Strategien zur Domänenanalyse

Ulrich Scholz

Fachbereich Informatik, Technische Universität Darmstadt
Alexanderstraße 10, 64283 Darmstadt, Germany
scholz@informatik.tu-darmstadt.de
http://kirmes.inferenzsysteme.informatik.tu-darmstadt.de/~scholz/

Abstract

Propositionales Planen ist ein hartes Problem, trotz rasanter Entwicklung stoßen Planer, bedingt durch die Weite des Suchraums, bei Problemen mittlerer Größe an Laufzeitgrenzen. Mit Informationen über die Struktur von Planungsdomänen kann der Suchraum drastisch eingeschränkt werden. Dieser Artikel stellt drei Strategien vor, die aus einer gegebenen Domäne Strukturinformationen extrahieren und sie einem Planer zur Verfügung stellen. Dabei ist es denkbar, diese Strategien als Vorverarbeitungsschritt unabhängig von einem konkreten Planungsproblem durchzuführen und die gewonnenen Informationen für viele Anwendungen wiederzuverwenden.

Einleitung

Propositionales Planen ist ein hartes Problem, selbst im weniger allgemeinen Fall ist es NP-hart (Bylander 1994). Trotz rasanter Entwicklung stoßen Planer, bedingt durch die Weite des Suchraums, bei Problemen mittlerer Größe an Laufzeitgrenzen. Mit Informationen über die Struktur von Planungsdomänen kann der Suchraum drastisch eingeschränkt werden (Kautz & Selman 1998), allerdings wird dieses domänenspezifische Wissen dem Planer manuell zur Verfügung gestellt. Dies bedeutet nicht nur Aufwand und die Gefahr von Auslassungen und Fehlern. Es ist eine Einschränkung der Allgemeinheit des propositionalen Planens, da Planungsdomänen den Vorzug gegeben wird, die vom Benutzter speziell konstruiert oder bearbeitet wurden.

Dieser Artikel stellt drei Strategien vor, die aus einer gegebenen Domäne Strukturinformationen extrahieren und sie einem Planer zur Verfügung stellen. Dabei ist es denkbar, diese Strategien als Vorverarbeitungsschritt unabhängig von einem konkreten Planungsproblem durchzuführen und die gewonnenen Informationen für viele Anwendungen wiederzuverwenden. Die Strategie MCP ermöglicht es Planeren, die total geordnete Pläne verwenden, ihren Suchraum einzuschränken. Im nächsten Abschnitt wird die Strategie RAS vorgestellt, die ersetzbare Aktionssequenzen ermittelt. Die Strategie SMP beweist für Teilmengen der Propositionen einer Domäne, daß nur einer ihrer Elemente zu einem Zeitpunkt aktiv sein kann. Im letzten Abschnitt werden Aufwand und Ergebnisse der Strategien besprochen.

Terminologie

Diese Arbeit beschäftigt sich mit Beziehungen zwischen Lösungen in gegebenen Domänen bzw. mit Eigenschaften, die für jede Lösung aller Planungsprobleme einer gegebenen Domäne gelten. Hierzu verwenden wir die folgende Terminologie.

Eine ***Aktion*** a besteht aus einer Menge von ***Vorbedingungen*** $pre(a)$, einer Menge von durch die Aktion ***aktivierten Effekten*** $add(a)$ und ***deaktivierten Effekten*** $del(a)$. Alle Vorbedingungen und Effekte sind positive Propositionen. Zum Beispiel bedeutet $p \in add(a_1) \cap pre(a_2)$, daß die Proposition p von a_1 aktiviert wird und daß sie Vorbedingung von a_2 ist. Eine ***Domäne*** $\mathcal{A}$ ist eine Menge von Aktionen, wobei $\mathrm{Prob}(\mathcal{A})$ die Menge aller in den Aktionen von $\mathcal{A}$ vorkommenden Propositionen bezeichnet.

