

Haase, Knut; Latteier, Jörg

**Working Paper — Digitized Version**

## Deckungsbeitragsorientierte Lehrgangsplanung bei der Lufthansa Technical Training GmbH

Manuskripte aus den Instituten für Betriebswirtschaftslehre der Universität Kiel, No. 395

**Provided in Cooperation with:**

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

*Suggested Citation:* Haase, Knut; Latteier, Jörg (1996) : Deckungsbeitragsorientierte Lehrgangsplanung bei der Lufthansa Technical Training GmbH, Manuskripte aus den Instituten für Betriebswirtschaftslehre der Universität Kiel, No. 395, Universität Kiel, Institut für Betriebswirtschaftslehre, Kiel

This Version is available at:

<https://hdl.handle.net/10419/149842>

**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. 395

Deckungsbeitragsorientierte Lehrgangsplanung  
bei der  
Lufthansa Technical Training GmbH

Knut Haase und Jörg Latteier



Nr. 395

**Deckungsbeitragsorientierte Lehrgangsplanung  
bei der  
Lufthansa Technical Training GmbH**

Knut Haase und Jörg Latteier

## 1 Problemstellung und Abgrenzung

Im Rahmen der 1995 erfolgten Umstrukturierung der Deutschen Lufthansa AG sind aus einzelnen Unternehmensbereichen selbständige Tochterunternehmen entstanden. Hierzu gehört auch die *Lufthansa Technical Training GmbH (LTT)* mit Schulungseinrichtungen in Berlin, Frankfurt und Hamburg.

Kunden der LTT sind die Lufthansa Technik AG und die technischen Abteilungen anderer Fluggesellschaften. Die technischen Abteilungen sind für die Kontrolle, Wartung und Überholung von Flugzeugen zuständig. Dabei zu verrichtende Tätigkeiten erfordern unterschiedliche Qualifikationen des technischen Personals. Zum technischen Personal gehören Elektroniker, Mechaniker und Techniker. Welche Aufgabe ein bestimmter Mitarbeiter an einem technischen Gerät durchführen darf, hängt entsprechend internationaler und nationaler Sicherheitsbestimmungen und Standards vom Ausbildungsstand des Mitarbeiters ab. Qualifizieren kann sich ein Mitarbeiter durch den erfolgreichen Abschluß spezieller und aufeinander aufbauender Lehrgänge der LTT. Einige Qualifikationen sind erst nach Jahren erreichbar. Daraus wird ersichtlich, daß die technischen Abteilungen eine langfristige, qualifikationsbezogene Personalplanung betreiben müssen.

Die LTT bietet derzeit ca. 670 verschiedene Lehrgangstypen an. Jeder Lehrgangstyp besteht aus einer festen Anzahl von Themen, so daß durch den Lehrgangstyp eindeutig vorgegeben ist, welche Themen behandelt werden. Die Anzahl der Unterrichtsstunden eines Themas ist ebenfalls fest. Zwischen den einzelnen Themen bestehen inhaltlich begründete Reihenfolgebeziehungen (z.B. Prüfung nach Theorie). Darüber hinaus ist eine bei der Planung zu bevorzugende Standardreihenfolge der Themen eines Lehrgangstyps gegeben. Die Standardreihenfolge reflektiert die ideale inhaltliche Komposition der zu schulenden Themen. Zu einem Thema gehören in der Regel ein theoretischer und ein praktischer Teil. Praktische Übungen werden in der Regel an Flugzeugen durchgeführt, die auch im normalen Linienbetrieb eingesetzt sind. Abhängig vom im Lehrgangstyp geschulten Flugzeugmuster können diese Flugzeuge nur in den Abendstunden zur Verfügung stehen, so daß die praktischen Übungen für diese Flugzeugmuster abends stattfinden müssen. Bedingt durch zusätzliche Ruhezeitregelungen wird dadurch die Lehrgangsplanung erschwert. Die Dauer der einzelnen Lehrgangstypen variiert stark. So dauern einige Lehrgangstypen nur eine Woche, während andere sich über ein Jahr erstrecken. Ob und wie oft ein Lehrgangstyp in einem Jahr durchgeführt wird, hängt von den Teilnehmerforderungen der technischen Abteilungen ab, die bereits zwischen Anfang August und Ende September des Vorjahres feststehen.

Zur Durchführung der Lehrgänge beschäftigt die LTT ungefähr 80 festangestellte Lehrkräfte, wobei jeder Lehrer einer Schulungseinrichtung fest zugeordnet ist. Während einige Lehrer sich vorrangig für einen bestimmten Flugzeugtyp spezialisiert haben, sind andere für ein mehrere Flugzeugtypen übergreifendes Lehrfach zuständig. Neben den Lehrern wird bei Bedarf Fachpersonal aus technischen Abteilungen der Lufthansa Technik AG als Tutoren zur Unterstützung eingesetzt.

Abbildung 1 enthält einen Auszug aus dem Lehrgangsplan des Jahres 1995. Darin zeigt der untere Balken an, wann der Lehrgang für Elektriker zur Erreichung des Qualifikationsgrades B1 für das Flugzeugmuster Boeing 747-400 stattfindet.

Unabhängig von höherwertigen strategischen Unternehmenszielen wird im jeweils laufenden Geschäftsjahr Gewinnmaximierung angestrebt. Einnahmen entstehen durch Lehrgangsgebühren, die für jeden Teilnehmer erhoben werden. Kosten entstehen durch Gehälter für festangestellte Lehrer, Unterrichtsmaterialien, Mieten angemietete Unterrichtsräume sowie für Tutoren und Simulatorbenutzung. Darüber hinaus entstehen Reisekosten für Lehrer, die in einem Lehrgang eingeplant werden, der nicht in der Schulungseinrichtung stattfindet, der sie zugeordnet sind (beispielsweise wenn ein Lehrer aus Hamburg in Frankfurt eingesetzt wird).

Einfache Unterrichtsräume stehen in ausreichender Anzahl zur Verfügung und müssen daher für die Planung nicht berücksichtigt werden. Es existieren jedoch auch knappe Raumressourcen. So muß der theoretische Unterricht bestimmter Themen in sogenannten Computer-

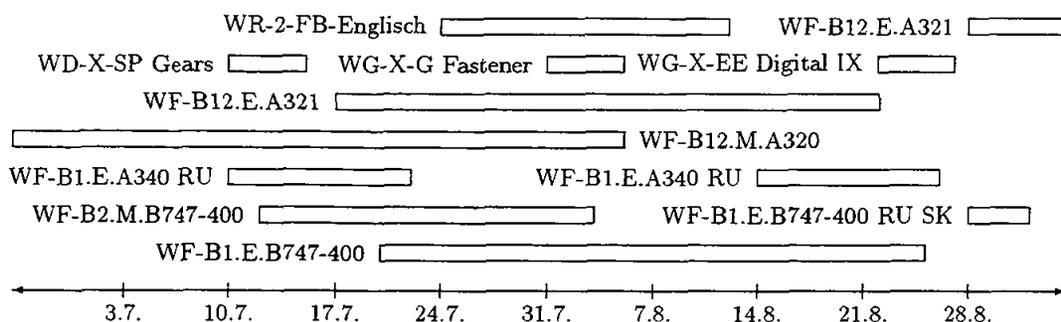


Abb. 1. Auszug aus dem Lehrgangplan 1995 der LTT

Based-Training Räumen (CBT-Räume) stattfinden, welche mit Multimedia-Computern ausgestattet sind und (wegen des hohen Anschaffungspreises) nur in begrenzter Anzahl zur Verfügung stehen. Praktische Übungen bestimmter Themen müssen in Simulatoren stattfinden, welche ebenfalls nur eingeschränkt verfügbar sind. Da Simulatoren in bestimmten Räumen fest untergebracht sind, lassen sie sich als (knappe) "Raumressource" betrachten; d.h. wenn für ein Thema ein bestimmter Raum erforderlich ist, so kann es sich dabei um einen CBT-Raum oder um einen Flugsimulator handeln.

