeschreibungen durch Effektpropositionen

Die im ersten Teil dieser Arbeit vorgestellten Interpretationen $I_\vee RCF$ und I_A werden im folgenden formal in $\mathcal{A}_{RNCC}$ vereinigt. Kontextabhängige Kausalbeschreibungen nach Definition 34 werden nun als im Allgemeinen aktionsabhängig interpretiert und auf Effektpropositionen abgebildet:

Definition 59 *Eine Effektproposition (kurz:* e–prop*) hat die folgende Struktur:*

action		[effects]
	[`if`	conditions]
	[	context]

action bestehe aus einer Menge A von Einzelaktionen. Eine Effektproposition sei eine Effektbeschreibung der Aktion A (siehe Definion 49. Die Menge A kann leer sein, die Effektproposition liefert dann eine Kausalbeschreibung, die unabhängig vom Agenten A_D ist.

2.2.1 Bedingungen

conditions beschreibt den Bedingungsteil einer e–prop, der bestimmt, ob die e–prop in einer Zustandsbeschreibung anwendbar ist.

conditions enthält mindestens einen der folgenden Bedingungsbezeichner zusammen mit einer passenden Menge

`holds` Q , $Q \subseteq L_{F_D}$, beschreibt qualitative Eigenschaften von Zuständen.

`available` R , $R \dot{\subseteq} R_D^*$, beschreibt Ressourceneigenschaften von Zuständen, wobei R endlich ist.

`not available` R , $R \dot{\subseteq} R_D^*$, beschreibt komplementäre Ressourceneigenschaften von Zuständen, wobei R endlich ist.

Durch Kombinationen von Ressourceneigenschaften und komplementären Ressourceneigenschaften einer Klasse in einem Bedingungsteil sind untere und obere Schranken für das Auftreten einer Ressource beschreibbar. Z.B. werden durch die Bedingungen `available` $\{\!\!\{r, r\}\!\!\}$ und `not available` $\{\!\!\{r, r, r, r\}\!\!\}$ die Ressourceneigenschaften $\{\!\!\{r, r\}\!\!\}$ und $\overline{\{\!\!\{r, r, r, r\}\!\!\}}$ dargestellt. Die Ressource r muß also mindestens zweimal und darf höchstens dreimal in einem Zustand vorkommen, damit eine e–prop mit diesem Bedingungsteil anwendbar ist.

Definition 60 *Sei e eine e–prop oder eine v–prop mit dem Bezeichner B, der mit einer Menge X kombiniert ist. Dann ist $B(e) = X$.*

Da Einzelaktionen lediglich spezielle Eigenschaften sind (Definition 47), folgt nach Definition 20 und 58 mit Gleichung 2.3 für die Anwendbarkeit einer e–prop:

Korollar 9 *Sei $P = (A, (Q, R))$ ein Prozeß. Eine e–prop e ist genau dann anwendbar*[1] *in P, wenn*

$$\begin{aligned}
&1.\quad B \subseteq A \\
&2.\quad \texttt{holds}(e) \subseteq Q \\
&3.\quad \forall r \in R_D : |\texttt{available}_r(e)| \leq |R_r| \\
&4.\quad \forall r \in R_D : |\texttt{not available}_r(e)| > |R_r|
\end{aligned} \tag{2.9}$$

Enthält eine e–prop keinen Bedingungsteil, dann ist sie in jeder Zustandsbeschreibung anwendbar.

Spezifität von Effektpropositionen

Aus Definition 4 und 22 folgt analog Interpretation $I_\vee$ die Spezifitätsrelation $\leq_E$ zwischen Effektpropositionen:

Korollar 10 *Seien e eine e–prop für die Aktion A und f eine e–prop für die Aktion B. Dann gilt*

$$\begin{aligned}
f \leq_E e \iff\ & A \subseteq B \\
\wedge\quad & \texttt{holds}(e) \subseteq \texttt{holds}(f) \\
\wedge\quad & \forall r \in R_D : |\texttt{available}_r(e)| \leq |\texttt{available}_r(f)| \\
\wedge\quad & \forall r \in R_D : |\texttt{not available}_r(f)| \leq |\texttt{not available}_r(e)|
\end{aligned} \tag{2.10}$$

$$\begin{aligned}
f =_E e \quad &\iff \quad e \leq_E f \quad \wedge \quad f \leq_E e \\
f <_E e \quad &\iff \quad e \leq_E f \quad \wedge \quad e \neq_E f
\end{aligned} \tag{2.11}$$

[1] Genauer: die durch e repräsentierte Kausalbeschreibung ist in dem durch $(A, (Q, R))$ anwendbar.

Gültigkeit von Effektpropositionen

Da es in einer Domänenbeschreibung nur eine endliche Anzahl von e–props gibt, folgt für Domänenbeschreibungen aus Definition 22 analog zu Interpretation $I_\vee$:

Korollar 11 *Sei D eine Domänenbeschreibung und P ein Prozeß und e eine in P anwendbare e–prop. e ist genau dann gültig in P, wenn keine in P anwendbare e–prop f zu P existiert, so daß $f <_E e$.*

Daraus und mit Definition 58 folgt:

Korollar 12 *Sei D eine Domänenbeschreibung und P ein Prozeß und M die Menge aller gültigen e–props zu P. Dann ist die Äquivalenzklassenzerlegung von M bzgl. $=_E$ eine Prozeßbeschreibung in der Domänenbeschreibung D zum Prozeß P, bezeichnet durch Z_D^P.*

Jede Äquivalenzklasse einer solchen Zerlegung enthält genau die gleichspezifischen e–props zu einem Prozeß, die alternative Beschreibungen eines Teilprozesses darstellen (siehe Definition 28):

Korollar 13 *Sei P ein Prozeß und Z_D^P eine Prozeßbeschreibung zu P. Eine Menge M_D^P ist genau dann eine spezielle Prozeßbeschreibung zu P, wenn sie aus jeder Äquivalenzklasse in Z_D^P genau ein Element enthält:*

$$M_D^S = \bigcup_{[f]_E \in Z_D^P} f \tag{2.12}$$

2.2.2 Kontexte von Effektpropositionen

Wie in Abschnitt 1.4.5 anhand der Interpretation $I_{\vee C}$ gezeigt wurde, kann durch die Angabe von exklusiven Bedingungen in Kausalbeschreibungen die Menge der beschriebenen Zustände eines Universums V eingeschränkt werden, um eine Beschreibung D eines Universums U in eine korrekte Teilbeschreibung des Universums U in V zu transformieren.

Der Kontextteil *context* einer Effektproposition beschreibt exklusive Bedingungen einer Kausalbeschreibung. *context* enthält einen der folgenden Kontextbezeichner kombiniert mit einer passenden Menge:

`using` Q , $Q \subseteq L_{F_D}$, beschreibt exklusive qualitative Eigenschaften von Zuständen.

`consuming` R , $R \dot{\subseteq} R_D^*$, beschreibt exklusive Ressourceneigenschaften, wobei R endlich ist.

Ressourceneigenschaften, die im Kontextteil oder im Effektteil einer e–prop auftauchen werden nicht idempotent verrechnet, wie im Abschnitt 1.4.5 anhand von Interpretation $I_{\vee RCF}$ dargestellt. Die Addition und Subtraktion wird in der Multimengendarstellung der Ressourceneigenschaften als Multimengenvereinigung und Multimengensubtraktion gemäß Definition 55 ausgedrückt:

Korollar 14 *Seien $s, t \in [r]_{\leq}$ mit $r \in R_D$ zwei Ressourceneigenschaften. Die Eigenschaft $s + t$ sei dann wie folgt definiert:*

$$s + t = \{\!\!\{ \underbrace{r, r, \ldots, r}_{k} \}\!\!\} \,\dot{\cup}\, \{\!\!\{ \underbrace{r, r, \ldots, r}_{l} \}\!\!\} = \{\!\!\{ \underbrace{r, r, \ldots, r}_{k+l} \}\!\!\} \tag{2.13}$$

Ist $|s| \geq |t|$, dann heißt die Eigenschaft $s - t$ Differenz *von s und t:*

$$s - t = \{\!\!\{ \underbrace{r, r, \ldots, r}_{k} \}\!\!\} \,\dot{\setminus}\, \{\!\!\{ \underbrace{r, r, \ldots, r}_{l} \}\!\!\} = \{\!\!\{ \underbrace{r, r, \ldots, r}_{k-l} \}\!\!\} \tag{2.14}$$

Definition 61 *Sei M eine Multimenge, dann bezeichne $\tau(M)$ diejenige Menge N, die jedes der Elemente aus M genau einmal enthält. Ist N' eine Menge, dann ist $M' = \tau^{-1}(N')$ die Multimenge, die jedes Element aus N' genau einmal enthält.*

Nach den Definitionen 36 und 44 wird der Kontextteil $\texttt{using}(M)$ und der nicht idempotente Kontextteil $\texttt{consuming}(M)$ aus einer speziellen Prozeßbeschreibung gewonnen.

Korollar 15 *Sei M eine Menge von e–props, dann geben*

$$\begin{aligned} \texttt{using}(M) &= \dot{\bigcup_{e \in M}} \tau^{-1}(\texttt{using}(e)) \\ \texttt{consuming}(M) &= \dot{\bigcup_{r \in R_D}} \dot{\bigcup_{e \in M}} \texttt{consuming}_r(e) \end{aligned} \tag{2.15}$$

den Kontext *von M an.*

Kontextkonfliktfreie Prozeßbeschreibungen

Da Fluentliteralmengen nach Gleichung 2.3 redundanzfrei sein müssen, sind zwei Eigenschaften c, d nur voneinander abhängig, wenn $c = d$. Nach Definition 37, 38 und 58 gilt dann:

Korollar 16 *Eine Prozeßbeschreibung Z_D^P verursacht einen Kontextkonflikt in $P = (A, (Q, R))$, wenn eine spezielle Prozeßbeschreibung M zu Z_D^P nicht kontextkonsistent ist. Eine spezielle Prozeßbeschreibung ist kontextkonsistent, gdw.*

$$\forall f \in \texttt{using}(M):\ f \notin \texttt{using}(M) \,\dot{\setminus}\, \{\!\!\{ f \}\!\!\} \tag{2.16}$$

und:

$$\begin{array}{ll} 1. & \tau(\texttt{using}(M)) \subseteq Q \\ 2. & \forall r \in R_D : |\texttt{consuming}_r(M)| \leq |R_r| \end{array} \qquad (2.17)$$

2.2.3 Effekte von Effektpropositionen

effects stellt den Effektteil einer e–prop dar. *effects* enthält einen der folgenden Effektbezeichner kombiniert mit einer passenden Menge:

$\texttt{causes}\, Q$, $Q \subseteq L_{F_D}$, beschreibt die Effekte einer e–prop, die qualitative Eigenschaften betreffen.

$\texttt{produces}\, R$, $R \dot{\subseteq} R_D$, beschreibt die Effekte einer e–prop, die Ressourceneigenschaften betreffen, wobei R endlich ist.

Effekte, die Ressourcen betreffen, werden durch nicht itempotente Verwendung der Ressourceneigenschaften wie in Abschnitt 1.4.5 gemäß Interpretation $I_{\vee RCF}$ dargestellt.

Die Definitionen 36 und 44 liefern den Effektteil $\texttt{causes}(M)$ und den nicht idempotenten Effektteil $\texttt{produces}(M)$ aus einer speziellen Prozeßbeschreibung; beide werden in Analogie zu Defintion 36 definiert:

Definition 62 *Sei $P = (A, \sigma)$ ein Prozeß und M eine spezielle kontextkonfliktfreie Prozeßbeschreibung zu P. Dann seien die Effekte von M wie folgt definiert:*

$$\begin{aligned} \texttt{causes}(M) &= \bigcup_{e \in M} \texttt{causes}(e) \qquad (2.18) \\ \texttt{produces}(M) &= \dot{\bigcup} \dot{\bigcup_{e \in M}} \texttt{produces}_r(e) \end{aligned}$$

Damit stellt $\texttt{causes}(M)$ den idempotenten und $\texttt{produces}(M)$ den nichtidempotenten Effektteil der Prozeßbeschreibung M dar.

Effektkonfliktfreie Prozeßbeschreibungen

Entsprechend Definition 57 ist jedes Tupel (Q, R) von Fluentliteralen $Q \subseteq L_{F_D}$ und einer endlichen Ressourcenmultimenge $R \dot{\subseteq} R_D^*$ eine Zustandsbeschreibung in der Domäne D, wenn Q keine zwei Eigenschaften enthält, die zueinander komplementär sind. Nach Definition 39 gilt also:

Korollar 17 *Eine Prozeßbeschreibung Z_D^P verursacht einen Effektkonflikt in $P = (A, (Q, R)$, wenn eine spezielle Prozeßbeschreibung M zu Z_D^P nicht effektkonsistent ist.*

Sei $\texttt{causes}(M)_\dagger$ *die Menge von Fluentnamen, die widersprüchliche Effekte einer speziellen Prozeßbeschreibung* M *darstellt, also*

$$\texttt{causes}(M)_\dagger = \{f \mid f \in \texttt{causes}(M) \wedge \overline{f} \in \texttt{causes}(M)\} \tag{2.19}$$

M *ist genau dann dann effekkonsistent, wenn* $\texttt{causes}(M)_\dagger$ *leer ist.*

2.3 Domänenbeschreibungen und Universen

Mit den Rahmenaxiomen 1.20 und 1.33 wird nun die aktionsabhängige Beschreibung von Kausalitäten Φ (siehe Definition 51) bestimmt:

Definition 63 *Sei* Φ *eine dreistellige Relation.* Φ *ist eine aktionsabhängige Beschreibung von Kausalitäten gdw: Für alle* $(\sigma, A, \sigma') \in \Phi$ *gilt Eine Aktion* A *überführt eine Zustandsbeschreibung* $\sigma = (Q, R)$ *in eine Zustandsbeschreibung* $\sigma' = (Q', R')$ *(*$(\sigma, A, \sigma') \in \Phi$*).*

Eine Aktion A *überführt* $\sigma = (Q, R)$ *genau dann in* $\sigma' = (Q', R')$*, wenn die Prozeßbeschreibung zu* (A, σ) *keinen Kontextkonflikt und keinen Effektkonflikt verursacht und eine spezielle Prozeßbeschreibung zu* (A, σ) *existiert, so daß gilt:*

$$\begin{aligned} Q' &= (Q \setminus \overline{\texttt{causes}(M)}) \cup \texttt{causes}(M) && (2.20)\\ R' &= \dot{\bigcup_{r \in R_D}} (R_r - \texttt{consuming}_r(M)) + \texttt{produces}_r(M) \end{aligned}$$

Dabei bezeichnet $\overline{\texttt{causes}(M)}$ *die Menge der zu den Elementen aus* $\texttt{causes}(M)$ *komplementären Fluentliterale.*

2.3.1 Wertpropositionen

Wertpropositionen repräsentieren Ergebnisaussagen nach Definition 50 gemäß Interpretation I_A.

Definition 64 *Eine Wertproposition (kurz:* v–prop*) hat folgende Struktur*

$$\text{propositions} \quad \texttt{after} \quad \text{actions} \tag{2.21}$$

propositions *kann Bedingungsbezeichner* `holds`, `available`, `not available`, *jeweils kombiniert mit einer Menge entsprechend Abschnitt 2.2.1 enthalten und* actions *ist eine Sequenz von Aktionen.*

Ist die Aktionssequenz leer, dann beschreibt die v–prop einen Anfangszustand, und kann auch als

$$\texttt{initially} \quad \text{propositions} \tag{2.22}$$

geschrieben werden.

Ebenso wie Beschreibungen von Universen in Kapitel 1 nach Definition 16 und 57, wird auch durch eine Domänenbeschreibung ein Universum mit einer Menge von Weltzuständen und einer Kausalitätsrelation definiert.

