Constraint-basierte Planung und Konfiguration*

D. Boulanger, A. Fordan, U. Geske, H.-J. Goltz, U. John, A. Nareyek, A. Schiemann, A. Wolf
GMD — Forschungszentrum Informationstechnik GmbH
GMD FIRST, Rudower Chaussee 5, D-12489 Berlin

e-mail: {dmitri, fordan, geske, goltz, john, alex, schieman, armin}@first.gmd.de

Zusammenfassung

Für die Lösung von hochkomplexen, kombinatorischen Planungs- und Simulationsproblemen, mit einer Vielzahl nicht zu überschauender Nebenbedingungen, eignen sich Constraint-Logische Verfahren, um gute Pläne mit geringem Aufwand zu berechnen. Es wird gezeigt, daß es mit dieser Methode gelingt, mit Ressourcen - sei es Energie, Material oder auch Personal - entsprechend gegebener Zielgrößen umzugehen. An Beispielen der Begrenzung der Elektro-Spitzenlast in der Multiressourcenplanung und der Konfiguration technischer Geräte mit optimalem Energieverbrauch wird die Methodik demonstriert.

1 Multiressourcen-Planung

Sind bei der Durchlaufterminierung in der Werkstattplanung nicht nur die eingeschränkt verfügbaren Maschinen, auf denen die einzelnen Aufgaben der Aufträge abzuarbeiten sind, zu berücksichtigen, sondern auch Abhängigkeiten von weiteren Ressourcen, liegt ein *Multiressourcenproblem* vor. Derartige eingeschränkt verfügbare und nicht konsumierbare Ressourcen können Werkzeuge, Transportraum, Personal und ähnliches sein. Es kann sich aber auch um konsumierbare Ressourcen handeln, deren Verbrauch eingeschränkt werden soll.

Das Beispiel in Abbildung 1 verwendet als zusätzliche nicht konsumierbare Ressourcen zwei unterschiedliche Arten von Personal, beispielsweise Fachkräfte (Personal 1) und Service-Personal (Personal 2). Im oberen Teil der Abbildung ist der unter Berücksichtigung aller Ressourcen ermittelte Durchlaufplan dargestellt.

Für jede Maschine gilt, daß zur gleichen Zeit nur eine Aufgabe bearbeitet werden kann. Für die Ressource *Personal 2* war vorgegeben, daß sechs Fachkräfte zur Verfügung stehen.

Im mittleren Teil der Abbildung ist die Beanspruchung der Fachkräfte über der Zeit dargestellt. Beispielsweise werden zum Zeitpunkt 40 genau 5 Fachkräfte benötigt, die die Aufgabe 2 des Auftrags 5 (oberes Rechteck), die Aufgabe 3 des Auftrags 6 (Mitte) und die Aufgabe 3 des Auftrags 4 (unten) zu bearbeiten haben (diese Aufgaben laufen auf den Maschinen 2, 6 und 3; s.a. im oberen Teil der Abbildung). Die Anzahl der Fachkräfte, die für die Durchführung einer

*Die dieser Arbeit zugrundeliegenden Forschungsvorhaben `WISPRO - 'Wissensbasierte Produktionsplanung'` und `VERMEIL - 'Verfahren und Methoden zur wissensbasierten Entwicklung zuverlässiger Leitsysteme'` werden mit den Mitteln des Bundesministeriums für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie unter den Förderkennzeichen 01 IW 206 A und 01 IN 507 B gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