Ein ***Planungsproblem*** $\mathcal{PP}$ ist ein Tripel $\prec\mathcal{A}, \Sigma, \Omega\succ$, wobei $\mathcal{A}$ eine Domäne und Σ bzw. Ω die ***Ausgangs-*** bzw. die ***Zielsituation*** bezeichnet. O. B. d. A. schränken wir Σ und Ω auf Teilmengen von $\mathrm{Prob}(\mathcal{A})$ ein.

Eine ***Zeitstufe*** ist eine Zahl $t \in \mathbb{N}_0$. Ein ***Prä-Plan*** der Domäne $\mathcal{A}$ ist eine Menge von Aktions/Zeitstufenpaaren a^t. Durch die Definition der Zeitstufen als natürliche Zahlen sind die Aktionen eines Prä-Planes total geordnet. Ein ***serieller*** Plan hat maximal eine Aktion zu einer Zeitstufe, einem ***parallelen*** Plan fehlt diese Einschränkung. Ein Prä-Plan ist in jeder seiner Eigenschaften endlich.

Ein serieller Prä-Plan P ist ***konfliktfrei***, wenn es für jedes Aktionspaar $a_1^{t_1}, a_2^{t_2} \in P$ mit $p \in del(a_1) \cap pre(a_2), t_1 < t_2$ eine Aktion $a_3^{t_3} \in P$ gibt, mit $p \in add(a_3)$ und $t_1 < t_3 < t_2$. Für einen konfliktfreien, parallelen Prä-Plan P muß zusätzlich gelten, daß für kein Aktionspaar $a_1^t, a_2^t \in P$ gilt: $add(a_1) \cap del(a_2) \neq \emptyset$ oder $pre(a_1) \cap del(a_2) \neq \emptyset$. Für einen Prä-Plan P ist $kf(P)$ wahr, falls P konfliktfrei ist.

Ein ***Plan*** P ist die Lösung eines Planungsproblems $\prec \mathcal{A}, \Sigma, \Omega \succ$. Für P gilt:

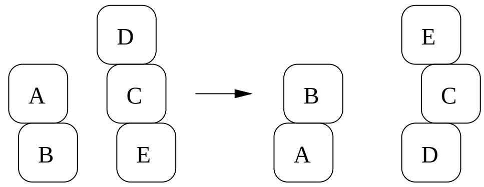
- P ist ein konfliktfreier Prä-Plan.
- Die einzige Aktion in der Zeitstufe 0 ist die zusätzliche Aktion INIT, mit $pre(\text{INIT}) = \emptyset$, $add(\text{INIT}) = \Sigma$ und $del(\text{INIT}) = \text{Prob}(\mathcal{A}) \setminus \Sigma$. Dies ist die einzige Verwendung von INIT in P.
- Die einzige Aktion in der letzten Zeitstufe ist die zusätzliche Aktion GOAL, mit $pre(\text{GOAL}) = \Omega$ und $add(\text{GOAL}) = del(\text{GOAL}) = \emptyset$. Dies ist die einzige Verwendung von GOAL in P.

Mit diesen Definitionen können nun die drei Strategien vorgestellt werden.

Maximal komprimierte Pläne

Bei der Verwendung paralleler, total geordneter Pläne kann die Lösungsmenge eines Planungsproblems Pläne beinhalten, die sich nur durch die Reihenfolge von Aktionen unterscheiden. Wird die totale Ordnung einer Planrepräentation durch die Zuweisung an explizite Zeitstufen erzwungen, können zusätzlich noch Lösungen enthalten sein, die sich nur durch diese Zuweisung unterscheiden, bei denen die Reihenfolge der Aktionen aber gleich ist. Dies kann den Lösungsmenge eines Planungsproblems aufblähen. Solche Plandarstellungen werden z. B. von Planern wie SATPLAN (Kautz & Selman 1996) oder GRAPHPLAN (Blum & Furst 1995) verwendet.

Die Strategie MCP (maximal compressed plans) ist auf dieses Problem zugeschnitten. Sie basiert auf dem Ausschluß von Prä-Planen, bei denen es Aktionen gibt, die eine Zeitstufe früher eingefügt sein könnten, ohne einen weiteren Konflikt zu erzeugen. Auf diese Weise werden von der Menge der zeitlich expliziten Repräsentationen eines partiell geordneten Planes alle bis auf genau eine verworfen.