Korollar 18 *Sei D eine Domänenbeschreibung und Φ_D eine entsprechend Definition 63 aufgebaute aktionsabhängige Beschreibung von Kausalitäten. Sei P_D die Menge der Prozesse mit $(a,s) = (a,(q,r)) \in P_D \iff \exists a, s' : (s,a,s') \in \Phi_D$. Dann ist D eine korrekte Beschreibung eines Universums U in $V = (W_D, K_D)$ mit*

$$\begin{aligned} W_D &= \bigcup_{d \in P_D} [\![d]\!] \\ K_D &= \{(w,w') \mid \exists (s,a,s') \in \Phi_D : w \in [\![a \times s]\!] \wedge w' \in [\![s']\!]\} \end{aligned}$$

wobei

$$[\![(a,s)]\!] = [\![(a,(q,r))]\!] = [\![a]\!] \cap [\![q]\!] \cap [\![r]\!]$$

2.3.2 Modelle

Die aktionsabhängige Beschreibung von Kausalitäten, wie in Korollar 18 beschrieben, kann nun mit einer Abbildung ϕ nach Definition 52 zu einer Struktur verknüpft werden. Sind alle Ergebnisaussagen in einer Struktur wahr, dann ist diese Struktur gemäß Definition 53 ein Modell der Domänenbeschreibung:

Korollar 19 *Sei D eine Domänenbeschreibung in $\mathcal{A}_{RNCC}$ mit der Menge S_D von Zustandsbeschreibungen nach Definition 57. Eine Struktur ist ein Tripel (σ_0, Φ, ϕ), wobei $\sigma_0 \in S_D$, Φ eine aktionsabhängige Beschreibung von Kausalitäten nach Definition 63 und $\phi : (2^{A_D})^* \mapsto S_D$, so daß:*

$$\begin{array}{ll} 1. & \phi([]) = \sigma_0 \\ 2. & (\phi([a_1,\ldots,a_n]), a_{n+1}, \phi([a_1,\ldots,a_n,a_{n+1}])) \in \Phi \\ & \textit{für jede Aktionssequenz } a_1,\ldots,a_n,a_{n+1} \textit{ mit } n \geq 0. \end{array} \tag{2.23}$$

Eine v-prop $v = l\,\texttt{after}\,[a_1,\ldots,a_n]$ ist in einer Struktur (σ_0, Φ, ϕ) genau dann wahr, wenn alle Aussagen aus l in $\phi([a_1,\ldots,a_n]) = (Q,R)$ gelten, also:

$$\begin{array}{ll} 1. & \texttt{holds}(v) \subseteq Q \\ 2. & \forall r \in R_D : |\texttt{available}_r(v)| \leq |R_r| \\ 3. & \forall r \in R_D : |\texttt{not available}_r(v)| > |R_r| \end{array} \tag{2.24}$$

Eine Struktur ist genau dann ein Modell von D, wenn alle v-props aus V_D wahr sind. Eine v-prop v wird genau dann durch D gestützt, wenn v in jedem Modell von D wahr ist.

Beispiel 16 (Kochen mit Wasser)

Effektpropositionen für die Aktion kochen*:*

kochen		`produces`	*heißes–wasser*
	`if`	`available`	*wasser*
		`consuming`	*wasser*
kochen		`produces`	*heißer–tee*
	`if`	`available`	*wasser, tee*
		`consuming`	*wasser, tee*
kochen		`produces`	*heiße–suppe*
	`if`	`available`	*wasser, brühwürfel*
		`consuming`	*wasser, brühwürfel*

Darstellungen der folgenden Art symbolisieren informal einige Tripel der entsprechenden Relation Φ_D. Links steht die Beschreibung des Ausgangszustands, in der Mitte die ausgeführte Aktion und rechts die Folgezustandsbeschreibung.

wasser	— *kochen*	$\longrightarrow$ *heißes–wasser*
wasser, tee	— *kochen*	$\longrightarrow$ *heißer–tee*
wasser, tee, brühwürfel	— *kochen*	$\longrightarrow$ `not defined`

Die folgende Zustandsübergangsbeschreibung wird durch eine mehrere e–props enthaltende spezielle Prozeßbeschreibung erzeugt:

wasser, wasser, tee, brühwürfel	— *kochen*	$\longrightarrow$ *heißer–tee, heiße–suppe*

Eine Eigenschaft der Spezifikationen in $\mathcal{A}_{RNCC}$ ist die Existenz der Spezifitätsrelation zwischen Effektpropositionen, die erlaubt durch Hinzunahme von Effektpropositionen Ausnahmen von einem Standardverhalten zu definieren. Die obige Zustandsübergangsbeschreibung kann z.B. durch die folgende zusätzliche Effektproposition verändert werden:

kochen		`produces`	*heiße–soße*
	`if`	`available`	*wasser, wasser, tee, brühwürfel*
		`consuming`	*wasser, wasser, tee, brühwürfel*

Der neue Zustandsübergang ist:

wasser, wasser, tee, brühwürfel	— *kochen*	$\longrightarrow$ *heiße–soße*

Eine andere Möglichkeit in dieser Domäne wäre z.B. die nichtdeterministische Erzeugung von heiße–suppe *oder* heißer–tee *anstelle von* heiße–soße*:*

kochen		`produces`	*heiße–suppe*
	`if`	`available`	*wasser, wasser, tee, bruehwuerfel*
		`consuming`	*wasser, brühwürfel*
kochen		`produces`	*heißer–tee*
	`if`	`available`	*wasser, wasser, tee, brühwürfel*
		`consuming`	*wasser, tee*

Die Zustandsübergangsbeschreibung bei der Aktion kochen *lautet dann:*

wasser, wasser, tee, brühwürfel — *kochen* $\longrightarrow$ *heißer–tee*
| *heiße–suppe*

bzw. zusammen mit dem ersten Vorschlag:

wasser, wasser, tee, brühwürfel — *kochen* $\longrightarrow$ *heißer–tee*
| *heiße–suppe*
| *heiße–soße*

□

Das folgende Beispiel demonstriert die Darstellung der parallelen Ausführung von Aktionen.

Beispiel 17 (Kauf eines Computersystems)

kaufe–Drucker		`produces`	*Drucker*
	`if`	`available`	DM^{500}
		`consuming`	DM^{500}
kaufe–Monitor,		`produces`	*Monitor, Computer*
kaufe–Computer	`if`	`available`	DM^{1000}
		`consuming`	DM^{1000}
kaufe–Computer,		`produces`	*Computer, Drucker*
kaufe–Drucker	`if`	`available`	DM^{1000}
		`consuming`	DM^{1000}

Da es nach dieser Domänenbeschreibung keine Aktion gibt, die ausschließlich einen Monitor bzw. einen Computer als Effekt hat, ist die einzige Möglichkeit ein vollständiges System durch einen einzigen Zustandsübergang zu erhalten die Ausführung der zusammengesetzten Aktionen.

DM^{500}	— *kaufe–Monitor,* *kaufe–Computer,* *kaufe–Drucker*	$\longrightarrow$ *Drucker*
DM^{1500}	— *kaufe–Monitor,* *kaufe–Computer,* *kaufe–Drucker*	$\longrightarrow$ `not defined`
DM^{2000}	— *kaufe–Monitor,* *kaufe–Computer,* *kaufe–Drucker*	$\longrightarrow$ *Monitor,* *Computer,* *Computer, Drucker*

Da die Ressourceneigenschaft DM^{1000} *spezifischer als* DM^{500} *ist, kommt die erste e–prop nicht zur Anwendung, wenn mindestens* DM^{1000} *verfügbar sind. Das ist in einer Domäne mitunter unerwünscht. Eine Möglichkeit, die erste e–prop spezifischer zu machen, ist die Hinzunahme einer negativen Bedingung:*

kaufe–Drucker		`produces`	*Drucker*
	`if`	`available`	DM^{500}
		`not available`	DM^{5000}
		`consuming`	DM^{500}

Solange also keine DM^{5000} *zur Verfügung stehen, führt die Aktion* kaufe–Drucker *zu* Drucker, *sie kann aber auch noch andere Effekte haben, beschrieben durch die e–prop für* kaufe–Computer, kaufe–Drucker, *da die e–props nun unabhängig sind.*

Damit gilt dann z.B.:

DM^{2000}	— *kaufe–Monitor,* *kaufe–Computer,* *kaufe–Drucker*	$\longrightarrow$ *Monitor,* *Computer,* *Computer, Drucker* | *Monitor,* *Computer,* *Drucker,* DM^{500}

Will man hingegen nur die zweite Variante, dann kann man z.B. eine spezifischere e–prop für die zusammengesetzte Aktion definieren:

kaufe–Monitor		`produces`	*Monitor, Drucker, Computer*
kaufe–Drucker	`if`	`available`	DM^{1500}
kaufe–Computer		`not available`	DM^{5000}
		`consuming`	DM^{1500}

□

Kapitel 3

Der Fluentkalkül $\mathcal{FC}_{RNCC}$

3.1 ELP–basierte Programme und $\mathcal{A}_{RNCC}$

In der Sprache $\mathcal{A}_{RNCC}$ beschriebene Domänen können als endliche logische Formelmenge P_D^* mit einer Gleichungstheorie $AC1^*$ formuliert werden, für die, falls sie gewisse Bedingungen erfüllen ([6],[1]), ein Modell durch SLDENF–Resolution ([17]) aus dem korrespondierenden logischen Programm P_D^* automatisch generiert werden kann. Die Verwendung von logischen Programmen mit einer Gleichungstheorie (*Equational Logic Programming (ELP)*,[10]) zur Darstellung dynamischer Systeme basiert auf dem in [11] angeführten Fluentkalkül $\mathcal{FC}$.

Eine solche Ableitung soll für alle Domänen aus $\mathcal{A}_{RNCC}$ korrekt beweisen, ob alle v–props einer Menge von Ergebnisaussagen durch eine Domäne gestützt werden oder nicht.

Die hier angegebene Übersetzung von Domänenbeschreibungen aus $\mathcal{A}_{RNCC}$ in logische Formeln P_D^* basiert auf der Darstellung aller Mengen[1] oder Multimengen, die Objekte der Sprache $\mathcal{A}_{RNCC}$ sind, als Terme [11]. Diese Terme enthalten den Operator $\circ$, wobei für $\circ$ die folgende Gleichungstheorie gilt:

$$\begin{array}{llcll} 1. & \forall X,Y,Z : (X \circ Y) \circ Z & = & X \circ (Y \circ Z) & \text{(Assoziativität)} \\ 2. & \forall X,Y : X \circ Y & = & Y \circ X & \text{(Kommutativität)} \\ 3. & \forall X : X \circ \emptyset & = & X & \text{(Einselement)} \end{array} \tag{3.1}$$

In [12] wurde gezeigt, daß eine Menge von Formeln $AC1^*$ erster Ordnung existiert, die obige Gleichungstheorie für den Operator $\circ$ beschreibt und für die Unifikation mit Gleichheit vollständig ist.

In der folgenden Darstellung des logischen Kalküls $\mathcal{FC}_{RNCC}$ werden Terme, die durch „$\circ$" verbunden werden können, als *AC1–Terme* bezeichnet. Die Gleichheit bezüglich der Theorie 3.1 wird im logischen Programm mit „$=_{AC1}$" bezeichnet. Es wird zunächst eine Übersetzung von Domänenbeschreibungen D in $\mathcal{A}_{RNCC}$ durch eine vervollständigte Formelmenge P_D^* angegeben. Das entsprechende

[1] außer den in die Beschreibung der Kausalität integrierten v–props

logische Programm stellt dann die Übersetzung von D in den Fluentkalkül $\mathcal{FC}_{RNCC}$ dar.

3.2 Domänenbeschreibungen mit ELP

Objekte aus $\mathcal{A}_{RNCC}$, die im folgenden übersetzt werden, sind Fluentliteralmengen, Fluentliteralmultimengen, Ressourcenmultimengen, Mengen von Aktionsnamen oder Mengen von e–props.

Um die Beziehung komplementärer Fluentliterale bei der folgenden Darstellung im logischen Programm berücksichtigen zu können, wird eine Abbildung φ_D eingeführt, die ein Fluentliteral auf ihr Komplement abbildet.

Definition 65 *Sei D eine Domänenbeschreibung in $\mathcal{A}_{RNCC}$. Dann bezeichnet φ_D eine bijektive Funktion mit*

$$\begin{array}{l} \varphi_D : F_D \cup \overline{F_D}^{\varphi_D} \mapsto F_D \cup \overline{F_D}^{\varphi_D} \\ F_D \cap \overline{F_D}^{\varphi_D} = \emptyset \\ x \in F_D \Leftrightarrow \varphi_D(x) \in \overline{F_D}^{\varphi_D} \end{array} \tag{3.2}$$

$\overline{F_D}^{\varphi_D}$ ist die Menge der neuen komplementären Symbole.

Fluentliteralmengen werden im logischen Programm durch $AC1$–Terme dargestellt, die nur den Operator $\circ$ enthalten:

Definition 66 *Sei $\{f_1, \ldots, \overline{f_n}\}$ eine Fluentliteralmenge, dann ist*

$$\mu^F_{\varphi_D}(f_1, \ldots, f_m, \overline{f_{m+1}}, \ldots, \overline{f_n}) = f_1 \circ \ldots \circ f_m \circ \varphi_D(f_{m+1}) \circ \ldots \circ \varphi_D(f_n)$$

Entsprechend werden Aktionen werden durch mit $\circ$ verkettete Aktionsnamen dargestellt:

Definition 67 *Sei $\{a_1, \ldots, a_k\}$ eine Menge von Aktionsnamen, dann ist*

$$\mu^A_{\varphi_D}(\{a_1, \ldots, a_k\}) = a_1 \circ \ldots \circ a_k$$

Multimengen können Elemente mehrfach enthalten; auch diese werden auf $AC1$–Terme abgebildet.

Definition 68 *Sei $\{\!|r_1, \ldots, r_1, \ldots, r_l, \ldots, r_l|\!\}$ eine Ressourcen– oder Fluentliteralmultimenge, dann ist*

$$\mu^R_{\varphi_D}(\{\!|r_1, \ldots, r_1, \ldots, r_l, \ldots, r_l|\!\}) = r_1 \circ \ldots \circ r_1 \circ \ldots \circ r_l \circ \ldots \circ r_l$$

Komplementäre Ressourcenmengen werden aus $\mathcal{A}_{RNCC}$ wie folgt in Terme überführt:

Definition 69 *Sei* $\overline{\{\!\!\{r_1, \ldots, r_1, \ldots, r_l, \ldots, r_l\}\!\!\}}$ *eine komplementäre Ressourcenmenge, dann ist*

$$\mu^{\overline{R}}_{\varphi_D}(\overline{\{\!\!\{r_1, \ldots, r_1, \ldots, r_l, \ldots, r_l\}\!\!\}}) = r_1 \circ \ldots \circ r_1 \circ \ldots \circ r_l \circ \ldots \circ r_l$$

Übersetzungen von Zustandsbeschreibungen werden als Paare von Übersetzungen einer Fluentliteralmenge und einer Ressourcenmultimenge definiert:

Definition 70 *Sei* (Q, R) *eine Zustandsbeschreibung, dann ist*

$$\mu^{\sigma}_{\varphi_D}((Q, R)) = (\mu^{F}_{\varphi_D}(Q), \mu^{R}_{\varphi_D}(R))$$

E–props werden in 4–stellige Tupel übersetzt. Jedes Element dieses Tupels ist dann eine wie oben definierte Übersetzung eines Sprachkonstrukts aus $\mathcal{A}_{RNCC}$ oder weiter strukturiert.

Definition 71 *Sei* e *eine e–prop, dann ist*

$$\begin{array}{l} \mu^{e-prop}_{\varphi_D}(e) = \\ \quad (\mu^{A}_{\varphi_D}(\texttt{action}(e)), \\ \quad (\mu^{F}_{\varphi_D}(\texttt{causes}(e)), \mu^{R}_{\varphi_D}(\texttt{produces}(e))), \\ \quad (\mu^{F}_{\varphi_D}(\texttt{holds}(e)), (\mu^{R}_{\varphi_D}(\texttt{available}(e)), \mu^{\overline{R}}_{\varphi_D}(\texttt{not available}(e)))), \\ \quad (\mu^{R}_{\varphi_D}(\tau^{-1}(\texttt{using}(e))), \mu^{R}_{\varphi_D}(\texttt{consuming}(e)))) \end{array} \tag{3.3}$$

Die Fluentliteralmenge $\texttt{using}(e)$ wird aus programmtechnischen Gründen wie eine Multimenge behandelt.

Mengen von e–props werden auf Terme in $\mathcal{FC}_{RNCC}$ abgebildet:

Definition 72 *Sei* $\{e_1, e_2, \ldots, e_n\}$ *eine Menge von e–props, dann ist*

$$\mu^{eset}_{\varphi_D}(\{e_1, e_2, \ldots, e_n\}) = \mu^{e-prop}_{\varphi_D}(e_1) \circ \mu^{e-prop}_{\varphi_D}(e_2) \circ \ldots \circ \mu^{e-prop}_{\varphi_D}(e_n)$$

Im folgenden wird eine Schablone eines vervollständigten logischen Programms angegeben, mit der Domänenbeschreibungen aus $\mathcal{A}_{RNCC}$ in $\mathcal{FC}_{RNCC}$ dargestellt werden können.