Den knappen Lehrer- und Raumkapazitäten ist gemeinsam, daß sie dazu führen können, daß nicht alle nachgefragten Lehrgänge realisierbar sind. Auch Teilnehmerquoten, die die durch eine technische Abteilung gleichzeitig maximal abstellbaren Mitarbeiter reflektieren, können dazu führen, daß ein Lehrgang nicht angeboten wird. Welche Lehrgänge dann letztlich durchgeführt werden, hängt maßgeblich von den Deckungsbeiträgen (Einnahmen minus direkt zuordbaren Kosten) der einzelnen Lehrgänge ab.

Trotz einer zu vermutenden engen Verwandtschaft läßt sich die Problemstellung nicht in die Literatur zur Schulstundenplanung bzw. zur Planung von Vorlesungen oder Examensprüfungen einordnen (vgl. z.B. Balakrishnan (1991), Carter/Laporte/Lee (1996), de Werra (1985), Drexl/Juretzka/Salewski (1993), Wright (1996)). So besteht beispielsweise in keiner der erwähnten Problemstellungen das Ziel der Gewinnmaximierung. Auch beim Lehrgangsplanungsproblem wie es beispielweise in Hertz (1992) betrachtet wird, steht stattdessen das Auffinden eines zulässigen Plans im Vordergrund. Dagegen ist ein zulässiger Lehrgangsplan für die LTT immer gewährleistet; eine triviale Lösung ist zum Beispiel, keinen Lehrgang anzubieten. Während in Hertz (1992) auch Reihenfolgebeziehungen zwischen Themen berücksichtigt werden, wird im Gegensatz zum Planungsproblem der LTT von einer festen Zuordnung zwischen Lehrer und Thema ausgegangen. Das Planungsproblem der LTT ist auch keine Verallgemeinerung der genannten Problemstellungen. So kann in Hertz (1992) im Gegensatz zur LTT-Problematik ein Thema auf mehrere Unterrichtstage mit Unterbrechungen und alternativen Stundenverteilungen verteilt werden. In Schulen und in Universitäten werden Unterrichts- bzw. Vorlesungspläne entworfen, in denen sich die angebotenen Veranstaltungen von Woche zu Woche wiederholen. Im Gegensatz dazu variieren die Veranstaltungen der LTT von Woche zu Woche sehr stark. Damit verdeutlichen wir die Schwierigkeit, das Problem der LTT in die Literatur einzuordnen. Zugleich ist nicht zu erwarten, daß aus der Literatur bekannte Verfahren direkt anwendbar sind.

Die Lehrgangspläne eines Jahres werden für alle Schulungseinrichtungen der LTT zentral in Frankfurt erstellt. Dabei entsteht ein mehrere Quadratmeter Papier umfassender Plan. Veränderungen des Lehrgangsplans erfordern in der Regel umfangreiche und zeitaufwendige Änderungen der Eintragungen, so daß das Durchspielen einer Vielzahl verschiedener Einplanungsalternativen eines Lehrgangs aus Zeit- und Komplexitätsgründen nicht realisierbar ist. Vermutet wurde allerdings, daß sich durch ein computergestütztes Planungssystem erhebli-

che Verbesserungen hinsichtlich der Auslastung der Raum- und Lehrerkapazitäten sowie der Anzahl durchführbarer Lehrgänge erzielen lassen. Insbesondere durch den Wegfall manueller Tätigkeiten sollte der Planungsprozeß derart beschleunigt werden, daß auch komplexe Einplanungsalternativen mit vertretbarem Zeitaufwand überprüfbar werden. Daher wurde beschlossen, ein Projekt zu starten mit dem Ziel einer deutlich verbesserten Nutzung der vorhandenen Ressourcen.

Die Ergebnisse des Projekts werden in den folgenden Abschnitten zusammengefaßt. Zunächst formulieren wir im folgenden Abschnitt ein mathematisches Modell zur formalen Beschreibung der Problemstellung. In Abschnitt 3 verdeutlichen wir anhand eines Beispiels das Modell. Da ein Verfahren zur Lösung des Problems aus der Literatur nicht bekannt ist, wird in Abschnitt 4 ein neues Verfahren präsentiert. In Abschnitt 5 gehen wir auf die Ergebnisse ein, die im Rahmen der Praxisanwendung erzielt wurden. Die Arbeit schließt mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick in Abschnitt 6.

## 2 Modellformulierung

Wir geben zunächst eine verbale Beschreibung der Details, die bei der Aufstellung eines Lehrgangsplans für die LTT zu beachten sind. Darauf aufbauend präsentieren wir dann ein mathematisches Modell der Problemstellung.

Auf der Basis der Kundennachfrage wird bestimmt, wie oft ein bestimmter Lehrgangstyp anzubieten ist. Ein Lehrgang wird nur dann angeboten, wenn eine Mindestteilnehmerzahl erfüllt ist. Aufgrund didaktischer Erwägungen und beschränkter Raumkapazitäten wird ferner für jeden Lehrgang eine maximale Teilnehmerzahl vorgegeben. Welcher Lehrgang in welcher Schulungseinrichtung stattfindet, wird im Vorwege eindeutig festgelegt. Die Festlegung kann dabei auf Wunsch der Kunden oder aufgrund der Schulungsinhalte des Lehrgangstyps oder Ausstattung der einzelnen Schulungseinrichtungen erfolgen. Jeder nachgefragte Lehrgang eines bestimmten Typs erhält eine eigene eindeutige Bezeichnung (Nummer), so daß wir im folgenden nur eine Menge von Lehrgängen  $J$  betrachten. Somit können zwei unterschiedlich bezeichnete Lehrgänge zum selben Lehrgangstyp gehören. Die Menge der Lehrer  $L$ , die Menge der Räume  $S$  und die Menge der Kunden  $K$  sind gegeben. Durch den Modus  $m$  des Lehrgangs  $j$  ist festgelegt, wann der Lehrgang  $j$  beginnt, wann welche Themen behandelt werden, wann welche Lehrer benötigt werden, wann welche Räume belegt werden und wieviele Teilnehmer von welchem Kunden kommen. Alle möglichen Einplanungsalternativen des Lehrgangs  $j$  sind in der Menge der Modi  $M_j$  zusammengefaßt.