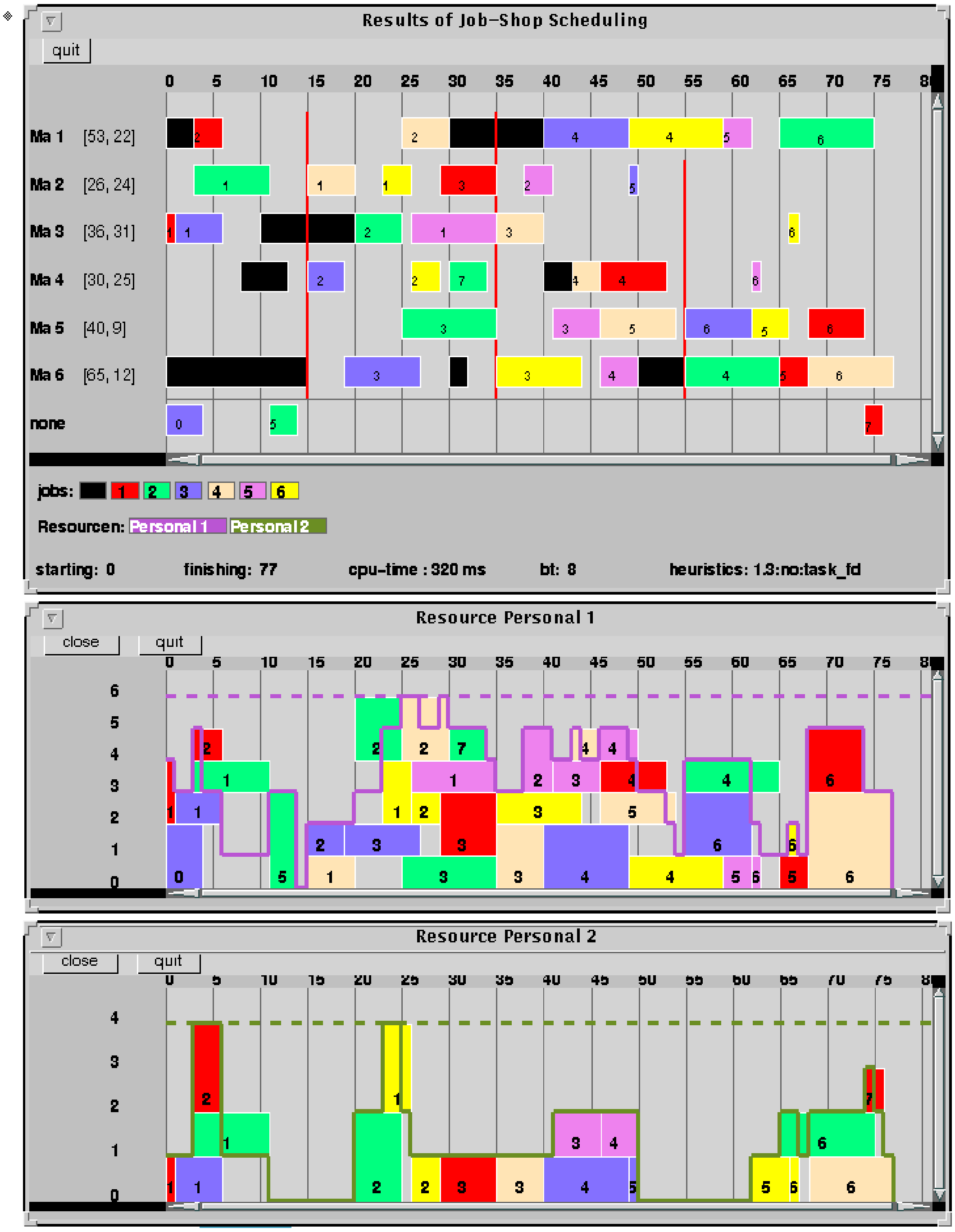

Abbildung 1: Multiressourcenplanung

Aufgabe erforderlich ist, ist durch die Höhe des die Aufgabe kennzeichnenden Rechtecks in der mittleren Abbildung dargestellt. Die Arbeitsaufgabe 2 des Auftrags 5 (oberes Rechteck) benötigt zum Beispiel zwei Fachkräfte (Zeitpunkt 40). Die Rechtecke werden immer zusammenhängend und nichtüberlappend dargestellt. Dadurch sind sie zuweilen außerhalb des einhüllenden Kurvenverlaufs angeordnet, wie z.B. die Aufgabe 2 des Auftrags 2 im Zeitbereich 20 bis 25. Das Ergebnis wird dadurch nicht verfälscht.

Der untere Teil der Abbildung stellt die Beanspruchung des Service-Personals (Personal 2) dar.

In der Problemstellung waren vier verfügbare Servicekräfte vorgegeben.

Nach diesem Schema könnten gleichzeitig weitere Ressourcen betrachtet werden. Inhaltlich ist ihre Anzahl nicht beschränkt, es sind jedoch Speicherplatzgrenzen und bei einer Vielzahl von Ressourcen eventuell auch ansteigende Programmlaufzeiten zu beachten.

Bei unterschiedlicher Wahl der Verfügbarkeiten von Personal 1 und Personal 2 kann der Einfluß auf die Durchlaufzeit aller Aufträge simuliert werden. Beispielsweise muß damit gerechnet werden, daß die Durchlaufzeit auf 96 Zeiteinheiten ansteigt, wenn nur 3 Fachkräfte und 2 Servicekräfte zur Verfügung stehen.