Die Klauseln 3.4, 3.5, 3.6, 3.35 sind dabei domänenabhängig, alle übrigen Klauseln sind invariant.

ressourcename ist domänenabhängig und bescheibt R_D.

$$\forall N : \left(ressourcename(N) \leftrightarrow \bigvee_{r \in R_D} N =_{AC1} r \right) \tag{3.4}$$

complement ist domänenabhängig und beschreibt die komplementären Paare in L_{F_D}.

$$\forall X : \left(complement(X) \leftrightarrow \bigvee_{f \in F_D} X =_{AC1} f \circ \varphi_D(f) \right) \tag{3.5}$$

eprop ist domänenabhängig und repräsentiert e–props in E_D.

$$\begin{aligned}
&\forall A, F, P, H, L, U, X, V : \\
&\quad \Big(eprop((A, (F, P), (H, (L, U)), (X, V))) \\
&\qquad \leftrightarrow \textstyle\bigvee_{e \in E_D} \Big(\quad A =_{AC1} \mu^{A}_{\varphi_D}(\texttt{action}(e)) \\
&\qquad\qquad F =_{AC1} \mu^{F}_{\varphi_D}(\texttt{causes}(e)) \quad \wedge \\
&\qquad\qquad P =_{AC1} \mu^{R}_{\varphi_D}(\texttt{produces}(e)) \quad \wedge \\
&\qquad\qquad H =_{AC1} \mu^{F}_{\varphi_D}(\texttt{holds}(e)) \quad \wedge \\
&\qquad\qquad L =_{AC1} \mu^{R}_{\varphi_D}(\texttt{available}(e)) \quad \wedge \\
&\qquad\qquad U =_{AC1} \mu^{\overline{R}}_{\varphi_D}(\texttt{not available}(e)) \quad \wedge \\
&\qquad\qquad X =_{AC1} \mu^{R}_{\varphi_D}(\tau^{-1}(\texttt{using}(e))) \quad \wedge \\
&\qquad\qquad V =_{AC1} \mu^{R}_{\varphi_D}(\texttt{consuming}(e)) \Big) \Big)
\end{aligned} \tag{3.6}$$

term beschreibt, wann sein Argument ein zusammengesetzter $AC1$–Term ist.

$$\begin{aligned}
&\forall A : \\
&\quad (term(A) \leftrightarrow \exists B, C : \\
&\qquad (A =_{AC1} B \circ C \wedge B \neq_{AC1} \emptyset \wedge C \neq_{AC1} \emptyset))
\end{aligned} \tag{3.7}$$

common beschreibt, wann zwei $AC1$–Terme ein gemeinsames Element besitzen.

$$\begin{aligned}
&\forall A, B : \\
&\quad (common(A, B) \leftrightarrow \exists C, D, E : \\
&\qquad (A =_{AC1} C \circ D \wedge B =_{AC1} C \circ E \wedge C \neq_{AC1} \emptyset))
\end{aligned} \tag{3.8}$$

maxcommon beschreibt, wann ein Term A ein größter Subterm von zwei $AC1$–Terme B und C ist.

$$\begin{aligned}
&\forall A, B, C : \\
&\quad (maxcommon(A, B, C) \leftrightarrow \exists D, E : \\
&\qquad (B =_{AC1} D \circ A \wedge C =_{AC1} E \circ A \wedge \neg common(D, E)))
\end{aligned} \tag{3.9}$$

notunique beschreibt, wann ein $AC1$–Term einen anderen $AC1$–Term mehrfach enthält.

$$\begin{array}{l} \forall A: \\ \quad (notunique(A) \leftrightarrow \exists C, D : (C \neq_{AC1} \emptyset \wedge A =_{AC1} C \circ C \circ D)) \end{array} \tag{3.10}$$

contradiction beschreibt, wann ein $AC1$–Term zwei $AC1$–Subterme enthält, die komplementäre Fluentliterale darstellen.

$$\begin{array}{l} \forall A: \\ \quad (contradiction(A) \leftrightarrow \exists B, C : \\ \quad\quad (A =_{AC1} B \circ C \wedge complement(B))) \end{array} \tag{3.11}$$

inconsistent beschreibt, wann ein 2–Tupel aus $AC1$–Termen keine Zustandsbeschreibung in der Domäne darstellt. Das ist gemäß Definition 58 der Fall, wenn die zur Zustandsbeschreibung gehörige Fluentliteralmenge (hier repräsentiert durch den $AC1$–Term Q)

1. zueinander komplementäre Fluentliterale enthält, oder
2. ein Element enthält, das kein Fluentliteral ist, oder
3. keines von zueinander komplementären Fluentliteralen aus F_D enthält, oder

(Q, R) stellt auch dann keine Zustandsbeschreibung dar, wenn Q mehrere Elemente enthält, die denselben Fluenten repräsentieren oder R (das die zur Zustandsbeschreibung gehörige Multimenge darstellt) ein Element enthält, das keinen Ressourcennamen aus R_D repräsentiert.

$$\begin{array}{l} \forall Q, R: \\ \quad (\quad inconsistent((Q, R)) \leftrightarrow \exists O, M, N, S, T : \\ \quad\quad (\quad contradiction(Q) \quad \vee \\ \quad\quad\quad notunique(Q) \quad \vee \\ \quad\quad\quad Q =_{AC1} O \circ M \wedge \neg complement(O \circ N) \quad \wedge \\ \quad\quad\quad \neg term(O) \wedge O \neq_{AC1} \emptyset \quad \vee \\ \quad\quad\quad complement(O \circ P) \wedge O \neq_{AC1} \emptyset \wedge P \neq_{AC1} \emptyset \quad \wedge \\ \quad\quad\quad \neg common(O, Q) \wedge \neg common(P, Q) \quad \vee \\ \quad\quad\quad R =_{AC1} S \circ T \wedge \neg ressourcename(S) \quad \wedge \\ \quad\quad\quad S \neq_{AC1} \emptyset \wedge \neg term(S) \quad) \quad) \end{array} \tag{3.12}$$

complementset beschreibt, wann ein $AC1$–Term genau die Komplemente zu den Fluentliteralen darstellt, die durch einen zweiten $AC1$–Term dargestellt werden.

$$\begin{array}{l} \forall A, B: \\ \quad (\quad complementset(A, B) \leftrightarrow \exists C, D, E, F : \\ \quad\quad (\quad A =_{AC1} \emptyset \wedge B =_{AC1} \emptyset \quad \vee \\ \quad\quad\quad A =_{AC1} C \circ E \wedge B =_{AC1} D \circ F \wedge E \neq_{AC1} \emptyset \wedge F \neq_{AC1} \emptyset \quad \wedge \\ \quad\quad\quad complement(E, F) \quad \wedge \\ \quad\quad\quad complementset(C, D) \quad) \quad) \end{array} \tag{3.13}$$

$fluenteffects$ beschreibt, wie mit $AC1$–Termen die Effektberechnung von Fluentliteralmengen dargestellt werden. Sind L, N, E, Q Resspräsentanten von Fluentliteralmengen L', N', E', Q', dann gilt $L' = E' \setminus (Q' \cap E')$ und $N' = Q' \cap \overline{E'}$.

$$\begin{array}{l} \forall L, N, E, Q : \\ \quad (\quad fluenteffects(L, N, E, Q) \leftrightarrow \exists F, B : \\ \quad\quad (\quad E =_{AC1} L \circ B \wedge complementset(F, E) \quad \wedge \\ \quad\quad\quad maxcommon(N, Q, F) \wedge maxcommon(B, Q, E) \quad) \quad) \end{array} \tag{3.14}$$

$element$ beschreibt, wann ein $AC1$–Term M eine Multimenge darstellt, die einen bestimmten Ressourcennamen N enthält.

$$\begin{array}{l} \forall N, M : \\ \quad (element(N, M) \leftrightarrow \exists R : \\ \quad\quad (M =_{AC1} N \circ R \wedge ressourcename(N))) \end{array} \tag{3.15}$$

$ressource$ beschreibt, wann ein $AC1$–Term M eine Multimenge darstellt, die ausschließlich einen bestimmten Ressourcennamen N enthält.

$$\begin{array}{l} \forall N, M : \\ \quad (\quad ressource(N, M) \leftrightarrow \exists R : \\ \quad\quad (\quad M =_{AC1} \emptyset \wedge ressourcename(N) \quad \vee \\ \quad\quad\quad M =_{AC1} N \circ R \wedge ressource(N, R) \quad) \quad) \end{array} \tag{3.16}$$

$ressourcepart$ beschreibt, wann ein $AC1$–Term T in zwei Subterme R und S zerlegt werden kann, so daß der eine Subterm R eine Multimenge repräsentiert, die ausschließlich einen bestimmten Ressourcennamen N enthält, und der andere Subterm S eine Multimenge darstellt, die N nicht enthält.

$$\begin{array}{l} \forall R, S, N, T : \\ \quad (ressourcepart(R, S, N, T) \leftrightarrow \\ \quad\quad T =_{AC1} R \circ S \wedge ressource(N, R) \wedge \neg element(N, S)) \end{array} \tag{3.17}$$

$leqcompres$ beschreibt, wann die Ordnung einer durch einen $AC1$–Term X dargestellten komplementäre Ressourcenmultimenge kleiner als die Ordnung einer anderen, durch einen weiteren $AC1$–Term Y dargestellten, komplementären Ressourcenmultimenge ist, falls beide Ressourcenmultimengen auschließlich den selben Ressourcennamen enthalten.

$$\begin{array}{l} \forall X, Y : \\ \quad (\quad leqcompres(X, Y) \leftrightarrow \exists K : \\ \quad\quad (\quad Y =_{AC1} \emptyset \quad \vee \\ \quad\quad\quad X \neq_{AC1} \emptyset \wedge Y =_{AC1} X \circ K \quad) \quad) \end{array} \tag{3.18}$$

$leqcompresset$ beschreibt, wann die Ordnungen aller größten komplementären Ressourcenmultimengen, die durch Subterme eines $AC1$–Terms X dargestellt werden und die je einen bestimmten Ressourcennamen ausschließlich enthalten, kleiner als die Ordnungen der dem Ressourcennamen nach zugehörigen größten komplementären Ressourcenmultimengen, die durch die Subterme eines anderen $AC1$–Termes Y dargestellt werden, sind.

$$
\begin{array}{l}
\forall X, Y : \\
\quad (\quad leqcompresset(X,Y) \leftrightarrow \exists N, L, R, S, T, V, W : \\
\quad\quad (\quad Y =_{AC1} \emptyset \quad \vee \\
\quad\quad\quad Y =_{AC1} N \circ L \wedge T =_{AC1} N \circ R \quad \wedge \\
\quad\quad\quad ressourcename(N) \wedge ressourcepart(R, S, N, L) \quad \wedge \\
\quad\quad\quad ressourcepart(V, W, N, X) \wedge leqcompres(V, T) \quad \wedge \\
\quad\quad\quad leqcompresset(W, S) \quad) \quad)
\end{array}
\tag{3.19}
$$

leqspec beschreibt, wann eine durch eine Struktur $(B, H, (D, (N, M)), L)$ von $AC1$–Termen dargestellte e–prop spezifischer als eine e–prop ist, die durch eine weitere Struktur $(A, E, (C, (F, G)), K)$ dargestellt ist.

$$
\begin{array}{l}
\forall A, E, C, F, G, K, B, H, D, N, M, L : \\
\quad (leqspec((B, H, (D, (N, M)), L), (A, E, (C, (F, G)), K)) \\
\quad\quad \leftrightarrow \exists I, J, O : \quad (\quad B =_{AC1} A \circ I \wedge D =_{AC1} C \circ J \quad \wedge \\
\quad\quad\quad\quad\quad\quad N =_{AC1} F \circ O \wedge leqcompresset(G, M) \quad))
\end{array}
\tag{3.20}
$$

independent beschreibt, wann eine Struktur F von $AC1$–Termen eine e–prop darstellt, deren Bedingung mit keiner Bedingung einer e–prop übereinstimmt, die in der Menge von übersetzten e–props enthalten ist. Die Menge von übersetzten e–props wird durch einen weiteren $AC1$–Term E dargestellt.

$$
\begin{array}{l}
\forall F, E : \\
\quad (\quad independent(F, E) \leftrightarrow \exists M, G : \\
\quad\quad (\quad E =_{AC1} \emptyset \quad \vee \\
\quad\quad\quad E =_{AC1} G \circ M \wedge eprop(G) \quad \wedge \\
\quad\quad\quad \neg leqspec(F, G) \wedge \neg leqspec(G, F) \quad \wedge \\
\quad\quad\quad independent(F, M) \quad) \quad)
\end{array}
\tag{3.21}
$$

validcompres beschreibt, wann die Ordnung einer durch einen $AC1$–Term L dargestellten Ressourcenmultimenge kleiner oder gleich der Ordnung einer anderen, durch einen weiteren $AC1$–Term U dargestellten, komplementären Ressourcenmultimenge ist, wobei beide Ressourcenmultimengen ausschließlich denselben Ressourcennamen enthalten.

$$
\begin{array}{l}
\forall L, U : \\
\quad (\quad validcompres(L, U) \leftrightarrow \exists K : \\
\quad\quad (U =_{AC1} \emptyset \vee U =_{AC1} L \circ K \wedge K \neq_{AC1} \emptyset) \quad)
\end{array}
\tag{3.22}
$$

validcompresset beschreibt, wann die Ordnungen aller größten Ressourcenmultimengen, die durch Subterme eines $AC1$–Terms L dargestellt werden und die je einen bestimmten Ressourcennamen auschließlich enthalten kleiner oder gleich den Ordnungen der dem Ressourcennamen nach zugehörigen größten komplementären Ressourcenmultimengen, die durch die Subterme eines anderen $AC1$–Termes U dargestellt werden, sind.

$$\begin{array}{l} \forall L, U : \\ \quad (\quad validcompresset(L, U) \leftrightarrow \exists N, M, R, S, T, U, V, W : \\ \quad\quad (\quad L =_{AC1} \emptyset \quad \vee \\ \quad\quad\quad L =_{AC1} N \circ M \wedge T =_{AC1} N \circ R \quad \wedge \\ \quad\quad\quad ressourcename(N) \wedge ressourcepart(R, S, N, M) \quad \wedge \\ \quad\quad\quad ressourcepart(V, W, N, U) \wedge validcompres(T, V) \quad \wedge \\ \quad\quad\quad validcompresset(S, W) \quad) \quad) \end{array} \tag{3.23}$$

validcond beschreibt, wann die durch eine Struktur $(O, (L, U))$ von $AC1$–Termen beschriebenen Bedingungen in einer Zustandsbeschreibung gelten, deren Übersetzung einem Tupel (Q, R) von $AC1$–Termen entspricht.

$$\begin{array}{l} \forall O, L, U, Q, R : \\ \quad (\quad validcond((O, (L, U)), (Q, R)) \leftrightarrow \exists H, S : \\ \quad\quad (\quad Q =_{AC1} O \circ H \wedge R =_{AC1} L \circ S \quad \wedge \\ \quad\quad\quad validcompresset(R, U) \quad) \quad) \end{array} \tag{3.24}$$

applicable beschreibt, wann eine durch eine Struktur A, E, C, K von $AC1$–Termen dargestellte e–prop in dem durch ein 2–Tupel S von $AC1$–Termen und einem $AC1$–Term B repräsentierten Prozeß anwendbar ist. S repräsentiert eine Zustandsbeschreibung und B eine Aktion.

$$\begin{array}{l} \forall A, E, C, K, B, S : \\ \quad (applicable((A, E, C, K), B, S) \leftrightarrow \exists D : \\ \quad\quad (B =_{AC1} A \circ D \wedge validcond(C, S))) \end{array} \tag{3.25}$$

morespec beschreibt, wann eine spezifischere $e - -prop$ in einem Prozeß anwendbar ist, als die durch eine Struktur G von $AC1$–Termen gegebene. Der Prozeß ist durch ein 2–Tupel S von $AC1$–Termen, das die Zustandsbeschreibung darstellt, und einem $AC1$–Term A, der die Aktion darstellt, angegeben.

$$\begin{array}{l} \forall G, A, S : \\ \quad (\quad morespec(G, A, S) \leftrightarrow \\ \quad\quad (\quad eprop(F) \wedge applicable(F, A, S) \quad \wedge \\ \quad\quad\quad leqspec(G, F) \wedge \neg leqspec(F, G) \quad) \quad) \end{array} \tag{3.26}$$

valideprop beschreibt, wann eine e–prop zu einer speziellen Prozeßbeschreibung gehören kann. Eine Struktur G von $AC1$–Termen repräsentiert die $e - -prop$, ein $AC1$–Term F, aufgebaut aus mehreren solchen Strukturen repräsentiert die möglicherweise unvollständige spezielle Prozeßbeschreibung. Der Prozeß ist durch ein 2–Tupel S von $AC1$–Termen, das die Zustandsbeschreibung darstellt, und einem $AC1$–Term A, der die Aktion darstellt, angegeben.

$$\begin{array}{l}\forall G, F, A, S : \\ \quad (\quad \mathit{valideprop}(G, F, A, S) \leftrightarrow \\ \qquad (\quad \mathit{eprop}(G) \wedge \mathit{applicable}(G, A, S) \quad \wedge \\ \qquad\quad \neg \mathit{morespec}(G, A, S) \wedge \mathit{independent}(G, F) \quad) \quad)\end{array} \tag{3.27}$$

description beschreibt, welchen Effektteil und welchen Kontextteil eine spezielle Prozeßbeschreibung hat. Effektteil und Kontextteil sind durch ein Tupel (M, O) bzw. eine Struktur (Y, K) von $AC1$–Termen. Der Prozeß ist durch ein 2–Tupel S von $AC1$–Termen, das die Zustandsbeschreibung darstellt, und einem $AC1$–Term A, der die Aktion darstellt, angegeben.

