

Schirmer, Andreas; Potzahr, Kathrin

**Working Paper — Digitized Version**

## Lehrgangsplanung für die Ausbildung von Verkehrsflugzeugführern: Ergebnisse einer Studie bei Lufthansa Flight Training

Manuskripte aus den Instituten für Betriebswirtschaftslehre der Universität Kiel, No. 538

**Provided in Cooperation with:**

Christian-Albrechts-University of Kiel, Institute of Business Administration

*Suggested Citation:* Schirmer, Andreas; Potzahr, Kathrin (2001) : Lehrgangsplanung für die Ausbildung von Verkehrsflugzeugführern: Ergebnisse einer Studie bei Lufthansa Flight Training, Manuskripte aus den Instituten für Betriebswirtschaftslehre der Universität Kiel, No. 538, Universität Kiel, Institut für Betriebswirtschaftslehre, Kiel

This Version is available at:

<https://hdl.handle.net/10419/147616>

**Standard-Nutzungsbedingungen:**

Die Dokumente auf EconStor dürfen zu eigenen wissenschaftlichen Zwecken und zum Privatgebrauch gespeichert und kopiert werden.

Sie dürfen die Dokumente nicht für öffentliche oder kommerzielle Zwecke vervielfältigen, öffentlich ausstellen, öffentlich zugänglich machen, vertreiben oder anderweitig nutzen.

Sofern die Verfasser die Dokumente unter Open-Content-Lizenzen (insbesondere CC-Lizenzen) zur Verfügung gestellt haben sollten, gelten abweichend von diesen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

**Terms of use:**

*Documents in EconStor may be saved and copied for your personal and scholarly purposes.*

*You are not to copy documents for public or commercial purposes, to exhibit the documents publicly, to make them publicly available on the internet, or to distribute or otherwise use the documents in public.*

*If the documents have been made available under an Open Content Licence (especially Creative Commons Licences), you may exercise further usage rights as specified in the indicated licence.*

Manuskripte  
aus den  
Instituten für Betriebswirtschaftslehre  
der Universität Kiel

Nr. 538

**Lehrgangsplanung für die Ausbildung  
von Verkehrsflugzeugführern  
- Ergebnisse einer Studie bei  
Lufthansa Flight Training**

Schirmer./Potzahr



**Manuskripte  
aus den  
Instituten für Betriebswirtschaftslehre  
der Universität Kiel**

Nr. 538

**Lehrgangsplanung für die Ausbildung  
von Verkehrsflugzeugführern  
- Ergebnisse einer Studie bei  
Lufthansa Flight Training**

Schirmer, Potzahr

Juni 2001

Dr. Andreas Schirmer <sup>a,b,\*</sup>, Dipl.-Inform. Kathrin Potzahr <sup>c</sup>

<sup>a</sup> Deutsche Lufthansa AG, Informatiksysteme Personal, HAM PI,  
Weg beim Jäger 193, D-22313 Hamburg, andreas.schirmer@dlh.de

<sup>b</sup> Institut für Betriebswirtschaftslehre, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel,  
Wilhelm-Seelig-Platz 1, D-24098 Kiel, Germany, schirmer@bwl.uni-kiel.de

<sup>c</sup> sd&m software design & management AG,  
Lübecker Straße 1, D-22087 Hamburg, kathrin.potzahr@sdm.de

[www.bwl.uni-kiel.de/bwlinstitute/prod/mab/schirmer](http://www.bwl.uni-kiel.de/bwlinstitute/prod/mab/schirmer)

## **Inhalt**

1. Einführung.....	1
2. Ausbildungs- und Schulungsplanung .....	3
2.1. Vorlesungsplanung .....	4
2.2. Schulstundenplanung .....	6
2.3. Konferenzplanung.....	8
2.4. Lehrgangsplanung.....	9
3. Problemstellung .....	12
3.1. Lehrgangsplanung .....	13
3.2. Raumzuordnung .....	16
3.3. Modellierung.....	16
4. Lösungsverfahren.....	18
4.1. Lehrgangsplanung.....	20
4.2. Raumzuordnung .....	24
5. Experimentelle Untersuchung.....	25
5.1. Testdaten.....	25
5.2. Ergebnisse.....	26
6. Zusammenfassung und Ausblick.....	27

**Überblick:** Dieser Beitrag ist der Zeit- und Ressourcenplanung der fliegerischen Theorieausbildung bei der Lufthansa Flight Training GmbH (LFT) gewidmet. Gemeinsamkeiten mit ähnlichen Problemen anderer Schulungsanbieter veranlaßten uns, diese als Elemente eines eigenständigen Problemfeldes zu betrachten, der Lehrgangsplanung. Der Vergleich mit anderen Gebieten der Ausbildungs- und Schulungsplanung läßt jedoch erkennen, daß die Lehrgangsplanung in ihren Anforderungen deutlich komplexer ist als traditionelle Problemfelder, und begründet damit den Bedarf an geeigneten Lösungsverfahren. Anhand der Problemstellung der LFT haben wir daher beispielhaft Verfahren erarbeitet; diese verwenden diverse algorithmische Ansätze für den Aufbau und die anschließende Verbesserung von Lehrgangsplänen, für die dann mit weiteren Verfahren geeignete Raumzuordnungen entwickelt und verbessert werden. Gemeinsam liefern die Algorithmen Lösungen, die im Hinblick auf alle betrachteten Ziele erheblich besser abschneiden als die von erfahrenen Planern der LFT manuell erstellten Pläne. Ferner benötigt die algorithmische Planung nur Minuten, um die endgültigen fünf Alternativvorschläge zu ermitteln, während die manuelle Planung mehrere Beschäftigungstage beansprucht. Außerdem sind die Verfahrensideen hinreichend allgemein, so daß sie ohne allzugroßen Aufwand an andere Probleme der Lehrgangsplanung angepaßt werden können. Im Ergebnis ist der Nachweis gelungen, daß der Einsatz eines methodengestützten Entscheidungssystems für die Lehrgangsplanung bei der LFT möglich und sinnvoll ist.

**Stichworte:** Entscheidungsunterstützung; Lehrgangsplanung; Ausbildung; Schulung; Luftfahrt

*"A planning question, after all, is likely to have an answer."  
(Solow 1963)*

## 1. Einführung

Der Lufthansa-Konzern beschäftigt etwa 70.000 Mitarbeiter und ist damit einer der größten Luftfahrt-Konzerne weltweit. Innerhalb der Muttergesellschaft Deutsche Lufthansa AG gehören etwa 14.000 Mitarbeiter zum fliegenden Personal; von ihnen arbeiten rund 3.000 im Cockpit, weitere 11.000 gehören dem Kabinenpersonal an. Die ausschließlich intern durchgeführte Aus- und Weiterbildung des fliegenden Personals besitzt bei der Lufthansa eine lange Tradition und wird als einer der entscheidenden Faktoren für die Sicherheit des Flugbetriebs und das Wohlergehen der Fluggäste gesehen. Seit 1997 sind alle diesbezüglichen Aktivitäten in der Lufthansa Flight Training GmbH (LFT) zusammengefaßt. Neben der Lufthansa selbst umfasst die Kundenliste etwa 50 weitere Fluggesellschaften sowie etwa ein Dutzend andere Unternehmen und Organisationen. Zentraler Bestandteil der LFT ist die Verkehrsfliegerschule, die seit ihrer Gründung im Mai 1956 Flugschüler bis zum Erwerb der Lizenz für Verkehrsflugzeugführer (Airline Transport Pilot License oder kurz ATPL) führt. Neben dieser zivilen Ausbildung liegt seit 1963 auch die fliegerische Ausbildung der Nachwuchsflugzeugführer für Transportflugzeuge der deutschen Luftwaffe und Marine in den Händen der LFT. Mittlerweile hat die Verkehrsfliegerschule mehr als 5000 Piloten ausgebildet. Die Schule verfügt über etwa 200 Mitarbeiter, von denen etwa ein Drittel Fachlehrer sind.

Die Ausbildung gliedert sich in alternierende Theorie- und Praxisphasen: Die Theorieausbildung findet im wesentlichen an der Verkehrsfliegerschule in Bremen statt; die praktische Flugausbildung wird aus klimatischen (etwa 360 Tage pro Jahr gute Flugwetterbedingungen) und wirtschaftlichen Gründen überwiegend in Arizona durchgeführt, wo die LFT über entspre-

chende Einrichtungen, einschließlich einer Flotte von Schulflugzeugen unterschiedlicher Muster, verfügt. Für jeden Lehrgang sind die Schulungsinhalte in einem sog. Syllabus beschrieben, der die zu unterrichtenden Fächer, deren Untergliederung in Themen sowie die Anzahl der jeweiligen Unterrichtseinheiten, also den vorgesehenen Stundenumfang, festlegt. Aufgrund der langen Dauer der Ausbildung - etwa 22 Monate bis zum Erreichen der ATPL - werden die Inhalte jedes Lehrgangs individuell zusammengestellt. Dies erlaubt einerseits, Änderungen in den Gesetzen für die Lizenzierung von Luftfahrtpersonal zu berücksichtigen, andererseits kann so gezielt Kundenwünschen entsprochen werden. Gegenwärtig umfasst die Theorieausbildung insgesamt 1248 Unterrichtseinheiten à 45 Minuten, die Gesamtdauer der Theorieausbildung beläuft sich damit auf etwa 208 Arbeitstage zuzüglich einiger Puffertage, die es auch im Fall unvorhergesehener Ereignisse erlauben sollen, terminliche Eckpunkte der Planung einzuhalten.

Der vorliegende Beitrag befaßt sich mit der Planung der gesamten fliegerischen Theorieausbildung innerhalb der LFT. Die Problemstellung besteht darin, alle vier Wochen einen Lehrgangsplan zu entwickeln, der für jeden Lehrgang festlegt, wann und wo welches Thema von welchem Lehrer unterrichtet wird. In der Praxis einsatzbare Pläne müssen sieben unterschiedlichen, teils konfliktären Zielsetzungen gerecht werden und dabei diverse komplexe Anforderungen erfüllen. Bisher erfolgt die Planung in einem langwierigen, manuellen Verfahren, das fünf Fachgruppenleiter jedesmal für fast einen ganzen Tag beansprucht; pro Jahr summiert sich der Aufwand damit auf etwa 55 Beschäftigungstage. Ein weiterer Mitarbeiter ist ausschließlich mit Planadministration und -umsetzung beschäftigt; von seiner Arbeitszeit werden etwa 50%, also etwa 110 Beschäftigungstage pro Jahr, durch Aufgaben beansprucht, die direkt durch den gegenwärtigen Planungsablauf verursacht sind. Dauer und Aufwand dieses Prozesses bedingen, daß jedes Mal nur ein einziger zulässiger Plan entwickelt wird.

Seit langem erschien es der LFT jedoch als wünschenswert, unterschiedliche Planungsstrategien anwenden zu können, um dann aus den resultierenden Plänen einen besonders geeigneten auszuwählen; angesichts der national wie international stark steigenden Nachfrage nach Piloten und der damit verbundenen hohen Auslastung der Verkehrsfliegerschule gewann dieser Wunsch zusätzlich an Bedeutung. Um Abhilfe zu schaffen, hatte man einige Jahre zuvor ein externes Softwarehaus mit der Entwicklung eines computergestützten Planungssystems beauftragt - einer Aufgabe, die das Softwarehaus nach eingehender Prüfung als "unmöglich" bezeichnet hatte. Ebenso hatte die LFT mehrere am Markt erhältliche Softwarepakete zur Schulstundenplanung untersucht, die sich jedoch sämtlich als für die Besonderheiten des Problems ungeeignet herausstellten. Vor diesem Hintergrund hatte die LFT uns mit der Durchführung einer Machbarkeitsstudie beauftragt. In einem Team aus Mitarbeitern der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel sowie der LFT sollte die Eignung von Methoden des Operations Research zur Lösung des Problems geklärt werden. Im einzelnen verfolgte die Studie folgende Zielsetzungen:

- Erzeugung praktisch einsetzbarer Lehrgangspläne, d.h. Berücksichtigung aller Nebenbedingungen (dies gilt ebenso für die manuelle Planung)
- Verkürzung der Planungszeit gegenüber der bisherigen, manuellen Planung
- Verbesserung der Qualität gegenüber der manuellen Planung, d.h. bessere Erreichung der Planungsziele
- Erzeugung mehrerer alternativer Lehrgangspläne

Alle diese Ziele wurden erreicht; im Ergebnis ließ sich u.a. nachweisen, daß eine algorithmisch gestützte Planung erhebliche Verbesserungen sowohl der Planungsergebnisse als auch der Planungszeiten bewirken kann.