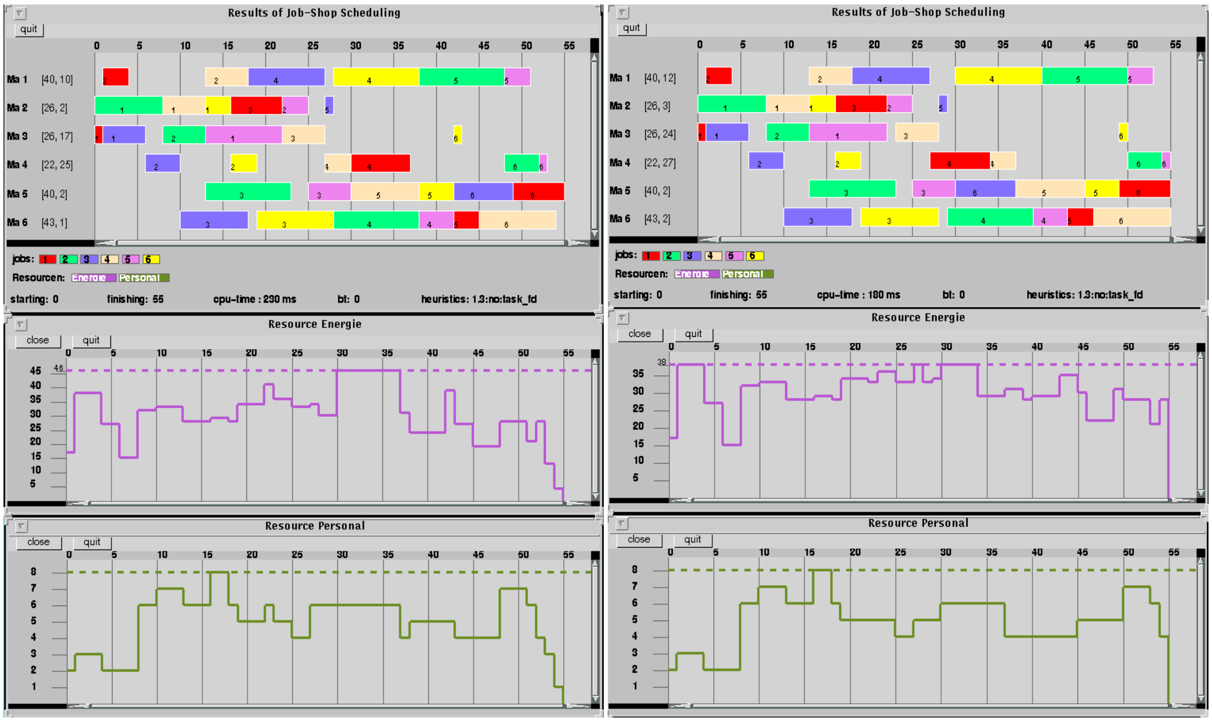

Abbildung 2: Multiressourcenplanung ohne (links) und mit (rechts) Energiekostenoptimierung

Die beschriebene Planungsoption der Multiressourcenplanung ermöglicht es, eine Lösung hinsichtlich einer eventuell eingeschränkt verfügbaren Ressource zu optimieren.

Es ist auch möglich, wie oben bereits erwähnt, ein konsumierbare Ressource (im allgemeinen eigentlich eine uneingeschränkt verfügbare Ressource) analog zu behandeln, wenn sie einer Einschränkung hinsichtlich ihres Verbrauchs unterworfen ist. Konsumierbares Material kann, z.B. bedingt durch die notwendigen aber begrenzten Zuführungs- oder Transportkapazitäten, nur bis zu einer gewissen Höchstmenge verbraucht werden oder Energie soll bewußt gleichmäßig genutzt werden, um Schaltanlagen klein zu halten oder um schonend und umweltbewußt mit dieser Ressource umzugehen.

Im linken Teil der Abbildung 2 ist ein Produktionsplan dargestellt, der, neben den sechs Maschinen zu seiner Ausführung innerhalb von 55 Zeiteinheiten, an zusätzlichen Ressourcen acht Bediener (Personal) und 46 Leistungseinheiten benötigt. Allein durch die zusätzliche