$$\begin{array}{l}\forall F, M, O, Y, K, A, S : \\ \quad (\quad \mathit{description}(F, (M, O), (Y, K), A, S) \\ \qquad \leftrightarrow \exists C, G, H, N, P, Q, R, T, X, Z : \\ \qquad (\quad M =_{AC1} \emptyset \wedge Q =_{AC1} \emptyset \wedge Y =_{AC1} \emptyset \wedge K =_{AC1} \quad \wedge \\ \qquad\quad \neg \mathit{valideprop}(G, F, A, S) \quad \vee \\ \qquad\quad M =_{AC1} N \circ I \wedge O =_{AC1} P \circ Q \quad \wedge \\ \qquad\quad Y =_{AC1} X \circ Z \wedge K =_{AC1} R \circ T \quad \wedge \\ \qquad\quad D =_{AC1} F \circ (B, (H, P), C, (X, R) \quad \wedge \\ \qquad\quad \mathit{maxcommon}(I, H, N) \quad \wedge \\ \qquad\quad \mathit{valideprop}((B, (H, P), C, (X, R)), F, A, S) \quad \wedge \\ \qquad\quad \mathit{description}(D, (N, Q), (Z, T), A, S) \quad) \quad)\end{array} \tag{3.28}$$

validcontext beschreibt, wann ein durch ein Tupel (I, V) von $AC1$–Termen dargestellter Kontext in einem Prozeß kontextkonsistent. Der Prozeß ist durch ein 2–Tupel (Q, R) von $AC1$–Termen, das die Zustandsbeschreibung darstellt, und einem $AC1$–Term A, der die Aktion darstellt, angegeben.

$$\begin{array}{l}\forall I, V, A, Q, R : \\ \quad (\mathit{validcontext}((I, V), A, (Q, R)) \leftrightarrow \exists O, S : \\ \qquad (Q =_{AC1} O \circ I \wedge R =_{AC1} S \circ V \wedge \neg \mathit{notunique}(I)))\end{array} \tag{3.29}$$

conflict beschreibt, wann Effekte, dargestellt durch ein Tupel (E, P) von $AC1$–Termen, und Kontexte, dargestellt durch ein Tupel K von $AC1$–Termen, in einem Prozeß einen Konflikt verursachen. Der Prozeß ist durch ein 2–Tupel S von $AC1$–Termen, das die Zustandsbeschreibung darstellt, und einem $AC1$–Term A, der die Aktion darstellt, angegeben.

$$\begin{array}{l}\forall E, P, K, A, S : \\ \quad (\mathit{conflict}((E, P), K, A, S) \leftrightarrow \\ \qquad (\neg \mathit{validcontext}(K, A, S) \vee \mathit{contradiction}(E)))\end{array} \tag{3.30}$$

invaliddescription beschreibt, wann eine Prozeßbeschreibung nicht gültig ist. Der Prozeß ist durch ein 2–Tupel S von $AC1$–Termen, das die Zustandsbeschreibung darstellt, und einem $AC1$–Term A, der die Aktion darstellt, angegeben.

$$\begin{array}{l} \forall A, S : \\ \quad (invaliddescription(A, S) \leftrightarrow \exists E, K : \\ \quad\quad (description(\emptyset, E, K, A, S) \wedge conflict(E, K, A, S))) \end{array} \tag{3.31}$$

action beschreibt, wann eine durch eine Prozeß die durch eine Struktur $(E, (P, C))$ von $AC1$–Termen repräsentierten Effekte hat. Der Prozeß ist durch ein 2–Tupel S von $AC1$–Termen, das die Zustandsbeschreibung darstellt, und einem $AC1$–Term A, der die Aktion darstellt, angegeben.

$$\begin{array}{l} \forall E, P, C, A, S : \\ \quad (\quad action((E, (P, C)), A, S) \leftrightarrow \exists X : \\ \quad\quad (\quad description(\emptyset, (E, P), (X, C), A, S) \quad \wedge \\ \quad\quad\quad \neg invaliddescription(A, S) \quad) \quad) \end{array} \tag{3.32}$$

causes beschreibt, wann eine durch einen $AC1$–Term A dargestellte Aktion die Überführung einer durch ein 2–Tupel (Q, R) von $AC1$–Termen dargestellten Zustandsbeschreibung in eine zweite durch ein 2–Tupel (O, S) von $AC1$–Termen dargestellte Zustandsbeschreibung bewirkt.

$$\begin{array}{l} \forall A, O, Q, R, S : \\ \quad (\quad causes((Q, R), A, (O, S)) \leftrightarrow \exists L, M, N, P, T, U : \\ \quad\quad (\quad R =_{AC1} U \circ T \wedge S =_{AC1} T \circ P \quad \wedge \\ \quad\quad\quad Q =_{AC1} N \circ M \wedge O =_{AC1} M \circ L \quad \wedge \\ \quad\quad\quad action((E, (P, U)), A, (Q, R)) \quad \wedge \\ \quad\quad\quad fluenteffects(L, N, E, Q) \quad) \quad) \end{array} \tag{3.33}$$

result beschreibt den Aufbau der Funktion ϕ einer Struktur (φ_0, Φ, ϕ). R repräsentiert eine Zustandsbeschreibung ϕ^0 und T eine Zustandsbeschreibung ϕ^n. P stellt eine Liste von Prozessen dar, die R in T überführen.

$$\begin{array}{l} \forall P, R, T : \\ \quad (\quad result(R, P, T) \leftrightarrow \exists A, B, S : \\ \quad\quad (\quad R =_{AC1} T \wedge P =_{AC1} [] \quad \vee \\ \quad\quad\quad P =_{AC1} [(A, S)|B] \wedge causes(R, A, S) \quad \wedge \\ \quad\quad\quad result(S, B, T) \quad) \quad) \end{array} \tag{3.34}$$

model ist domänenabhängig und enthält die Übersetzung der v–props einer Domänenbeschreibung. *model* beschreibt, wann eine Domänenbeschreibung ein

Modell in $\mathcal{A}_{RNCC}$ besitzt.

$$\begin{array}{l} \forall I, X_1, \ldots, X_\beta : \\ \quad (model(I, X_1, \ldots, X_\beta) \leftrightarrow \exists G_1, \ldots, G_{V_D} : \\ \quad\quad (\neg inconsistent(I) \quad \wedge \\ \quad\quad\quad \bigwedge_{v \in V_D} \quad (result(I, [(\mu^A(a_{v,1}), X_{\alpha_v}), \ldots, (\mu^A(a_{v,n_v}), X_{\delta_v})], G_v) \\ \quad\quad\quad\quad\quad \wedge\, validcond((\mu^F_{\varphi_D}(\mathtt{holds}(v)), (\mu^R_{\varphi_D}(\mathtt{available}(v)), \\ \quad\quad\quad\quad\quad\quad\quad\quad \mu^{\overline{R}}_{\varphi_D}(\mathtt{not\ available}(v)))), G_v)) \end{array} \tag{3.35}$$

3.3 Die Äquivalenz von $\mathcal{A}_{RNCC}$ und $\mathcal{FC}_{RNCC}$

Der folgende Beweis des Theorems 2 beweist die Vollständigkeit und Korrektheit[2] der Übersetzung von Domänenbeschreibungen aus $\mathcal{A}_{RNCC}$ in ELP–basierte mit „Negantion als Fehlschlag" interpretierte vervollständigte logische Programme.

Mit X_D werden im folgenden Elemente einer Domänenbeschreibung D in $\mathcal{A}_{RNCC}$ bezeichnet. Objekte Y aus $\mathcal{A}_{RNCC}$ werden durch ein angefügtes $'$ von Objekten aus $\mathcal{FC}_{RNCC}$ unterschieden. Variablen in logischen Formeln werden als allquantifiziert betrachtet, solange sie nicht explizit existenzquantifiziert sind.

Die Gleichungstheorie 3.1, die die Eigenschaften des Operators $\circ$ beschreibt, gilt auch für den Operator $\dot{\cup}$, der die Vereinigung von Multimengen darstellt. Werden $AC1$–Terme als Multimengen interpretiert, dann beschreibt $\circ$ also die Multimengenvereinigung dieser Multimengen. Im folgenden wird diese Interpretation implizit verwendet, wenn die Multimengenvereinigung durch $\circ$ beschrieben werden soll.

Lemma 1 $(P^*_D, AC1^*) \models term(A)$
gdw. A ein Term ist, der zwei Elemente enthält, die durch $\circ$ verbunden sind.

Beweis 3 (Lemma 1)
Nach (3.7) gilt:
$(P^*_D, AC1^*) \models term(A)$ *gdw.* $\exists B, C, D :\ A =_{AC1} B \circ C \wedge B \neq_{AC1} \emptyset \wedge C \neq_{AC1} \emptyset.$

Gemäß den Gleichungen 3.1 enthält damit A mindestens zwei nichtleere Elemente, die durch $\circ$ verbunden sind. □

Lemma 2 $(P^*_D, AC1^*) \models common(A, B)$
gdw. mindestens ein Element aus A in B enthalten ist.

Beweis 4 (Lemma 2)
Nach (3.8) gilt

[2] Es wird beim Beweis vorausgesetzt, daß jedes logische Programm in $\mathcal{FC}_{RNCC}$ ein Modell besitzt, also erfüllbar ist

$(P_D^*, AC1^*) \models common(A, Q)$ *gdw.* B, C, D, E *existieren, so daß* $A =_{AC1} C \circ D$ *und* $B =_{AC1} C \circ E$ *und* $C \neq_{AC1} \emptyset$.

Gemäß den Gleichungen 3.1 ist das nichtleere C damit sowohl in A als auch in B enthalten, also folgt Lemma 2. □

Lemma 3 *Sind B, C Übersetzungen von Fluentliteralmengen B', C', dann gilt* $(P_D^*, AC1^*) \models maxcommon(A, B, C)$ *gdw.* $A' = B' \cap C'$.

Beweis 5 (Lemma 3)
Nach (3.9) gilt:
$(P_D^*, AC1^*) \models maxcommon(A, B, C)$ *gdw. es existieren D, E, so daß* $B =_{AC1} D \circ A$ *und* $C =_{AC1} E \circ A$ *und* $(P_D^*, AC1^*) \models \neg common(D, E)$.

$(P_D^*, AC1^*) \models \neg common(D, E)$ *gilt nach Lemma 2 und wegen Vollständigkeit gdw. D und E kein gemeinsames Element besitzen. Entsprechend den Gleichungen 3.1 repräsentiert damit A die größte Multimenge, in der nur Elemente enthalten sind, die sowohl in B als auch in C auftauchen, das entspricht für Übersetzungen von Fluentliteralmengen B' und C' der Definition des Mengendurchschnitts* $A' = B' \cap C'$. □

Lemma 4 *Ist* $A = \mu^F_{\varphi_D}(A')$ *eine Übersetzung einer Fluentliteralmenge.* $(P_D^*, AC1^*) \models contradiction(A)$ *gilt gdw. A' widersprüchlich ist.*

Beweis 6 (Lemma 4)
Nach (3.11) gilt:
$(P_D^*, AC1^*) \models contradiction(A)$ *gdw. es existieren B, C, so daß* $A =_{AC1} B \circ C$ *und* $complement(B)$, *also gdw. in A eine Übersetzung $f \circ \varphi_D(f)$ eines komplementären Paares $f, \overline{f}$ von Fluentliteralen enthalten ist.* □

Lemma 5 $(P_D^*, AC1^*) \models notunique(A)$ *gdw. ein Element mehrfach in A repräsentiert ist.*

Beweis 7 (Lemma 5) *Nach (3.10) gilt:*
$(P_D^*, AC1^*) \models notunique(A)$ *gdw. C, D existieren, so daß* $C \neq_{AC1} \emptyset$ *und* $A =_{AC1} C \circ C \circ D$, *das gilt gdw. das nichtleere C mindestens zweimal in A enthalten ist.* □

Lemma 6 *Ist* $B = \mu^F_{\varphi_D}(B')$, *dann gilt*
$(P_D^*, AC1^*) \models complementset(A, B)$ *gdw.* $A = \mu^F_{\varphi_D}(\overline{B'})$ *gemäß Definition 63.*

Beweis 8 (Lemma 6)
Nach (3.13) gilt:
$(P_D^*, AC1^*) \models complementset(A, B)$ *gdw.*

1. $A =_{AC1} \emptyset$ *und* $B =_{AC1} \emptyset$ *oder*

2. *es existieren* C, D, E, F, *so daß* $A =_{AC1} C \circ E$ *und* $B =_{AC1} D \circ F$ *und und* $E \neq_{AC1} \emptyset$ *und* $F \neq_{AC1} \emptyset$ *und* $(P_D^*, AC1^*) \models complement(E \circ F)$ *und* $(P_D^*, AC1^*) \models complementset(C, D)$

Entsprechend 2. repräsentieren E *und* F *komplementäre Fluentliterale* $\varphi_D(F)$ *und* F*, wobei* E *Element von* A *und* F *Element von* B *ist.*

A *und* B *sind Terme der Form* $A = a_1 \circ a_2 \circ \ldots \circ a_k$ *und* $B = b_1 \circ b_2 \circ \ldots \circ b_l$.

Gemäß 2. und den Gleichungen 3.1 und mit $a_k = \varphi_D(b_l)$ *(ohne Einschränkung der Allgemeinheit wegen Kommutativität von* $\circ$*) gilt also:*
$(P_D^*, AC1^*) \models complementset(a_1 \circ \ldots \circ a_k, b_1 \circ \ldots \circ b_l)$
gdw. $(P_D^*, AC1^*) \models complementset(a_1 \circ \ldots \circ a_{k-1}, b_1 \circ \ldots \circ b_{l-1})$ *für alle* $k, l \geq 1$.

Existiert kein Paar $a_k = \varphi_D(b_l)$*, dann gilt, wenn* A *oder* B *nicht leer sind (mit 1.)* $(P_D^*, AC1^*) \not\models complementset(A, B)$.

Daraus folgt, daß $(P_D^*, AC1^*) \models complementset(A, B)$ *gdw.* A *genau die Fluentliterale* $\varphi_D(f)$ *repräsentiert, für die* f *in* B *repräsentiert ist (Definition 63) und damit Lemma 6.* □

Lemma 7 $(P_D^*, AC1^*) \models element(N, M)$ *gdw.* M *ein Element* N *enthält, das eine Ressourcenname repräsentiert.*

Beweis 9 (Lemma 7)
Nach (3.15) gilt:
$(P_D^*, AC1^*) \models element(N, M)$ *gdw. ein* R *existiert, so daß* $M =_{AC1} N \circ R$ *und* $(P_D^*, AC1^*) \models ressourcename(N)$.

$(P_D^*, AC1^*) \models ressourcename(N)$ *gilt gdw.* N *einen Ressourcenname* $r \in R_D$ *darstellt (3.4).* $\exists R : M =_{AC1} N \circ R$ *gilt gdw.* $N \dot{\subseteq} M$*. Damit gilt Lemma 7.* □

Lemma 8 *Ist* N *nichtleer, dann gilt:*
$(P_D^*, AC1^*) \models ressource(N, M)$ *gdw.* M *ausschließlich Elemente* N *enthält, wobei* N *einen Ressourcennamen repräsentiert.*

Beweis 10 (Lemma 8)
Nach (3.16) gilt:
$(P_D^*, AC1^*) \models ressource(N, M)$ *gdw.*

1. $M =_{AC1} \emptyset$ *und* $(P_D^*, AC1^*) \models ressourcename(N)$ *oder*

2. *es existiert ein* R*, so daß* $M =_{AC1} N \circ R$ *und* $(P_D^*, AC1^*) \models ressource(N, R)$

Sind $M = \underbrace{m \circ \ldots \circ m}_{n-mal}$ *und* $N = m$ *dann gilt entsprechend 2. und den Gleichungen 3.1:*

$(P_D^*, AC1^*) \models ressource(m, \underbrace{m \circ \ldots \circ m}_{n-mal})$
gdw. $(P_D^*, AC1^*) \models ressource(m, \underbrace{m \circ \ldots \circ m}_{(n-1)-mal})$ *für alle* $n > 0$.