Bei der Konstruktion der Modi sind einige Details zu beachten, die wir im folgenden näher erläutern.

Inhaltlich begründete Reihenfolgebeziehungen zwischen einzelnen Themen eines Lehrgangs sind zu beachten. So kann beispielsweise eine schriftliche Prüfung erst nach der Abhandlung bestimmter Lehrinhalte erfolgen. Komplexere Reihenfolgebeziehungen entstehen bei Themen, die zu einer Gruppe zusammengefaßt werden. Ein Thema, das nicht zu einer Themengruppe gehört, muß entweder vor oder nach dem Unterrichten der Themengruppe behandelt werden. Innerhalb einer Themengruppe können wiederum zusätzliche (komplexe) Reihenfolgebeziehungen bestehen.

Unterrichtet wird normalerweise Montag bis Freitag von 7.30-15.30 Uhr. Davon ausgenommen sind Themen, an denen ein für Übungszwecke benötigtes Flugzeug erst am Abend zur Verfügung steht. Ein Tag wird daher in zwei Schichten (normal, spät) unterteilt. Die Länge einer Schicht wird in der Anzahl der Unterrichtsstunden gemessen. Sowohl die Lehrgangsteilnehmer als auch die Lehrer dürfen pro Tag nur in einer Schicht eingeplant werden. Da für einen Lehrer innerhalb einer Schicht ein Lehrgangswechsel erfolgen kann, ist zur genauen Abbildung der Problemstellung der Planungshorizont in Perioden mit der Länge "Unterrichtsstunde" zu unterteilen.

Die Startperiode eines Lehrgangs hängt von verschiedenen Faktoren ab. Grundsätzlich beginnt jeder Lehrgang in der ersten Stunde des ersten Unterrichtstages. Weiterhin muß eine Startperiode gewährleisten, daß eine fest vorgegebene Lehrgangsdauer

eingehalten wird, wobei die Lehrgangsdauer in der Anzahl Unterrichtstage gemessen wird. Eine Überschreitung der vorgesehenen Lehrgangsdauer kann beispielsweise erfolgen, wenn am Montagabend eine praktische Übung eingeplant wird, so daß für die Teilnehmer am Dienstagvormittag aufgrund arbeitsrechtlicher Ruhezeitregelungen kein Unterricht stattfinden darf. Vermieden wird eine derartige Verlängerung nur dann, wenn die Übung vor einem freien Tag (Feiertag, Samstag) durchgeführt wird. Ein ähnlicher Zusammenhang besteht bei Prüfungen, die in der ersten Stunde eines Unterrichtstages beginnen müssen. Wird nämlich eine Prüfung so eingeplant, daß am Tag vor der Prüfung einige Stunden ausfallen müssen, kann der Lehrgang im Vergleich zu einer anderen Einplanung, bei der der Vortag vollständig genutzt wird, mehr Unterrichtstage benötigen. Wir werden diesen Sachverhalt am Beispiel im Abschnitt 3 verdeutlichen.

Zur Abbildung der jeweiligen Lehrerkapazität ist zu unterscheiden zwischen der Kapazität pro Stunde, pro Quartal (s. unten) und pro Jahr. Wir erweitern deshalb unsere Periodeneinteilung, indem wir fiktive Perioden einführen, die jeweils das Ende eines Quartals und des Jahres markieren. Besitzt beispielsweise das 1. Quartal 1000 Unterrichtsstunden, so markiert die Periode  $t = 1001$  das Ende des 1. Quartals. Die Anzahl der Stunden, die dann der Lehrer  $r \in L$  im 1. Quartal zur Verfügung steht, ist durch  $c_{r,1001}$  gegeben. Bei der Berechnung der in einem Quartal geleisteten Arbeitszeit eines Lehrers werden auch Vorbereitungszeiten für die unterrichteten Themen berücksichtigt. Kann ein Lehrer  $r$  in der Unterrichtsstunde  $t$  eingeplant werden, so erhält er eine Kapazität von  $c_{r,t} = 1$  und  $c_{r,t} = 0$  sonst. Für alle zu betrachtenden Räume  $r \in S$  definieren wir analog eine Periodenkapazität  $c_{r,t} \in \{0, 1\}$ , wobei für die fiktiven Perioden keine Kapazität definiert werden muß. Ist beispielsweise der Raum  $r$  in der Periode  $t$  vermietet, so ist  $c_{r,t} = 0$ .

In welchen Stunden ein Thema unterrichtet wird, hängt vom Modus eines Lehrgangs ab. Denn durch den Modus ist bekannt, in welcher Reihenfolge (direkt hintereinander) Themen stattfinden. Für einige Themen gelten allerdings zusätzliche Bedingungen, die die Mengen der erlaubten Startperioden des Lehrgangs weiter einschränken können. So dürfen Prüfungen - wie oben bereits erwähnt - nur in der 1. Stunde eines Tages starten. Ähnliches gilt für praktische Übungen, die in den Abendstunden durchgeführt werden.

Wird ein Lehrer  $r$  für den Lehrgang  $j$  im Modus  $m$  in der Stunde  $t$  eingesetzt, so ist der entsprechende Ressourcenbedarf gegeben durch  $a_{j,r,m,t} = 1$ , und  $a_{j,r,m,t} = 0$  sonst. Sei  $t$  die fiktive Periode eines Quartals oder Jahres. Dann ist der Ressourcenbedarf  $a_{j,r,m,t}$  des Lehrers  $r$  zunächst gegeben aus der Summe der Unterrichtsstunden, in denen der Lehrer  $r$  im betrachteten Zeitraum für den Lehrgang  $j$  im Modus  $m$  eingesetzt wird. Zur vollständigen Bestimmung des Ressourcenbedarfs ist auch die Vorbereitungszeit für ein Thema zu beachten. Dies kann pauschal über den Kapazitätsbedarf eines Quartals erfolgen, oder es kann genau festgelegt werden, in welchen Stunden der Lehrer ein Thema vorbereitet. Bei der LTT wird eine pauschale Betrachtungsweise bevorzugt. Weiterer Kapazitätsbedarf eines Lehrers entsteht, wenn er in einem Lehrgang eingesetzt wird, der in einer anderen Schule stattfindet. Die Reisezeit kann zum einen pauschal oder zum anderen dadurch berücksichtigt werden, daß Lehrer in bestimmten Stunden nicht eingesetzt werden dürfen. Ein pauschale Betrachtungsweise ist zum Beispiel dann geeignet, wenn der betreffende Lehrer am Wochenende anreist. Erfolgt die Anreise während der normalen Unterrichtszeit, so muß für die entsprechenden Stunden ein Kapazitätsbedarf derart berücksichtigt werden, daß der Lehrer nicht während seiner Reise gleichzeitig für Unterrichtszwecke eingeteilt wird. Eine Besonderheit für unsere Modellformulierung ist die Situation, daß ein Lehrer innerhalb einer Woche für zwei verschiedene Lehrgänge in einer auswärtigen Schule eingesetzt wird, so daß eigentlich nur einmal Reisezeiten zu berücksichtigen sind. Modelltechnisch lassen sie sich durch die Einführung fiktiver Ressourcen berücksichtigen Haase (1996).