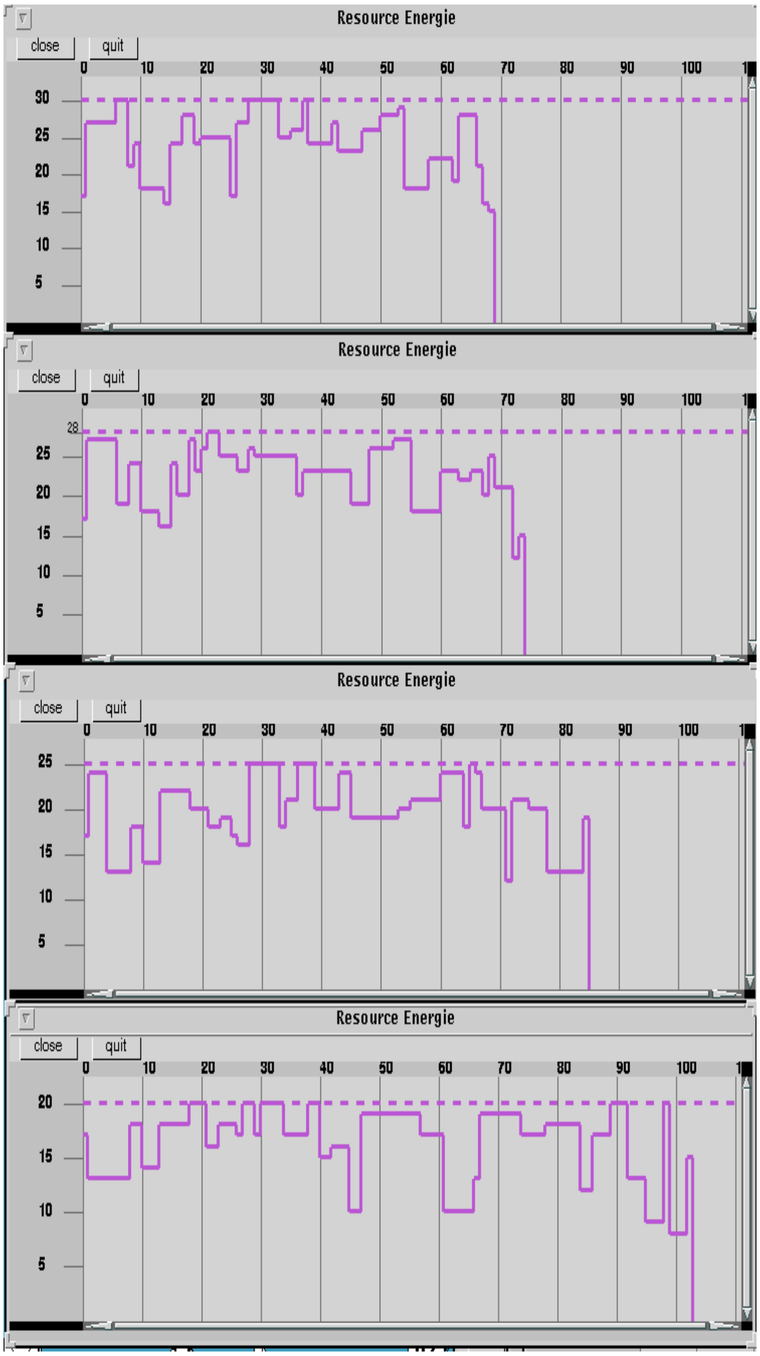

Abbildung 3: Multiressourcenplanung mit Priorität bei der Energiekosteneinsparung

Einbeziehung des Energieverbrauchs in die Modellierung der Problemstellung liefert die verwendete constraintlogische Methodik eine Reduzierung um acht Einheiten. Der Ablaufplan, der Fertigstellungstermin (55 Zeiteinheiten) und die erforderliche Personalmenge bleiben unverändert (vergl. auch Abbildung 2, rechts).

Unter der Annahme, daß die Energieverteilung, z.B. wegen der Kosten (großer Leistungsspitzen) oder wegen der (zu) geringen Auslegung der Energieversorgungsanlage, das hauptsächliche Optimierungskriterium ist, gelingt es sogar, die Spitzenlast auf 20 Einheiten herabzusetzen (s.a. Abb. 3).

Das gelingt allerdings nur unter einer Hinausschiebung des Liefertermins. In dem in den Abbildungen 2 und 3 betrachteten Beispiel ist ein linearer Zusammenhang zwischen der Herabsetzung der Leistungsspitze und der Vergrößerung des Zeitbedarfs festzustellen.

In Abhängigkeit von den Möglichkeiten des Unternehmens kann durch Simulation des Produktionsablaufes mit unterschiedlichen Parametern ein geeigneter Plan gefunden werden. Die kurzen Ausführungszeiten der Simulation (cpu-time) unterstützen diese Herangehensweise. In dem Fall, daß ein funktioneller Zusammenhang zwischen Ressourceneinsparung und Kostenersparnis bekannt ist, könnte unmittelbar eine Darstellung der Kostenersparnis erfolgen.

Die Beherrschung der Komplexität der beschriebenen Probleme erfolgt wesentlich durch die Methode der backtrackbaren Domänenreduzierung [Go 95]. Sie erlaubt darüberhinaus eine problembezogene visualisierte Darstellung der Abarbeitung, die im Zusammenhang mit der Darstellung von Belastungsprofilen, eine interaktive Problembearbeitung unterstützt (s. a. Abb. 4).