Beispiel für die Aufblähung des Lösungsraums durch explizite Zeitstufen in einer Blocks World Domäne.[1] Das Umdrehen des rechten Turms benötigt drei Zeitstufen. Die beiden Aktionen zur Vertauschung der Blöcke A und B können auf drei verschiedene Weisen diesen Zeitstufen zugewiesen werden.

Definition 1. $a_1 \overset{mcp}{\rightarrow} a_2 \equiv$
$pre(a_1) \cap del(a_2) \neq \emptyset \lor del(a_1) \cap add(a_2) \neq \emptyset \lor add(a_1) \cap del(a_2) \neq \emptyset \lor add(a_1) \cap pre(a_2) \neq \emptyset$

Die Relation $\overset{mcp}{\rightarrow}$ hält genau dann zwischen zwei Aktionen, falls sich zwischen ihnen bei Platzierung in der selben Zeitstufe ein Konflikt ergeben könnte. Nur falls alle Aktionen eines Prä-Planes P, außer den ersten, mit einer direkt vorher eingefügten Aktion in dieser Beziehung stehen, wollen wir P als Teil einer Lösung akzeptieren.

Definition 2. *Für einen Prä-Plan P sei $t_{min}(P)$ die kleinste besetzte Zeitstufe.*

$mcp(P) :=$
$\forall a_1^t \in P.\ t = t_{min}(P) \ \lor\ \exists a_2^{t-1} \in P.\ a_2 \overset{mcp}{\rightarrow} a_1$

Satz 3. *Für jeden konfliktfreien Prä-Plan P gibt es einen konfliktfreien Prä-Plan P' mit $mcp(P')$, der sich von P nur durch die Zuweisung der Aktionen zu den Zeitstufen unterscheidet.*

Beweis. Annahme: Sei P ein konfliktfreier Prä-Plan und $mcp(P)$ gilt nicht. Dann gibt es eine Aktion $a_1^t \in P$ mit $t \neq t_{\min}(P)$ und $\neg\exists a_2^{t-1} \in P.\ a_2 \overset{mcp}{\rightarrow} a_1$. Dann kann a_1 auch eine Zeitstufe früher eingefügt sein, also $P' = (P \setminus a_1^t) \cup a_1^{t-1}$ ist konfliktfrei und unterscheidet sich von P nur durch die Zuweisung der Aktionen zu den Zeitstufen.

Falls wiederum die Bedingung $mcp(P')$ nicht gilt, kann dieser Schritt wiederholt werden und wir erhalten ein neues P'. Da die Zahl der Aktionen und Zeitstufen von Prä-Plänen

[1] Bei den in dieser Arbeit verwendeten Blocks World Domänen ist eine Aktion das Versetzen eines Blocks von der Ausgangsposition zur Endposition, ein Greifarm ist nicht Vorgesehen.

endlich ist, erhält man zuguterletzt ein P' mit $mcp(P')$.

□

Satz 4. *Für jede zeitlich explizite Lösung P eines Planungsproblems gibt es genau eine zeitlich explizite Lösung P', mit $mcp(P')$, P' unterscheidet sich von P nur durch die Zuweisung der Aktionen zu den Zeitstufen und P' ist kürzer oder gleich lang wie P.*

Beweis. (Skizze). Der Graph G_P eines zeitlich expliziten Planes P sei folgendermaßen definiert: Die Aktionen von P sind die Knoten und die Beziehungen $\stackrel{mcp}{\rightarrow}$ zwischen Aktionen an früheren Zeitpunkten zu Aktionen an späteren sind die Kanten. Wir bilden Äquivalenzklassen, indem wir Pläne mit gleichem Graphen gleich setzen. Als Repräsentanten jeder Klasse wählen wir denjenigen Plan P_R, der alle Aktionen $a \in P_R$ zum Zeitpunkt $t_a =$ 'Länge des längsten Pfads von INIT zu a' eingefügt sind.