Abschließend skizzieren wir den Aufbau unseres Beitrages. Auf dem Gebiet der Ausbildungs- und Schulungsplanung sind viele innovative und interessante Lösungsansätze vorgeschlagen worden; jedoch gehört das Problem der LFT bei näherer Betrachtung keinem der klassischen Problemfelder an, so daß eine Übertragung bisheriger Ansätze nicht erfolgversprechend erschien. Wir belegen dies in Abschnitt 2 anhand eines Überblicks über die relevante Literatur. Dabei beleuchten wir vor allem die Beziehung zwischen den klassischen Problemfeldern des Gebiets und einem neuen Feld, das wir als Lehrgangsplanung bezeichnen; wir werden sehen, daß das Problem der LFT diesem neuen Feld zuzurechnen ist. Abschnitt 3 ist einer detaillierten Darstellung dieses Problems gewidmet, für das wir in Abschnitt 4, als funktionalen Kern eines methodengestützten Entscheidungsunterstützungssystems, mehrere gezielt entwickelte Lösungsverfahren vorstellen, denen Komponenten wie heuristische Konstruktion, Nachbarschaftssuche sowie ein graphentheoretische basierter Algorithmus zugrundeliegen. In Abschnitt 5 vergleichen wir die algorithmische Planung und die bisher manuell durchgeführte Planung der LFT anhand der Güte ihrer Ergebnisse. Einige Bemerkungen in Abschnitt 6 beschließen den Beitrag.

## **2. Ausbildungs- und Schulungsplanung**

Die Ausbildungs- und Schulungsplanung umfaßt ein weites Feld unterschiedlicher Anwendungen. Mooney et al. (1996) charakterisieren den gemeinsamen Kern aller dieser Anwendungen abstrakt als ein Planungsproblem, in dem die einzuplanenden Aufgaben für Treffen verschiedener Beteiligter stehen. Zu den Ressourcen, die dabei berücksichtigt werden müssen, gehören etwa Lehrer, Unterrichtsräume und Gruppen von Teilnehmern. Konkret zählen damit zahlreiche Probleme der Schulstundenplanung, Vorlesungsplanung und Konferenzplanung zu diesem Feld. Eine Vielzahl von Artikeln ist insbesondere in den letzten 15 Jahren auf diesem Gebiet veröffentlicht worden, die überwiegende Mehrzahl beschäftigt sich mit Aspekten der Vorlesungs- oder der Schulstundenplanung. Im folgenden geben wir einen Abriß der Literatur, soweit

diese für unser Problem relevant ist. Detailliertere Einführungen in die Materie geben etwa Schmidt, Ströhlein (1980), de Werra (1985) und Schaerf (1999). Um die strukturellen Gemeinsamkeiten und Unterschiede zwischen den genannten Problemfeldern deutlicher herausarbeiten zu können, verwenden wir einige zentrale Begriffe, nämlich Kurs<sup>1</sup>, Lehrer, Periode, Fach und Thema durchgängig; soweit notwendig, geben wir innerhalb der einzelnen Problemfelder jeweils spezifische Interpretationen für diese Begriffe an. Generell wollen wir unter einem Fach eine durch eine inhaltliche Klassifizierung bestimmte Untermenge von Ausbildungs- oder Unterrichtsstoff verstehen (im Kontext der Schulstundenplanung etwa zählen dazu konkret einzelne Schulfächer wie Mathematik oder Geschichte); hierzu tritt unter Umständen eine feinere Unterteilung des Stoffes einzelner Fächer in mehrere Themen.

## 2.1. Vorlesungsplanung

### *Planungsgegenstände*

Die Vorlesungsplanung (Tripathy 1984; Aubin, Ferland 1989; Kang, White 1992; Sampson et al. 1995) beschäftigt sich mit der Planung von Lehrveranstaltungen an Universitäten, Hochschulen und vergleichbaren Institutionen. Konkret bedeutet dies, eine geeignete Zuordnung von Lehrern und Kursen zu Räumen und Perioden zu konstruieren (den Begriff "geeignet" werden wir weiter unten unter der Überschrift "Nebenbedingungen" operationalisieren).

### *Interpretationen*

Dabei steht der Begriff Lehrer stellvertretend für Professoren, externe Dozenten und andere Lehrkräfte, die Lehrveranstaltungen abhalten. Perioden im Sinne der Planung haben die Länge jeweils einer Vorlesungsstunde. Der Planungshorizont umfaßt eine Woche, die Planung wird jeweils für ein neues Semester erneut durchgeführt. Mit dem Begriff Kurs bezeichnen wir eine Gruppe von Teilnehmern (Studenten), die der Wunsch (oder die Notwendigkeit) verbindet, eine Lehrveranstaltung zu einem bestimmten Thema zu besuchen (da für Planungszwecke eine Einteilung des in einem Studiengang angebotenen Stoffes lediglich in Fächer zu grob wäre, werden Fächer hier nicht betrachtet). Im Kontext der Vorlesungsplanung werden zahlreiche Themen - insbesondere der Propädeutik - in mehreren Veranstaltungen (Übungen) behandelt und von mehreren Lehrern (wissenschaftliche Mitarbeiter, wissenschaftliche Hilfskräfte) gegeben. Dennoch gehen die meisten Autoren davon aus, daß jede Lehrveranstaltung ihren eigenen Teilnehmerkreis besitzt und einem spezifischen Thema gewidmet ist, so daß Kurse und Themen miteinander identifiziert werden können. Diese Annahme ist zumindest dann gerechtfertigt,

---

<sup>1</sup> Wir wählen den Begriff "Kurs" aus zwei Gründen. Zum einen umfaßt sein Bedeutungsfeld sowohl den Lehrgang oder Ausbildungskursus als auch die Gruppe der entsprechenden Teilnehmer. Zum anderen besitzt er eine sprachliche Nähe zum englischen Begriff "course", der in der angelsächsischen Literatur weithin Verwendung findet.

wenn die Planung sich auf die Behandlung der Vorlesungen im engeren Sinne konzentriert. Für die Zwecke der Planung muß damit nur einer der beiden Planungsgegenstände Kurse und Themen explizit behandelt werden (wir werden später sehen, daß dies nicht immer der Fall ist); wir haben uns hier für die Kurse entschieden.

### *Zuordnung von Teilnehmern zu Kursen*

Da Studenten den Besuch von Kursen bzw. Lehrveranstaltungen im allgemeinen für einen deutlich längeren Zeitraum (Semester) als den Planungshorizont (Woche) fortsetzen, ist die zeitlich konfliktfreie Zuordnung von Studenten zu Kursen bzw. Lehrveranstaltungen nicht Gegenstand der Vorlesungsplanung. Vielmehr wird diese organisatorische Aufgabe in den meisten Fällen individuell auf jeden Studenten delegiert, der sich jeweils aus dem Angebot in einem Semester eine zeitlich konfliktfreie Teilmenge von Lehrveranstaltungen aussuchen muß, die er besuchen möchte. Etwaige Konflikte muß er dabei nötigenfalls durch eine geeignete Beschränkung der getroffenen Auswahl auflösen.

### *Nebenbedingungen*

Eine Übersicht über die in der Literatur betrachteten Nebenbedingungen findet sich in Tabelle 1. Allen Quellen gemeinsam ist die Forderung, daß Kurse und Räume höchstens einmal pro Periode zugewiesen werden dürfen. Die Unzulässigkeit von Doppelzuordnungen erstreckt sich prinzipiell zwar auch auf die Lehrer; da aber alle Autoren nur diejenigen Lehrveranstaltungen betrachten, die von Professoren gegeben werden, gehört zu jedem Kurs genau ein Lehrer, so daß für Lehrer die Anforderung nicht explizit formuliert werden muß<sup>2</sup>. Alle Kurse müssen eingeplant werden, dabei dürfen diese nur jeweils verfügbaren Räumen zugewiesen werden. Einige Veröffentlichungen berücksichtigen auch die Möglichkeit, daß Lehrer in einigen Perioden nicht verfügbar sind, etwa wegen Urlaub oder anderweitiger Verpflichtungen (Aubin, Ferland 1989; Kang, White 1992). Weiterhin werden in einigen Modellen individuelle Höchstgrenzen für Kurse vorgeschrieben, die die maximale Anzahl der Teilnehmer beschränken (Sampson et al. 1995). Alle Lehrveranstaltungen sind inhaltlich voneinander unabhängig, so daß zwischen ihnen keine Reihenfolgebeziehungen beachtet werden müssen.

---

<sup>2</sup> Offensichtlich konzentrieren sich die Ansätze hier lediglich auf die Planung der knappsten Ressourcen unter den Lehrern. Andere Lehrveranstaltungen können durchaus von mehreren Lehrern durchgeführt werden (beispielsweise können Übungen im Grundstudium im allgemeinen von allen Assistenten und wissenschaftlichen Mitarbeitern eines Lehrstuhls betreut werden), so daß die entsprechenden personellen Ressourcen aus der Sicht der Planung untereinander austauschbar sind und damit mit Kapazitäten größer eins pro Periode zur Verfügung stehen.

### Zielsetzungen

Neben der Zulässigkeit der Lösungen wird lediglich eine einzige weitere Zielsetzung verfolgt: Die Lehrer können Präferenzen sowohl für Räume als für Perioden angeben; folgerichtig wird angestrebt, die Gesamtsumme der Präferenzen zu maximieren. Zielsetzungen und Nebenbedingungen beziehen sich jeweils auf die Klammern () genannten Planungsgegenstände; Anforderungen in eckigen Klammern [] werden nicht in allen Veröffentlichungen berücksichtigt.

Planungsgegenstände	Nebenbedingungen	Zielsetzungen
Lehrer (L)	Vollständige Einplanung (K)	Zulässigkeit
Kurse (K)	Keine Doppelzuordnungen (K, R)	Präferenzmaximierung (L)
Räume (R)	Verfügbarkeit (R)	
Perioden (P)	[Verfügbarkeit (L)] [Kapazitäten (K)]	

*Tabelle 1: Charakteristika der Vorlesungsplanung*

## 2.2. Schulstundenplanung

### Planungsgegenstände

Die Schulstundenplanung (de Gans 1981; Abramson 1991; Cangalovic, Schreuder 1991, 1992; Hertz 1992; Costa 1994; Alvarez-Valdes et al. 1996) befaßt sich mit der Planung von Schulunterricht, d.h. mit der geeigneten Zuordnung von Lehrern, Fächern und Kursen zu Räumen und Perioden.

### Interpretationen

In diesem Kontext steht der Begriff des Lehrers für Schullehrer, Referendare, etc., die mit der Durchführung von Unterricht betraut sind. Unter einem Kurs wollen wir eine Klasse im Sinne einer Gruppe von Schülern verstehen. Eine Periode steht für eine Schulstunde. Wiederum umfaßt der Planungshorizont eine Woche, die Planung wird jeweils für ein Schulhalbjahr durchgeführt. Als Fächer bezeichnen wir hier einzelne Schulfächer wie Mathematik oder Geschichte. Da zahlreiche Fächer in mehreren Kursen unterrichtet werden und von mehreren Lehrern gegeben werden können, lassen sich in der Schulstundenplanung Kurse, Fächer und Lehrer nicht miteinander identifizieren, so daß alle diese Planungsgegenstände explizit behandelt werden müssen. Andererseits brauchen Themen hier nicht weiter betrachtet zu werden, da die Auswahl einzelner Themen innerhalb der zugeordneten Fächer im wesentlichen durch einen übergeordneten Lehrplan geregelt ist und damit nicht Gegenstand der Planung sein kann.

### *Zuordnung von Teilnehmern zu Kursen*

Auch hier bleibt die Zuordnung von Schülern zu Kursen für einen sehr viel größeren Zeitraum als den Planungshorizont unverändert, so daß diese nicht Gegenstand der Schulstundenplanung ist. Anders als bei der Vorlesungsplanung, bei der die Teilnehmer bei ihrer - individuellen - Wahl von Lehrveranstaltungen ihren persönlichen Neigungen oder Interessen folgen, wird die Zusammenstellung von Schülern zu Kursen oder Klassenverbänden jeweils durch eine zentrale Institution innerhalb der Schule, i.a. die Schulleitung bzw. deren Beauftragte, vorgenommen. Aus planerischer Sicht trägt diese Partitionierung der Menge der Schüler erheblich zu einer Komplexitätsreduktion bei: Die zeitlich konfliktfreie Zuordnung von Schülern zu Fächern wird nun nämlich dadurch sichergestellt, daß die Kurse als aggregierte Einheiten nicht zeitgleich mehreren Fächern zugeordnet werden dürfen.