Wegen 1. und (3.4) gilt für $n = 0$ $(P_D^*, AC1^*) \models ressource(m, \emptyset)$ *gdw.* m *einen Ressourcennamen repräsentiert.*

Nach 1. gilt $(P_D^*, AC1^*) \not\models ressource(N, M)$ *für* M, N*, wenn* M *ein anderes Element als* N *enthält.*

Damit folgt Lemma 8. □

Lemma 9 *Repräsentiert* N *einen Ressourcennamen* N'*, dann gilt:*
$(P_D^*, AC1^*) \models ressourcepart(R, S, N, T)$
gdw. R *die größte Teilmultimenge von* T *ist, die ausschließlich* N *enthält und* S *die größte Teilmultimenge von* T *ist, die kein* N *enthält.*

Beweis 11 (Lemma 9)
Nach (3.17) gilt:
$(P_D^*, AC1^*) \models ressourcepart(R, S, N, T)$
gdw. $T =_{AC1} R \circ S$ *und* $(P_D^*, AC1^*) \models ressource(N, R)$
und $(P_D^*, AC1^*) \models \neg element(N, S)$

Da N *einen Ressourcennamen repräsentiert, gilt entsprechend Lemma 8* $(P_D^*, AC1^*) \models ressource(N, R)$ *gdw.* R *ausschließlich Elemente* N *enthält.*

Nach Lemma 7 und mit der Vollständigkeit gilt $(P_D^*, AC1^*) \models \neg element(N, S)$ *gdw.* N *nicht in* S *enthalten ist.*

Wegen $T =_{AC1} R \circ S$ *kann* T *keine Elemente enthalten, die weder in* R *noch in* S *enthalten sind und daher folgt aus Lemma 8 und Lemma 7 das Lemma 9.* □

Lemma 10 *Sind* X, Y *Übersetzungen komplementärer Ressourcenmultimengen* X', Y'*, die ausschließlich Elemente enthalten, welche gleiche Ressourcennamen repräsentieren, dann gilt*
$(P_D^*, AC1^*) \models leqcompres(X, Y)$ *gdw.* $|X'| \leq |Y'|$ *gemäß Definition 55.*

Beweis 12 (Lemma10)
Nach (3.18) gilt:
$(P_D^*, AC1^*) \models leqcompres(X, Y)$ *gdw.*

1. $Y =_{AC1} \emptyset$ *oder*
2. *es existiert ein* K*, so daß* $Y =_{AC1} X \circ K$ *und* $X \neq_{AC1} \emptyset$

Da die Ordnung einer leeren komplementären Ressourcenmultimenge entsprechend Definition 55 ∞ *ist, gilt:*
$(P_D^*, AC1^*) \models leqcompres(X, Y)$ *gdw.* $|Y'| = \infty$.

Repräsentiert X eine nichtleere komplementäre Ressourcenmenge, dann gilt gemß 2. $(P_D^*, AC1^*) \models leqcompres(X,Y)$ gdw. Y nichtleer ist und $|X'| \leq |Y'|$ (dann existiert ein K, so daß $Y =_{AC1} X \circ K$).

Damit folgt Lemma 10. □

Lemma 11 *Sind $X = \mu^{\overline{R}}_{\varphi_D}(X')$ und $Y = \mu^{\overline{R}}_{\varphi_D}(Y')$, dann gilt $(P_D^*, AC1^*) \models leqcompresset(X,Y)$ gdw. $\forall r \in R_D : |X'_r| \leq |Y'_r|$.*

Beweis 13 (Lemma 11)
Nach (3.19) gilt:
$(P_D^*, AC1^*) \models leqcompresset(X,Y)$ gdw.

1. *$Y =_{AC1} \emptyset$ oder*
2. *es existieren N, L, R, S, T, V, W, so daß*
   (a) *$Y =_{AC1} N \circ L$ und $T =_{AC1} N \circ R$ und*
   (b) *$(P_D^*, AC1^*) \models ressourcename(N)$ und*
   (c) *$(P_D^*, AC1^*) \models ressourcepart(R,S,N,L)$ und*
   (d) *$(P_D^*, AC1^*) \models ressourcepart(V,W,N,X)$ und*
   (e) *$(P_D^*, AC1^*) \models validcompres(V,T)$ und*
   (f) *$(P_D^*, AC1^*) \models validcompresset(W,S)$*

Zu 2. gilt wegen der Übersetzung von Ressourcennamen gemäß (3.4) $(P_D^*, AC1^*) \models ressourcename(N)$ gdw. N einen Ressourcennamen N' repräsentiert. Mit Lemma 9 gilt außerdem $(P_D^*, AC1^*) \models ressourcepart(R,S,N,L)$ gdw. R die größte Teilmultimenge von L', die nur N, und S die größte Teilmultimenge von L', die kein N enthält, repräsentieren.

Also gilt $(P_D^*, AC1^*) \models ressourcepart(R,S,N,L)$ gdw. $R = \mu^{\overline{R}}_{\varphi_D}(L'_r)$ und $S = \mu^{\overline{R}}_{\varphi_D}(L' \dot{\setminus} L'_r)$ für $N' = r$.

Analog gilt $(P_D^*, AC1^*) \models ressourcepart(V,W,N,X)$ gdw. $V = \mu^{\overline{R}}_{\varphi_D}(X'_r)$ und $W = \mu^{\overline{R}}_{\varphi_D}(X' \dot{\setminus} X'_r)$, für $N' = r$.

Wegen Lemma 10 gilt $(P_D^*, AC1^*) \models leqcompres(V,T)$ gdw. $|V'| \leq |T'|$, wenn $T = \mu^{\overline{R}}_{\varphi_D}(T')$ und $V = \mu^{\overline{R}}_{\varphi_D}(V')$ und V' und T' nur den gleichen Ressourcennamen enthalten.

Mit $Y =_{AC1} N \circ L$ und $T =_{AC1} N \circ R$ gilt nun $|L'_r| + 1 = |Y'_r| = |T'|$ und: $(P_D^*, AC1^*) \models leqcompresset(X,Y)$ gdw.

1. *$|Y'| = 0$ oder*
2. *$|X'_r| \leq |Y'_r|$ und $(P_D^*, AC1^*) \models leqcompresset(W,S)$,*
   wobei $S = \mu^{R}_{\varphi_D}(Y' \dot{\setminus} Y'_r)$ und $W = \mu^{R}_{\varphi_D}(X' \dot{\setminus} X'_r)$.

X' und X' enthalten nur endlich viele verschiedene Ressourcennamen. Enthält Y' m verschiedene Ressourcennamen, dann enthält $Y' \dot{\setminus} Y'_r$ bzw. $X' \dot{\setminus} X'_r$ kein N' mehr, wobei $N' = r$ in Y' enthalten ist. Für alle $m > 0$ gilt also $Y' \dot{\setminus} Y_r$ enthält $m - 1$ Ressourcennamen. Ist $m = 0$, dann gilt $|Y'| = 0$.

Damit gilt $(P_D^*, AC1^*) \models leqcompresset(X, Y)$
gdw. $\forall r \in Y' : |X'_r| \leq |Y'_r|$.

Ist ein Ressourcename r nicht in Y' enthalten und daher auch nicht in Y repräsentiert, dann gilt $|Y'_r| = \infty$ gemäß Definition 55 für komplementäre Ressourceneigenschaften und es gilt $|X'_r| \leq |Y'_r|$, da die größte Ordnung einer komplementären Ressourcenmultimenge ∞ ist (Definition 55).

Also folgt aus Lemma 10 das Lemma 11 für alle Ressourcennamen aus R_D. □

Lemma 12 *Sind $X = \mu_{\varphi_D}^{e-prop}(G') = (A, E, (C, (F, G)), K)$ und*
$Y = \mu_{\varphi_D}^{e-prop}(F') = (B, H, (D, (N, M)), L)$, dann gilt
$(P_D^*, AC1^*) \models leqspec(X, Y)$ gdw. $X' \leq_E Y'$.

Beweis 14 (Lemma 12)
Nach (3.20) gilt:
$(P_D^*, AC1^*) \models leqspec((A, E, (C, (F, G)), K), (B, H, (D, (N, M)), L))$
gdw. I, J, O existieren, so daß
$(P_D^*, AC1^*) \models B =_{AC1} A \circ I \wedge D =_{AC1} C \circ J \wedge N =_{AC1} F \circ O$
und $(P_D^*, AC1^*) \models leqcompresset(G, M)$.

A, B repräsentieren gemäß Definition 71 Aktionen A' und B'. Gemäß den Gleichungen 3.1 und Definition 67 gilt $A' \subseteq B'$ gdw. $\exists I : B =_{AC1} A \circ I$.

C, D repräsentieren gemäß Definition 71 Fluentmengen C' und D'. Gemäß den Gleichungen 3.1 und Definition 66 gilt $C' \subseteq D'$ gdw. $\exists J : B =_{AC1} A \circ J$.

F, N repräsentieren gemäß Definition 71 Ressourcenmultimengen F' und N'. Gemäß den Gleichungen 3.1 und Definition 68 gilt $\forall r \in R_D : |F'_r| \leq |N'_r|$ gdw. $\exists O : N =_{AC1} F \circ O$.

G, M repräsentieren gemäß Definition 71 komplementäre Ressourcenmultimengen G' und M'. Wegen Lemma 11 gilt $(P_D^*, AC1^*) \models leqcompresset(M, G)$ gdw. $\forall r \in R_D : |G'_r| \leq |M'_r|$.

Nach Korollar 10 folgt also $(P_D^*, AC1^*) \models leqspec(X, Y)$ gdw. $X' \leq_E Y'$ und damit Lemma 12. □

Lemma 13 *Repräsentiert E eine endliche Menge E' von e-props gemäß Definition 72 und F eine e-prop F'. Dann gilt:*
$(P_D^*, AC1^*) \models independent(F, E)$ gdw. E' keine e-prop D' enthält, die genauso spezifisch ist, wie F'.

Beweis 15 (Lemma 13)
Nach (3.21) gilt:
$(P_D^*, AC1^*) \models independent(F, E)$ gdw.

1. *$E =_{AC1} \emptyset$ oder*
2. *es existieren M, G, so daß*
   (a) *$E =_{AC1} M \circ G$ und*
   (b) *$(P_D^*, AC1^*) \models eprop(G)$ und*
   (c) *$(P_D^*, AC1^*) \models \neg leqspec(F, G)$ und*
   (d) *$(P_D^*, AC1^*) \models \neg leqspec(G, F)$ und*
   (e) *$(P_D^*, AC1^*) \models independent(F, M)$*

$E =_{AC1} M \circ G$ und $(P_D^*, AC1^*) \models eprop(G)$ gilt gdw. eine e-prop G' existiert, deren Übersetzung G ist und G in E enthalten ist.

$(P_D^*, AC1^*) \models \neg leqspec(F, G)$ und $(P_D^*, AC1^*) \models \neg leqspec(G, F)$ gilt außerdem nach Lemma 12 und mit Vollständigkeit gdw. $G' \not\leq_E F'$ und $F' \not\leq_E G'$.

Enthält E k e-props mit $k > 0$, dann gilt $(P_D^*, AC1^*) \models independent(F, E)$ gdw. $(P_D^*, AC1^*) \models independent(F, M)$ und $G' \in E'$ nicht gleichspezifisch zu F' ist, wobei $M = \mu_{\varphi_D}^{eset}(E' \setminus \{G'\})$ nur $k-1$ Übersetzungen von e-props enthält, für alle $k > 0$.

Ist $k = 0$, dann gilt $E =_{AC1} \emptyset$ und E enthält keine Übersetzung einer e-prop und damit auch keiner genau so spezifischen wie F'.

Aus Lemma 12 folgt also Lemma 13. □

Lemma 14 *Seien $L = \mu_{\varphi_D}^{R}(L')$ und $U = \mu_{\varphi_D}^{\overline{R}}(U')$, wobei L' und U' ausschließlich den gleichen Ressourcennamen enthalten. Dann gilt*
$(P_D^*, AC1^*) \models validcompres(L, U)$ gdw. $|L'| < |U'|$.

Beweis 16 (Lemma 14)
Nach (3.22) gilt:
$(P_D^*, AC1^*) \models validcompres(L, U)$ gdw. $U =_{AC1} \emptyset$ oder ein K existiert, so daß $U =_{AC1} L \circ K$ und $K \neq_{AC1} \emptyset$.

Ist U leer, dann repräsentiert U die leere komplementäre Ressourceneigenschaft, die gemäß Definition 55 die Ordnung ∞ besitzt. ∞ ist größer als jede Ordnung einer endlichen Ressourceneigenschaft, also gilt $|L'| < |\emptyset|$.

$U =_{AC1} L \circ K$ und $K \neq_{AC1} \emptyset$ gilt gdw. $\exists k : |U'| = |L'| + k \wedge k > 0$.

Damit folgt Lemma 14. □

Lemma 15 *Seien $L = \mu_{\varphi_D}^{R}(L')$ und $U = \mu_{\varphi_D}^{\overline{R}}(U')$, dann gilt*
$(P_D^*, AC1^*) \models validcompresset(L, U)$ gdw. $\forall r \in R_D : |L'_r| < |U'_r|$.

Beweis 17 (Lemma 15)
Nach (3.23) gilt:
$(P_D^*, AC1^*) \models validcompresset(L, U)$ gdw.

1. $L =_{AC1} \emptyset$ *oder*
2. *es existieren* N, M, R, S, T, U, V, W, *so daß*
   (a) $L =_{AC1} N \circ M$ *und* $T =_{AC1} N \circ R$ *und*
   (b) $(P_D^*, AC1^*) \models ressourcename(N)$ *und*
   (c) $(P_D^*, AC1^*) \models ressourcepart(R, S, N, M)$ *und*
   (d) $(P_D^*, AC1^*) \models ressourcepart(V, W, N, U)$ *und*
   (e) $(P_D^*, AC1^*) \models validcompres(T, V)$ *und*
   (f) $(P_D^*, AC1^*) \models validcompresset(S, W)$

Zu 2. gilt wegen der Übersetzung von Ressourcennamen nach (3.4) $(P_D^*, AC1^*) \models ressourcename(N)$ *gdw.* N *einen Ressourcennamen* N' *repräsentiert.*

Mit Lemma 9 gilt außerdem $(P_D^*, AC1^*) \models ressourcepart(R, S, N, M)$ *gdw.* R *die größte Teilmultimenge von* M'*, die nur* N*, und* S *die größte Teilmultimenge von* M'*, die kein* N *enthält, repräsentieren.*

Also gilt $(P_D^*, AC1^*) \models ressourcepart(R, S, N, M)$ *gdw.* $R = \mu_{\varphi_D}^R(M'_r)$ *und* $S = \mu_{\varphi_D}^R(M' \dot{\setminus} M'_r)$*, wobei* $N' = r$.

Analog gilt $(P_D^*, AC1^*) \models ressourcepart(V, W, N, U)$ *gdw.* $V = \mu_{\varphi_D}^{\overline{R}}(U'_r)$ *und* $W = \mu_{\varphi_D}^{\overline{R}}(U' \dot{\setminus} U'_r)$*, wobei* $N' = r$.

Wegen Lemma 14 gilt $(P_D^*, AC1^*) \models validcompres(T, V)$ *gdw.* $|T'| < |V'|$*, wenn* $T = \mu_{\varphi_D}^R(T')$ *und* $V = \mu_{\varphi_D}^{\overline{R}}(V')$ *und* V' *und* T' *nur den gleichen Ressourcennamen enthalten.*

Mit $T =_{AC1} N \circ R$ *und* $L =_{AC1} N \circ M$ *gilt nun* $|M'_r| + 1 = |L'_r|$ *und* $(P_D^*, AC1^*) \models validcompresset(L, U)$ *gdw.*

1. $|L'| = 0$ *oder*
2. $|L'_r| < |V'_r|$ *und* $(P_D^*, AC1^*) \models validcompresset(S, W)$*, wobei* $S = \mu_{\varphi_D}^R(L' \dot{\setminus} L'_r)$ *und* $W = \mu_{\varphi_D}^R(U' \dot{\setminus} U'_r)$

L' *und* U' *enthalten nur endlich viele verschiedene Ressourcennamen. Enthält* L' m *verschiedene Ressourcennamen, dann enthält* $L' \dot{\setminus} L_r$ *bzw.* $U' \dot{\setminus} U'_r$ *kein* $N' = r$ *mehr, wobei* N' *in* L' *enthalten ist, für alle* $m > 0$*. Ist* $m = 0$*, dann gilt* $|L'| = 0$.

Damit gilt $(P_D^*, AC1^*) \models validcompresset(L, U)$ *gdw.* $\forall r \in L' : |L'_r| < |U'_r|$*. Ist ein Ressourcenname* r *nicht in* L' *enthalten und daher auch nicht in* L *repräsentiert, dann gilt* $|L'_r| = 0$ *gemäß Definition 55 für Ressourcenmultimengen und es gilt* $|L'_r| < |U'_r|$*, da die kleinste Ordnung einer komplementären Ressourcenmultimenge* 1 *ist (Definition 55).*

Also folgt aus Lemma 15 das Lemma 14 für alle Ressourcennamen aus R_D. □

Lemma 16 *Sind* $O = \mu^F_{\varphi_D}(O')$, $L = \mu^R_{\varphi_D}(L')$, $U = \mu^{\overline{R}}_{\varphi_D}(U')$ *und* $(Q,R) = \mu^\sigma_{\varphi_D}((Q',R'))$ *Übersetzungen aus* $\mathcal{A}_{RNCC}$*, dann gilt*
$(P^*_D, AC1^*) \models validcond((O,(L,U)),(Q,R))$ *gdw.* O', L', U' *gelten in* (Q',R') *gemäß Definition 58.*

Beweis 18 (Lemma 16)
Nach (3.24) gilt
$(P^*_D, AC1^*) \models validcond((O,(L,U)),(Q,R))$
gdw. $\exists H, S : Q =_{AC1} O \circ H \wedge R =_{AC1} L \circ S \wedge validcompresset(R,U)$

Nach Definition 66 gilt $\exists H : Q =_{AC1} O \circ H$ *gdw.* $O' \subseteq Q'$.