Es wird offensichtlich, daß P_R eindeutig ist, $mcp(P_R)$ gilt und daß P_R einer der kürzesten Mitglieder seiner Äquivalenzklasse ist.

□

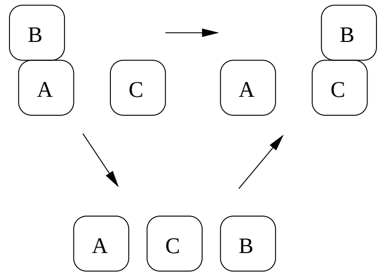
Satz 5. *Zu jeder partiell geordneten Lösung P eines Planungsproblems gibt es genau eine zeitlich explizite Lösung P', mit $mcp(P')$.*

Beweis. (Skizze). Da sich die Ordnung eines partiell geordneten Planes P genau aus den Abhängigkeiten ergibt, die auch zur Definition von $\stackrel{mcp}{\rightarrow}$ verwendet wurden, ist der Graph G_P die partielle Ordnung von P. Nach Satz 4 gibt es zu jedem solchen Graph genau einen Plan, der die mcp-Bedingung erfüllt. □

Der Suchraum von Planungsproblemen wird nicht nur durch Vertauschungen sondern auch durch ersetzbare Aktionen vergrößert.

Ausschluß von ersetzbaren Aktionssequenzen

Viele Domänen haben die Eigenschaft, daß die direkte Hintereinanderausführung ihrer Aktionen (*Sequenzen*, $\circ$) durch eine einzelne Aktion ersetzt werden kann. Durch Ausschließen solcher Sequenzen kann der Suchraum eingeschränkt werden, wobei die verbleibenden Lösungen weniger Aktionen enthalten und kürzer sein können. Auf Grund der Komplexität der Berechnung ersetzbarer Sequenzen behandelt die RAS-Strategie (replacable action sequences) nur Sequenzen der Länge zwei.



Anstelle Block B erst auf den Tisch und dann auf Block C zu stellen, kann man ihn auch direkt dorthin bewegen.

Um für einen Plan sicherzugehen, daß eine Sequenz $a_1 \circ a_2$ durch eine Aktion a_3 ersetzt werden kann, muß garantiert werden, daß zu jeder Lösung P eine Lösung P' existiert, so daß P und P' sich nur durch die Ersetzung von $a_1 \circ a_2$ durch a_3 unterscheidet.

Für einen *linearen* Plan kann man definieren:

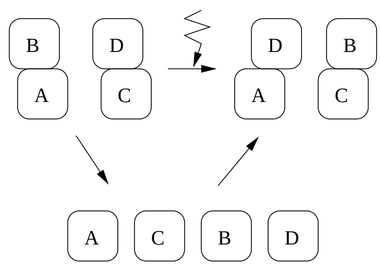
Definition 6. $a_1 \circ a_2 =_{lin} a_3 \quad \equiv$
$pre(a_3) \subseteq pre(a_1) \cup (pre(a_2) \setminus add(a_1)) \wedge$
$(add(a_1) \setminus del(a_2)) \cup add(a_2) \subseteq add(a_3) \wedge$
$del(a_3) \subseteq (del(a_1) \setminus add(a_2)) \cup del(a_2) \wedge$
$del(a_1) \cap pre(a_2) = \emptyset$

Satz 7. *Sei*
$P = \{\text{INIT}^0, a^1_{i_1}, \ldots, a^t_1, a^{t+1}_2, a^{t+2}_{i_{t+2}}, \ldots, \text{GOAL}^n\}$
ein linearer Plan und $a_1 \circ a_2 =_{lin} a_3$. *Dann ist*
$P' = \{\text{INIT}, a^1_{i_1}, \ldots, a^t_3, a^{t+1}_{i_{t+2}}, \ldots, \text{GOAL}^{n-1}\}$
auch ein Plan.