### *Nebenbedingungen*

Da in Schulen die meisten Kurse von mehreren Lehrern gegeben werden können, entfällt gegenüber der Vorlesungsplanung der modelltechnische Vorteil der eindeutigen Abbildung von Kursen auf Lehrer; folglich muß hier - zusätzlich zu den bereits für die Vorlesungsplanung genannten Anforderungen - das bereits für Kurse formulierte Verbot von Doppelzuordnungen explizit auch für die Lehrer formuliert werden. Eine weitere Anforderung zielt auf die zeitliche Kompaktheit der Pläne; sie läßt sich einfach als Nebenbedingung formulieren, indem man Freiperioden nur jeweils zu Beginn oder am Ende eines Tages zuläßt. Wie bereits bei der Vorlesungsplanung berücksichtigen einige Autoren die Abwesenheit von Lehrern in bestimmten Perioden, dasselbe gilt für die Abwesenheit von Klassen (Alvarez-Valdés et al. 1996). Weiterhin werden in einigen Modellen im voraus festgelegte Einplanungen von Fächern (Costa 1994) oder Reihenfolgebeziehungen zwischen einzelnen Themen (Hertz 1992) berücksichtigt. Schließlich versuchen einige Modelle, über Nebenbedingungen für Lehrer und Klassen eine gleichmäßige Verteilung der Unterrichtsstunden zu gewährleisten (de Gans 1981, Hertz 1992, Alvarez-Valdes et al. 1996).

### *Zielsetzungen*

Alle diese Problemstellungen gehören aus formaler Sicht zu den Zulässigkeitsproblemen; neben dem Finden eines zulässigen Planes werden keine weiteren Zielsetzungen verfolgt.

Planungs- gegenstände	Nebenbedingungen	Zielsetzungen
Lehrer (L)	Vollständige Einplanung (K)	Zulässigkeit
Kurse (K)	Keine Doppelzuordnungen (L, K, R)	
Fächer (F)	Verfügbarkeit (R)	
Räume (R)	Kompaktheit (P)	
Perioden (P)	[Verfügbarkeit (L, K)] [Gleichmäßige Verteilung (L, K)]	

*Tabelle 2: Charakteristika der Schulstundenplanung*

### 2.3. Konferenzplanung

#### *Planungsgegenstände*

Die einzige uns bekannte Veröffentlichung zum Thema Konferenzplanung stammt von Eglese, Rand (1987). Obwohl die Parallelen zwischen diesem und den vorher behandelten Problemfeldern nicht auf den ersten Blick augenfällig sind, werden sie deutlich, sobald man für die einzelnen Planungsobjekte geeignete Interpretationen angibt. Die Autoren betrachten die Planung des Besuchs von Veranstaltungen (Vorträgen) einzelner Lehrer (Redner) im Rahmen einer Konferenz. Hierbei ist für jeden Teilnehmer bekannt, welche Vorträge er besuchen möchte. Um den Wünschen aller Interessenten zu entsprechen, kann jeder Vortrag bei genügender Nachfrage mehrfach angeboten werden. Die Problemstellung besteht darin, eine geeignete Zuordnung von Teilnehmern zu Veranstaltungen, Räumen und Perioden zu finden; hierbei wird für Zwecke der Planung jede Veranstaltung durch die Kombination aus Lehrer und Periode bestimmt.

#### *Interpretationen*

Teilnehmer sind die Veranstaltungsbesucher, die eine Konferenz besuchen und an einzelnen ihrer Veranstaltungen teilnehmen möchten. Aufgrund der besonders einfachen Struktur der betrachteten Problemstellung brauchen mehrere der bislang angeführten Planungsgegenstände nicht explizit betrachtet zu werden: Jede Veranstaltung ist genau einem Thema gewidmet, so daß weder Fächer noch Themen expliziter Gegenstand der Planung sind. Einem Kurs würde hier die Menge aller Teilnehmer einer bestimmten Veranstaltung entsprechen; da aber hier jeder Teilnehmer individuell verplant wird, werden auch Kurse nicht explizit geplant. Jede Veranstaltung kann nur von einem bestimmten Lehrer gehalten werden; für die Zuordnung von Lehrern zu Veranstaltungen müssen also - wie bei der Vorlesungsplanung - keine Alternativen berücksichtigt werden. Jeder Vortrag ist von uniformer Dauer, die sinnvollerweise die verwendeten Periodenlänge bestimmt. Der Planungshorizont erstreckt sich über die Dauer der Konferenz.

### *Zuordnung von Teilnehmern zu Kursen*

Anders als bei den bisher betrachteten, klassischen Problemfeldern, bei denen die Planung nicht bis auf die Ebene einzelner Personen heruntergebrochen wird, zielt die Planung hier direkt auf die Zuordnung der individuellen Teilnehmer zu den Veranstaltungen.

### *Nebenbedingungen*

Eine Reihe von Nebenbedingungen schließen sowohl den mehrfachen Besuch derselben Veranstaltung zu unterschiedlichen Terminen als auch die Mehrfachbelegung von Räumen aus. Ferner wird für jeden Lehrer die zeitgleiche Einplanung verhindert, die sich ergäbe, wenn mehrere Wiederholungen derselben Veranstaltung auf dieselbe Periode gelegt würden. Da jede Veranstaltung von genau einem Lehrer gehalten wird, verhindert diese Nebenbedingung gleichzeitig jede zeitliche Paralleleinplanung identischer Veranstaltungen. Wie bei der Vorlesungsplanung sind alle Veranstaltungen inhaltlich voneinander unabhängig, so daß zwischen ihnen keine Reihenfolgebeziehungen beachtet werden müssen.

### *Zielsetzungen*

Anstelle einer Zulässigkeit der Lösungen im Sinne der vollständigen Einplanung aller gewünschten Veranstaltungsbesuche wird eine relaxierte Variante dieser Forderung verfolgt. Jeder Teilnehmer gibt für jede von ihm gewünschte Veranstaltung eine Präferenz an; die Gesamtsumme der Präferenzen soll maximiert werden.

Planungs- gegenstände	Nebenbedingungen	Zielsetzungen
Lehrer (L)	Keine Doppelzuordnungen (L, T, R)	Präferenzmaximierung (T)
Teilnehmer (T)	Verfügbarkeit (R)	
Räume (R)		
Perioden (P)		

*Tabelle 3: Charakteristika der Konferenzplanung*

#### *2.4. Lehrgangsplanung*

Wir wenden uns nun einem weiteren Feld der Ausbildungs- und Schulungsplanung zu, das wir als Lehrgangsplanung bezeichnen wollen. In der Literatur hat dieses Feld bislang nur geringen Widerhall gefunden. Angesichts der immer schnelleren Obsolenz einmal erworbenen Wissens überrascht diese Feststellung, zudem die zunehmende Informationsorientierung von Wirtschaft und Gesellschaft hier wachsenden Bedarf vermuten läßt. Zusätzlich unterstrichen wird die

Wichtigkeit adäquater und aktueller Wissensvermittlung durch die zunehmende Forderung von Unternehmern nach Mitarbeitern, die zu "lebenslangem Lernen" bereit sind. Gleichzeitig steigt angesichts eines wachsenden Wettbewerbsdrucks in der Wirtschaft das Kostenbewußtsein der Kunden, die Ausbildungsleistungen nachfragen. Im Spannungsfeld dieser gegensätzlichen Entwicklungen gewinnt die effiziente Planung von Aus- und Weiterbildungsmaßnahmen mehr und mehr an Bedeutung.

### *Planungsgegenstände*

Dieses Feld umfasst die Planung von Schulungen, Lehrgängen oder Seminaren, die von professionellen Veranstaltern angeboten werden. Diese Kurse dienen der Vermittlung von Wissen, Fähigkeiten oder Fertigkeiten; sie sind zielgerichtet und bereiten ihre Teilnehmer häufig auf das Ablegen einer qualifizierenden Prüfung vor. Demzufolge sind Inhalte und Struktur der Kurse weitgehend vorgegeben. Da die Anbieter im allgemeinen Unternehmungen sind, die nach wirtschaftlichem Erfolg (oder zumindest nach Kostendeckung) streben, müssen die Teilnehmer (oder ihre Unternehmen) für den Besuch von Veranstaltungen entsprechende Entgelte entrichten. Es ergibt sich die interessante Konsequenz, daß die Teilnehmer an solchen Kursen (oder ihre Unternehmen) aufgrund ihres finanziellen Engagements einen sehr viel größeren Einfluß auf die Akzeptanz von Lehrgangsplänen ausüben können, als dies den Teilnehmern in den klassischen Problemfeldern möglich ist. Aufgrund dieses Einflusses müssen im Verlauf des Planungsprozesses im allgemeinen eine weit größere Anzahl von Nebenbedingungen und Zielsetzungen berücksichtigt werden.

Es gibt eine Reihe weiterer Unterschiede. Die wenigsten der traditionellen Planungsprobleme enthalten Reihenfolgebeziehungen. Die Beziehung zwischen Lehrern und Fächern ist in der Lehrgangsplanung flexibler: Unterschiedliche Themen desselben Faches können durchaus von unterschiedlichen Lehrern behandelt werden, wenngleich die meisten Lehrer nur qualifiziert sind, Themen aus ein oder zwei Fächern zu unterrichten. Weiterhin versuchen sowohl die Vorlesungs- als auch die Schulstundenplanung, periodische Pläne zu entwickeln. Diese wiederholen sich in regelmäßigen Abständen, zumeist in einem wöchentlichen Turnus. Demgegenüber sind Lehrgangspläne wiederholungsfrei und gelten für einen längeren Planungshorizont, der Zeiträume von einigen Wochen bis zu wenigen Jahren umfassen kann. Die Fächer werden deshalb in einzelne Themen unterteilt; u.a. erlaubt dies die planerische Berücksichtigung von themenspezifischen Anforderungen an Ausbildungsmittel oder Einrichtungen (z.B. Geräte, Anlagen, Simulatoren, Räume). Da die abschließende Behandlung eines Themas oft länger als eine Periode (Dauer einer Unterrichtseinheit) dauert, ist es nicht ausreichend, lediglich eine Zuordnung von Themen zu Perioden zu konstruieren. Die Themen werden daher weiter in sog. Unterrichtseinheiten zerlegt, die dann im Zuge der Planung einzelnen Perioden zugeordnet werden. Konkret zielt die Lehrgangsplanung damit auf eine geeignete Zuordnung von Lehrern, Kursen und Unterrichtseinheiten zu Räumen und Perioden.

### *Interpretationen*

Unter einem Kurs verstehen wir eine Menge von Teilnehmern, die an demselben Lehrgang teilnehmen und gemeinsam als Gruppe unterrichtet werden. Da Themen und Unterrichtseinheiten inhaltlicher Bestandteil mehrerer Kurse sein können, ist anders als bei der Vorlesungsplanung keine Identifikation von Themen (bzw. Unterrichtseinheiten) und Teilnehmern möglich. Lehrer sind hier die Dozenten, Instruktoren oder Ausbilder, die mit der Vermittlung der Lehrgangsinhalte betraut sind. Eine Periode entspricht in ihrer Länge der Dauer einer Unterrichtseinheit, diese Länge bestimmt damit, wie stark einzelne Themen in Unterrichtseinheiten zergliedert werden müssen.

### *Zuordnung von Teilnehmern zu Kursen*

Wie bereits im Kontext der Schulstundenplanung bleibt auch hier die Zusammensetzung der Lehrgangsteilnehmer als Gruppe über einen längeren Zeitraum (meist über die gesamte Dauer der Ausbildung) unverändert. Daher ist die Zuordnung von Teilnehmern zu Kursen wiederum nicht Gegenstand der Planung, sondern sie wird vor Beginn der eigentlichen Lehrgangsplanung durch die Planungsabteilung vorgenommen.

### *Nebenbedingungen*

Eine Reihe von Nebenbedingungen sind denen der klassischen Problemfelder vergleichbar (vgl. die Übersicht in Tabelle 4): Lehrer, Kurse und Räume dürfen nicht mehrfach in derselben Periode verplant werden, Lehrer müssen in der zu planenden Periode verfügbar sein. Zu diesen aus den klassischen Problemfeldern bekannten Bedingungen treten nun weitere hinzu: Auch die zeitliche Verfügbarkeit von Räumen und Kursen wird explizit betrachtet. In den Lehrplänen sind die Unterrichtsinhalte bis hinunter auf die Ebene von Unterrichtseinheiten beschrieben; meist ist dort auch eine bewährte zeitliche Abfolge der zu behandelnden Unterrichtseinheiten festgelegt. Diese Reihenfolge kann sich etwa an didaktischen Erfahrungen orientieren, sie kann aber auch praktische Gründe haben (theoretischer Unterricht vor praktischem Üben, erst dann Zwischenprüfungen). Eine Reihenfolge kann sogar durch gesetzliche Bestimmungen vorgegeben sein, wie es bei vielen Ausbildungen im Bereich der Luftfahrt der Fall ist, die auf eine staatliche Lizenz vorbereiten (z.B. Piloten-, Mechaniker- oder Prüferlizenzen). Weitere Nebenbedingungen können etwa die Einhaltung von Zeitfenstern für die Einplanung bestimmter Kurse fordern, die durch frühester Start und spätester Endtermine definiert sind.