Die Anzahl der Mitarbeiter des Kunden  $r \in K$ , die in dem Modus  $m$  des Lehrgangs  $j$  eingeplant sind, wird als Ressourcenbedarf  $a_{j,r,m,t}$  berücksichtigt. Dagegen wird die maximale Anzahl der in Periode  $t$  freistellbaren Mitarbeiter des Kunden  $r$  als Ressourcenangebot  $c_{r,t}$  erfaßt. Um zu gewährleisten, daß nicht mehr Mitarbeiter als von einer technischen Abteilung für Unterrichtszwecke abstellbar sind eingeplant werden, ist eine entsprechende Restriktion

notwendig, die gewährleistet, daß von der Ressource Kunde nicht mehr als verfügbar genutzt wird. Hierbei genügt es zur Reduzierung der Anzahl der Restriktionen, eine entsprechende Kapazitätsrestriktion auf Tagesbasis zu formulieren.

Der Deckungsbeitrag  $d_{j,m}$  des Lehrgangs  $j$  im Modus  $m$  hängt von der Teilnehmerzahl und den eingesetzten Lehrern ab. Die Einnahmen errechnen sich durch die Gebühren, die die Kunden pro Teilnehmer entrichten. Modusabhängige Kosten entstehen durch die Anzahl eingesetzter Tutoren und Reisen für auswärtig eingesetzte Lehrer.

Zusammenfassend definieren wir die Parameter:

$J$	Menge der einplanbaren Lehrgänge
$K$	Menge der Kunden
$L$	Menge der Lehrer
$M_j$	Menge der Modi des Lehrgangs $j$
$S$	Menge der Räume (CBT-Räume, Simulatoren)
$R$	Menge der verfügbaren Ressourcen ( $R = L \cup S \cup K$ )
$P_r$	Menge der Perioden, für die ein Kapazitätsangebot der Ressource $r$ definiert ist
$a_{j,r,m,t}$	benötigte Kapazität der Ressource $r$ in der Periode $t \in P_r$ bei Einplanung des Lehrgangs $j$ im Modus $m$
$c_{r,t}$	verfügbare Kapazität der Ressource $r$ in der Periode $t \in P_r$
$d_{j,m}$	Deckungsbeitrag bei Einplanung des Lehrgangs $j$ im Modus $m$

Unter Verwendung der Entscheidungsvariablen

$$y_{j,m} = \begin{cases} 1 & : \text{ falls Lehrgang } j \text{ im Modus } m \text{ eingeplant wird} \\ 0 & : \text{ sonst} \end{cases}$$

läßt sich das Planungsproblem der LTT als mehrperiodiges *Knapsack-Problem* (vgl. z.B. Drexel (1988)) formulieren:

$$\text{Maximiere } \sum_{j \in J} \sum_{m \in M_j} d_{j,m} y_{j,m} \quad (1)$$

unter den Nebenbedingungen

$$\sum_{j \in J} \sum_{m \in M_j} a_{j,m,r,t} y_{j,m} \leq c_{r,t} \quad r \in R; t \in P_r \quad (2)$$

$$\sum_{m \in M_j} y_{j,m} \leq 1 \quad j \in J \quad (3)$$

$$y_{j,m} \in \{0, 1\} \quad j \in J; m \in M_j \quad (4)$$

Maximiert wird der Gesamtdeckungsbeitrag (1) unter Berücksichtigung der Kapazitätsrestriktionen (2) und der Bedingung (3), daß jeder Lehrgang höchstens einmal eingeplant werden darf.

Zur Verdeutlichung des Modells betrachten wir im nächsten Abschnitt ein Beispiel.

### 3 Beispiel

Der Einfachheit halber gehen wir davon aus, daß die Lehrgangsplanung für das kommende Jahr schon durchgeführt ist und aufgrund einer verspäteten Bedarfsanmeldung (vgl. Tabelle 1) einer technischen Abteilung zu überprüfen ist, inwieweit die zusätzliche Nachfrage in den ersten beiden Kalenderwochen berücksichtigt werden kann. Die Kapazitäten der Räume sind im dargestellten Beispiel nicht knapp und daher vernachlässigbar. Bereits eingeplante Lehrgänge - auch hinsichtlich der Teilnehmerzahl - sind nicht mehr zu verändern. Die Lehrgänge sind der Frankfurter Schulungseinrichtung zuzuordnen. Es können hierzu nur ortsansässige Lehrer eingeteilt werden, so daß keine Reisezeiten entstehen. Ferner besteht keine Obergrenze hinsichtlich der vom Kunden abkömmlichen Mitarbeiter.

Tabelle 1. Zusätzliche Nachfrage

Lehrgangstyp	Anzahl der Anmeldungen
B1.B747	9
B2.B747	12

In Tabelle 2 sind die Lehrgangstypen näher beschrieben. Auf der Basis der minimalen und maximalen Teilnehmerzahlen der Lehrgangstypen (5. und 6. Spalte in Tabelle 2) bestimmen wir die Menge der zusätzlich nachgefragten Lehrgänge. Jeder Lehrgang erhält eine eigene Lehrgangsnummer. Lehrgänge sind - falls möglich - vollständig mit Teilnehmern aufzufüllen. Daher bilden wir von B1.B747 nur einen Lehrgang (1) und von B2.B747 zwei Lehrgänge (2 und 3) mit 8 Teilnehmern bzw. mit 4 Teilnehmern. Die Themen der Lehrgangstypen erhalten eine eindeutige Nummer. Die Vergabe der Nummern für einen Lehrgangstyp erfolgt dabei gemäß der bevorzugten Standardreihenfolge der Themen (vgl. 2. Spalte von Tabelle 2). Welcher der 3 Frankfurter Lehrer A, B und C für ein bestimmtes Thema eingeteilt werden kann, ist der letzten Spalte der Tabelle 2 zu entnehmen. Dabei repräsentiert T in beliebiger Anzahl zur Verfügung stehende Tutoren. Wieviele Lehrer für ein bestimmtes Thema benötigt werden, hängt unter anderem von der Anzahl der Teilnehmer ab, die gleichzeitig unterrichtet werden können. So sind beispielsweise für die praktische Übung (Thema 3 und Thema 7) zwei Lehrer erforderlich, wenn mehr als 4 Teilnehmer insgesamt am Lehrgang teilnehmen. Die Angaben in Tabelle 2 beschreiben die Lehrgangstypen nur unvollständig. Beispielsweise aus Vereinfachungsgründen sind typabhängige, maximale Anzahl an Unterrichtsstunden pro Tag weggelassen, da diese im Beispiel der Länge einer Schicht entsprechen.