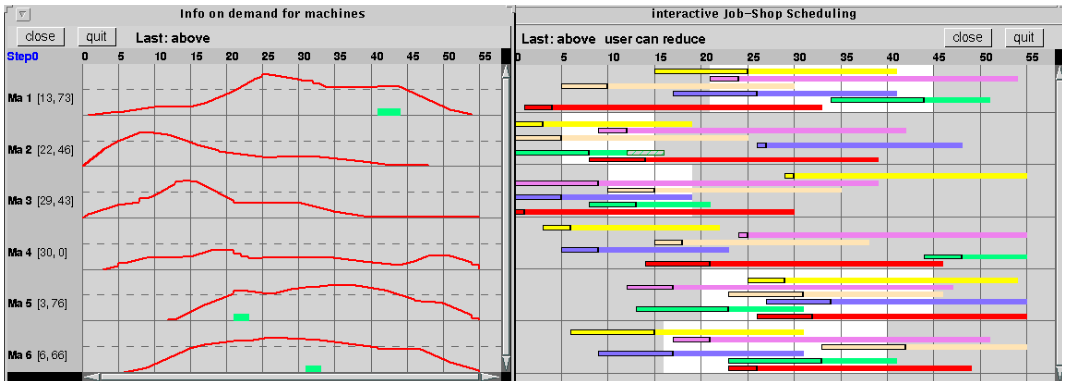

Abbildung 4: System ConPlan: Anfangszustand einer Werkstattplanung; links: Maschinenprofile (zum Teil kritisch); rechts: Zeitfenster (zu reduzierende Domänen) der Teilaufgaben nach der Constraint-Propagation

2 Konfiguration technischer Geräte

In der Abbildung 5 ist mit Hilfe des constraint-basierten Software-Werkzeugs ConBaCon schematisch der Aufbau eines bestimmten Geräts dargestellt. Die Rechtecke symbolisieren die Basis-Komponenten (untere Endpunkte eines Zweiges), Zusammensetzungen von Komponenten (mit ein- und ausgehenden Kanten) und das Endprodukt (an der Spitze des Baums). Die Zahl am Rechteck gibt die Komponentenbezeichnung (codiert) an. Gestrichelte Kanten zeigen alternative Möglichkeiten der Zusammensetzung, durchgezogene Kanten obligatorische oder optionale (blau gefärbt im Orginal) Zusammensetzungen auf. Für die Basiskomponenten gelten die in der Tabelle 1 angegebenen Werte für den jeweiligen Preis und Energieverbrauch der Komponente. Nicht aufgeführt sind in der Tabelle weitere Komponenteneigenschaften, die bei der Konfiguration beachtet werden müssen.

Wird vom Anwender gefordert, daß für das gewünschte Gerät die Constraints gelten sollen, daß der Energieverbrauch kleiner als 50KWh ist und daß der Preis unter 50TDM liegt (s.a. Abbildung 6), so werden von ConBaCon entsprechende Lösungen (im Backtracking) angezeigt. Eine derartige Lösung ist in Abbildung 7 dargestellt (die gefüllten Rechtecke bezeichnen Komponenten, die Bestandteil der ermittelten Lösung sind).

Durch Veränderung der Parameter kann durch weitere Simulationsläufe eine Konfiguration mit einem für die Unternehmensziele geeignet erscheinenden Verhältnis von Kosten und Energieverbrauch ermittelt werden.

Ein häufiger Fall beim Konfigurieren eines Produkts aus Komponenten ist, daß der Wunsch besteht, die erzielte Lösung nur an bestimmten Stellen zu ändern und den Rest, so wie er ist, beizubehalten. Wegen der angestrebten bzw. erforderlichen Änderung wird die unveränderte Beibehaltung des Restes im allgemeinen nicht möglich sein, weil sich die Änderungen global auswirken werden. Die Zielstellung der Re-Konfiguration besteht darin, den Rest *bestmöglich* beizubehalten, also entsprechend einer verwendeten Fehlerfunktion leichte Änderungen zuzulassen. Ansonsten können entweder die Fälle auftreten, daß keine Lösung möglich ist oder daß eine völlig abweichende Konfiguration ermittelt wird. Technisch wird die erwähnte Vorgehensweise durch die Einführung von 'weichen' (abgestuft verletzbaren) Constraints (Soft-Constraints) erreicht.