### *Zielsetzungen*

Bei vielen der traditionellen Problemstellungen bewirkt die Kombination aus knappen Ressourcen und einem vorgegebenen Planungshorizont für die Einplanung aller Kurse, daß bereits das zugehörige Zulässigkeitsproblem streng NP-vollständig ist. Mit anderen Worten: selbst die Überprüfung, ob eine zulässige Lösung existiert, ist so schwierig wie das Lösen der schwierig-

sten bekannten Planungsprobleme. Demgegenüber besitzen Probleme der Lehrgangsplanung stets zumindest eine (formal) zulässige Lösung, die darin besteht, keine Unterrichtseinheiten einzuplanen; dies ist möglich, da vorgesehene Kurse abgesagt werden können. Demzufolge ist es nicht notwendig, die Zulässigkeit der erzeugten Pläne anzustreben. Jedoch werden im allgemeinen eine Reihe anderer Zielsetzungen verfolgt. Da die Lehrgangsanbieter Unternehmungen darstellen, die nach wirtschaftlichem Erfolg streben, versuchen sie im allgemeinen, im Rahmen der bestehenden, gesetzlichen und tariflichen Arbeitszeitregelungen eine möglichst hohe Auslastung ihrer Ressourcen, insbesondere der Lehrer, zu erreichen. Weitere, häufig betrachtete Ziele umfassen etwa die Maximierung von Gewinn, Nachfragebefriedigung oder Prioritäten, die Orientierung der Themenabfolge an einer bewährten Standardreihenfolge oder die Minimierung der Ausbildungsdauer. Tatsächlich erwiesen sich in einem anderen Praxisprojekt in der Luftfahrtbranche insgesamt zehn Zielsetzungen als relevant für die Planung (Haase et al. 1999).

Planungs- gegenstände	Nebenbedingungen	Zielsetzungen
Lehrer (L)	Keine Doppelzuordnungen (L, K, R)	Gewinn
Kurse (K)	Verfügbarkeit (L, K, R)	Nachfragebefriedigung
Unterrichts- einheiten (U)	Reihenfolgebeziehungen (U)	Standardreihenfolge (U)
Räume (R)	Zeitliche Einschränkungen (K)	Gleichmäßige Auslastung (L)
Perioden (P)		Kompaktheit (U)

*Tabelle 4: Charakteristika der Lehrgangsplanung*

### 3. Problemstellung

Im folgenden geben wir eine detaillierte Beschreibung der Problemstellung, d.h. der Planung der gesamten fliegerischen Theorieausbildung innerhalb der LFT. Im Zuge der Diskussion der Problemstellung wird deutlich werden, daß diese tatsächlich der Lehrgangsplanung zuzurechnen ist. Wir unterteilen das Gesamtproblem in zwei Teilprobleme, die sich mit der Lehrgangsplanung im engeren Sinne einerseits und mit der Raumzuordnung andererseits befassen. Beide Teilprobleme werden im Rahmen der in Abschnitt 4 beschriebenen Verfahren sukzessive gelöst. Dieser Trennung und der sukzessiven Bearbeitung liegt die Einsicht zugrunde, daß die Anzahl der Lehrgänge und die Anzahl der einzuplanenden Schüler modellexogene Parameter sind, also keiner Entscheidung innerhalb des Modells unterliegen; damit ist die durch die Lehrgänge ausgelöste Nachfrage nach Räumen im wesentlichen unabhängig von dem jeweils gewählten Lehrgangsplan. Der einzige raumbezogene Aspekt, der sich auf die Zulässigkeit der Pläne auswirken kann, besteht in der Knappheit einiger weniger Räume mit besonderer Aus-

stattung: Jeder zulässige Lehrgangsplan muß also die vorhandene Anzahl dieser Räume berücksichtigen. Unter dieser Voraussetzung aber ist es auch für solche Räume möglich, eine Raumzuordnung erst nach der Festlegung aller Lehrgangspläne vorzunehmen.

### 3.1. Lehrgangsplanung

Das Teilproblem der Lehrgangsplanung (im engeren Sinne) läßt sich wie folgt charakterisieren:

- *Planungszeitraum, Unterrichtsblöcke, -stunden und Perioden:* Die gesamte Planung folgt dem Schema einer rollierenden Planung, wobei jeder Lehrgangsplan einen Zeitraum von vier Wochen umfaßt. Innerhalb dieses Zeitraums ist jeder Werktag in mehrere (Unterrichts-) Blöcke unterteilt, die jeweils aus zwei Unterrichtsstunden von 45 Minuten Dauer (Doppelstunde) bestehen. Eine abweichende Festlegung gilt nur für die Ausbildung der Bundeswehr-Piloten, für die der letzte Block jedes Tages aus drei Unterrichtsstunden von 45 Minuten Dauer besteht. Die Anzahl der Perioden in einem Planungszeitraum ergibt sich daher als das Produkt der Anzahl der Werktage, der Anzahl der Blöcke und der jeweiligen Anzahl der Unterrichtseinheiten pro Block. Die Einplanung von Unterricht erfolgt auf der Ebene von Blöcken, da aber die bei der LFT gültigen Betriebsvereinbarungen zur Arbeitszeitregelung der Lehrer auf der Ebene von Perioden definiert sind, ist die zeitliche Granularität der Planung durch die Länge einer Periode bestimmt.
- *Lehrgänge:* Innerhalb eines Planungszeitraums befinden sich üblicherweise mehrere Lehrgänge in einer Theoriephase, alle diese Lehrgänge sind in der Planung zu berücksichtigen. Da die Inhalte jedes Lehrganges individuell festgelegt werden, ist der Begriff des Lehrgangstyps, der in anderen Problemstellungen Lehrgänge gleicher Struktur zusammenfaßt und damit die planerische Handhabung erleichtert (Haase et al. 1999), hier irrelevant.
- *Fächer und Themen:* Die Ausbildung ist sachlogisch in Fächer (etwa Navigation, Meteorologie; Technik) unterteilt, die ihrerseits jeweils aus einer Reihe einzelner Themen bestehen. Themen sind durch spezifische Anforderungen an Anzahl und Qualifikation der notwendigen Lehrer sowie Art (und vereinzelt Anzahl) der erforderlichen Räume gekennzeichnet. Ferner sind in jedem Lehrgang Reihenfolgebeziehungen zwischen bestimmten Themen vorgegeben, die meist das Ergebnis didaktischer Erfahrungen oder gesetzlicher Anforderungen sind (z.B. theoretische Themen vor praktischen Übungen vor Prüfungen). Um die sich daraus ergebende Komplexität des Planungsprozesses zu reduzieren, ist für eine Reihe von Themen in jedem Lehrgang eine *Standardreihenfolge* festgelegt, die diese Reihenfolgebeziehungen miteinbezieht und die sich auch aus praktischer Sicht bewährt hat.
- *Lehrer:* Fast die gesamte Ausbildung liegt in den Händen von Lehrkräften der LFT; die einzigen Ausnahmen bestehen aus einigen speziellen Seminaren, die von externen Psychologen durchgeführt werden, sowie natürlich aus den offiziellen Lizenzprüfungen, die von

Beamten des Luftfahrtbundesamtes abgenommen werden. Obwohl die meisten Lehrer jeweils in nur einem einzigen Fach unterrichten, gibt es doch einige Sonderfälle, in denen entweder ein Lehrer nicht alle Themen seines Faches abdeckt oder aber einzelne Lehrer auch Themen aus anderen Fächern unterrichten. Der Einfachheit halber betrachten wir daher für jeden Lehrer die Menge der von ihm unterrichteten Themen.

- *Verfügbarkeit der Lehrgänge:* Für Zwecke der Planung können Lehrgänge in bestimmten Blöcken "geblockt", d.h. nicht einplanbar sein. Solche Blockungen werden überwiegend für Ausbildungsbestandteile vorgenommen, deren terminliche Planung nicht in den Händen der LFT liegt, also für externe Seminare und Prüfungen. Von diesen Sonderfällen abgesehen werden alle Unterrichtsblöcke jedes Werktages für die Ausbildung genutzt. Der Ausbildungsbetrieb findet an jedem Tag durchgehend in aufeinanderfolgenden Unterrichtsblöcken statt, beginnend mit dem ersten Block des Tages; anders als in der Schulstundenplanung gibt es also keine unterrichtsfreien Blöcke.
- *Verfügbarkeit der Räume:* Planungsrelevante Charakteristika der Räume sind ihre Ausstattung und ihre Sitzkapazität. Entsprechend dieser Charakteristika lassen sich die vorhandenen Räume in Typen gleicher Art zusammenfassen. Für die Lehrgangsplanung im engeren Sinne von Interesse ist hier nur die jeweils verfügbare Anzahl an Räumen eines Typs; diese Anzahl ist über die Zeit veränderlich, da einige Räume zeitweise für andere als Ausbildungszwecke verwendet werden.
- *Verfügbarkeit der Lehrer:* Naheliegender ist, daß kein Lehrer gleichzeitig in mehr als einem Lehrgang unterrichten kann. Zusätzlich sind in der Planung eine Reihe weiterer Regelungen zur Arbeitszeit zu beachten, von denen wir hier nur die wichtigsten nennen: Alle Lehrer stehen in jedem Planungszeitraum nur für eine vorgegebene Zahl von Perioden zur Verfügung. Ferner können sie in einzelnen Perioden nicht einplanbar sein, etwa wegen Urlaub oder Fortbildungsmaßnahmen. Ein Lehrer darf nicht mehr als eine bestimmte Maximalzahl an Perioden pro Tag unterrichten. Darüber hinaus ist die Anzahl der Tage, an denen sein Unterrichtpensum diese Maximalzahl erreichen darf, sowohl pro Woche als auch pro Planungszeitraum limitiert. Für dringende Fälle gibt es zu diesen Arbeitszeitbestimmungen Ausnahmeregelungen mit geringfügig höheren Grenzwerten. Schließlich können Lehrer darum bitten, etwa aus privaten Gründen in bestimmten Blöcken nicht eingeplant zu werden; solche Wünsche werden aus Sicht der LFT priorisiert.

Zu beachten ist, daß es diese Arbeitszeitregelungen in Verbindung mit dem rollierenden Charakter der Planung notwendig machen, bereits abgeschlossene Teile des Unterrichts für jeden einzelnen Lehrer mitzuschreiben; nur so läßt sich die Zulässigkeit von Lehrgangsplänen im Hinblick auf die Einhaltung dieser Regelungen hin sicherstellen.

- *Modi*: Für jede Kombination aus Lehrgang und Thema werden eine Reihe von Modi definiert, die alternative Zuordnungen von Lehrern und Räumen repräsentieren. Anzumerken ist hierbei, daß eine einmal getroffene Zuordnung eines Lehrers zu einer solchen Kombination für die gesamte Dauer des Lehrgangs unverändert bleibt.
- *Vorwegzuordnungen*: In einigen Fällen erweist es sich als notwendig, bestimmte Kombinationen aus Lehrgang, Thema, Lehrer und Raum bereits vor Beginn des Planungsprozesses fest bestimmten Blöcken zuzuordnen.

Die Lehrgangsplanung verfolgt eine Reihe unterschiedlicher Ziele, anhand deren Erreichungsgrade die Güte der Pläne beurteilt wird. Insgesamt wurden sieben Ziele formuliert und priorisiert; Ziele und Prioritäten resultieren zum Teil aus didaktischen Erfahrungen, zum Teil geben sie Interessen der Geschäftsleitung oder der Lehrkräfte der LFT wieder. Nicht alle Ziele sind überschneidungsfrei, entsprechende Ziele werden im folgenden unter jeweils derselben Überschrift aufgeführt. Der Hinweis erscheint angebracht, daß die vorhandenen Überschneidungen in dieser Form auf den Angaben und Wünschen der LFT basieren. Konzeptionell entspricht jedes dieser Ziele einer sog. *weichen Nebenbedingung* (soft constraint) (Dige et al. 1993), so daß die Zielfunktion sich als die gewichtete Summe der Verletzungen dieser weichen Nebenbedingungen berechnet.