Tabelle 2. Beschreibung der Lehrgangstypen

Lehrgangstyp	Thema	Dauer <sup>1)</sup>	VZ <sup>2)</sup>	min <sup>3)</sup>	max <sup>3)</sup>	Schicht	Lehrer
<u>B1.B747</u>				4	8		
Elektronik	1	4	1	4	8	normal	A
Instrumentenlehre	2	5	1	4	8	normal	B
praktische Übung	3	3	1	0	4	spät	A,B,T <sup>4)</sup>
Prüfung	4	2	0	4	8	normal	A,B
<u>B2.B747</u>				4	8		
Elektronik	5	6	1	4	8	normal	A
Instrumentenlehre	6	6	1	4	8	normal	C
praktische Übung	7	3	1	0	4	spät	A,C,T <sup>4)</sup>
Prüfung	8	3	0	4	8	normal	A,C

<sup>1)</sup> in Perioden

<sup>2)</sup> Vorbereitungszeit in Perioden

<sup>3)</sup> Teilnehmerzahl

<sup>4)</sup> Tutor

Die (vereinfachte) Periodeneinteilung der ersten beiden Kalenderwochen ist in Tabelle 3 wiedergegeben, wobei wir davon ausgehen, daß nur am Freitag Übungsstunden eingeplant werden. Wir betrachten zu Illustrationszwecken nur fiktive wöchentliche Kapazitäten der Lehrer. Um die wöchentliche Kapazität der Lehrer abzubilden, führen wir die Perioden  $t = 19$  und  $t = 38$  ein (vgl. letzte Spalte der Tabelle 4). Tabelle 4 gibt auch an, in welchen Stunden ein Lehrer (noch) verfügbar ist.

**Tabelle 3.** Periodeneinteilung  $t = 1, \dots, 38$

Kalenderwoche	1.						2.					
	Mo	Di	Mi	Do	Fr	Sa	Mo	Di	Mi	Do	Fr	Sa
normal	1	4	7	10	13	19	20	23	26	29	32	38
	2	5	8	11	14		21	24	27	30	33	
	3	6	9	12	15		22	25	28	31	34	
spät					16						35	
					17						36	
					18						37	

**Tabelle 4.** Verfügbare Lehrerkapazitäten

Lehrer	1. Kalenderwoche																			
	t	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
A		1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	15
B		0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	10
C		0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	15
Lehrer	2. Kalenderwoche																			
	t	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38
A		1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	8
B		1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6
C		1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	12

Tabelle 5 enthält für jeden Lehrgang die Menge der verschiedenen Durchführungsmodi. Bei der Konstruktion der Modi sind wir davon ausgegangen, daß die Themen 2 und 3 (bzw. 5 und 6) eine Gruppe bilden und daß die Prüfung am Ende des Lehrgangs einzuplanen ist. Innerhalb der Themengruppen gelten feste Reihenfolgebeziehungen, d.h. Thema 2 vor 3 (bzw. Thema 5 vor 6). Somit kann beispielsweise Thema 1 nur direkt vor (entsprechend der Standardreihenfolge) oder direkt nach der Themengruppe (2,3) eingeplant werden. Die praktischen Übungen können in unserem Beispiel nur am Freitagabend der 1. Kalenderwoche stattfinden. Damit ergeben sich in Abhängigkeit der Reihenfolgebeziehungen für jeden Lehrgang nur zwei Startperioden. Bei den praktischen Übungen ist darauf zu achten, daß die Teilnehmer in kleinere Gruppen unterteilt werden. In unserem Beispiel bilden wir Gruppen mit jeweils 4 Teilnehmern. Es muß mindestens 1 Lehrer der LTT die Übung leiten, d.h. Tutoren dürfen nur zur Unterstützung eingesetzt werden. Daher betrachten wir keinen Modus, bei dem für die praktische Übung zwei Tutoren eingesetzt werden. Da die Anzahl der Teilnehmer in Lehrgang 3 nur 4 ist, ist auch keine weitere Aufteilung der Gruppe bei der praktischen Übung erforderlich.

Eine Besonderheit ergibt sich aus der Forderung, daß sich die Lehrgangsdauer nicht erhöhen darf. Der Lösung in Tabelle 6 entnehmen wir, daß Lehrgang  $j = 1$  im Modus  $m = 8$  eingeplant und Thema 1 nicht durchgehend unterrichtet wird, d.h. Thema 1 wird in  $t = 12$  und - nach einer Unterbrechung - in  $t = 20$  bis  $t = 22$  behandelt. Die Reihenfolgebeziehungen sind somit nicht mehr streng eingehalten und ein Thema wird nicht mehr durchgehend

Tabelle 5. Modimengen

Lehrgang	Modus	Themenfolge	Lehrer	Startperiode
1	1	(1,2,3,4)	(A,B,{A,T},A)	4
	2	(1,2,3,4)	(A,B,{A,T},B)	4
	3	(1,2,3,4)	(A,B,{B,T},A)	4
	4	(1,2,3,4)	(A,B,{B,T},B)	4
	5	(1,2,3,4)	(A,B,{A,B},A)	4
	6	(1,2,3,4)	(A,B,{A,B},B)	4
	7	(2,3,1,4)	(B,{A,T},A,A)	7
	8	(2,3,1,4)	(B,{A,T},A,B)	7
	9	(2,3,1,4)	(B,{B,T},A,A)	7
	10	(2,3,1,4)	(B,{B,T},A,B)	7
	11	(2,3,1,4)	(B,{A,B},A,A)	7
	12	(2,3,1,4)	(B,{A,B},A,B)	7
2	1	(5,6,7,8)	(A,C,{A,T},A)	4
	2	(5,6,7,8)	(A,C,{A,T},C)	4
	3	(5,6,7,8)	(A,C,{C,T},A)	4
	4	(5,6,7,8)	(A,C,{C,T},C)	4
	5	(5,6,7,8)	(A,C,{A,C},A)	4
	6	(5,6,7,8)	(A,C,{A,C},C)	4
	7	(6,7,5,8)	(C,{A,T},A,A)	7
	8	(6,7,5,8)	(C,{A,T},A,C)	7
	9	(6,7,5,8)	(C,{C,T},A,A)	7
	10	(6,7,5,8)	(C,{C,T},A,C)	7
	11	(6,7,5,8)	(C,{A,C},A,A)	7
	12	(6,7,5,8)	(C,{A,C},A,C)	7
3	1	(5,6,7,8)	(A,C,A,A)	4
	2	(5,6,7,8)	(A,C,A,C)	4
	3	(5,6,7,8)	(A,C,C,A)	4
	4	(5,6,7,8)	(A,C,C,C)	4
	5	(6,7,5,8)	(C,A,A,A)	7
	6	(6,7,5,8)	(C,A,A,C)	7
	7	(6,7,5,8)	(C,C,A,A)	7
	8	(6,7,5,8)	(C,C,A,C)	7