Beweis. Trivial, da a_3 nach Definition höchstens die Vorbedingungen der Sequenz $a_1 \circ a_2$ hat, höchstens ihre deaktivierten Effekte deaktiviert und mindestens ihre aktivierten Effekte aktiviert. Es können also durch die Ersetzung keine Konflikte mit Aktionen entstehen, die Zeitstufen kleiner t oder größer $t+1$ zugewiesen sind.

□

Bei parallelen Plänen muß zusätzlich garantiert werden, daß die Ersetzung mit keiner weiteren Aktion eines Planes in Konflikt geraten kann.



Obwohl $=_{lin}$ zwischen den entsprechenden Aktionen gilt kann bei der Verwendung paralleler Pläne in diesem Beispiel keiner der Blöcke B oder D direkt auf das Ziel gesetzt werden.

Definition 8. $a_1 \circ a_2 =_{par} a_3 \quad \equiv$ $a_1 \circ a_2 =_{lin} a_3 \wedge \forall a_4, a_5.$ $kf(\{a_1^t, a_2^{t+1}, a_4^t\}) \wedge kf(\{a_1^t, a_2^{t+1}, a_5^{t+1}\}) \rightarrow$ $kf(\{a_3^t, a_4^t\}) \wedge kf(\{a_3^t, a_5^{t+1}\}) \vee kf(\{a_4^t, a_3^{t+1}\}) \wedge$ $kf(\{a_3^{t+1}, a_5^{t+1}\})$

Satz 9. *Sei P ein Plan mit $a_1^t, a_2^{t+1} \in P$ und sei $a_1 \circ a_2 =_{par} a_3$. Dann ist auch $P' = (P \setminus \{a_1^t, a_2^{t+1}\}) \cup a_3^t$ oder $P'' = (P \setminus \{a_1^t, a_2^{t+1}\}) \cup a_3^{t+1}$ ein Plan.*

Beweis. Da $(a_1 \circ a_2 =_{\text{par}} a_3) \rightarrow (a_1 \circ a_2 =_{\text{lin}} a_3)$, kann die Ersetzung von $\{a_1^t, a_2^{t+1}\}$ keine Konflikte mit Aktionen in Zeitstufen kleiner t oder größer $t+1$ erzeugen, es bleiben nur mögliche Konflikte mit Aktionen in den zu verändernden Zeitstufe. Der zweite Teil der Definition schließt dies aus. $\square$

Durch eine Ersetzung in einem parallelen Plan wird dieser i. A. nicht verkürzt, da zu der Sequenz parallele Aktionen dies verhindern können.

Mengen von sich gegenseitig ausschließenden Propositionen

Bei der Betrachtung einer Blocks World Domäne $\mathcal{A}$ erwarten wir, daß ein Block sich nur an einer Stelle befindet bzw. daß nur ein Block auf einem anderen steht. Entsprechend ist von der Teilmenge $\{\text{on(A,B)}, \text{on(A,C)}, \dots\}$ der Menge Prob($\mathcal{A}$) nur jeweils eine Proposition aktiv. Die Kenntnis und Verwendung von Teilmengen mit dieser Eigenschaft kann für das Planen von großem Nutzen sein.

Das manuelle Suchen und Definieren solcher *Mengen sich gegenseitig ausschließender Propositionen* SMPs (sets of mutually exclusive propositions) kann schwierig sein. Zum Beispiel hat die Flat Tire Domäne von Russell (Russell & Norwig 1995) bei nur 28 Aktionen und 33 Propositionen 15 SMPs der Größe zwei bis vier, die sich mehrfach überschneiden. Außer dem Arbeitsaufwand sie zu finden, muß noch bewiesen werden, daß für sie die oben genannte Eigenschaft gilt.