- *Standardreihenfolge*: Die Pläne sollen die für die Themen festgelegte Standardreihenfolge einhalten (Priorität 10).
- *Fächerverteilung*: In jedem Lehrgang soll der Unterricht in den Fächern möglichst gleichmäßig über den Planungszeitraum verteilt stattfinden. Dieses Ziel wird im wesentlichen dadurch operationalisiert, daß kein Fach zweimal am selben Tag unterrichtet werden soll (Priorität 2). Zusätzlich soll in keinem Lehrgang dasselbe Thema in aufeinanderfolgenden Blöcken unterrichtet werden (Priorität 4).
- *Lehrerwechsel*: Die Anzahl der Lehrer, die in einem Lehrgang unterrichten, soll möglichst gering sein, um unnötige Wechsel für Lehrer und Schüler zu vermeiden (Priorität 5).
- *Lehrerauslastung*: Die insgesamt zu gebenden Unterrichtseinheiten sollen unter den Lehrern möglichst gleichmäßig aufgeteilt werden; dabei sind Blöcke entsprechend zu berücksichtigen, in denen Lehrer nicht verfügbar sind (Priorität 2). Ebenso sollen die einzuplanenden Unterrichtseinheiten für jeden Lehrer möglichst gleichmäßig über den Planungszeitraum verteilt werden; dies wird erreicht, indem man die Anzahl der Tage gering hält, an denen ein Lehrer die vorgegebene Maximalzahl an Perioden pro Tag unterrichtet (Priorität 5).
- *Lehrerwünsche*: Lehrer können Wünsche äußern, in bestimmten Blöcken von Unterricht freigehalten zu werden; je nach Grund wird dem Wunsch durch das Unternehmen eine be-

stimmte Priorität zugeordnet. Möglichst vielen dieser Wünsche soll - in der Reihenfolge ihrer Priorität - entsprochen werden (Priorität 5).

### 3.2. Raumzuordnung

Das Raumzuordnungsproblem kann wie folgt charakterisiert werden:

- *Räume:* Es gibt mehrere Räume, in denen Unterricht abgehalten werden kann. Jeder Raum verfügt über eine bestimmte Ausstattung und Sitzkapazität.
- *Raumtypen:* Die vorhandenen Räume sind - je nach Ausstattung und Sitzkapazität - in Typen eingeteilt.
- *Zuordnung von Räumen:* In jedem Block, in dem Unterricht stattfindet, benötigt ein Lehrgang mindestens einen Raum. Ein bestimmter Raum kann ihm nur dann zugewiesen werden, wenn dieser die für das Thema erforderliche Ausstattung aufweist, über eine ausreichende Anzahl von Sitzplätzen verfügt und nicht bereits anderweitig vergeben ist.

Bei der Raumzuordnung wird nur ein einziges Ziel verfolgt, das sich darauf bezieht, wie oft die einzelnen Lehrgänge während ihrer Dauer von einem Raum in einen anderen umziehen müssen.

- *Raumwechsel:* Jeder Lehrgang sollte möglichst selten den Raum wechseln müssen.

Damit gibt ein Lehrgangsplan für jede Kombination von Lehrgang und Block, in der Unterricht stattfindet, die entsprechende Zuordnung von Thema, Raum und Lehrer wieder.

### 3.3. Modellierung

Als Grundlage für die Verfahrensentwicklung wurden zunächst die Zielsetzungen und Nebenbedingungen der hier betrachteten Problemstellung als gemischt-ganzzahliges Modell formuliert. Zu den Vorteilen einer solch formalen Beschreibung eines Optimierungsproblems zählen die unzweideutige, interpretationsfreie Darstellung der Problemstellung sowie der einfachere Zugang zu abstrakten Beweismethoden aus der Komplexitätstheorie, einem Forschungsgebiet der theoretischen Informatik, die Aussagen über die Eignung verschiedener Klassen von Algorithmen für die Lösung des Problems erlauben (Bachem 1980; Schirmer 1995). Aus Gründen der Lesbarkeit verzichten wir allerdings auf eine explizite Darstellung des Modells, das insgesamt 17 Nebenbedingungen sowie eine Zielfunktion mit sieben Komponenten umfaßt. Stattdessen beschränken wir uns hier auf die Darstellung einiger ausgewählter Aspekte, die die Verwendung verschiedener Ressourcenkonzepte verdeutlichen. Eine vollständige Diskussion des Modells findet sich in Potzahr (1998).

Jede Einplanung von Unterricht betrifft jeweils einen Kurs (im folgenden verwenden wir synonym den Begriff Lehrgang), ein Thema, einen oder mehrere Lehrer sowie einen Raum. Nebenbedingungen prüfen dabei u.a. die Verfügbarkeit von Lehrern, Kursen und Räumen sowie die Berücksichtigung der im Syllabus für jedes Thema festgelegte Anzahl der einzuplanenden Unterrichtseinheiten. Alle diese Anforderungen lassen sich als Kapazitätsbeschränkungen oder logische Bedingungen interpretieren, die sich mit Hilfe geeigneter Ressourcenkonzepte formal darstellen lassen (Schirmer, Drexl 2001).

Traditionell unterscheidet man Ressourcenkonzepte danach, in welcher Weise das Angebot an Ressourcen limitiert ist: Die vorhandene Menge nicht-erneuerbarer Ressourcen ist durch eine Gesamtkapazität über den gesamten Planungshorizont beschränkt, diejenige erneuerbarer Ressourcen in jeder einzelnen Periode des Planungshorizontes durch eine periodenbezogene Kapazität (Slowinski 1981). Demgegenüber erlaubt das neue, vergleichsweise ausdrucksstärkere Konzept partiell erneuerbarer Ressourcen, Kapazitätsbeschränkungen über beliebigen Mengen von Perioden innerhalb des Planungshorizontes zu formulieren (Böttcher et al. 1999; Schirmer, Drexl 2001).

- Die Verfügbarkeit von Lehrern, Kursen und Räumen läßt sich über erneuerbare Ressourcen ausdrücken. Da Räume gleicher Ausstattung untereinander austauschbar sind, definieren wir eine Ressource pro Ausstattung. Da einzelne Räume zu bestimmten Zeiten gesperrt sein können, lassen wir hierbei zeitveränderliche Profile zu, so daß die Kapazität pro Periode der Anzahl der in dieser Periode verfügbaren Räume entspricht. Da individuelle Lehrer und Kurse nicht austauschbar sind, definieren wir für diese jeweils eine eigene Ressource, mit einer Periodenkapazität von eins, wenn diese verfügbar sind, von null, wenn sie für die Einplanung gesperrt sind. Sperrungen von Lehrern entstehen etwa durch Urlaubstage, solche von Lehrgängen Zeiträume, in denen externe Seminare vorgesehen sind. Wenn die Beendigung einer Theoriephase für einen Lehrgang in den aktuell betrachteten Planungszeitraum fällt, wird der Lehrgang außerdem an den nicht benötigten Puffertagen des Syllabus gesperrt, damit die entstehenden freien Tage wirklich am Ende auftreten (Kompaktheit der Ausbildung). Schließlich ist für jeden Lehrgang festgelegt, in welchen Unterrichtsblöcken der Unterricht stattfinden soll (üblicherweise in den ersten drei oder vier Blöcken des Tages); in den übrigen Blöcken ist er ebenfalls gesperrt.
- Die Einschränkung, in keinem Lehrgang mehr als die im Syllabus vorgesehene Anzahl von Unterrichtseinheiten zu jedem Thema einzuplanen, läßt sich leicht einbeziehen, wenn man für jede Kombination von Lehrgang und Thema eine nicht-erneuerbare Ressource einführt, deren Kapazität durch die jeweils vorgegebene Anzahl der Unterrichtseinheiten bestimmt ist. Ferner läßt sich die in den Arbeitszeitregelungen festgelegte Anzahl an Unterrichtseinheiten, die jeder Lehrer pro Planungszeitraum höchstens geben darf, durch Einführung einer nicht-erneuerbaren Ressource pro Lehrer mit entsprechender Kapazität abbilden.

- Weitere, komplexere Arbeitszeitregelungen lassen sich nur mit Hilfe partiell erneuerbarer Ressourcen formalisieren, weil diese teils auf Mengen von Blöcken, teils auf Mengen von Arbeitstagen bezogen sind. Hierzu gehört einerseits die Bestimmung, daß jeder Lehrer nur eine bestimmte Anzahl von Unterrichtseinheiten pro Tag unterrichten darf. Diese Regelung läßt sich für jeden Lehrer durch Einführung einer partiell erneuerbaren Ressource darstellen, deren Kapazität an jedem Tag auf der Menge aller Blöcke dieses Tages durch die vorgegebene Anzahl von Unterrichtseinheiten pro Tag bestimmt ist. Andererseits gehören hierzu entsprechende Festlegungen, daß für jeden Lehrer die Zahl der Tage, an denen er die o.a. Anzahl von Unterrichtseinheiten geben darf, sowohl pro Planungszeitraum als auch pro Woche begrenzt ist. Hierzu werden Periodenmengen definiert, die die Blöcke des gesamten Planungszeitraums bzw. jeweils einer einzelnen Woche umfassen, und deren Kapazität sich aus der in der Arbeitszeitregelung festgeschriebenen Anzahl an Tagen ergibt.

#### 4. Lösungsverfahren

Eine formale Analyse der algorithmischen Komplexität des betrachteten Problems zeigt, daß es als Spezialfälle mehrere Probleme aus der Klasse der streng NP-äquivalenten Probleme enthält, so daß die Entwicklung exakter Optimierungsverfahren kaum Erfolg verspricht (Schirmer 1999, S. 27-31, 159-162). Auch eine direkte Übertragung von Lösungsverfahren für andere, klassische Probleme der Ausbildungs- und Schulungsplanung wäre wenig sinnvoll, da klassische Ansätze den inhaltlich weitergehenden Zielsetzungen und Nebenbedingungen dieses Problems kaum gerecht werden könnten. Daher wurden für beide Teilprobleme gezielt heuristische Konstruktions- und Verbesserungsverfahren entwickelt, die wir im folgenden darstellen. Obwohl die Algorithmen auf das betrachtete Problem ausgerichtet sind, sind die verwendeten Verfahrensideen allgemein genug, daß sie mit geringem Aufwand an andere Problemstellungen der Lehrgangsplanung angepaßt werden können.

Probleme der Ausbildungs- und Schulungsplanung enthalten meist sowohl periodenbezogene Aspekte (z.B. Zuordnung von Schulstunden oder Unterrichtseinheiten) als auch ressourcenbezogene Aspekte (z.B. Zuordnung von Lehrern, Räumen oder Klassen). Mooney et al. (1996) führen in ihrer Charakterisierung solcher Probleme aus, daß diese angesichts der algorithmischen Unzugänglichkeit zumindest großer Instanzen üblicherweise gelöst werden, indem man iterativ zwischen der (heuristischen) Lösung der periodenbezogenen und diverser Ein-Ressourcen-Teilprobleme hin- und herwechselt. Obwohl die in diesem Beitrag betrachtete Problemstellung offenkundig zu dieser Klasse von Problemen gehört, wird sich zeigen, daß sowohl die Zuordnung von Perioden als auch die von Ressourcen simultan gelöst werden können, indem man wohlbekanntete Konzepte aus dem Bereich der kapazitierten Projektplanung geeignet anpasst. Aus Gründen der Übersichtlichkeit trennen wir allerdings die eigentliche Lehrgangsplanung von der Raumzuordnung; da beide Teilprobleme logisch kaum voneinander

abhängen, würde eine simultane Behandlung keine weitergehenden algorithmischen Anforderungen stellen, wäre aber weniger leicht nachvollziehbar.

