

5 Erprobung der neuen Lösungsansätze

5.1 Implementation eines prototypischen Softwaresystems

Damit die Frage nach dem Potenzial der Gemischt-ganzzahligen Programmierung für eine effektive automatisierte Setzung von Stundenplänen allgemeinbildender Schulen befriedigend beantwortet werden kann, bedarf es einer praktischen Erprobung der in Kapitel 4 vorgestellten neuen Lösungsansätze ToMIP, HiMIP und SeMIP. Zu diesem Zweck habe ich ein spezielles prototypisches Softwaresystem implementiert, welches durch die Verknüpfung dreier verschiedener Komponenten die für die Durchführung und Evaluation von Testläufen erforderlichen Funktionalitäten zur Verfügung stellt.⁴⁶

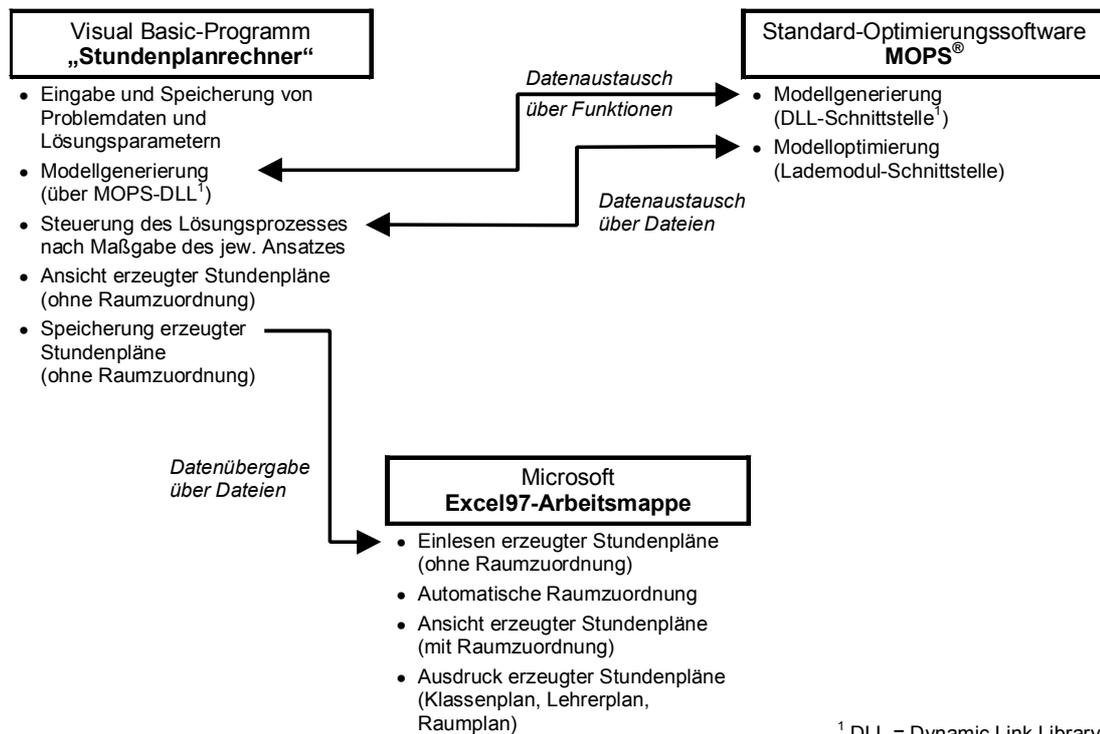
Unter diesen drei Komponenten stellt die kommerziell verfügbare Standard-Optimierungssoftware MOPS die Kernkomponente dar. Sie wird für die Generierung und für die Lösung der gemischt-ganzzahligen Modelle eingesetzt. Die zweite Komponente bildet das Windows-Programm „Stundenplanrechner“, welches für die Eingabe der Problemdata, für die Transformation der Problemdata in das bzw. die durch den jeweiligen Ansatz definierten gemischt-ganzzahligen Modelle und für die Steuerung des Lösungsprozesses verwendet wird. Eine ebenfalls von mir entworfene Microsoft Excel97-Arbeitsmappe stellt die dritte Komponente des Softwaresystems dar. Mit einem in ihr enthaltenen Makro werden die erzeugten Stundenpläne in ein druckfertiges Format transferiert. Dabei wird auch die in den gemischt-ganzzahligen Modellen nicht abgebildete (triviale) Raumzuordnung innerhalb der Raumgruppen vorgenommen.⁴⁷

Einen Überblick über die wesentlichen Aufgaben der drei Komponenten MOPS, „Stundenplanrechner“ und Excel-Arbeitsmappe des prototypischen Softwaresystems gibt [Abbildung 5.1](#). Eine genauere Beschreibung der für diese Studie relevanten Eigenschaften der drei Komponenten wird in den nachfolgenden Abschnitten dieses Unterkapitels vorgenommen.