Nach Definition 68 und 55 gilt außerdem $\exists S : R =_{AC1} L \circ S$ *gdw.* $\forall r \in R_D : |L'_r| \leq |R'_r|$.

Nach Lemma 15 gilt $(P^*_D, AC1^*) \models validcompresset(R,U)$ *gdw.* $\forall r \in R_D : |U'_r| > |R'_r|$.

Entsprechend Definition 58 folgt also Lemma 16 aus Lemma 15. □

Lemma 17 *Sind* $G = \mu^{e-prop}_{\varphi_D}(G') = (A,E,C,K)$, $B = \mu^A_{\varphi_D}(B')$ *und* $S = \mu^\sigma_{\varphi_D}(S')$*, dann gilt*
$(P^*_D, AC1^*) \models applicable((A,E,C,K),B,S)$ *gdw.* G' *in* (B',S') *anwendbar ist.*

Beweis 19 (Lemma 17)
Nach (3.25) gilt:
$(P^*_D, AC1^*) \models applicable((A,E,C,K),B,S)$ *gdw. ein* D *existiert, so daß* $B =_{AC1} A \circ D$ *und* $(P^*_D, AC1^*) \models validcond(C,S)$.

Mit Definition 71 gilt
$C = (\mu^F_{\varphi_D}(\texttt{holds}(G')), (\mu^R_{\varphi_D}(\texttt{available}(G')), \mu^{\overline{R}}_{\varphi_D}(\texttt{not available}(G'))))$.

Damit sind die Voraussetzungen von Lemma 16 erfüllt und die Bedingungen aus C' *nach Definition 58 gelten in* S' *gdw.* $(P^*_D, AC1^*) \models validcond(C,S)$.

Eine e–prop ist entsprechend Definition 9 anwendbar gdw. die Eigenschaften aus C' *in* S' *gelten und* $A' \subseteq B'$. $A' \subseteq B'$ *gilt gdw.* $\exists D : \mu^A_{\varphi_D}(B') =_{AC1} \mu^A_{\varphi_D}(A) \circ D$*, wegen den Gleichungen 3.1 und Definition 67.*

Damit folgt Lemma 17 aus Lemma 16. □

Lemma 18 *Sind* $A = \mu^A_{\varphi_D}(A')$, $S = \mu^\sigma_{\varphi_D}(S')$ *und* $G = \mu^{e-prop}_{\varphi_D}(G')$*, dann gilt* $(P^*_D, AC1^*) \models morespec(G,A,S)$ *gdw. eine spezifischere, in* (A',S') *anwendbare e–prop als* G' *existiert.*

Beweis 20 (Lemma 18)
Nach (3.26) gilt:
$(P^*_D, AC1^*) \models morespec(G,A,S)$ *gdw. ein* F *existiert, so daß*

1. $(P^*_D, AC1^*) \models eprop(F)$ *und*

2. $(P_D^*, AC1^*) \models applicable(F, A, S)$ *und*

3. $(P_D^*, AC1^*) \models leqspec(G, F)$ *und*

4. $(P_D^*, AC1^*) \models \neg leqspec(F, G)$.

Wegen Definition 71 und (3.6) gilt $(P_D^*, AC1^*) \models eprop(F)$ *gdw. F eine Übersetzung einer e–prop* F' *ist.*

Nach Lemma 17 gilt $(P_D^*, AC1^*) \models applicable(F, A, S)$ *gdw. die e–prop* F' *in* (A', S') *anwendbar ist.*

Mit Lemma 12 gilt $(P_D^*, AC1^*) \models leqspec(F, G)$ *gdw.* $F' \leq_E G'$ *nach Korollar 10 ist.*

Wegen der Vollständigkeit folgt außerdem aus Lemma 12 $(P_D^*, AC1^*) \models \neg leqspec(G, F)$ *gdw.* $G' \not\leq_E F'$.

$F' <_E G' \Leftrightarrow F' \leq G' \wedge G' \not\leq F'$ *gilt entsprechend Korollar 10*

Aus Lemma 17, Lemma 12 folgt also Lemma 18. □

Lemma 19 *Sind* $A = \mu^A_{\varphi_D}(A')$ *und* $S = \mu^\sigma_{\varphi_D}(S')$ *und F eine Menge von Übersetzungen von e–props, dann gilt:*
$(P_D^*, AC1^*) \models valideprop(G, F, A, S)$ *gdw. G die Übersetzung einer e–prop* G' *ist, die in* (A', S') *anwendbar ist, es keine spezifischere, in* (A', S') *anwendbare e–prop als* G' *gibt und keine gleichspezifische e–prop in F repräsentiert ist.*

Beweis 21 (Lemma 19)
Nach (3.27) gilt:
$(P_D^*, AC1^*) \models valideprop(G, F, A, S)$ *gdw.*

1. $(P_D^*, AC1^*) \models eprop(G)$ *und*

2. $(P_D^*, AC1^*) \models applicable(G, A, S)$ *und*

3. $(P_D^*, AC1^*) \models \neg morespec(G, A, S)$ *und*

4. $(P_D^*, AC1^*) \models independent(G, F)$.

Gemäß Lemma 17 gilt
$(P_D^*, AC1^*) \models applicable(G, A, S)$ *gdw.* G' *eine in* (A', S') *anwendbare e–prop ist.*

Nach Lemma 18 und mit der Vollständigkeit gilt
$(P_D^*, AC1^*) \models \neg morespec(G, A, S)$ *gdw. keine spezifischere, in* (A', S') *anwendbare e–prop als* G' *existiert.*

Nach Lemma 13 gilt
$(P_D^*, AC1^*) \models independent(G, F)$ *gdw. F keine Übersetzung einer e–prop* D' *enthält, die genauso spezifisch ist, wie* G'.

Wegen (3.6) gilt
$(P_D^*, AC1^*) \models eprop(G)$ *gdw. G die Übersetzung einer e–prop* G' *gemäß Definition 71 ist.*

Damit sind die Voraussetzungen der obigen Lemmas erfüllt und aus Lemma 17, Lemma 18 und Lemma 13 folgt Lemma 19. □

Lemma 20 *Sind* $A = \mu^A_{\varphi_D}(A')$ *und* $S = \mu^\sigma_{\varphi_D}(S')$ *und* $F =_{AC1} \emptyset$*, ann gilt:*
$(P_D^*, AC1^*) \models description(F, (M, O), (Y, K), A, S)$
gdw. eine spezielle Prozeßbeschreibung U' *in* (A', S') *existiert, so daß*
$M = \mu^F_{\varphi_D}(\texttt{causes}(U'))$, $K = \mu^R_{\varphi_D}(\texttt{consuming}(U'))$,
$O = \mu^R_{\varphi_D}(\texttt{produces}(U'))$ *und* $Y = \mu^R_{\varphi_D}(\texttt{using}(U'))$.

Beweis 22 (Lemma 20)
Nach (3.28) gilt:
$(P_D^*, AC1^*) \models description(F, (M, O), (Y, K), A, S)$ *gdw.*

1. (a) $M =_{AC1} \emptyset$ *und*
   (b) $O =_{AC1} \emptyset$ *und*
   (c) $Y =_{AC1} \emptyset$ *und*
   (d) $K =_{AC1} \emptyset$ *und*
   (e) $(P_D^*, AC1^*) \models \neg valideprop(G, F, A, S)$

   oder

2. *es existieren* $D, C, G, H, N, P, Q, R, T, X, Z$*, so daß*
   (a) $M =_{AC1} N \circ I$ *und*
   (b) $O =_{AC1} P \circ Q$ *und*
   (c) $Y =_{AC1} X \circ Z$ *und*
   (d) $X =_{AC1} R \circ T$ *und*
   (e) $D =_{AC1} F \circ (B, (H, P), C, (X, R))$ *und*
   (f) $(P_D^*, AC1^*) \models maxcommon(I, H, N)$ *und*
   (g) $(P_D^*, AC1^*) \models valideprop((B, (H, P), C, (X, R)), F, A, S)$ *und*
   (h) $(P_D^*, AC1^*) \models description(D, (M, O), (Y, K), A, S)$

Entsprechend Lemma 19 und wegen Vollständigkeit gilt
$(P_D^*, AC1^*) \models \neg validepop(G, F, A, S)$ *gdw. keine e–prop* G' *existiert mit* $G = \mu^{e-prop}_{\varphi_D}(G')$*, die in* (A', S') *anwendbar ist, keine spezifischere e–prop als* G' *in* (A', S') *anwendbar ist und keine zu* G' *gleichspezifische e–prop in F repräsentiert ist.*

$(P_D^*, AC1^*) \models description(F, (M, O), (Y, K), A, S)$ *gilt nach 1. gdw. F mindestens die Übersetzungen von e–props enthält, die in* (A', S') *gültig sind und die eine spezielle Prozeßbeschreibung gemäß Korollar 13 bilden. Ist* $F =_{AC1} \emptyset$*, dann gilt*

$(P_D^*, AC1^*) \models \neg validepop(G, F, A, S)$ *gdw. die spezielle Prozeßbeschreibung* F' *leer ist, da dann keine in* (A', S') *gültige e–prop existiert.*

k *ist die (endliche) Zahl der gültigen e–props, die nicht in* F *durch eine e–prop ihrer Äquivalenzklasse repräsentiert sind. Ist* F *leer, dann entspricht* k *der Anzahl* n *der Äquivalenzklassen.*

Ist $k > 0$*, dann gilt*
$\exists B, H, P, C, X, R : (P_D^*, AC1^*) \models valideprop((B, (H, P), C, (X, R)), F, A, S)$ *entsprechend Lemma 19, wobei* $(B, (H, P), C, (X, R))$ *eine Übersetzung einer gültigen e–prop ist, die noch nicht durch die Übersetzung einer e–prop ihrer Äquivalenzklasse in* F *repräsentiert ist.*

Zu $D =_{AC1} F \circ (B, (H, P), C, (X, R))$*, wie in 2. verwendet, existieren dann nur noch* $k - 1$ *gültige e–props, die nicht in* D *durch eine e–prop ihrer Äquivalenzklasse repräsentiert sind, für alle* $k > 0$*.*

Ist $k = 0$*, dann gilt 1. gdw. die* M, O, Y, K*, die Effekte und Kontexte repräsentieren, leer sind.*

Für M, O, Y, K *und die übersetzten Effekte bzw. Kontexte der e–props* H, P, X, R *gilt nun entsprechend 1. und 2., wobei* $B, C, M, O, Y, K, H, P, X, R$ *im folgenden durch* k *indiziert werden:*

Nach Lemma 3 und da H^k *eine Fluentliteralmenge repräsentiert (nach Definition 71) folgt für die Repräsentation von* $\mu^F_{\varphi_D}(\texttt{causes}(U')) = M^n$*:*

$\forall k, 1 \le k \le n : M^k = M^{k-1} \dot\cup (H^k \dot\setminus (H^k \cap M^{k-1}))$ *und* $M^0 = \emptyset$*.*

Da P^k *nach Definition 71 eine Ressourcenmultimenge repräsentiert, gilt für die Repräsentation von* $\mu^R_{\varphi_D}(\texttt{produces}(U')) = O^n$*:*

$\forall k, 1 \le k \le n : O^k = P \dot\cup O^{k-1}$ *und* $O^0 = \emptyset$*.*

Da Y^k *nach Definition 71 eine Fluentmultimenge repräsentiert, gilt für die Repräsentation von* $\mu^R_{\varphi_D}(\texttt{using}(U')) = Y^n$*:*

$\forall k, 1 \le k \le n : Y^k = X \dot\cup Y^{k-1}$ *und* $Y^0 = \emptyset$*.*

Nach Definition 71 repräsentiert K^k *eine Ressourcenmultimenge und für die Repräsentation von* $\mu^R_{\varphi_D}(\texttt{consuming}(U')) = K^n$ *gilt:*

$\forall k, 1 \le k \le n : K^k = \dot\cup R^{k-1}$ *und* $K^0 = \emptyset$*.*

Diese Gleichungen gelten gdw. für die spezielle Prozeßbeschreibung U' *Korollar 15 und Definition 62 erfüllt sind.*

Für die Übersetzung der Menge von e–props, die für $k > 0$ *durch* $D =_{AC1} F \circ (B, (H, P), C, (X, R))$ *in 2. konstruiert wird, gilt nun:*

$\forall k, 1 \le k \le n : F^{n-k} = F^{n-(k-1)} \dot\cup (B^k, (H^k, P^k), C^k, (X^k, R^k))$ *und* $F^0 = \emptyset$ *nach Voraussetzung in Lemma 20.*

F^n *ist damit eine Repräsentation einer speziellen Prozeßbeschreibung* U' *und es folgt Lemma 20.* □

Lemma 21 *Sind* $E = \mu^F_{\varphi_D}(E')$ *und* $Q = \mu^F_{\varphi_D}(Q')$, *dann gilt:*
$(P^*_D, AC1^*) \models fluenteffects(L, N, E, Q)$
gdw. $L' = E' \setminus (Q' \cap E')$ *und* $N' = Q' \cap \overline{E'}$, *wobei* $L = \mu^F_{\varphi_D}(L')$, $N = \mu^F_{\varphi_D}(N')$ *und* $\overline{E'}$ *die Menge der zu den Elementen aus* E' *komplementären Fluentliterale darstellt.*

Beweis 23 (Lemma 21)
Nach (3.14) gilt:
$(P^*_D, AC1^*) \models fluenteffects(L, N, E, Q)$ *gdw. es existieren* F, B

1. $E =_{AC1} L \circ B$ *und*
2. $complementset(F, E)$ *und*
3. $maxcommon(N, Q, F)$ *und*
4. $maxcommon(B, Q, E)$.

Nach Lemma 3 gilt
$(P^*_D, AC1^*) \models maxcommon(X, Y, Z)$ *gdw.* $X = \mu^F_{\varphi_D}(Y' \cap Z')$ *und* Y, Z *Übersetzungen von den Fluentliteralmengen* Y', Z' *darstellen.*

Nach Lemma 6 gilt
$(P^*_D, AC1^*) \models complementset(F, E)$ *gdw.* $F = \mu^F_{\varphi_D}(\overline{E'})$ *gemäß Definition 63.*

Mit $E =_{AC1} L \circ B$ *und wegen* $L = \mu^F_{\varphi_D}(E' \setminus B') = \mu^F_{\varphi_D}(E' \setminus (Q' \cap E'))$ *und* $N = \mu^F_{\varphi_D}(Q' \cap F') = \mu^F_{\varphi_D}(Q' \cap \overline{E'})$ *folgt Lemma 21 aus Lemma 3 und Lemma 6.*
□

Lemma 22 *Sind* $(Q, R) = \mu^\sigma_{\varphi_D}((Q', R'))$ *und* $(I, V) = (\mu^R_{\varphi_D}(I'), \mu^R_{\varphi_D}(V'))$, *dann gilt:*
$(P^*_D, AC1^*) \models validcontext((I, V), A, (Q, R))$ *gdw. der Kontextteil* (I', V') *den Gleichungen 2.17 und 2.16 genügt.*

Beweis 24 (Lemma 22)
Nach (3.29) gilt:
$(P^*_D, AC1^*) \models validcontext((I, V), A, (Q, R))$ *gdw.*

1. $(P^*_D, AC1^*) \models \neg notunique(I)$ *und*
2. $V' \dot{\subseteq} R'$ *und*
3. $\tau(I') \subseteq Q'$.

(wegen $\exists O : Q =_{AC1} O \circ I$ *und* $\exists S : R =_{AC1} V \circ S$*.)*

Also gilt $(P^*_D, AC1^*) \models validcontext((I, V), A, (Q, R))$ *gdw.*
$(P^*_D, AC1^*) \models \neg notunique(I)$ *und die Gleichungen 2.16 für* (I', V') *gelten.*

Nach Lemma 5 und mit der Vollständigkeit gilt außerdem
$(P^*_D, AC1^*) \models \neg notunique(I)$ *gdw. kein Element in* I *existiert, das mehr als*

einmal in I enthalten ist. Die Elemente aus I repräsentieren Fluentliterale aus I'.

Es gilt also $(P_D^*, AC1^*) \models \neg notunique(I)$ gdw. Gleichung 2.17 für I' gilt.

Aus Lemma 5 folgt damit Lemma 22. □

Lemma 23 *Seien $A = \mu_{\varphi_D}^A(A')$ und $S = \mu_{\varphi_D}^\sigma(S')$ und $E = \mu_{\varphi_D}^F(E')$ und $K = (\mu_{\varphi_D}^R(X'), \mu_{\varphi_D}^R(Y'))$, dann gilt*
$(P_D^*, AC1^*) \models conflict((E,P), K, A, S)$ gdw. E' nach Definition 17 widersprüchlich ist oder (X', Y') nicht den Gleichungen 2.17 und 2.16 genügt.