Die prinzipielle Vorgehensweise ist naheliegend: Zunächst wird mit einem Konstruktionsverfahren eine zulässige Lösung erzeugt, auf die dann ein Verbesserungsverfahren angewendet wird. Danach wird für den sich ergebenden Lehrgangplan eine zulässiger Raumbelugung ermittelt, die dann ebenfalls mit einem weiteren Verfahren verbessert wird. Hierbei ist eine Besonderheit hervorzuheben: Während des Lösungsprozesses wird nicht nur jeweils die beste bisher gefundene Lösung mitgeführt, sondern es wird eine bestimmte, vom Benutzer gewählte Anzahl der besten bislang gefundenen Lösungen gespeichert. Ziel dieser Vorgehensweise ist es, dem Anwender nicht nur eine einzige Lösung, sondern eine Reihe von guten Lösungsalternativen anzubieten, aus denen er dann eine Auswahl treffen kann. Um den Entscheidern die mühsame und fehlerträchtige Arbeit zu erleichtern, diese Pläne im einzelnen auf ihre Güte und Umsetzbarkeit hin zu untersuchen, werden zusätzlich zu jedem dieser Pläne einige Kennzahlen ermittelt, die wesentliche Größen wie Auslastung, Fächerverteilung und Berücksichtigung von Freistellungswünschen der Lehrer messen; die Auswahl kann sich dann im wesentlichen an den Kennzahlen orientieren. Obwohl diese Vorgehensweise im Zusammenhang mit Entscheidungsunterstützungssystemen noch eher unüblich ist, bringt sie aufgrund der höheren Transparenz des Entscheidungsprozesses eine Reihe von motivationspsychologisch begründeten Vorteilen hinsichtlich Akzeptanz und Nutzung solcher Systeme mit sich (Hansmann 1997; Schirmer 2000a). Außerdem trägt sie zwei aus der Praxis gewonnenen Einsichten Rechnung, die sich auf die Abbildung komplexer realer Probleme durch formale Modelle beziehen; dabei bezieht sich die eine der beiden in unserem Kontext auf die Formulierung von Nebenbedingungen, die andere auf die von Mehrfachzielsetzungen. Die erste ist eine fundamentale Erkenntnis, die bereits auf Ergebnisse der Künstlichen-Intelligenz-Forschung in den achtziger Jahren zurückgeht: Eine Erhebung aller eventuell relevanten Anforderungen sowie deren Einbindung in ein formales Modell ist außer bei sehr eng abgesteckten Problemstellungen praktisch kaum zu erreichen (Kim, Courtney 1988; Boose 1989), so daß etwa eine Nebenbedingung, die in der Praxis selten greift, bei der Modellbildung durchaus vergessen worden sein kann. Bei der zweiten handelt es sich um die bekannte Schwierigkeit, bei Problemen unter Mehrfachzielsetzung die individuelle Zielgewichtung der Entscheider exakt zu ermitteln. Obwohl entsprechende Verfahren existieren, sind sie verhältnismäßig aufwendig; die Bereitschaft von Entscheidern, sich solchen Verfahren zu unterziehen, ist daher im allgemeinen eher als gering einzuschätzen. Daher muß die Zielfunktion eines formalen Modells nicht notwendigerweise eine exakte Wiedergabe der Präferenzen der Entscheidungsträger darstellen. Beide Phänomene begründen für jede formal optimale Lösung die Frage, inwieweit die Lösung auch aus praktischer Sicht die bestmögliche darstellt. Es ist daher grundsätzlich wünschenswert, den Entscheidungsträgern eine Reihe von Alternativen anzubieten; dies gibt ihnen die Möglichkeit, in Einzelfällen einen Plan auszuwählen, der zwar aus modelltheoretischer Sicht nicht die beste gefundene Lösung darstellt, der aber praktischen Anforderungen besser ge-

recht wird, die in dem formalen Modell nicht oder nicht in ausreichendem Maße berücksichtigt sind.

#### *4.1. Lehrgangsplanung*

##### *4.1.1. Konstruktionsverfahren*

Als erster algorithmischer Ansatz wurde ein serielles, prioritätsregelbasiertes Konstruktionsverfahren (siehe etwa Kolisch 1996) entwickelt, das zusätzlich zu den üblichen Komponenten noch über eine Backtracking-Funktionalität verfügt. Die Entscheidung für ein serielles Verfahren fiel aus mehreren Gründen. Erstens hat sich für verschiedene Probleme der kapazitierten Projektplanung gezeigt, daß solche Verfahren zu den leistungsfähigsten Heuristiken überhaupt gehören (Kolisch, Hartmann 1999; Schirmer 2000b). Zweitens ist die Arbeitsweise serieller Verfahren dem manuellen Vorgehen der LFT-Planer sehr ähnlich, so daß Verständnis und Akzeptanz hier einfacher zu erreichen waren als dies bei einem parallelen Verfahren der Fall gewesen wäre. Drittens erlauben serielle Verfahren eine frühzeitige Auflösung von Engpässen in der Einplanung: Verbleiben für ein Thema nur noch wenige zulässige Perioden (hier: Blöcke), so kann dieses - bei Verwendung geeigneter Prioritätsregeln - sofort eingeplant werden; ein paralleles Verfahren würde möglicherweise andere Themen vorrangig behandeln und dadurch einige Lehrer soweit auslasten, daß eine Einplanung des Themas unmöglich würde.

Wie in seriellen Verfahren üblich werden Teilpläne, beginnend mit einem leeren Plan, schrittweise um die Einplanung jeweils eines Themas erweitert; dieser Vorgang setzt sich fort, bis alle Themen aller Lehrgänge betrachtet worden sind. Da der Planungshorizont nur einen Bruchteil der Dauer eines jedes Kurses umfaßt, kann selbst der abschließende Plan in einem Planungshorizont meist nicht alle Themen vollständig einplanen (außer im Dezember, siehe unten); nicht vollständig eingeplante Themen werden daher jeweils im folgenden Planungsintervall erneut betrachtet. Wir unterteilen die Menge aller Themen in vier disjunkte Teilmengen, nämlich in eingeplante, ressourcen-unzulässig einplanbare, zulässig einplanbare und übrige. Die erste Menge umfaßt alle Themen, die bereits eingeplant worden sind. Themen in der zweiten Menge könnten zwar hinsichtlich der Reihenfolgebeziehungen eingeplant werden, jedoch verhindern zu knappe Restkapazitäten benötigter Ressourcen die tatsächliche Einplanung innerhalb des aktuell betrachteten Planungszeitraums; da die Problemstellung in einen Kontext rollierender Planung eingebettet ist, werden diese Themen im folgenden Planungszeitraum erneut betrachtet werden. Die Menge der zulässig einplanbaren Themen setzt sich aus all jenen Themen zusammen, deren Einplanung aktuell weder gegen Reihenfolgebeziehungen noch gegen die vorhandenen Ressourcenbeschränkungen verstoßen würde. In jedem Schritt wird nun aus der Menge der zulässig einplanbaren Alternativen ein Thema ausgesucht, dem dann ein geeigneter Modus sowie ein noch freier Block zugeordnet werden. Da hierbei meist mehr als nur eine Alternative zur Auswahl stehen, wird die Entscheidung jeweils mit

Hilfe von Prioritätsregeln getroffen; der Einfachheit halber werden die Prioritätsregeln deterministisch angewendet, nur im Falle mehrerer höchstpriorisierter Kandidaten wird die Auswahl zufällig vorgenommen.

Im einzelnen verläuft die Themenauswahl wie folgt: Als erstes werden die Vorwegzuordnungen eingeplant; da diese im Nachhinein nicht mehr geändert werden können, empfiehlt es sich, diese frühzeitig vorzunehmen. Hierbei kann der Fall auftreten, daß manche Vorwegzuordnungen anfänglich nicht eingeplant werden können, solange nicht bereits alle ihre Vorgänger eingeplant worden sind. Um solche Vorwegzuordnungen ebenfalls so möglichst frühzeitig verarbeiten zu können, werden dann solange wie nötig nur deren Vorgänger als Auswahlkandidaten betrachtet. Greift dieser Fall nicht, so werden zunächst nur Themen betrachtet, von denen bereits Unterrichtseinheiten gegeben wurden. Dieser Vorgehensweise liegt die didaktisch begründete Intention zugrunde, nicht zuviele Themen anzufangen, da dann manche von ihnen über eine längere Zeit nicht abgeschlossen werden könnten.

Gibt es keine solchen Themen (mehr), so werden alle zulässig einplanbaren Themen untersucht. Um die Anzahl der betrachteten Alternativen nicht zu stark anwachsen zu lassen, gehen wir dabei wiederum in zwei Schritten vor: Zuerst wird ein Lehrgang ausgesucht, für den dann eines seiner zulässig einplanbaren Themen ausgewählt wird. Die Zuordnung eines Modus ist dann recht einfach: Wenn das Thema in dem Lehrgang bereits unterrichtet wurde, so wird wieder derselbe Modus verwendet, um unnötige Lehrerwechsel zu vermeiden. Andernfalls wird per Prioritätsregel ein Modus gewählt. Schließlich wird für die Kombination aus Thema und Lehrer ein freier Block gesucht und zugeordnet, zusammen mit dieser Einplanung wird dann auch die Fortschreibung der verbleibenden Restkapazitäten aktualisiert.

Existiert kein geeigneter freier Block, so versuchen wir, durch Anwendung eines beschränkten Backtracking-Verfahrens einen geeigneten Block "freizuschaukeln", indem wir ein bereits eingeplantes Thema auf einen anderen freien Block verschieben. Dazu überprüfen wir zunächst, in welchen Blöcken das betrachtete Thema unterrichtet werden könnte, wenn diese nicht jeweils gerade durch ein anderes Thema belegt wären. Für alle diese Themen untersuchen wir dann, welchen noch freien Blöcken diese alternativ zugeordnet werden könnten. Gibt es mehrere solche alternativen Zuordnungen, so wählen wir diejenige mit dem besten Zielfunktionswert; gibt es wiederum mehrere solche, so wählen wir unter diesen zufällig eine aus. Gibt es keine solchen Zuordnungen, so wird das Thema als ressourcen-unzulässig gekennzeichnet und innerhalb des aktuellen Planungszeitraums nicht weiter betrachtet.

Zur Verdeutlichung betrachten wir den Teilplan in Abbildung 1, der für jede Kombination aus Lehrgang und Block das eingeplante Thema und den zugeordneten Lehrer ausweist (schraffierte Felder stellen Zeiten von Prüfungen dar, in denen kein Unterricht eingeplant werden kann). Nehmen wir weiter an, daß Lehrer AB in Block 1 des ersten Tages nicht abkömmlich ist. Nun soll das Thema MET 2.0 in Lehrgang 1 eingeplant werden. Da Lehrer AB dieses Thema bereits

unterrichtet hat, sollte er dies auch weiterhin tun, eine solche Einplanung ist aber mangels Verfügbarkeit nicht zulässig. Wir versuchen daher, andere Einplanungen rückgängig zu machen, indem wir alle Blöcke ausfindig machen, in denen MET 2.0 noch gehalten werden könnte. In unserem Beispiel sind dies die Kombinationen (Tag 1, Block 2), (Tag 2, Block 1) und (Tag 2, Block 2). Von diesen kann das Thema NAV 4.1 von (Tag 2, Block 1) nicht nach (Tag 1, Block 1) verschoben werden, da der zugehörige Lehrer CD bereits in Lehrgang 2 verplant ist. Verschiebt man das Thema ERI 3.3 von (Tag 2, Block 2) in die freie Kombination und lässt MET 2.0 in dem dadurch freigewordenen Block stattfinden, so wird zweimal ein Thema in zwei Blöcken desselben Tages unterrichtet, was dem Ziel einer gleichmäßigen Fächerverteilung zuwiderläuft. Die letzte Möglichkeit, nämlich das Thema ERI 3.3 von (Tag 1, Block 2) nach (Tag 1, Block 1) zu schieben und den dadurch frei werdenden Block zu nutzen, würde den Zielfunktionswert nicht ändern und stellt daher die vorteilhaftere der beiden möglichen Alternativen dar. Das Ergebnis dieser Alternative ist in Abbildung 2 dargestellt.

	Tag 1				Tag 2			
	1	2	3	4	1	2	3	4
Lehrgang 1		ERI 3.3 XY	ATC 3.1 EF		NAV 4.1 CD	ERI 3.3 XY	MET 2.0 AB	
Lehrgang 2	NAV 1.0 CD	NAV 1.0 CD	MET 1.0 AB		ERI 1.0 XY	ATC 2.1 JK	TEC 2.0 GH	

Abbildung 1: Backtracking - Erster Lehrgangsplan

	Tag 1				Tag 2			
	1	2	3	4	1	2	3	4
Lehrgang 1	ERI 3.3 XY	MET 2.0 AB	ATC 3.1 EF		NAV 4.1 CD	ERI 3.3 XY	MET 2.0 AB	
Lehrgang 2	NAV 1.0 CD	NAV 1.0 CD	MET 1.0 AB		ERI 1.0 XY	ATC 2.1 JK	TEC 2.0 GH	

Abbildung 2: Backtracking - Letzter Lehrgangsplan

#### 4.1.2. Verbesserungsverfahren

Wir verwenden dann ein Tabu-Search-Verfahren, um die mittels des Konstruktionsverfahrens gefundenen Ausgangslösungen weiter zu verbessern. Die wesentlichen Komponenten des Verfahrens lassen sich wie folgt beschreiben:

- **Bewertungsfunktion:** Wir bewerten zunächst alle Lehrgangspläne mit ihrem Zielfunktionswert; zu diesem wird ein Strafterm addiert, der die Anzahl der (aufgrund mangelnder Res-

sourcen) nicht eingeplanten Unterrichtseinheiten mit einer hinreichend großen Zahl multipliziert. Im Ergebnis bewirkt dies, daß die zusätzliche Einplanung einer Unterrichtseinheiten jeder anderen Verbesserung der Zielfunktion vorgezogen wird.