⁴⁶ Das hier präsentierte Softwaresystem dient ausschließlich zu Forschungszwecken. Es ist aufgrund seiner prototypischen Architektur und Benutzeroberfläche in seiner gegenwärtigen Form für einen praktischen Einsatz an den Schulen weder geeignet noch vorgesehen.

⁴⁷ Zur Trennung von Zeit- und Raumzuordnung in den neuen Lösungsansätzen vgl. Abschnitt 4.1.3.

Abbildung 5.1: Komponenten des Softwaresystems für die Erprobung der Lösungsansätze ToMIP, HiMIP und SeMIP



5.1.1 Mathematischer Kern: MOPS – Mathematical Optimization System

Das unter der Federführung von Prof. U. H. Suhl entwickelte Standard-Softwaresystem für die Mathematische Optimierung MOPS® (= **M**athematical **O**ptimization **S**ystem) wurde erstmals 1987 für die Lösung Linearer Programme eingesetzt und wird seitdem laufend weiterentwickelt. Herzstück dieses Systems ist die Lineare Optimierung mit Hilfe einer auf der Methodik der LU-Basis-Faktorisierung (vgl. Suhl und Suhl [1990 und 1993]) beruhenden Implementation des Simplex-Algorithmus¹. Besonders für die Lösung großer linearer Modelle geeignet ist die Innere-Punkte-Methode (interior point method), welche seit 1999 als Alternative zum Simplex-Verfahren ebenfalls in MOPS enthalten ist (vgl. Suhl [2000]).

MOPS beinhaltet seit 1994 standardmäßig ein LP-basiertes Branch-and-Bound-Verfahren für die Lösung ganzzahliger und gemischt-ganzzahliger Modelle. Dem Anwender stehen dabei mehrere alternative Knotenwahlstrategien und Branching-Heuristiken zur Auswahl, die den Verlauf des Lösungsprozesses erheblich beeinflussen. Einen Überblick über die möglichen Einstellungen der entsprechenden MOPS-Parameter *xnodse* für die Knotenwahl und *xbrheu* für die Branching-Heuristik gibt [Tabelle 5.1](#).

Tabelle 5.1: MOPS-Parameter für Knotenwahl und Branching-Heuristik innerhalb des Branch-and-Bound-Prozesses

(Darstellung für ein 0/1-Minimierungsmodell)

Parameter $xnodse$: Strategie der Knotenwahl	
Wert	Strategie
0	zuletzt erzeugter Knoten zuerst (LIFO)
1	Knoten k mit dem niedrigsten Zielfunktionswert $z(LP(k))$ der zu k gehörenden LP-Relaxation $LP(k)$ zuerst (Best Bound)
2	Knoten k mit der niedrigsten Summe $unzul(k)$ der Verletzungen der Ganzzahligkeitsbedingung zuerst (Lowest Infeasibility), wobei: $unzul(k) := \sum_{v \in V^{0/1}} \min\{w_k(v), 1 - w_k(v)\}; \quad \text{wobei}$ $w_k(v) := \text{Wert der 0/1-Variablen } v \text{ an Knoten } k$ $V^{0/1} := \text{Menge aller 0/1-Variablen des betrachteten Modells}$
3	Knoten k mit bester (= maximaler) Projektion $bp^{Beale}(k)$ zuerst (Best Projection); Berechnungsweise nach Beale [1979]: $bp^{Beale}(k) := [z_{min} - z(LP(k))] / unzul(k); \quad \text{wobei}$ $z_{min} := \text{Zielfunktionswert der besten bisher gefundenen ganzzahligen Lösung}$
4	Knoten k mit bester (= minimaler) Projektion $bp^{Forrest}(k)$ zuerst (Best Projection); Berechnungsweise nach Forrest, Hirst und Tomlin [1974]: $bp^{Forrest}(k) := z(LP(k)) + faktor \cdot unzul(k); \quad \text{wobei}$ $faktor := \begin{cases} [z_{min} - z(LP(sk))] / unzul(sk) & \text{falls bereits mindestens eine ganzzahlig-zulässige Lösung gefunden wurde} \\ 0,4 \cdot z(LP(sk)) / unzul(sk) & \text{sonst} \end{cases}$ $sk := \text{Startknoten im Entscheidungsbaumes des Branch-and-Bound-Prozesses}$
Parameter $xbrheu$: Branching-Heuristik	
Wert	Strategie
0	Variablenwahl: fraktionelle 0/1-Variable ¹ mit dem höchsten Zielfunktionskoeffizienten Wertewahl: 0
1	Variablenwahl: fraktionelle 0/1-Variable mit dem niedrigsten Zielfunktionskoeffizienten Wertewahl: 1
2	Variablenwahl: 0/1-Variable, deren Wert am weitesten von 0 und 1 entfernt ist Wertewahl: nach kaufmännischer Rundung
3	Variablenwahl: fraktionelle 0/1-Variable mit dem höchsten Zielfunktionskoeffizienten; bevorzugt fixed charge-Variablen ² Wertewahl: 0
4	Variablenwahl: fraktionelle 0/1-Variable mit der höchsten zugewiesenen Priorität Wertewahl: je nach Einstellung 0 oder 1