Beweis 25 (Lemma 23)
Nach (3.30) gilt:
$(P_D^*, AC1^*) \models conflict(E, K, A, S)$ gdw. $(P_D^*, AC1^*) \models \neg validcontext(K, A, S)$ oder $(P_D^*, AC1^*) \models contradiction(E)$.

Wegen Lemma 22 und der Vollständigkeit gilt
$(P_D^*, AC1^*) \models \neg validcontext(K, A, S)$ gdw. der Kontextteil K' nicht den Gleichungen 2.17 und 2.16 genügt.

Wegen Lemma 4 gilt
$(P_D^*, AC1^*) \models contradiction(E)$ gdw. E' widersprüchlich ist.

Aus Lemma 22 und Lemma 4 folgt damit Lemma 23. □

Lemma 24 *Sind $A = \mu_{\varphi_D}^A(A')$ und $S = \mu_{\varphi_D}^\sigma(S')$, dann gilt*
$(P_D^*, AC1^*) \models invaliddescription(A, S)$ gdw. die Prozeßbeschreibung in dem durch (A', S') beschriebenen Zustand einen Konflikt verursacht.

Beweis 26 (Lemma 24) *Nach (3.31) gilt:*
$(P_D^*, AC1^*) \models invaliddescription(A, S)$
gdw. ein K und ein E existieren, so daß
$(P_D^*, AC1^*) \models description(\emptyset, E, K, A, S)$ und
$(P_D^*, AC1^*) \models conflict(E, K, A, S)$.

Wegen Lemma 20 gilt
$(P_D^*, AC1^*) \models description(\emptyset, E, K, A, S)$ gdw. eine spezielle Prozeßbeschreibung M' in (A', S') existiert und $E = (\mu_{\varphi_D}^F(\texttt{causes}(M')), \mu_{\varphi_D}^R(\texttt{produces}(M'))) = (U, V)$ und $K = (\mu_{\varphi_D}^R(\texttt{using}(M')), \mu_{\varphi_D}^R(\texttt{consuming}(M')))$ gilt.

Wegen Lemma 23 gilt
$(P_D^*, AC1^*) \models conflict(E, K, A, S)$ gdw. der durch U in $E = (U, V)$ dargestellte idempotente Effektteil nach Definition 17 widersprüchlich ist oder der durch $K = (X, Y)$ dargestellte Kontextteil nicht den Gleichungen 2.17 und 2.16 genügt.

Da eine Prozeßbeschreibung gemäß Korollar 17 und 16 einen Konflikt verursacht gdw. eine spezielle Prozeßbeschreibung nicht effektkonsistent oder nicht kontextkonsistent ist, folgt Lemma 24 aus Lemma 20 und Lemma 23. □

Lemma 25 *Sind* $S = \mu^{\sigma}_{\varphi_D}(S')$ *und* $A = \mu^{A}_{\varphi_D}(A')$, *dann gilt* $(P^*_D, AC1^*) \models action((E,(P,C)),A,S)$ *gdw.* $(E,(P,C))$ *die Übersetzungen der Effekte einer speziellen Prozeßbeschreibung* M' *für den durch* A *und* S *dargestellten Prozeß sind,* $E = \mu^{F}_{\varphi_D}(\texttt{causes}(M'))$, $C = \mu^{R}_{\varphi_D}(\texttt{consuming}(M'))$, $P = \mu^{R}_{\varphi_D}(\texttt{produces}(M'))$, *und die Prozeßbeschreibung keinen Konflikt verursacht.*

Beweis 27 (Lemma 25)
Nach (3.32) gilt:
$(P^*_D, AC1^*) \models action((E,(P,C)),A,S)$
gdw. $\exists X : description(\emptyset,(E,P),(X,C),A,S)$ *und* $\neg invaliddescription(A,S)$.

Gemäß Lemma 20 gilt
$(P^*_D, AC1^*) \models description(\emptyset,(E,P),(X,C),A,S)$ *gdw. eine spezielle Prozeßbeschreibung* M' *existiert, so daß* $E = \mu^{F}_{\varphi_D}(\texttt{causes}(M'))$, $C = \mu^{R}_{\varphi_D}(\texttt{consuming}(M'))$, $P = \mu^{R}_{\varphi_D}(\texttt{produces}(M'))$ *und* $X = \mu^{R}_{\varphi_D}(\texttt{using}(M'))$.

Nach Lemma 24 und wegen der Vollständigkeit gilt
$(P^*_D, AC1^*) \not\models \neg invaliddescription(A,S)$ *gdw. die Prozeßbeschreibung in dem durch* (A', S') *beschriebenen Zustand keinen Konflikt verursacht.*

Damit folgt Lemma 25 aus Lemma 20 und Lemma 24. □

Lemma 26 *Ist* $(Q,R) = \mu^{\sigma}_{\varphi_D}((Q',R'))$ *die Übersetzung einer Zustandsbeschreibung und* $A = \mu^{A}_{\varphi_D}(A')$ *die Übersetzung einer Aktion, dann gilt:* $(P^*_D, AC1^*) \models causes((Q,R),A,(O,S))$ *gdw.* $((Q',R'),a,(O',S')) \in \Phi)$ *und* $(O,S) = \mu^{\sigma}_{\varphi_D}((O',S'))$.

Beweis 28 (Lemma 26)
Nach (3.33) gilt
$(P^*_D, AC1^*) \models causes((Q,R),A,(O,S))$ *gdw.* L,M,N,P,T,U *existieren, so daß*

1. $(P^*_D, AC1^*) \models action((E,(P,U)),A,(Q,R))$ *und*
2. $R =_{AC1} U \circ T$ *und*
3. $S =_{AC1} T \circ P$ *und*
4. $Q =_{AC1} N \circ M$ *und*
5. $O =_{AC1} M \circ L$ *und*
6. $(P^*_D, AC1^*) \models fluenteffects(L,N,E,Q)$.

Entsprechend Lemma 25 gilt
$(P^*_D, AC1^*) \models action((E,(P,U)),A,(Q,R))$
gdw. $(E,(P,U))$ *die Übersetzung der Effekte einer speziellen Prozeßbeschreibung* M' *für den durch* A *und* (Q,R) *dargestellten Prozeß sind mit* $E =$

$\mu^F_{\varphi_D}(\texttt{causes}(M'))$, $U = \mu^R_{\varphi_D}(\texttt{consuming}(M'))$, $P = \mu^R_{\varphi_D}(\texttt{produces}(M'))$ *und die Prozeßbeschreibung keinen Konflikt verursacht.*

Nach Lemma 21 gilt, wenn $E = \mu^F_{\varphi_D}(E')$, $Q = \mu^F_{\varphi_D}(Q')$:
$(P^*_D, AC1^*) \models fluenteffects(L, N, E, Q)$
gdw. $L' = E' \setminus (Q' \cap E')$ *und* $N' = Q' \cap \overline{E'}$, *wobei* $L = \mu^F_{\varphi_D}(L')$, $N = \mu^F_{\varphi_D}(N')$ *und* $\overline{E'}$ *die Menge der zu den Elementen aus* E' *komplementären Fluentliteralen gemäß Definition 63 darstellt.*

Wegen Definition 63 und 55 ist $((Q', R'), A', (O', S')) \in \Phi$ *gdw.* $O' = (Q' \setminus \overline{E'}) \cup E'$ *und* $R' = (R' \dot{\setminus} U') \dot{\cup} P'$.

Wegen $O =_{AC1} M \circ L$ *und* $Q =_{AC1} N \circ M$ *und da* Q *und* E *keine Elemente mehrfach enthalten:*

$$\begin{aligned} O' &= \tau((\tau^{-1}(Q') \dot{\setminus} (\tau^{-1}(Q') \dot{\cap} \overline{\tau^{-1}(E')})) \\ &\qquad \dot{\cup} (\tau^{-1}(E') \dot{\setminus} (\tau^{-1}(Q') \dot{\cap} \tau^{-1}(E')))) \\ &= (Q' \setminus \overline{E'}) \cup E' \end{aligned}$$

Wegen $R =_{AC1} U \circ T$, $S =_{AC1} T \circ P$ *gilt außerdem:* $S' = (R' \dot{\setminus} U') \dot{\cap} P'$

Damit folgt Lemma 26 aus Lemma 25 und Lemma 21. □

Lemma 27 *Repräsentiert* $R = \mu^\sigma_{\varphi_D}(S_0)$ *eine Beschreibung eines Anfangszustands und* P *eine Sequenz von Tupeln* (A_i, S_i), *wobei* A_i *die Übersetzung einer Aktion* A'_i *ist* $(1 \leq i \leq n)$, *dann gilt:*

$$(P^*_D, AC1^*) \models result(R, P, T) \quad gdw. \quad T = \mu^\sigma_{\varphi_D}(\phi([A'_1, \ldots, A'_n]))$$

Beweis 29 (Lemma 27)
Nach (3.34) gilt:
$(P^*_D, AC1^*) \models result(R, P, T)$ *gdw.*

1. $P = []$ *und* $R =_{AC1} T$ *oder*
2. $\exists A, B, S:$
   (a) $P = [(A, S)|B]$ *und*
   (b) $(P^*_D, AC1^*) \models causes(R, A, S)$ *und*
   (c) $(P^*_D, AC1^*) \models result(S, B, T)$.

Ist n *die Anzahl der Elemente der Liste* P *und ist* $n = 0$, *dann gilt nach 1.:* $T = \mu^\sigma_{\varphi_D}(\phi([])) = R = \mu^\sigma_{\varphi_D}(S'_0)$ *und die erste Gleichung aus 2.23 ist erfüllt.*

Ist $n > 0$ *(aber endlich), dann ist* P *nicht leer und es gilt nach 2.:*

$(P^*_D, AC1^*) \models result(S_{j-1}, [(A_j, S_j), (A_{j+1}, S_{j+1}), \ldots, (A_n, S_n)], T)$ *gdw.*
$(P^*_D, AC1^*) \models causes(S_{j-1}, A_j, S_j)$ *und*
$(P^*_D, AC1^*) \models result(S_j, [(A_{j+1}, S_{j+1}), \ldots, (A_n, S_n)], T)$, *für alle* $n \geq j > 0$

Nach Lemma 26 gilt für alle j
$(P_D^*, AC1^*) \models causes(S_{j-1}, A_j, S_j)$ *gdw.* $(\mu^{\sigma}_{\varphi_D}(S'_{j-1}), A'_j, \mu_{\varphi_D}(S'_n)) \in \Phi)$.

Damit ist die 2. Gleichung aus 2.23 refüllt für alle S'_j *für* $j > 0$ *und es gilt:*
$(P_D^*, AC1^*) \models result(R, [(A_1, S_1), (A_2, S_2), \ldots, (A_n, S_n)], T)$ *gdw.*

$$T = S_n = \mu^{\sigma}_{\varphi_D}(\phi([A'_1, \ldots, A'_n]))$$

Aus Lemma 26 folgt das Lemma 27. □

Lemma 28 $(P_D^*, AC1^*) \models inconsistent(I)$ *gdw. I keine Übersetzung einer Zustandsbeschreibung ist.*

Beweis 30 (Lemma 28)
Nach (3.12) folgt $(P_D^*, AC1^*) \models inconsistent((Q, R))$

gdw.

1. $(P_D^*, AC1^*) \models contradiction(Q)$, *das nach Lemma 4 gilt gdw. ein Fluent und sein Komplement in Q repräsentiert sind.*

   Oder

2. $(P_D^*, AC1^*) \models notunique(Q)$, *das nach Lemma 5 gilt gdw. ein Element mehrfach in Q repräsentiert ist.*

   Oder

3. $\exists O, M, N : (P_D^*, AC1^*) \models Q =_{AC1} O \circ M \wedge \neg complement(O \circ N) \wedge \neg term(O) \wedge O \neq_{AC1} \emptyset$.

   Nach Lemma 1 gilt $(P_D^*, AC1^*) \models \neg term(O)$ *gdw. O weniger als zwei Elemente enthält. Deshalb und wegen* $O \neq_{AC1} \emptyset$ *gilt obiges gdw. O ein Element aus Q ist, das keinen Fluent f oder dessen Komplement* $\overline{f}$ *darstellt.*
   $(\exists N : (P_D^*, AC1^*) \models complement(O \circ N))$.

   Oder

4. $\exists O, P : (P_D^*, AC1^*) \models complement(O \circ P) \wedge O \neq_{AC1} \emptyset \wedge P \neq_{AC1} \emptyset \wedge \neg common(O, Q) \wedge \neg common(P, Q)$.

   Nach Lemma 2 gilt wegen Vollständigkeit
   $(P_D^*, AC1^*) \models \neg common(A, Q)$ *gdw. kein Element aus A in Q enthalten ist.*

   $(P_D^*, AC1^*) \models inconsistent((Q, R))$ *gilt gdw. O und P zwei zueinander komplementäre Fluentliterale* $O' = \varphi_D(P')$ *repräsentieren, wobei weder* $O' \in Q'$ *noch* $P' \in Q'$.

   Oder

5. $\exists S, T : (P_D^*, AC1^*) \models R =_{AC1} S \circ T \wedge \neg ressourcename(S) \wedge S \neq_{AC1} \emptyset \wedge \neg term(S)$,

   das gilt gdw. S ein Element aus R ist, das keine Übersetzung eines Ressourcennamens repräßentiert.

Wenn eine der Folgerungen 1.-5. gilt, dann ist I keine Übersetzung eines Zustandes I' gemäß Definition 57.

Lemma 28 folgt damit aus Lemma 2,4 und 5. □

Theorem 2 *Ist D eine Domänenbeschreibung in $\mathcal{A}_{RNCC}$, dann gilt:*
Es existiert ein σ_0 mit: Die Struktur (σ_0, Φ_D, ϕ) ist ein Modell von D mit $I = \mu^\sigma_{\varphi_D}(\sigma_0)$, und $X_i = \mu^\sigma_{\varphi_D}(\phi([a_{i1}, \ldots, a_{in_i}]))$ $(1 \leq i \leq \beta)$ gdw.

$$(P_D^*, AC1^*) \models model(I, X_1, \ldots, X_\beta).$$

Beweis 31 (Theorem 2)
Entsprechend (3.35) gilt:

$(P_D^*, AC1^*) \models model(I, X_1, \ldots, X_\beta)$ *gdw.*
$(P_D^*, AC1^*) \models \neg inconsistent(I)$

und für alle v–props $v = l_v$ `after` $a_{v1}, \ldots, a_{vn_v}$ gilt:

$$\exists G : (P_D^*, AC1^*) \models$$
$$result(\mu^\sigma_{\varphi_D}(\sigma^0), [(\mu^A_{\varphi_D}(a_{v1}), X_{\alpha_v}), \ldots, (\mu^A_{\varphi_D}(a_{vn_v}), X_{\delta_v})], G)$$
$$\wedge\ validcond(\mu^F_{\varphi_D}(\texttt{holds}(v)), \mu^R_{\varphi_D}(\texttt{available}(v)), \mu^{\overline{R}}_{\varphi_D}(\texttt{not available}(v)), G)$$

Nach Korollar 19 ist eine Struktur (σ_0, Φ_D, ϕ) ein Modell von D gdw. alle v–props wahr sind, σ_0 eine Zustandsbeschreibung ist und ϕ eine Abbildung entsprechend Gleichung 2.23.