Die SMP-Strategie umgeht diese Probleme, indem sie es ermöglicht, einen großen Teil der SMPs einer gegebenen Domäne zu berechnen. Sie basiert auf der folgenden Tatsache: Aktiviert eine Aktion a ein inaktives Element p eines SMP M, so muß sie ein aktives Element $q \in M$ deaktivieren, falls es ein solches gibt. Wird dessen Existenz in jedem Fall durch genau eine Vorbedingung erzwungen, so kann die SMP-Strategie dieses SMP finden, es gilt $\{q\} = pre(a) \cap del(a) \cap M$. Die Zahl der aktiven Elemente eines SMPs mit dieser Eigenschaft kann sich also nicht erhöhen. Die Menge der konsumierten Vorbedingungen einer Aktion a, $pre(a) \cap del(a)$, wird im Weiteren durch $cons(a)$ abgekürzt. Im Folgenden wird der Algorithmus der SMP-Strategie skizziert.

Die SMP-Strategie konstruiert SMPs einer Domäne $\mathcal{A}$ rekursiv. Bei jeder Rekursion werden drei Mengen übergeben:

- Die Kandidatenmenge $K \subseteq \text{Prob}(\mathcal{A})$, von der vermutet wird, daß sie Teil eines SMP ist: Weder ist K selbst ein SMP noch wurde gezeigt, daß K nicht Teil eines SMPs sein kann.
- Die Verbotsmenge $V \subseteq \text{Prob}(\mathcal{A})$, für die gilt: Ist K Teilmenge eines SMPs M der Domäne $\mathcal{A}$, so gilt $V \cap M = \emptyset$.
- Die Menge I mit $\forall E \in I.\ E \subseteq \text{Prob}(\mathcal{A})$. Die Elementmengen von I erklären sich folgendermaßen: Aktiviert eine Aktion a eine Proposition eines SMP M, so muß nach der oben genannten Bedingung $|cons(a) \cap M| = 1$ gelten. Dies wird zur Erweiterung von K ausgenutzt. Die Menge I enthält nun die Mengen $cons(a) \cap V$ von Aktionen a, die ein Element aus K aktivieren. Aus ihnen werden die Elemente von V gestrichen, da von diesen schon gezeigt wurde, daß sie keine Erweiterung von K sein können.

Bei dem rekursiven Aufruf wird eine Elementmenge $E \in I$ ausgewählt. Nacheinander wird K durch jedes der Propositionen $p \in E$ erweitert und V bzw. I entsprechend angepaßt: Aus I werden alle Mengen E' gestrichen, die p enthalten und $E' \setminus \{p\}$ erweitert V. Für alle Aktionen a mit $p \in add(a)$ erweitert $cons(a)$ die Menge I. Zuletzt werden alle Elemente von V aus allen Elementmengen von I gestrichen.

Falls I nun die leere Menge *ist*, d. h. alle Aktionen, die ein Element aus K aktivieren auch eines deaktivieren, so ist K ein SMP. Falls I die leere Menge *enthält*, so gibt es eine Aktion, die ein Element aus K aktiviert ohne ein Element aus einem SMP deaktivieren zu können, von der K eine Teilmenge sein könnte. Dies bedeutet, daß K keine Teilmenge eines SMPs sein kann.

Die Rekursion wird gestartet, indem man nacheinander für alle $p \in \text{Prob}(\mathcal{A})$ die Menge $K = \{p\}$, die Menge $V = \{q|a \in \mathcal{A} \wedge \{p, q\} \subseteq add(a)\}$ und die Menge $I = \{cons(a)|a \in \mathcal{A} \wedge p \in add(a)\}$ setzt.

Die SMPs können nur dann uneingeschränkt zur Lösung eines Planungsproblems eingesetzt werden, wenn die Bedingungen in dessen Ausgangssituation beachtet werden. Falls zwei oder mehr Propositionen eines SMPs in einer Ausgangssituation aktiv sind, so kann dies auch in weitern Zeitstufen eines Planes der Fall sein. Eine Möglichkeit dies zu umgehen ist, solche Planungsprobleme zu verbieten. So ist die Blocks World Domäne, die für die Experimente in (Kautz & Selman 1996) verwendet wurde, manuell um SMP-Informationen erweitert worden und erlaubt nur das Stellen entsprechender Probleme.