- *Nachbarschaft*: Um zu neuen Lehrgangsplänen zu gelangen, verwenden wir eine Reihe von Zügen, die jeweils innerhalb eines Lehrganges zwei Einplanungen vertauschen, eine bereits getroffene Einplanung in einen noch freien Block verschieben oder eine neue Einplanung in einen noch freien Block vornehmen. Ausgehend von einem gegebenen Lehrgangsplan besteht dessen Nachbarschaft aus der Gesamtheit aller daraus über einen der Züge konstruierbaren Lehrgangspläne. Obwohl es prinzipiell möglich wäre, in jeder Iteration die gesamte Nachbarschaft über alle Lehrgänge zu untersuchen und daraus den besten Zug auszuwählen, wären die aus dieser Vorgehensweise resultierenden Rechenzeiten prohibitiv, weil die verhältnismäßig aufwendig zu berechnende Zielfunktion für jeden Zug in der Nachbarschaft ausgewertet werden müsste. Wir wenden daher eine sog. Nachbarschaftszerlegung an (Glover et al. 1993) und verwalten für jeden einzelnen Lehrgang eine separate, sog. partielle Nachbarschaft (siehe unten).

Hierbei ist anzumerken, daß aus zwei Gründen die Nachbarschaft im allgemeinen nicht identisch ist mit der Menge aller zulässigen Lösungen, die durch Anwendung der entsprechenden Züge von der Ausgangslösung aus erreichbar wären. Einerseits verringern wir aus Effizienzgründen die Größe der Nachbarschaften, indem wir nur Themen berücksichtigen, die entweder bereits in der Lösung des Konstruktionsverfahrens enthalten waren oder die aktuell hinsichtlich der Standardreihenfolge einplanbar sind. Das letzte Kriterium wird durch die hohe Priorität dieses Zieles motiviert, angesichts dessen eine Lösungsverbesserung kaum erreichbar scheint, wenn man Themen abweichend von der Standardreihenfolge einplant. Andererseits müssen wir für den Fall vorsorgen, daß das Konstruktionsverfahren keine zulässige Lösung findet; in diesem Fall gäbe es in wenigstens einem Lehrgang ein Thema, in dem weniger als die im Syllabus festgelegte Anzahl der einzuplanenden Unterrichtseinheiten eingeplant wurden. Um auch in solchen Fällen den Einsatz des Verbesserungsverfahrens zu ermöglichen, umfaßt unsere Definition von Nachbarschaft nicht nur solche Lösungen, bei denen genau die festgelegte Anzahl an Unterrichtseinheiten eingeplant ist, sondern alle Lösungen, bei denen die Anzahl der eingeplanten Unterrichtseinheiten wenigstens so groß wie in der Ausgangslösung, aber nicht größer als die festgelegte Anzahl ist.

- *Tabu-Status*: Nach jedem Zug werden alle daran beteiligten Blöcke tabu gesetzt; zur Speicherung des Tabu-Status verwalten wir für jeden Lehrgang eine Tabu-Liste fester Länge.
- *Aspirationskriterium*: Wir verwenden die übliche Definition eines Aspirationskriteriums, derzufolge der Tabu-Status einer Lösung dann ignoriert wird, wenn diese eine bessere Bewertung aufweist als die beste bislang gefundene Lösung. Von allen Zügen, die entweder

nicht tabu sind oder andernfalls dem Aspirationskriterium genügen, wird derjenige mit der niedrigsten Bewertung ausgewählt; im Falle mehrerer solcher Kandidaten mit identischer Bewertung wird unter diesen zufällig entschieden.

- *Iteration:* Anstatt in jeder Iteration die gesamte Nachbarschaft abzusuchen und daraus die beste Lösung auszuwählen, impliziert die verwendete Nachbarschaftszerlegung, daß wir in jeder Iteration nacheinander alle partiellen Nachbarschaften durchsuchen. Aus jeder partiellen Nachbarschaft wird die beste Lösung ausgewählt; liegen mehrere solche Kandidaten vor, wird zufällig entschieden. Eine vollständige Iteration läßt sich daher als ein Mehrfachzug auffassen, der auf jeden Lehrgang jeweils einen Zug anwendet. Eine sog. Nachbarschafts-Sequenz muß dann festlegen, in welcher Reihenfolge die partiellen Nachbarschaften abzusuchen sind. Die denkbar einfachste Reihenfolge, die auch hier verwendet wurde, besteht darin, alle Nachbarschaften in aufsteigender Indexreihenfolge ihrer Lehrgänge zu durchsuchen.
- *Abbruchkriterium:* Das Verfahren terminiert nach einer vorgegebenen Anzahl von Iterationen.

## 4.2. Raumzuordnung

Auf der Grundlage einer zulässigen Lehrgangsplanes kann die Raumzuordnung in jedem Block separat vorgenommen werden, da Räume hier den Charakter von erneuerbaren Ressourcen haben.

### 4.2.1. Konstruktionsverfahren

Das verwendete Konstruktionsverfahren ist recht simpel: Jedem Lehrgang wird die benötigte Anzahl der verfügbaren und geeigneten Räume zugewiesen. Erweist sich dies für einen Lehrgang als unmöglich, so versuchen wir rekursiv, für einen bereits verplanten Lehrgang einen alternativen Raum zu finden, um den freiwerdenden Raum dem betrachteten Lehrgang zuordnen zu können. Diese Vorgehensweise wiederholt sich solange, bis eine zulässige Lösung gefunden ist oder alle Möglichkeiten der Alternativensuche ausgeschöpft sind.

### 4.2.2. Verbesserungsverfahren

Wenn eine erste zulässige Raumzuordnung gefunden ist, wird der Versuch unternommen, diese durch ein Verfahren der Nachbarschafts-Suche zu verbessern; aus Effizienzgründen werden hierbei die Blöcke getrennt voneinander betrachtet (Nachbarschaftszerlegung). Für jede zulässige Raumzuordnung in einem Block besteht die Nachbarschaft aus all denjenigen Zuordnungen, die durch einen Ringtausch der Räume zwischen mehreren Lehrgängen erreicht werden können; der einfachste Fall eines solchen Zuges wäre der Tausch der Räume zwischen zwei Lehrgängen.

Für die Bestimmung solcher Ringtausch-Züge läßt sich ein einfacher graphentheoretischer Algorithmus verwenden, der Zyklen negativer Länge in einem gewichteten Digraphen erkennt (z.B. Jungnickel 1994). Dazu werden die Räume als Knoten modelliert; eine Kante von Raum  $r$  zu Raum  $r'$  wird genau dann eingeführt, wenn der in Raum  $r$  eingeplante Lehrgang auch in Raum  $r'$  eingeplant werden könnte oder wenn  $r$  frei ist. Ein Zyklus in diesem Graphen läßt sich nun als zulässige Änderung der Einplanung interpretieren, bei der iterativ entweder ein Lehrgang oder der Status "nicht eingeplant" in den jeweils nächsten Raum in dem Zyklus weitergeschoben wird. Bewertet man ferner eine Kante von  $r$  nach  $r'$  mit der Änderung des Zielfunktionswertes, der sich aus einer Verschiebung des in Raum  $r$  eingeplanten Lehrganges in Raum  $r'$  ergibt, so entspricht jeder Zyklus negativer Länge einem Zug, der zu einer besser bewerteten Raumzuordnung führt. Die Suche endet, wenn keine weiteren Verbesserungen mehr möglich sind. Der Algorithmus terminiert stets mit einer optimalen Lösung, weil nach Konstruktion des Graphen ein Zyklus negativer Länge genau dann existiert, wenn eine Verbesserung möglich ist.

## 5. Experimentelle Untersuchung

### 5.1. Testdaten

Wie in vielen praktischen Anwendungen des Operations Research, so stellte auch in diesem Projekt die Sammlung und Aufbereitung der benötigten Planungsdaten eine besonders langwierige und aufwendige Aufgabe dar. Ein Teil der Daten hatte bisher gar nicht vorgelegen, ein weiterer Teil war nicht in computerlesbarer Form vorhanden. Weitere Daten mußten, obwohl prinzipiell vorhanden, umstrukturiert werden, da die verwendeten Ansätze höhere Anforderungen an den Detaillierungsgrad der Daten stellen, als die bisherige manuelle Vorgehensweise. Um einen Eindruck von dem Umfang der Planungsdaten zu vermitteln, geben wir im folgenden einige charakteristische Größen eines typischen Datensatzes wieder: Innerhalb eines Zeitraums von 216 Perioden waren 1686 Unterrichtseinheiten aus fünf Fächern in 15 unterschiedlichen Lehrgängen einzuplanen. Dabei waren die jeweiligen An- und Abwesenheiten von 30 Lehrern unterschiedlicher Qualifikation zu berücksichtigen, die im Durchschnitt an 4,6 Tagen nicht eingesetzt werden durften. Wir erinnern nochmals daran, daß eine solche Planung sich alle vier Wochen wiederholt.

Eine experimentelle Untersuchung der Güte von Algorithmen sollte auf der Grundlage möglichst repräsentativer Testdatensätze durchgeführt werden. Die Bereitstellung einer umfangreicheren Stichprobe von Echt-Datensätzen erwies sich jedoch als undurchführbar. Der Versuch, anhand vorhandener Unterlagen Datensätze aus vergangenen Jahren sowie die entsprechenden, manuell erstellten Lehrgangspläne zu reproduzieren, hätte unverhältnismäßige Kosten nach sich gezogen. Die Verwendung eines generalisierten Datensatz-Generators wie ProGen (Kolisch et al. 1995) war aufgrund der besonderen Struktur des Problems unmöglich, die Entwicklung eines

dezidierten Generators (vgl. etwa Salewski et al. 1997) hätte den vorgegebenen Rahmen des Projektes gesprengt. Zusätzliche Testdatensätze wurden daher durch gezielte Modifikation einzelner Charakteristika der praktischen Datensätze gewonnen; ein solches Verfahren haben wir bereits in Haase et al. (1998) beschrieben.

## 5.2. Ergebnisse

Alle Algorithmen wurden in der Programmiersprache C implementiert. Das Konstruktionsverfahren zur Lehrgangsplanung wurde je zweimal durchlaufen. Der bessere der beiden gefundenen Pläne wurde an das Tabu-Search-Verfahren weitergereicht, das dann 20 Iterationen durchlief. Geeignete Einstellungen der Kontrollparameter der Algorithmen waren in vorgelagerten Experimenten ermittelt worden. Im Anschluß wurden das Konstruktions- und das Verbesserungsverfahren für die Raumzuordnung angewandt. Da diese beiden Verfahren deterministischer Natur sind, waren hierfür keine Kontrollparameter zu belegen.

Die Vorteilhaftigkeit einer algorithmischen Planungsunterstützung läßt sich anhand der folgenden Charakteristika der ermittelten Lösungen belegen (vgl. die Zielsetzungen in Abschnitt 1):

- Für alle Praxisdatensätze wurden sämtliche Nebenbedingungen eingehalten.
- Die benötigte Rechenzeit ist mit jeweils etwa 150 CPU-Sekunden (gemessen auf einem PC mit Pentium 133-Prozessor und 16 MB RAM unter Windows 95) als vernachlässigbar zu bezeichnen.
- Die Zielfunktionswerte der besten algorithmisch ermittelten Lösungen sind deutlich besser als die der manuell entwickelten Pläne. Wir verdeutlichen dies weiter unten an den entsprechenden Lösungen für den Planungszeitraum Dezember 1997.
- Für jeden Praxisdatensatz wurden fünf alternative Lehrgangspläne entwickelt.

Im folgenden vergleichen wir exemplarisch die beste algorithmische Lösung für den Dezember 1997 mit dem entsprechenden manuell entwickelten Plan der LFT. Tabelle 5 faßt für beide Pläne die Verletzungen der weichen Nebenbedingungen zusammen, die die Zielfunktion bestimmen. Von diesen weisen wir zusätzlich diejenigen separat aus, die direkt durch den - manuell ermittelten - Plan des Vormonats determiniert sind und damit innerhalb des betrachteten Monats planerisch nicht mehr beeinflußt werden können. In Spalte D weisen wir die relative Verbesserung des "manuellen" Wertes durch die algorithmische Planung aus, daher gilt  $D = (A-B)/A$ . Spalte E zeigt im wesentlichen denselben Wert, bezogen aber auf die tatsächlich in dem Monat verursachten Verletzungen, so daß  $E = (A-B)/(A-C)$  gilt.