unterrichtet. Erwartungsgemäß hätte Thema 1 erst in Periode  $t = 20$  starten sollen mit der Konsequenz, daß die vierte Stunde in Periode  $t = 23$  abgehalten wird. Die Prüfung (Thema 4) hätte dann erst frühestens in Periode  $t=26$  beginnen dürfen, bedingt durch die Forderung, daß Prüfungen grundsätzlich in der 1. Periode zu beginnen haben. Dies hätte zur Folge, daß sich der Lehrgang um einen Tag, verglichen mit der kürzesten Lehrgangsdauer, verlängert. Zur Vermeidung der Verlängerung - und nur dann - wird ein *Splitten* eines Themas, wie in der Lösung gezeigt, erlaubt. Die eingeklammerten Lehrerbezeichnungen bei den Perioden 13-15 in Tabelle 6 zeigen an, daß die entsprechenden Lehrer tagsüber aufgrund arbeitsrechtlicher Bestimmungen nicht eingesetzt werden dürfen (im Beispiel, weil sie am selben Tag bereits zur Spätschicht eingeteilt sind). Der gesamte Kapazitätsbedarf der Lehrer gemäß der Lösung in Tabelle 6 errechnet sich aus den Unterrichtsstunden und den Vorbereitungszeiten für die einzelnen Themen; z.B. gilt  $a_{A,19} = (6 + 1) + (1 + 1) + (3 + 0) = 12$  (Werte nach Themen geordnet; Dauer + Vorbereitungszeit). Lehrgang 3 kann nicht eingeplant werden, da die Lehrerkapazitäten nicht ausreichen; so kann Lehrer C aufgrund der Wochenarbeitszeitbeschränkung nicht zweimal Instrumentenlehre unterrichten. Sind nur 12 Mitarbeiter der technischen Abteilung gleichzeitig abkömmlich, so wäre der Lehrgangsplan nur dann zulässig, wenn wir statt des Lehrgangs 2 Lehrgang 3 in den Lehrgangsplan aufnehmen würden.

Das Beispiel skizziert, wie vielfältig die Anforderungen hinsichtlich des Lehrgangsproblems der LTT sind. Es unterstreicht aber zugleich die Flexibilität des mathematischen Modells, in dem die Anforderungen bei der Konstruktion der Modimengen berücksichtigt

Tabelle 6. Lösung

$j$ $m$		1. Kalenderwoche																	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	8	Lehrer						B	B	B	B	B	A	(A)	(A)	(A)	{A,T}	{A,T}	{A,T}
		Thema						2	2	2	2	2	1				3	3	3
2	2	Lehrer	A	A	A	A	A	C	C	C	C	C	C	(C)	(C)	(C)	{C,T}	{C,T}	{C,T}
		Thema	5	5	5	5	5	5	6	6	6	6	6	6			7	7	7
		2. Kalenderwoche																	
		20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37
1	1	Lehrer	A	A	A	B	B												
		Thema	1	1	1	4	4												
2	2	Lehrer	C	C	C														
		Thema	8	8	8														

werden. Das Beispiel macht aber auch deutlich, daß die Anzahl der Modi insbesondere bei Praxisproblemen eine kaum noch handhabbare Größenordnung erreicht.

Daher entwickeln wir im nächsten Abschnitt eine heuristische Methode zur approximativen Lösung des Modells.

#### 4 Lösungsverfahren

Zur Lösung des Problems stellen wir im folgenden ein Konstruktionsverfahren vor. Wir verzichten dabei auf eine formale Darstellung und skizzieren lediglich die wesentlichen Ideen des Verfahrens. Details sind in Haase/Latteier (1996) dargestellt.

Wir unterscheiden zwei Mengen:  $J_0$ , die Menge der noch einzuplanenden Lehrgänge und  $J_1$ , die Menge der bereits eingeplanten Lehrgänge. Zu Beginn des Konstruktionsverfahren ist  $J_1 = \emptyset$  und  $J_0 = J$ . Durch eine noch zu erläuternde Prioritätsregel wird eine Ordnung der Lehrgänge  $j \in J_0$  festgelegt. Gemäß der Ordnung werden sukzessiv Lehrgänge aus  $J_0$  entfernt und überprüft, ob der jeweilige Lehrgang in  $J_1$  aufgenommen werden kann. Zur Überprüfung der Einplanbarkeit des Lehrgangs  $j$  sind die Modi  $m \in M_j$  gemäß einer ebenfalls noch zu erläuternden Vorschrift auszuwählen. Die Vorschrift legt fest, in welcher Reihenfolge die Modi eines einzuplanenden Lehrgangs betrachtet werden. Ist ein Lehrgang  $j$  in einem Modus  $m$  einplanbar, so wird der Lehrgang  $J_1$  zugeordnet und keine weiteren Modi  $m' \in M_j$  untersucht. Ferner werden die verfügbaren Kapazitäten geeignet aktualisiert:

$$c_{r,t} := c_{r,t} - a_{j,m,r,t} \quad r \in R; t \in P_r$$

Einmal eingeplante Lehrgänge bzw. verplante Ressourcen werden nicht verändert, so daß ein einmal gescheiterter Lehrgang auch zu keinem späteren Zeitpunkt (des Verfahrens) eingeplant werden kann (da alle Einplanungsmodi geprüft werden). Unabhängig davon, ob ein Lehrgang mit Erfolg eingeplant werden konnte, wird der nächste Lehrgang  $j \in J_0$  gemäß der definierten Ordnung betrachtet. Dieser Vorgang wiederholt sich solange, bis  $J_0 = \emptyset$ . Die Verwendung von Tutoren verursacht Zusatzkosten. Daher wird am Ende des Verfahrens jeder eingeplante Tutor nach Möglichkeit durch einen festangestellten Lehrer ersetzt, wenn dadurch der Deckungsbeitrag erhöht werden kann. Die Notwendigkeit dieses Schritts ergibt sich aus der folgenden Vorschrift, nach der die Modi eines Lehrgangs ausgewählt werden:

**Modi-Auswahl-Vorschrift:** Die Reihenfolge, in der die Modi eines Lehrgangs überprüft werden, erfolgt gemäß folgender nach absteigender Priorität geordneter Regeln:

1. Tutoren sind grundsätzlich einzusetzen.
2. Ortsansässige Lehrkräfte sind zu bevorzugen.
3. Die Standardreihenfolge der Themen eines Lehrgangs ist bevorzugt einzuplanen.

4. Alle alternativen Startperioden werden betrachtet, bevor eine Änderung der Ressourcen-zuordnung erfolgt.
5. Lehrkräfte mit niedriger Auslastung sind zu bevorzugen.
6. Lehrgänge sind so zu terminieren, daß eine gleichmäßige Kapazitätsauslastung erfolgt.

Dabei wird Regel  $i$  vor Regel  $j$  angewendet, wenn  $i < j$  gilt. Die erste Regel bewirkt, daß mit der knappen Ressource Lehrer "sparsam" umgegangen wird und Pläne erzeugt werden, die vorrangig mit Tutoren besetzt sind. (Somit wird die Notwendigkeit des letzten Verfahrensschritts einsichtig.) Die Auslastung eines Lehres wird durch Gegenüberstellung des "abgeschätzten Kapazitätsbedarfs" (Restnachfrage aufgrund von  $J_0$ ) und der verfügbaren Kapazität des Lehrers gemessen. Gemäß Regel 2 werden alle alternativen Themenreihenfolgen überprüft, bevor auswärtige Lehrkräfte eingeplant werden. Gemäß Regel 6 sind Startperioden zu bevorzugen, die gewährleisten, daß ein einzuplanender Lehrgang in einen Zeitraum gelegt wird, in dem vergleichsweise wenig Lehrgänge bisher eingeplant sind.