Verschiedene SMPs haben oft gemeinsame Elemente. So ist die Proposition on(A,B) sowohl Teil des SMPs, das die Einzigartigkeit des Ortes von Block A beschreibt, als auch Teil des SMPs, daß nur einen anderen Block auf A zuläßt. Ein SMP kann daher nur schlecht als mehrwertige Variable gesehen werden, da in Domänen mit extrem verknüpften SMPs die Zahl der Werte dieser Variablen die Zahl der Propositionen übersteigen kann. Z. B. hat eine Blocks World Domäne mit n Blöcken n^2+2n Propositionen und die SMP-Strategie findet $2n$ SMPs, jeweils der Größe $n+1$. Die entsprechenden Variablen hätten zusammen $2n^2+2n$ Werte.

Die vorgestellte SMP-Strategie kann nicht alle SMPs einer Domäne finden. Ein Beispiel dafür sind die SMPs $\{\text{on}(X,Y), \text{on}(Y,X)\}$, wiederum aus der Blocks World Domäne, wobei X und Y zwei verschiedene Blöcke bezeichnen. Da Blöcke unabhängig voneinander platziert werden können, schwankt die Zahl der aktiven Elemente dieser SMPs zwischen Null und Eins, sie kann sich also erhöhen. Durch die Beschränkung auf konsumierende Aktionen wird dieser Fall nicht abgedeckt.

Ergebnisse

Um die Leistungsfähigkeit der vorgestellten Strategien zu demonstrieren, wurden einige Experimente in den Domänen Blocks World und in Logistics durchgeführt. Wie z. B. in (Kautz & Selman 1996) sind nur die reinen Suchzeiten in Sekunden angegeben, gemittelt über 50 Läufe. Die verwendeten Planer sind ProbaPla (Scholz 1997) und SatPlan.

Problem	mit SMP	ohne Strat.	SatPlan
bw_large.a	0.12	13.39	0.77
bw_large.b	0.84	350.43	33.95
bw_large.c	4.51	–	1104.15
bw_large.d	17.20	–	–

Beispiel für die Verwendung der SMP-Strategie. Die Zeiten für SatPlan sind mit der original SatPlan-Distribution mit den Standardeinstellungen unter den selben Bedingungen wie für ProbaPla ermittelt worden und sind in Sekunden angegeben. Die MCP- und die RAS-Strategien wurden nicht verwendet.

Problem	MCP & RAS	ohne MCP	ohne RAS	SatPlan
logistics.a	1.75	20.37	2.27	3.99
logistics.b	3.07	57.04	19.10	4.85
logistics.c	4.55	102.74	21.10	9.35

Beispiel für die Verwendung der MCP- und RAS-Strategie mit dem Planer ProbaPla.

Die Ergebnisse für die Probleme 'bw_large.a' bis 'bw_large.d' zeigen, daß die Verwendung von SMP-Informationen für das Planen nützlich ist. Ohne die SMP-Strategie kann ProbaPla nur die ersten beiden Probleme lösen. Mit der Strategie werden die Lösungen deutlich schneller gefunden als mit SatPlan, obwohl die mit SatPlan verwendete Domäne manuell hinzugefügte SMP-Beziehungen enthält. Die Experimente in der Logistics Domäne zeigen den Effekt der Strategien MCP und RAS.

Der Berechnungsaufwand für die einzelnen Strategien unterscheidet sich stark. Die Analyse der Domäne für 'logistics.c' benötigt 0.09 Sekunden (SMP), 0.02 Sekunden (MCP) bzw. 0.63 Sekunden (RAS), so daß in dieser Domäne alle drei Strategien als Teil des Planers eingesetzt werden können. Die Blocks World Domäne für 'bw_large.d' hat bei 19 Blöcken 6498 Aktionen und 380 Fakten. Die Strategie SMP findet die zugehörigen 38 SMPs in 11 Sekunden während die MCP- und die RAS-Strategie für diese Domäne 131 bzw. 9497 Sekunden benötigen. In dieser Domäne ist nur SMP-Strategie als Teil des Planers sinnvoll, der Aufwand für die beiden anderen ist zu hoch. Da deren Ergebnisse von speziellen Planungsproblemen unabhängig sind, ist ihr Einsatz als Vorverarbeitungsschritt nur *einmal* nötig. Die Analyseergebnisse können für 'kleinere' Domänen verwendet werden, die von der analysierten subsumiert werden. So können z. B. die Analyseergebnisse der

Domäne für das Problem 'bw_large.d' für alle Blocks World Probleme mit bis zu 19 Blöcken verwendet werden.