Zielsetzungen	Priorität	Verletzungen			Verbesserung durch algorithm. Planung	
		Manueller Plan	Algorithm. Plan	Determiniert	Relativ 1	Relativ 2
		(A)	(B)	(C)	(D)	(E)
Standardreihenfolge	10	unbekannt	102	71	entfällt	entfällt
Lehrerwünsche	5	2	0	0	100%	100%
Lehrerauslastung 1	2	358	192	0	46%	46%
Lehrerauslastung 2	5	45	15	9	67%	83%
Lehrerwechsel	5	17	16	15	6%	N/A
Fächerverteilung 1	2	154	113	38	27%	35%
Fächerverteilung 2	4	72	40	38	44%	94%

*Tabelle 5: Bester algorithmisch vs. bester manuell ermittelter Plan*

Folgende Anmerkungen scheinen uns angebracht: Die Anzahl der Verletzungen der Standardreihenfolge des manuellen Plans wurde aufgrund des hohen Aufwands, der dafür nötig gewesen wäre, nicht erhoben. Die scheinbar hohe Zahl von 102 Verletzungen durch den algorithmischen Plan stellt aber keinen so schlechten Wert dar, wie dies zunächst den Anschein haben mag, denn 71 dieser Verletzungen sind bereits aus dem (manuell entwickelten) Plan des Vormonats festgelegt. Zum besseren Verständnis erinnern wir daran, daß die algorithmische Planung versucht, bereits im Vormonat begonnene Themen fortzusetzen, so daß sie gezwungen ist, bereits begangene Verletzungen der Standardreihenfolge fortzuschreiben. Für alle übrigen Ziele erreicht unser methodengestützter Ansatz deutlich bessere Ergebnisse. Sieht man von den Verletzungen der Standardreihenfolge ab, bei denen uns für die manuelle Planung keine Vergleichswerte vorliegen, liegt der Zielfunktionswert des manuellen Plans bei 1632, während der entsprechende Wert unseres Ansatzes mit 925 um 43% niedriger liegt.

## 6. Zusammenfassung und Ausblick

Dieser Beitrag ist der Zeit- und Ressourcenplanung der fliegerischen Theorieausbildung bei der LFT gewidmet. Die Erkenntnis, daß die Problemstellung der LFT mit den Problemstellungen anderer Schulungsanbieter (Haase et al. 1998, 1999) einen gemeinsamen Kern von Planungsgegenständen, Nebenbedingungen und Zielsetzungen besitzen, führt uns dazu, diese als Repräsentanten eines eigenständigen Problemfeldes zu betrachten, der Lehrgangsplanung. Eine vergleichende Analyse der relevanten Gebiete der Ausbildungs- und Schulungsplanung läßt erkennen, daß die Lehrgangsplanung in ihren Anforderungen deutlich komplexer ist als traditionelle Problemfelder.

U.a. liefern die Ergebnisse der Analyse die Erklärung, warum sich die seitens der LFT begutachteten Softwarepakete zur Schulstundenplanung für die Lehrgangsplanung der LFT als ungeeignet erweisen mußten: Trotz einiger Gemeinsamkeiten sind die beiden Problemfelder

grundsätzlich zu verschieden in ihren Strukturen, insbesondere müssen zulässige, d.h. in der Praxis umsetzbare, Lehrgangspläne einer Reihe von weiteren, komplexen Nebenbedingungen genügen. Pläne, die nur unter Berücksichtigung von Anforderungen der Schulstundenplanung erstellt werden, werden daher im allgemeinen gegen eine oder mehrere Nebenbedingungen verstoßen, deren Beachtung für die praktische Umsetzung der Pläne essentiell wäre. Außerdem berücksichtigt die Schulstundenplanung neben der Zulässigkeit der Pläne keine weiteren Zielsetzungen.

Damit stellt sich die grundsätzliche Aufgabe, für das Feld der Lehrgangsplanung eigene Verfahren zu entwickeln. Anhand der Problemstellung der LFT haben wir daher beispielhaft Verfahren erarbeitet; sie verwenden diverse algorithmische Ansätze für den Aufbau und die anschließende Verbesserung von Lehrgangsplänen, für die dann mit weiteren Verfahren geeignete Raumzuordnungen entwickelt und verbessert werden. Gemeinsam liefern diese Algorithmen Lösungen, die im Hinblick auf alle betrachteten Ziele erheblich besser abschneiden als die von erfahrenen Planern der LFT manuell erstellten Pläne. Ferner benötigt die algorithmische Planung nur Minuten, um die endgültigen fünf Alternativvorschläge zu ermitteln, während die manuelle Planung mehrere Beschäftigungstage beansprucht. Außerdem sind die Verfahrensideen hinreichend allgemein, so daß sie ohne allzugroßen Aufwand an andere Probleme der Lehrgangsplanung angepaßt werden können.

Im Ergebnis ist der Nachweis gelungen, daß der Einsatz eines methodengestützten Entscheidungsunterstützungssystems für die Lehrgangsplanung bei der LFT möglich und sinnvoll ist. Zu den Vorteilen, die sich aus dem Einsatz eines solchen System ergeben, zählen ein geringerer zeitlicher und personeller Aufwand für die Planung, eine höhere, aber auch gleichmäßigere Auslastung der Lehrkräfte und eine höhere Transparenz der Planungsergebnisse für alle Betroffenen (in der Vergangenheit war das einzige Medium, das einen lehrgangsübergreifenden Überblick erlaubte, eine mehrere Quadratmeter große Lego-Plantafel). Ferner erlaubt die Schnelligkeit der Planung eine höhere Flexibilität bei der Reaktion auf veränderte Planungssituationen wie auch verringerte Antwortzeiten bei der Bearbeitung von Kundenanfragen hinsichtlich zusätzlicher Ausbildungsangebote. Schließlich ermöglicht unser Ansatz auch die Durchführung von Szenario-Analysen, bspw. zu den Auswirkungen veränderter tariflicher oder gesetzlicher Arbeitszeitregelungen.

Die Entwicklung eines umfassenden Planungssystems für die LFT, das auch auf den in diesem Artikel beschriebenen Komponenten basiert, ist gegenwärtig in Arbeit.

### **Danksagungen**

Wie immer in komplexen Projekten waren viele an dem Gelingen beteiligt. Seitens der LFT möchten wir vor allem Robert Nyenhuis erwähnen, zu Beginn des Projektes Leiter der Theo-

rieausbildung, der dieses Projekt auf den Weg brachte, seinen Nachfolger Detlev Carius, der es am Laufen hielt, und Reiner Brauwer, dessen fachliche Mitarbeit unersetzbar war. Schließlich danken wir Peter Kandzia für seine wertvolle Unterstützung und Jürgen Hauschildt für hilfreiche Hinweise.

## Anmerkung

Das in diesem Artikel beschriebene Projekt fand statt, während die Autoren am Institut für Betriebswirtschaftslehre sowie am Institut für Informatik und Praktische Mathematik, beide Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, tätig waren. Daher geben die Ansichten in diesem Artikel ausschließlich die Meinung der Autoren wieder, nicht aber notwendig die der Deutsche Lufthansa AG oder einer ihrer Tochtergesellschaften.

## Literatur

- ABRAMSON, D. (1991), "Constructing school timetables using simulated annealing: sequential and parallel algorithms", *Management Science* 37, S. 98-113.
- ALVAREZ-VALDES, R., G. MARTIN, AND J.M. TAMARIT (1996), "Constructing good solutions for a school timetabling problem", *Journal of the Operational Research Society* 47, S. 1203-1215.
- AUBIN, J. AND J.A. FERLAND (1989), "A large scale timetabling problem", *Computers and Operations Research* 16, S. 67-77.
- BÖTTCHER, J., A. DREXL, R. KOLISCH, AND F. SALEWSKI (1999), "Project scheduling under partially renewable resource constraints", *Management Science* 45, pp. 543-559.
- BOOSE, J. (1989), "A survey of knowledge acquisition techniques and tools", *Knowledge Acquisition* 1, pp. 3-38
- CANGALOVIC, M. AND J.A.M. SCHREUDER (1991), "Exact colouring algorithm for weighted graphs applied to timetabling problems of different length", *European Journal of Operational Research* 51, S. 248-258.
- CANGALOVIC, M. AND J.A.M. SCHREUDER (1992), "Modelling and solving an acyclic multi-period timetabling problem", *Discrete Applied Mathematics* 35, S. 177-195.
- COSTA, D. (1994), "A tabu search algorithm for computing an operational timetable", *European Journal of Operational Research* 76, S. 98-110.
- DE GANS, O.B. (1981), "A computer timetabling system for secondary schools in the Netherlands", *European Journal of Operational Research* 7, S. 175-182.
- DE WERRA, D. (1985), "An introduction to timetabling", *European Journal of Operational Research* 19, S. 151-162.
- DIGE, P., C. LUND, AND H.C. RAVN (1993): "Timetabling by simulated annealing", in: *Applied simulated annealing*, Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems 396, Springer, Berlin, S. 151-174.
- EGLESE, R.W. AND G.K. RAND (1987), "Conference seminar timetabling", *Journal of the Operational Research Society* 38, S. 591-598.
- GLOVER, F., E. TAILLARD, AND D. DE WERRA (1993), "A user's guide to tabu search", *Annals of Operations Research* 41, S. 3-28.
- HAASE, K., J. LATTEIER, AND A. SCHIRMER (1998), "The course scheduling problem at Lufthansa Technical Training", *European Journal of Operational Research* 110, S. 441-456.
- HAASE, K., J. LATTEIER, AND A. SCHIRMER (1999), "Course planning at Lufthansa Technical Training - Constructing more profitable schedules", *Interfaces* 29:5, S. 95-109.

- HANSMANN, K.-W. (1997), *Industrielles Management*, 5. Auflage, Oldenbourg.
- HERTZ, A. (1992), "Finding a feasible course schedule using tabu search", *Discrete Applied Mathematics* 35, S. 255-270.
- JUNGNICKEL, D. (1994), *Graphen, Netzwerke und Algorithmen*, BI-Wissenschaftsverlag.
- KANG, L. AND G.M. WHITE (1992), "A logic approach to the resolution of constraints in timetabling", *European Journal of Operational Research* 61, S. 306-317.
- KIM, J. AND J. COURTNEY (1988), "A survey of knowledge acquisition techniques and and the relevance to managerial problem domains", *Decision Support Systems* 4, pp. 269-284.
- KOLISCH, R. (1996), "Serial and parallel resource-constrained project scheduling methods revisited: Theory and computation", *European Journal of Operational Research* 90, S. 320-333.
- KOLISCH, R. AND S. HARTMANN (1999), "Heuristic algorithms for solving the resource-constrained project scheduling problem: Classification and computational analysis", in: *Project scheduling - Recent models, algorithms and applications*, J. Weglarz (Hrsg.), Kluwer, Boston, S. 147-178.
- KOLISCH, R., A. SPRECHER, AND A. DREXL (1995), "Characterization and generation of a general class of resource-constrained project scheduling problems", *Management Science* 41, S. 1693-1703.
- MOONEY, E.L., R.L. RARDIN, AND W.J. PARMENTER (1996), "Large-scale classroom scheduling", *IIE Transactions* 28, S. 369-378.
- POTZAHN, K. (1998), *Entwicklung und Implementierung eines Stundenplanerstellungsprogramms bei der Lufthansa Flight Training GmbH*, unpublished Diploma thesis, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel (in German).
- SALEWSKI, F., A. SCHIRMER, AND A. DREXL (1997), "Project scheduling under resource and mode identity constraints: Model, complexity, methods, and application", *European Journal of Operational Research* 102, S. 88-110.
- SAMPSON, S.E., J.R. FREELAND, AND E.N. WEISS (1995), "Class scheduling to maximize participant satisfaction", *Interfaces* 25, S. 30-41.
- SCHAERF, A. (1999), "A survey of automated timetabling", *Artificial Intelligence Review* 13, S. 87-127.
- SCHIRMER, A. (1995), "A guide to complexity theory in operations research", Manuskripte aus den Instituten für Betriebswirtschaftslehre der Universität Kiel 381, [www.bwl.uni-kiel.de/bwlinstitute/prod/mab/schirmer/pdf/wp381.pdf](http://www.bwl.uni-kiel.de/bwlinstitute/prod/mab/schirmer/pdf/wp381.pdf).
- SCHIRMER, A. (1999), *Project scheduling with scarce resources - Models, methods, and applications*, Kovac, Hamburg.
- SCHIRMER, A. (2000a), "Widerstände gegen Innovationen - Erfahrungen aus der Einführung von Entscheidungsunterstützungssystemen für die Personaleinsatzplanung", *Zeitschrift Führung + Organisation* 69, S. 340-348.
- SCHIRMER, A. (2000b), "Case-based reasoning and improved adaptive search for project scheduling", *Naval Research Logistics* 47, pp. 201-222.
- SCHIRMER, A. AND A. DREXL (2001), "Allocation of partially renewable resources - Concept, capabilities, and applications", *Networks* 37, pp. 21-34.
- SCHMIDT, G. AND T. STRÖHLEIN (1980), "Timetable construction - An annotated bibliography", *The Computer Journal* 23, S. 307-316.
- SLOWINSKI, R. (1981), "Multiobjective network scheduling with efficient use of renewable and nonrenewable resources", *European Journal of Operational Research* 7, pp. 265-273.
- TRIPATHY, A. (1984), "School timetabling - A case in large binary integer linear programming", *Management Science* 30, S. 1473-1489.