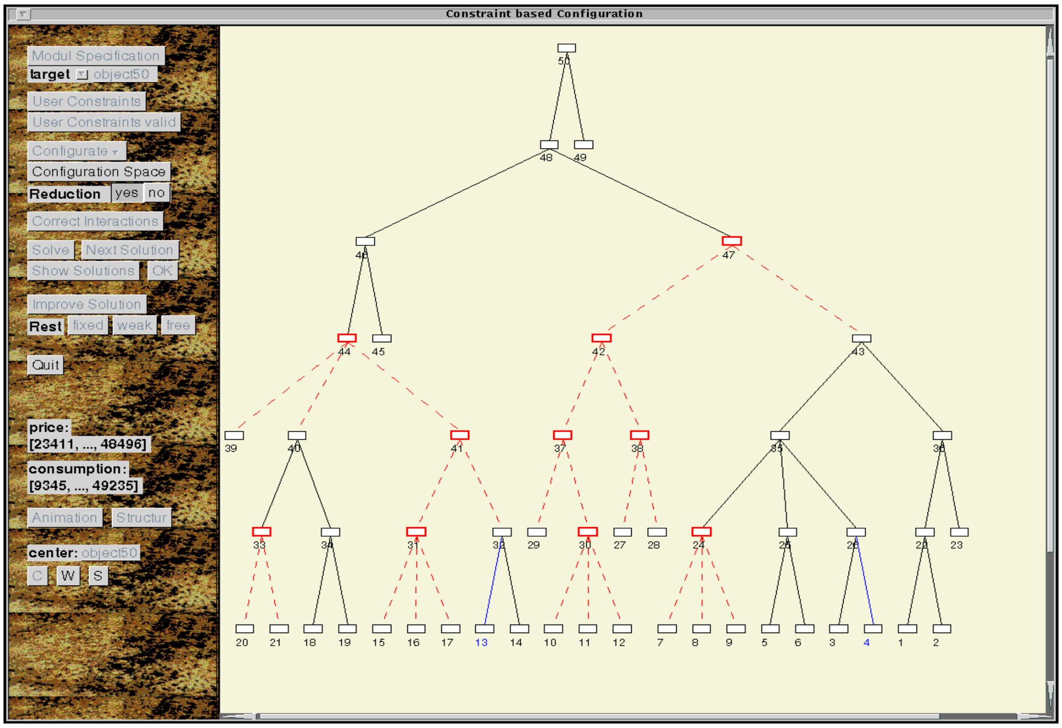

Abbildung 5: System ConBaCon: Spezifikation eines Geräts

In einem angenommenen Szenario wollen wir davon ausgehen, daß die in der Abbildung 7 gezeigte Lösung vom Kunden im wesentlichen akzeptiert wird, daß er aber zusätzlich zu seiner ursprünglichen Gerätespezifikation jetzt noch den Austausch der Komponente 40 (Mitte links in

Komponente	Preis	Energieverbrauch
Nr.	DM	KWh
1	18513	9830
2	5436	7581
3	9893	5811
4	16015	4977
5	17313	8930
6	7003	296
7	8472	7228
8	11771	6438
10	5054	6194
11	3124	2349
12	18003	7
13	8460	9075
14	8386	3862
15	18455	1233
16	4562	3852
17	4773	2584
18	393	18490
19	3758	7452
20	7399	6590
21	9746	2644
23	7475	3325
27	9588	174
28	14813	2945
29	321	7293
39	4447	34936
45	13147	7687

Tabelle 1: Energieverbrauch und Preis der Basiskomponenten

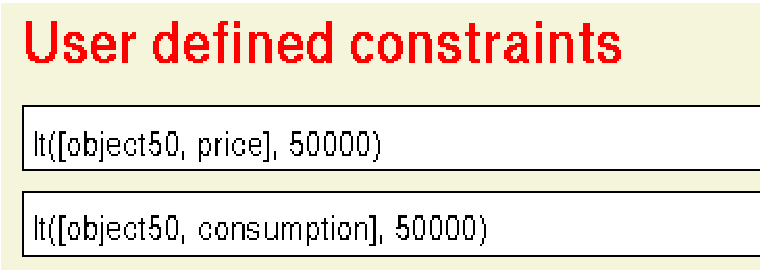

Abbildung 6: Anwender-Constraints

der Lösung) durch die Komponente 39 für erforderlich hält. Dabei sollen die Struktur der Lösung und die anderen enthaltenen Komponenten möglichst beibehalten werden. In der Abbildung 8 ist die unter Verwendung von weichen Constraints ermittelte geänderte Konfiguration dargestellt. Es ist zu erkennen, daß die geänderte Konfiguration bis auf die gewünschte Änderung und den Austausch von Komponente 29 durch die Komponente 30 ähnlich ist. Dieser Austausch resultiert daraus, daß Komponente 29 den Energieverbrauch über 50KW bringen würde und deshalb ersetzt werden muß.