Diskussion

Heuristiken, die den hier vorgestellten Strategien ähnlich sind, sind schon in verschiedenen Planern eingesetzt worden. Zum Beispiel wird in (Kautz & Selman 1998) beschrieben, daß in der Logistics Domäne ein Laster direkt nach dem Beladen in eine andere Stadt fahren sollte. Die Proposition 'Laster in X' ist eine Vorbedingung der Aktion, die den Laster in X belädt, als auch ein deaktivierter Effekt einer Aktion, die den Laster in eine andere Stadt bewegt. Zwischen Beladen und Fahren hält also die Relation $\stackrel{mcp}{\rightarrow}$. Die MCP-Strategie ist aber keine künstlich hinzugefügte Heuristik, sondern garantiert das Finden aller solcher Beziehungen.

Daß die Qualität von Plänen der Blocks World Domäne erhöht wird, wenn Züge über den Tisch durch direktere ersetzt werden, ist allgemein bekannt. Ein Beispiel ist die Planungsmethode 'Planning by Rewiting' (Ambite & Knoblock 1997), die u. a. auf der Ersetzung solcher Sequenzen basiert, die dem System manuell beigefügt wurden. Mit der RAS-Strategie ist es möglich, ersetzbare Sequenzen automatisch für eine gegebene Domäne zu berechnen.

Auch die SMP-Beziehung wird als Heuristik verwendent, z. B in der Blocks World Domäne, die für die Experimente in (Kautz & Selman 1996) verwendet wurde. Obwohl die SMP-Strategie nicht alle SMPs einer Domäne berechnen kann, ist sie eine effiziente Möglichkeit einen großen Teil dieser Strukturinformation automatisch zu errechnen und so die Allgemeinheit des Planers zu erhalten.

Die Ergebnisse zeigen, daß die Verwendung der vorgestellten Strategien die Leistung von Planern bedeutend erhöhen kann. Dies gibt Hoffnung auf weitere Erfolge der Arbeit auf diesem Gebiet. Neben dem Finden besser Algorithmen für die Strategien geht unser Interesse in drei Richtungen: das Entwickeln weiterer Strategien, die Verallgemeinerung auf ausdrucksstärkere Domänen und die Anwendung der gesammelten Informationen für eine größere Gruppe von Planungsverfahren.

References

Ambite, J. L., and Knoblock, C. A. 1997. Planning by Rewriting: Efficiently Generating High-Quality Plans. In *Proceedings of the National Conference on Artificial Intelligence (AAAI-97)*.

Blum, A. L., and Furst, M. L. 1995. Fast planning through planning graph analysis. In *Proceedings of the International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-95)*, 1636–1642. San Mateo, CA: Morgan Kaufmann.

Bylander, T. 1994. The Computational Complexity of STRIPS Planning. *Artificial Intelligence Journal* 69:165–204.

Kautz, H., and Selman, B. 1996. Pushing the envelope: Planning, propositional logic, and stochastic search. In *Proceedings of the National Conference on Artificial Intelligence (AAAI-96)*, 1194–1201. Portland, OR: Morgan Kaufmann, San Mateo, CA.

Kautz, H., and Selman, B. 1998. The Role of Domain-Specific Knowledge in the Planning as Satisfiability Framework. In *Proceedings of AIPS-98*.

Russell, S., and Norwig, P. 1995. *Artificial Intelligence, A Modern Approach.* Prentice Hall.

Scholz, U. 1997. Planning by Local Search. Master's thesis, Technische Universität Darmstadt, Fachbereich Informatik, Alexanderstraße 10, 64283 Darmstadt, Germany.