Aufgrund der 1. Regel werden im Beispiel des vorherigen Abschnitts die Modi  $m = 5, 6, 11, 12$  der Lehrgänge  $j = 1, 2$  (vgl. 2. Spalte in Tabelle 5) zunächst nicht betrachtet. Sie sind erst im letzten Verfahrensschritt relevant, wo wir Tutoren durch Lehrer geeignet ersetzen. Die anderen Modi der Lehrgänge in Tabelle 5 sind entsprechend der Regeln konstruiert.

Ziel der Lehrgangsplanung ist die Maximierung des Gesamtdeckungsbeitrags. Bei der Konstruktion eines Lehrgangplans ist es daher naheliegend, Lehrgänge mit hohem Deckungsbeitrag vorrangig auszuwählen. Üblicherweise ist das Ziel komplementär mit dem Ziel, die Anzahl der eingeplanten Lehrgänge zu maximieren. Ein Lehrgang mit einer geringen Anzahl möglicher Startperioden gerät leichter in Gefahr, nicht einplanbar zu sein. Gleiches gilt, wenn für einzelne Themen eines Lehrgangs nur (noch) wenige Lehrer verfügbar sind. Um eine hohe Anzahl von eingeplanten Lehrgängen zu erreichen, ist es daher sinnvoll, Lehrgänge mit geringer Flexibilität (wenige Startperioden, wenige Lehrer) vorrangig einzuplanen. Sind einige Lehrgänge bereits eingeplant, so werden dadurch die Lehrerverfügbarkeiten noch nicht eingeplanter Lehrgänge in der Regel weiter eingeschränkt. Um dem Rechnung zu tragen, definieren wir eine dynamische Prioritätsregel zur Auswahl von Lehrgängen aus  $J_0$ , d.h. nach Einplanung eines Lehrgangs bestimmen wir für jeden Lehrgang  $j \in J_0$  die Lehrerverfügbarkeit neu.

Zur Bestimmung der Prioritätsregel definieren wir

- $u_j$  Anzahl möglicher Startperioden für den Lehrgang  $j \in J_0$
- $v_j$  Durchschnittliche Anzahl verfügbarer Lehrer pro Thema des Lehrgangs  $j \in J_0$  in Abhängigkeit bereits eingeplanter Lehrgänge  $i \in J_1$
- $w_j$  Deckungsbeitrag des Lehrgangs  $j \in J_0$

Die Priorität Lehrgang  $j \in J_0$  einzuplanen, ist somit umgekehrt proportional zu  $u_j$  und  $v_j$  und proportional zu  $w_j$ . Zur Vermeidung von Skalierungsproblemen normieren wir die Prioritätswerte:

$$U_j = \frac{\min\{u_i | i \in J_0\}}{u_j}$$

$$V_j = \frac{\min\{v_i | i \in J_0\}}{v_j}$$

$$W_j = \frac{w_j}{\max\{w_i | i \in J_0\}}$$

Darauf basierend definieren wir den Prioritätswert  $p_j$  wie folgt:

$$p_j = U_j^{\beta_1} \times W_j^{\beta_2} \times V_j^{\beta_3} \quad j \in J_0$$

mit  $\beta_h \in [0, 1]$  ( $h = 1, 2, 3$ ).

Je größer  $p_j$ , desto höher die Priorität, Lehrgang  $j$  als nächstes einzuplanen. Daher wird derjenige Lehrgang  $j$  ausgewählt, für den gilt:

$$p_j = \max\{p_i | i \in J_0\}$$

Zur Bestimmung geeigneter Werte für die Parameter  $\beta_h$  ( $h = 1, 2, 3$ ) verwenden wir das in Haase (1996) dargestellte Verfahren. Dabei werden systematisch Kombinationen von Parameterausprägungen bestimmt, d.h. der durch die Parameter aufgespannte Raum wird nach einem Schema durchsucht. Hierbei werden die einzelnen Wertebereiche in  $s$  Abschnitte gleicher Länge unterteilt, so daß der Parameterraum in Teilräume unterteilt wird (hier in Würfel). Jeder Eckpunkt eines Teilraums repräsentiert Werte für  $\beta_h$  ( $h = 1, 2, 3$ ), mit denen eine neue Lösung mit dem oben skizzierten Konstruktionsverfahren zu bestimmen ist. Die Berechnung der Lösungen für alle Eckpunkte bezeichnen wir als eine Iteration. Die Reihenfolge, in der Lehrgänge aus  $J_0$  zur Aufnahme in dem Lehrgangsplan ( $J_1$ ) ausgewählt werden, hängt von den Parameterwerten ab. Unterschiedliche Kombinationen der Parameterwerte können dazu führen, daß ein Lehrgang einmal einen höheren und einmal einen kleineren Prioritätswert als ein anderer Lehrgang erhält. Benötigen beide Lehrgänge dieselben Ressourcen, so daß nur einer eingeplant werden kann, dann wird nur der Lehrgang mit dem höheren Prioritätswert eingeplant werden. Wir erhalten somit in Abhängigkeit der Parameterwerte unterschiedliche Lehrgangspläne, d.h. die einzelnen Lösungen "an den Eckpunkten" variieren. Um den Eckpunkt, bei dem die beste Lösung in einer Iteration gefunden wurde, wird in einer weiteren Iteration eine detailliertere Suche (kleinere Würfel) nach geeigneten Parameterausprägungen durchgeführt. Die Suche bricht ab, wenn in der letzten Iteration keine Verbesserung der bis dahin besten Lösung erzielt wurde.

## 5 Ergebnisse

Im folgenden Abschnitt wird ein direkter Vergleich zwischen der heuristischen Lösung und der manuell ermittelten Lösung für den Lehrgangsplan 1996 vorgenommen. Wir haben uns zunächst auf die Frankfurter Schulungseinrichtung mit einer Nachfrage von 164 Lehrgängen beschränkt. Bereits die hierzu erforderliche EDV-technische Erfassung sämtlicher relevanter Lehrer-, Raum- und Lehrgangsdaten dauerte mehrere Monate. (In dem erheblichen Zeitaufwand liegt auch die Begründung, daß bisher nur die Frankfurter Schulungseinrichtung betrachtet wurde.) Die Ergebnisse sind in Tabelle 7 zusammengefaßt. Es zeigt sich, daß ein erhebliches Verbesserungspotential gegenüber der manuell ermittelten Lösung vorhanden ist. So kann bei Anwendung der Heuristik der Gesamtdeckungsbeitrag um 25.9% verbessert werden. Sowohl in der manuell ermittelten als auch in der heuristischen Lösung werden alle Lehrgänge eingeplant. Entscheidend für die Verbesserung ist der reduzierte Einsatz von Lehrern auswärtiger Schulungseinrichtungen (vgl. Zeile 2 in Tabelle 7). Anhand der Kosten für Tutoren ist ersichtlich, daß das heuristische Verfahren die Verbesserung durch den verstärkten Einsatz von Tutoren erreicht. Die 4. Spalte der Tabelle 7 enthält den Zielfunktionswert, der erreicht wird, wenn alle Lehrgänge ohne Zusatzkosten (Reisekosten, Einsatz von Tutoren) eingeplant werden. Hinsichtlich dieser (einfachen) oberen Schranke besitzt die Heuristik eine Differenz von 6.7%. (Die tatsächliche Differenz ist allerdings noch kleiner, da gezeigt werden kann, daß bei Einplanung aller Lehrgänge Reisekosten nicht vermeidbar sind.)