In der Abbildung 9 ist dargestellt, wie das Resultat der herkömmlichen Vorgehensweise aussehen

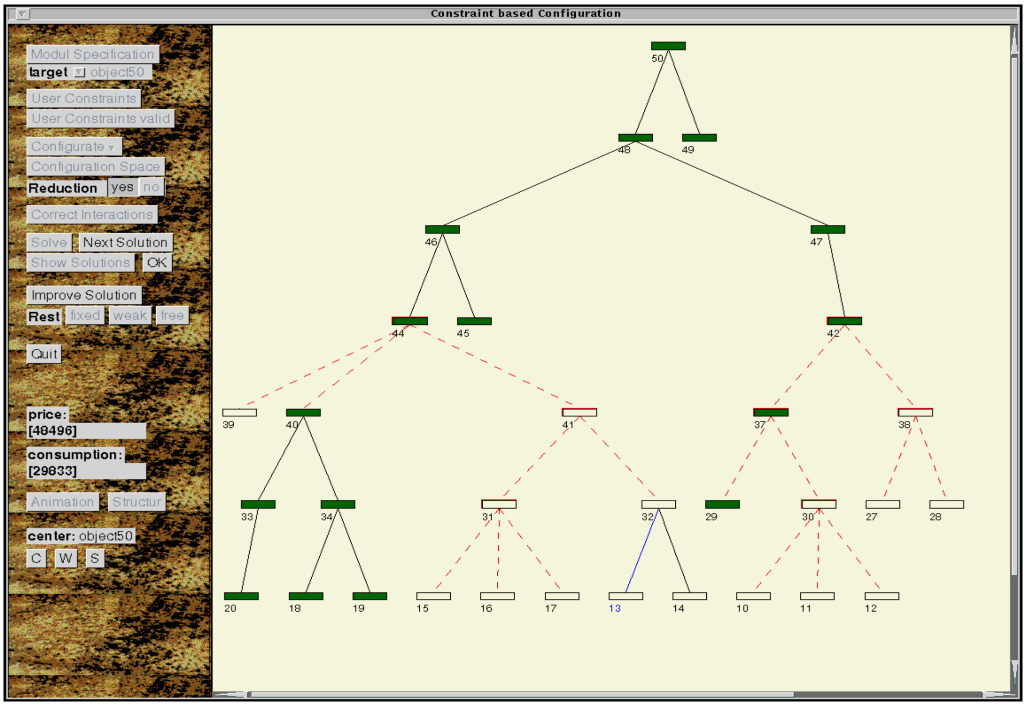

Abbildung 7: Ermittelte Konfiguration eines Produkts

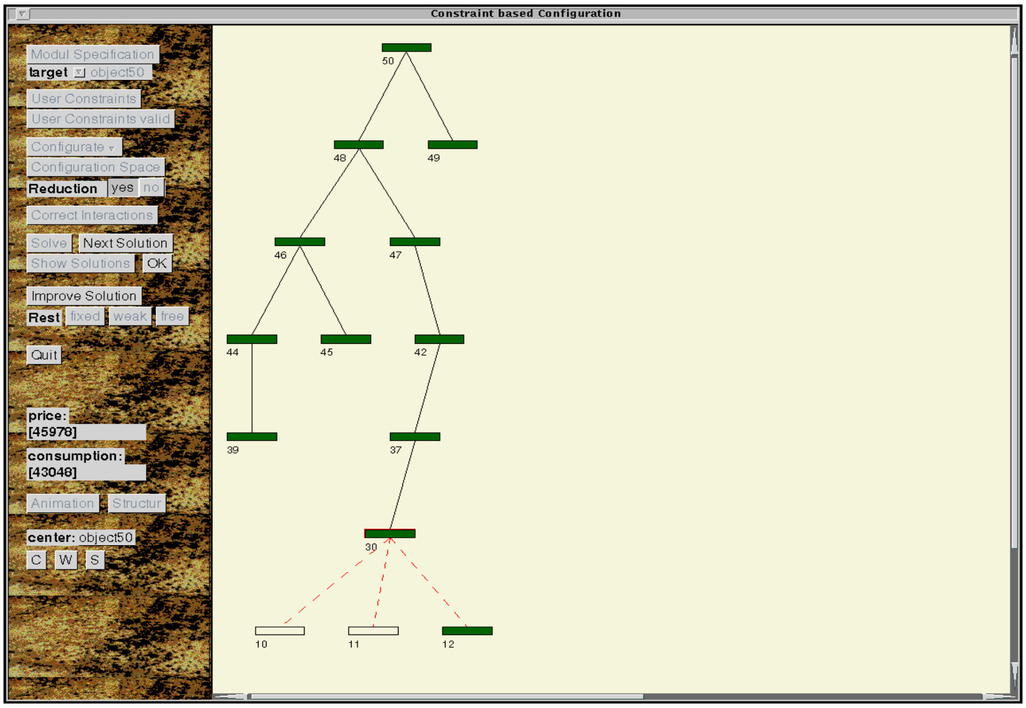

Abbildung 8: Re-Konfiguration mit weichen Constraints

würde. Der vorher beschriebene Komponentenaustausch (39 für 40) ist auch hier erfolgt, aber insgesamt weichen Struktur und Komponenten der geänderten Konfiguration erheblich von der Wunschkonfiguration ab und wären nur mit erheblichem Aufwand daran anzupassen.