Eine v–prop v ist nach Korollar 19 wahr gdw. die Eigenschaften, repräsentiert durch die Fluentliterale `holds`(v)*, die Ressourceneigenschaften* `available`(v)*,* `not available`(v)*, in dem durch $\phi(A_v) = \phi([a_{v1}, \ldots, a_{vn_v}])$ beschriebenen Zustand gelten.*

Nach Lemma 27 gilt
$\exists G : (P_D^*, AC1^*) \models result(I, A_v, G)$ *gdw.* $G = \mu^\sigma_{\varphi_D}(\phi(A_v))$

und nach Lemma 16 gilt
$(P_D^*, AC1^*) \models validcond(C, G)$ *gdw. die durch die Übersetzung von in v dargestellten Eigenschaften in G gelten.*

$(P_D^*, AC1^*) \models \neg inconsistent(I)$ *gilt entsprechend Lemma 28 und mit Vollständigkeit gdw. $I = \mu^\sigma_{\varphi_D}(\sigma_0)$ keine Zustandsbeschreibung in $\mathcal{A}_{RNCC}$ repräsentiert.*

Also folgt Theorem 2 aus Lemma 27, 16 und 28 □

3.4 $\mathcal{FC}_{RNCC}$

Sei D eine Domänenbeschreibung in $\mathcal{A}_{RNCC}$ mit der Menge R_D, die k Ressourcennamen enthält, der Menge F_D, die l Fluentnamen enthält, der Menge E_D, die m e–props enthält und der Menge V_D, die n v–props enthält. Das logische Programm P_D, also die Übersetzung von D aus $\mathcal{A}_{RNCC}$ in $\mathcal{FC}_{RNCC}$, ist wie folgt definiert:

$$\begin{array}{l} ressourcename(r_1). \\ \quad . \\ \quad . \\ \quad . \\ ressourcename(r_k). \end{array} \tag{3.36}$$

$$\begin{array}{l} complement(f_1 \circ \varphi_D(f_1)). \\ \quad . \\ \quad . \\ \quad . \\ complement(f_l \circ \varphi_D(f_l)). \end{array} \tag{3.37}$$

$$\begin{array}{l} eprop((A_1, (F_1, P_1), (H_1, (L_1, U_1)), (X_1, V_1))). \\ \quad . \\ \quad . \\ \quad . \\ eprop((A_m, (F_m, P_m), (H_m, (L_m, U_m)), (X_m, V_m))). \end{array} \tag{3.38}$$

$$\begin{array}{l} term(B \circ C) \\ \quad \leftarrow \quad B \neq_{AC1} \emptyset, C \neq_{AC1} \emptyset. \end{array} \tag{3.39}$$

$$\begin{array}{l} common(C \circ D, C \circ E) \\ \quad \leftarrow \quad C \neq_{AC1} \emptyset. \end{array} \tag{3.40}$$

$$\begin{array}{l} maxcommon(A, D \circ A, E \circ A) \\ \quad \leftarrow \quad \neg common(D, E). \end{array} \tag{3.41}$$

$$\begin{array}{l} notunique(C \circ C \circ D) \\ \quad \leftarrow \quad C \neq_{AC1} \emptyset. \end{array} \tag{3.42}$$

$$\begin{array}{l} contradiction(B \circ C) \\ \quad \leftarrow \quad complement(B). \end{array} \tag{3.43}$$

$$\begin{aligned}
&inconsistent(Q, R)\\
&\quad\leftarrow\quad contradiction(Q).\\
&inconsistent(Q, R)\\
&\quad\leftarrow\quad notunique(Q).\\
&inconsistent(O \circ M, R)\\
&\quad\leftarrow\quad \neg complement(O \circ N),\\
&\qquad\quad\ \neg term(O), O \neq_{AC1} \emptyset.\\
&inconsistent(Q, R)\\
&\quad\leftarrow\quad complement(O \circ P),\\
&\qquad\quad\ O \neq_{AC1} \emptyset, P \neq_{AC1} \emptyset,\\
&\qquad\quad\ \neg common(O, Q), \neg common(P, Q).\\
&inconsistent(Q, S \circ T)\\
&\quad\leftarrow\quad S \neq_{AC1} \emptyset, \neg term(S),\\
&\qquad\quad\ \neg ressourcename(S).
\end{aligned} \tag{3.44}$$

$$\begin{aligned}
&complementset(\emptyset, \emptyset).\\
&complementset(C \circ E, D \circ F)\\
&\quad\leftarrow\quad E \neq_{AC1} \emptyset, F \neq_{AC1} \emptyset,\\
&\qquad\quad\ complement(E, F),\\
&\qquad\quad\ complementset(C, D).
\end{aligned} \tag{3.45}$$

$$\begin{aligned}
&fluenteffects(N, L, L \circ B, Q)\\
&\quad\leftarrow\quad complementset(F, L \circ B),\\
&\qquad\quad\ maxcommon(N, Q, F),\\
&\qquad\quad\ maxcommon(B, Q, L \circ B).
\end{aligned} \tag{3.46}$$

$$\begin{aligned}
&element(N, N \circ R)\\
&\quad\leftarrow\quad ressourcename(N).
\end{aligned} \tag{3.47}$$

$$\begin{aligned}
&ressource(N, \emptyset)\\
&\quad\leftarrow\quad ressourcename(N).\\
&ressource(N, N \circ R)\\
&\quad\leftarrow\quad ressource(N, R).
\end{aligned} \tag{3.48}$$

$$\begin{aligned}
&ressourcepart(R, S, N, R \circ S)\\
&\quad\leftarrow\quad ressource(N, R),\\
&\qquad\quad\ \neg element(N, S).
\end{aligned} \tag{3.49}$$

$$\begin{aligned}
&leqcompres(X, \emptyset).\\
&leqcompres(X, X \circ K)\\
&\quad\leftarrow\quad X \neq_{AC1} \emptyset.
\end{aligned} \tag{3.50}$$

$$\begin{aligned}
&leqcompresset(X, \emptyset).\\
&leqcompresset(X, N \circ L)\\
&\quad \leftarrow \quad ressourcename(N),\\
&\qquad\quad ressourcepart(R, S, N, L),\\
&\qquad\quad ressourcepart(V, W, N, X),\\
&\qquad\quad leqcompres(V, N \circ L),\\
&\qquad\quad leqcompresset(W, S).
\end{aligned} \tag{3.51}$$

$$\begin{aligned}
&leqspec((A \circ I, H, (C \circ J, (F \circ O, M)), L), (A, E, (C, (F, G)), K))\\
&\quad \leftarrow \quad leqcompresset(G, M).
\end{aligned} \tag{3.52}$$

$$\begin{aligned}
&independent(F, \emptyset).\\
&independent(F, G \circ M)\\
&\quad \leftarrow \quad eprop(G),\\
&\qquad\quad \neg leqspec(F, G),\\
&\qquad\quad \neg leqspec(G, F),\\
&\qquad\quad independent(F, M).
\end{aligned} \tag{3.53}$$

$$\begin{aligned}
&validcompres(L, \emptyset).\\
&validcompres(L, L \circ K)\\
&\quad \leftarrow \quad K \neq_{AC1} \emptyset.
\end{aligned} \tag{3.54}$$

$$\begin{aligned}
&validcompresset(\emptyset, U).\\
&leqcompresset(N \circ M, U)\\
&\quad \leftarrow \quad ressourcename(N),\\
&\qquad\quad ressourcepart(R, S, N, M),\\
&\qquad\quad ressourcepart(V, W, N, U),\\
&\qquad\quad validcompres(N \circ R, V),\\
&\qquad\quad validcompresset(S, W).
\end{aligned} \tag{3.55}$$

$$\begin{aligned}
&validcond((O, (L, U)), (O \circ H, L \circ S))\\
&\quad \leftarrow \quad validcompresset(L \circ S, U).
\end{aligned} \tag{3.56}$$

$$\begin{aligned}
&applicable((A, E, C, K), A \circ D, S)\\
&\quad \leftarrow \quad validcond(C, S).
\end{aligned} \tag{3.57}$$

$$\begin{aligned}
&morespec(G, A, S)\\
&\quad \leftarrow \quad eprop(F),\\
&\qquad\quad applicable(F, A, S),\\
&\qquad\quad leqspec(G, F),\\
&\qquad\quad \neg leqspec(F, G).
\end{aligned} \tag{3.58}$$

$$
\begin{array}{ll}
\multicolumn{2}{l}{validdeprop(G, F, A, S)} \\
\leftarrow & eprop(G), \\
& applicable(G, A, S), \\
& negmorespec(G, A, S), \\
& independent(G, F).
\end{array} \tag{3.59}
$$

$$
\begin{array}{ll}
\multicolumn{2}{l}{description(F, (\emptyset, \emptyset), (\emptyset, \emptyset), A, S).} \\
\multicolumn{2}{l}{description(F, (N \circ I, P \circ Q), (X \circ Z, R \circ T), A, S)} \\
\leftarrow & valideprop((B, (H, P), C, (X, R)), F, A, S), \\
& maxcommon(I, H, N), \\
& description(F \circ (B, (H, P), C, (X, R)), (N, Q), (Z, T), A, S).
\end{array} \tag{3.60}
$$

$$
\begin{array}{ll}
\multicolumn{2}{l}{validcontext((I, V), A, (O \circ I, S \circ V))} \\
\leftarrow & \neg notunique(I).
\end{array} \tag{3.61}
$$

$$
\begin{array}{ll}
\multicolumn{2}{l}{conflict((E, P), K, A, S)} \\
\leftarrow & \neg validcontext(K, A, S). \\
\multicolumn{2}{l}{conflict((E, P), K, A, S)} \\
\leftarrow & contradiction(E).
\end{array} \tag{3.62}
$$

$$
\begin{array}{ll}
\multicolumn{2}{l}{invaliddescription(A, S)} \\
\leftarrow & description(\emptyset, E, K, A, S), \\
& conflict(E, K, A, S).
\end{array} \tag{3.63}
$$

$$
\begin{array}{ll}
\multicolumn{2}{l}{action((E, (P, C)), A, S)} \\
\leftarrow & description(\emptyset, (E, P), (X, C), A, S), \\
& \neg invaliddescription(A, S).
\end{array} \tag{3.64}
$$

$$
\begin{array}{ll}
\multicolumn{2}{l}{causes((N \circ M, U \circ T), A, (M \circ L, T \circ P))} \\
\leftarrow & action((E, (P, U)), A, (Q, R)), \\
& fluenteffects(L, N, E, T \circ P).
\end{array} \tag{3.65}
$$

$$
\begin{array}{ll}
\multicolumn{2}{l}{result(R, [], R).} \\
\multicolumn{2}{l}{result(R, [(A, S)|B], T).} \\
\leftarrow & causes(R, A, S), \\
& result(S, B, T).
\end{array} \tag{3.66}
$$

$$
\begin{array}{ll}
\multicolumn{2}{l}{model(I, X_1, \ldots, X_\beta)} \\
\leftarrow & \neg inconsistent(I), \\
& result(I, [(a_{1,1}, X_{\alpha_1}), \ldots, (a_{1,p_1}), X_{\delta_1})], G_1) \\
& validcond((q_1, (r_1, n_1)), G_1)), \\
& . \\
& . \\
& . \\
& result(I, [(a_{n,1}, X_{\alpha_n}), \ldots, (a_{n,p_1}), X_{\delta_n})], G_n) \\
& validcond((q_n, (r_n, n_n)), G_n)).
\end{array} \tag{3.67}
$$

Zusammenfassung und Ausblick

Grundlage für die Definition der Semantik von Beschreibungen dynamischer Systeme war in der vorliegenden Arbeit eine flexible Vorstellung des dynamischen Systems als eine Menge von Zuständen zusammen mit einer Kausalitätsrelation. Die daraus abgeleitete Definition einer Eigenschaft und das auf diesem Begriff aufbauende Konzept der Beschreibung eines Universums ist nahezu domänenunabhängig.

Eine effiziente Beschreibung eines Universums enthält im Vergleich zur Anzahl der durch Kausalbeschreibungen beschriebenen Zustandsübergänge nur sehr wenige Kausalbeschreibungen. Diese Effizienz kann für viele Domänen mit der hier angegebenen Interpretation von zu Prozeßbeschreibungen kombinierbaren Kausalbeschreibungen erreicht werden. Um die korrekte Spezifikation der zu beschreibenden Zustandsübergänge gewährleisten zu können, wurde ein neues Konstrukt in Kausalbeschreibungen integriert: der Kontext.

Die Untersuchung der logischen Abhängigkeiten zwischen Aussagen über Weltzustände führte zu der wichtigen Definition von *relativ unabhängigen* Mengen von Eigenschaften. Die Einschränkung der möglichen Aussagen über Weltzustände auf diese Klasse ermöglicht die Erweiterung von Interpretationen von Kausalbeschreibungen um allgemeingültige Rahmenaxiome und die oben erwähnte Definition des Kontextes, der exklusive Bedingungen von Kausal– bzw. Prozeßbeschreibungen repräsentiert.

Die Bestimmung der Zustandsübergangsrelationen beruhte auf der strikten Trennung von kausalen Abhängigkeiten von Zustandsbeschreibungen (Ursache–Effekt Relation) und logischen Abhängigkeiten der Eigenschaften (Spezifitätsrelation).

Obwohl noch nicht alle semantischen Konzepte, die im ersten Teil der Arbeit untersucht wurden, in der Sprache $\mathcal{A}_{RNCC}$ realisiert sind, bietet $\mathcal{A}_{RNCC}$ eine gegenüber den bestehenden $\mathcal{A}$–Varianten wesentlich ausdrucksstärkere Aktionsbeschreibungssprache, da sie neben der Formulierung nichtdeterministischer Zustandsübergänge und der Möglichkeit der Beschreibung paralleler Aktionen, Konsumtionen bzw. Produktionen von Ressourcen, exklusive Bedingungen und die Spezifikation von Ressourcenbedingungen erlaubt.

Die Übersetzung von $\mathcal{A}_{RNCC}$ in den Fluentkalkül ist mit der angegebenen Gleichungstheorie nur verhältnismäßig aufwendig realisierbar. Vereinfachungen, z.B. durch Nutzung mehrerer verschiedener Gleichungstheorien für unterschiedliche Terme, sind jedoch denkbar.

Die in der Sprache $\mathcal{A}_{RNCC}$ realisierte Annahme, daß zwischen Eigenschaften keinerlei Abhängigkeiten bestehen dürfen, sofern sie nicht zu einer Ressourcenklasse gehören, ist in vielen Domänen zu streng. Wünschenswert wäre daher eine Sprache und ein entsprechender Kalkül, die bzw. der beliebige Abhängigkeiten (mindestens gemäß der Definition der relativen Unabhängigkeit) zwischen Eigenschaften berücksichtigen kann.

Ebenso wie generische Eigenschaften (Ressourcen) können generische Kausalbeschreibungen untersucht werden. Generische Kausalbeschreibungen könnten sehr effizient funktionale Beziehungen zwischen Quantitätseigenschaften modellieren. Im Rahmen der Beschreibung von dynamischen Systemen ist häufig auch eine explizite Darstellung von Zeit oder Zeitintervallen unbedingt erforderlich.

Die genannten Erweiterungen sind jedoch nur einige wenige von vielen möglichen und vor allem notwendigen, um einen Schritt in Richtung einer allgemeinen Theorie der Beschreibung dynamischer Systeme gehen zu können.

Literaturverzeichnis

[1] K. R. Apt, H. A. Blair, and A. Walker. Towards a theory of declarative knowledge. In J. Minker, editor, *Foundations of Deductive Databases and Logic Programming*, chapter 2, pages 89–148. Morgan Kaufmann Publishers Inc., 1987.

[2] Chitta Baral and Michael Gelfond. Representing Concurrent Actions in Extended Logic Programming. In R. Bajcsy, editor, *IJCAI*, pages 866–871, Chambéry, France, August 1993. Morgan Kaufmann.

[3] W. Bibel. A deductive solution for plan generation. *New Generation Computing*, 4:115–132, 1986.

[4] S.-E. Bornscheuer. Gleichzeitige Aktionen im ELP-basierten Planungsansatz. Diplomarbeit, THD, 1994.

[5] S.-E. Bornscheuer and M. Thielscher. Explicit and implicit indeterminism. *JLP*, 1997.

[6] K. L. Clark. Negation as failure. In H. Gallaire and J. Minker, editors, *Logic and Databases*, pages 293–322. Plenum, New York, NY, 1978.

[7] M. Gelfond and V. Lifschitz. Representing actions in extended logic programming. In K. Apt, editor, *IJCSLP*, pages 559–573. MIT Press, 1992.

[8] M. Gelfond and V. Lifschitz. Representing Action and Change by Logic Programs. *JLP*, 17:301–321, 1993.

[9] J. Y. Girard. Linear logic. *Theoretical Computer Science*, 50(1):1 – 102, 1987.

[10] S. Hölldobler. *Foundations of Equational Logic Programming*, volume 353 of *Lecture Notes in Artificial Intelligence*. Springer, 1989.

[11] S. Hölldobler and J. Schneeberger. A new deductive approach to planning. *New Generation Computing*, 8:225–244, 1990.

[12] S. Hölldobler and M. Thielscher. Computing change and specificity with equational logic programs. *Annals of Mathematics and Artificial Intelligence*, 14:99–133, 1995.

[13] G. N. Kartha and V. Lifschitz. Actions with Indirect Effects. In J. Doyle, E. Sandewall, and P. Torasso, editors, *KR*, pages 341–350, Bonn, Germany, May 1994. Morgan Kaufmann.

[14] V. Lifschitz. Frames in the space of situations. *AIJ*, 46:365–376, 1990.

[15] J. McCarthy and P. J. Hayes. Some philosophical problems from the standpoint of Artificial Intelligence. In B. Meltzer and D. Michie, editors, *Machine Intelligence 4*, pages 463 – 502. Edinburgh University Press, 1969.

[16] Newton. *Principia Mathematicae.*

[17] John C. Shepherdson. SLDNF-Resolution with Equality. *JAR*, 8:297–306, 1992.

[18] M. Thielscher. Representing actions in equational logic programming. In *Proceedings of the International Conference on Logic Programming (ICLP)*, pages 207–225, Santa Margherita Ligure, Italien, 1994. MIT Press.

Erklärung

Hiermit erkläre ich, daß ich die vorliegende Arbeit selbständig angefertigt und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet, sowie Zitate kenntlich gemacht habe.

Dresden, den 31.Januar 1997

Helko Lehmann