**Tabelle 7.** Vergleich der Lösungsgüte

	manuell	Heuristik	obere Schranke
Gesamtdeckungsbeitrag	1.061.747 DM	1.336.919 DM	1.432.800 DM
Reisekosten	347.533 DM	48.361 DM	0 DM
Kosten für Tutoren	23.520 DM	47.520 DM	0 DM

Das Verfahren wurde unter Verwendung von Borland C auf einem mit 100MHz getakteten 486-DX Personalcomputer implementiert. Die Rechenzeit des Verfahrens hängt insbesondere vom Detaillierungsgrad ab, mit dem der durch die Gewichtungsfaktoren  $\beta_h$  ( $h = 1, 2, 3$ ) aufgespannte Raum durchsucht wird (vgl. Haase (1996) ). Werden beispielsweise die Bereiche zwischen den aktuellen Obergrenzen und Untergrenzen der jeweiligen Faktoren in  $s=8$  Teilschritten gleicher Länge durchlaufen, so werden pro Iteration 729 Lösungen generiert. Eine weitere Iteration wird nur dann durchgeführt, wenn in der letzten Iteration der Zielfunktionswert verbessert wurde. Somit hängt die Anzahl der Iterationen vom jeweiligen Datensatz ab.

Die Auswirkungen hinsichtlich der Wahl von  $s$  zeigt folgendes Ergebnis: Für  $s = 8$  beträgt die Rechenzeit des Verfahrens für den Praxisdatensatz 15145 Sekunden. Bei  $s = 3$  benötigt dagegen das Verfahren nur 330 Sekunden. Der Zielfunktionswert verschlechterte sich dabei nur um 0.6%. Dieses Ergebnis verdeutlicht, daß das Verfahren auch für die kurzfristige Planung geeignet erscheint. Eine weitere Beschleunigung wird möglich, wenn nur wenige Werte für die Gewichtungsfaktoren zugelassen werden, wobei sich (laufend zu aktualisierende) Werte anbieten, die sich in der Vergangenheit "bewährt" haben.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wird ein Projekt zwischen der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel und der Lufthansa Technical Training GmbH vorgestellt. Gegenstand der Arbeit ist die Erstellung des Lehrgangsplans eines Jahres für die Schulungseinrichtungen der LTT. Die zugrundeliegende Problemstellung wird als binäres Optimierungsmodell modelliert. Jede Spalte des Modells entspricht einer Einplanungsalternative (Modus) eines Lehrgangs. Jeder Lehrgang ist - soweit es die verfügbaren Raum- und Lehrkapazitäten zulassen - einmal einzuplanen, unter der Zielsetzung der Maximierung des Gesamtdeckungsbeitrags.

Zur Lösung des Modells wird ein heuristisches Verfahren vorgestellt. Die Ergebnisse auf der Basis der Planungsdaten der Frankfurter Schulungseinrichtung des Jahres 1996 zeigen, daß die Erstellung eines Plans (ohne Datenerfassung bzw. -eingabe) in wenigen Minuten bis Stunden möglich ist, während die bisherige manuelle Planung mehr als einen Mannmonat erforderte. Weiterhin wird im Vergleich zur manuell ermittelten Lösung der Gesamtdeckungsbeitrag bei Verwendung der heuristischen Lösung um mehrere Hunderttausend DM gesteigert.

Im Rahmen zukünftiger Forschungsarbeiten sind oberer Schranken des Modells zur Abschätzung der Lösungsgüte der Heuristik zu bestimmen. Bei kleineren Datensätze kann voraussichtlich das Modell mit Standardmethoden - wie sie beispielsweise in CPLEX enthalten sind - exakt gelöst werden. Für größere Datensätze ist ein naheliegender Ansatz, nur die LP-Relaxation exakt mit Spaltengenerierungsverfahren zu lösen.

Für den kurzfristigen täglichen Einsatz sind zusätzliche Verfahren zu entwickeln, die in wenigen Sekunden eine revidierende Planung ermöglichen, um auf zusätzliche oder veränderte Bedarfe reagieren zu können.

Derzeit wird von der LTT ein computergestütztes System mit einer benutzerfreundliche Oberfläche und einer leistungsfähigen Datenbank entwickelt, in das das Verfahren integriert wird. Langfristig wird die kommerzielle Nutzung des Planungssystems angestrebt.

## Literatur

1. N. Balakrishnan. Examination Scheduling: A Computerized Application. *OMEGA International Journal of Management Science*, 19(1):37-41, 1991.
2. M. W. Carter, G. Laporte, and S. Y. Lee. Examination Timetabling: Algorithmic Strategies and Applications. *Journal of the Operational Research Society*, 47:373-383, 1996.
3. D. de Werra. An Introduction to Timetabling. *European Journal of Operational Research*, 19:151-162, 1985.

4. A. Drexl. A Simulating Annealing Approach to the Multiconstraint Zero-one Knapsack Problem. *Computing*, 40:1–8, 1988.
5. A. Drexl, J. Juretzka, and F. Salewski. Academic Course Scheduling Under Workload and Changeover Constraints. Technical Report 337, Institut für Betriebswirtschaftslehre, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, 1993.
6. K. Haase. Capacitated Lot-sizing with Sequence Dependent Setup Costs. *OR Spektrum*, 18:51–59, 1996.
7. K. Haase and J. Latteier. The Course Scheduling Problem at Lufthansa Technical Training GmbH. Technical Report (in Vorbereitung), Institut für Betriebswirtschaftslehre, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, 1996.
8. A. Hertz. Finding a Feasible Course Schedule using Tabu Search. *Discrete Applied Mathematics*, 35:255–270, 1992.
9. M. Wright. School Timetabling Using Heuristic Search. *Journal of the Operational Research Society*, 47:347–357, 1996.

## Danksagung

Für konstruktive Unterstützung danken wir Prof. Dr. A. Drexl. Dank gilt auch den engagierten Mitarbeitern der Lufthansa Technical Training GmbH. Dabei sind hervorzuheben Herr Hollmann, der stets als Ansprechpartner zur Verfügung stand, und Herr Kohrs, der in aufwendiger Detailarbeit die Daten bereitgestellt hat. “Last but not least” ist dem Leiter des gesamten Schulungsbereiches, Herrn Reichow, für die Förderung des Projekts zu danken.