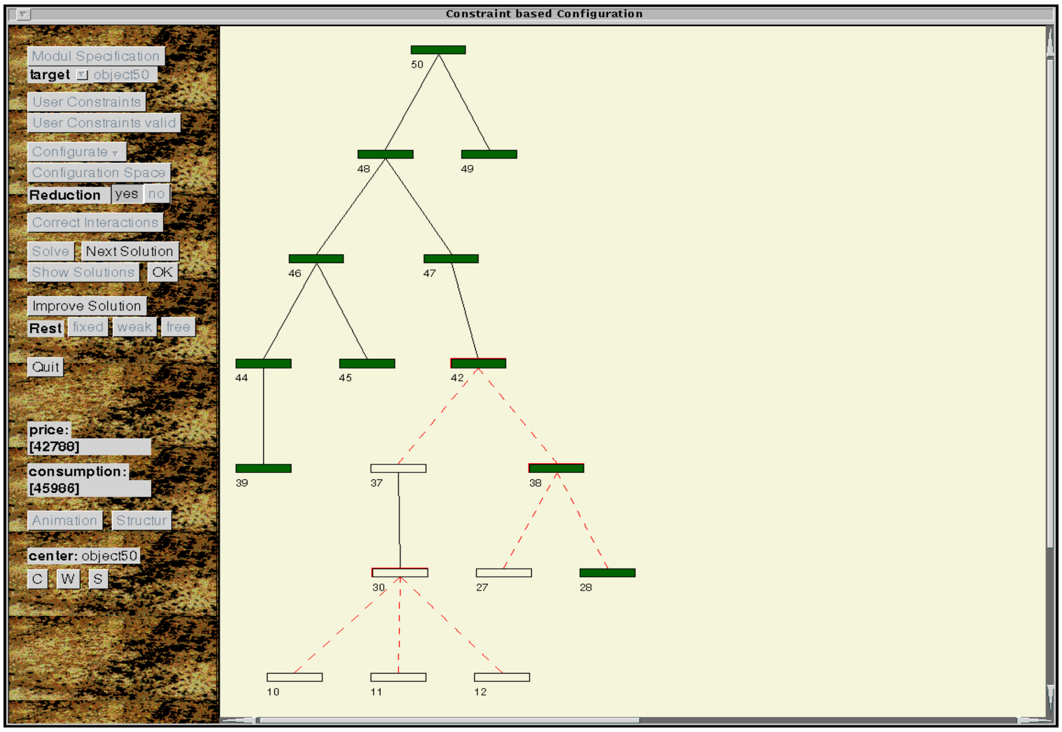

Abbildung 9: System ConBaCon: Re-Konfiguration unter ausschließlicher Verwendung harter Constraints

Die beschriebenen Vorteile der Verwendung weicher Constraints lassen sich auch bei dem Neuentwurf einer technischen Anlage ausnutzen. Damit ist die Spezifikation von Präferenzen, die 'bestmöglich' (aber nicht unbedingt) einzuhalten sind, möglich.

Literatur

[GeFo 97] Geske, Ulrich; Fordan, Andreas: *Using Constraint Logic Programming for Modelling and Simulation of Manufacturing Systems.* Proc. 15th IMACS World Congress, 1997.

[Go 95] H.-J. Goltz: *Reducing domains for search in CLP(FD) and its application to job-shop scheduling.* In: LNCS 976, 1995.

[Go 97b] Goltz, Hans-Joachim: *Redundante Constraints und Heuristiken zum effizienten Lösen von Problemen der Ablaufplanung in CHIP.* Proc. 12. Workshop Logische Programmierung (WLP'97). München, Sept. 1997.

[Hege 97] Hegewald, Annekatrin: *Behandlung eines Zuteilungsproblems in der constraintlogischen Programmierung.* Arbeitspapiere der GMD Nr.1074, GMD, 53754 Sankt Augustin, Mai 1997.

[SchJGB] Schiemann, André; John, Ulrich; Geske, Ulrich; Boulanger, Dmitri: *Realisierung und Anwendung von Constraint-Hierarchien für die Konfiguration technischer Systeme in ConBaCon.* Proc. 12. Workshop Logische Programmierung (WLP'97). München, Sept. 1997.

[Wo 97] Wolf, Armin: *Adaptiv-inkrementelle Unifikation.* Proc. 12. Workshop Logische Programmierung (WLP'97). München, Sept. 1997.