Anmerkungen:

¹ fraktionelle Variable = Variable mit Ganzzahligkeitsanforderung, die in der Lösung der aktuellen LP-Relaxation einen nicht ganzzahligen Wert aufweist

² Als fixed charge-Variablen gelten solche 0/1-Variablen y , die eine Summe beliebiger kontinuierlicher oder ganzzahliger Variablen v_j ($j \in J$) durch eine Restriktion des Typs

$$\sum_{j \in J} v_j - M \cdot y \leq 0$$

kontrollieren, wobei M eine sehr große Zahl (Platzhalter für $+\infty$) darstellt. Fixed charge-Variablen sind innerhalb der SeMIP-Modellstruktur nicht gegeben.

Mit der Branching-Heuristik $xbrheu = 4$ bietet MOPS die Möglichkeit, den Branch-and-Bound-Algorithmus an die jeweilige individuelle Problemstellung anzupassen. Dies geschieht durch die Definition problemspezifischer Prioritäten für die Variablenwahl. Von der Branching-Heuristik 4 macht das Softwaresystem für die Setzung Gebrauch, um eine

bevorzugte Behandlung solcher Variablen zu begünstigen, die besonders schwierig zu setzenden Unterrichtseinheiten zugeordnet sind. Um den Begriff der Schwierigkeit zu präzisieren wird dabei folgende Definition der setztechnischen Komplexität $komp(u)$ einer Unterrichtseinheit u verwendet:

$$komp(u) := |K_u| + |L_u| + \sum_{r \in R} ar(u, r) + rl(u) + tlg(u); \quad \forall u \in U$$

mit

U := Menge aller zu setzenden Unterrichtseinheiten

K_u := Menge aller Klassen, die an Unterrichtseinheit u beteiligt sind; $\forall u \in U$

L_u := Menge aller Lehrer, die an Unterrichtseinheit u beteiligt sind; $\forall u \in U$

R := Menge aller Raumgruppen

$ar(u, r)$:= Anzahl der Räume der Raumgruppe r , die durch Unterrichtseinheit u beansprucht werden; $\forall u \in U, r \in R$

$rl(u)$:= $\begin{cases} 1 & \text{die Sitzungen von } u \text{ müssen am Rand} \\ & \text{eines Unterrichtstages der an Unterrichts-} \\ & \text{einheit } u \text{ beteiligten Klassen liegen} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}; \quad \forall u \in U$

$tlg(u)$:= $\begin{cases} 1 & u \text{ ist eine Teilung, die mehrere} \\ & \text{Sitzungen am selben Tag erfordert} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}; \quad \forall u \in U$

Nach dieser Definition fließen in den Parameter $komp(u)$ der Unterrichtseinheit u neben der Anzahlen der an u beteiligten Klassen, Lehrer und Räume zwei weitere Schwierigkeitsindikatoren $rl(u)$ und $tlg(u)$ ein. $rl(u)$ erhöht die Komplexitätsbewertung um 1, wenn es sich bei u um eine Unterrichtseinheit handelt, deren Sitzungen jeweils am Rand eines Unterrichtstages der in u involvierten Klassen liegen müssen. $tlg(u)$ erzielt denselben Effekt, wenn u eine Teilung ist, von der mehrere Sitzungen demselben Tag zugeordnet werden müssen. Die für die Stundenplansetzung angepasste Branching-Heuristik 4 ist so gestaltet, dass jeder Variable x_{udtp} des ToMIP-Modells oder eines SeMIP-Teilmodells der Wert $komp(u)$ als Priorität für die Variablenwahl zugeordnet wird. Analog wird als Priorisierung für die Variablen x_{st} des HiMIP-Wochenmodells bzw. x_{sp} der HiMIP-Tagesmodelle die Komplexität $komp(u(s))$ derjenigen Unterrichtseinheit $u(s)$ verwendet, zu der die Sitzung s gehört. Alle jene 0/1-Variablen, die als Hilfsvariablen keiner Unterrichtseinheit zugeordnet sind, z.B. die Belegvariablen der Klassen und Lehrer, erhalten die Branching-Priorität 0. Dies hat zur Folge, dass diese Variablen nie für ein Branching ausgewählt werden, da einerseits sämtliche Zuordnungsvariablen x gegenüber den Hilfsvariablen be-

vorzuzug werden, andererseits aber in dem Moment, in dem alle Zuordnungsvariablen einen ganzzahligen Wert aufweisen, die Werte aller Hilfsvariablen ebenfalls ganzzahlig sind. Ist an einem Knoten die Variablenwahl getroffen, so wird der Variablen durch die Heuristik stets der Wert 1 zugewiesen.

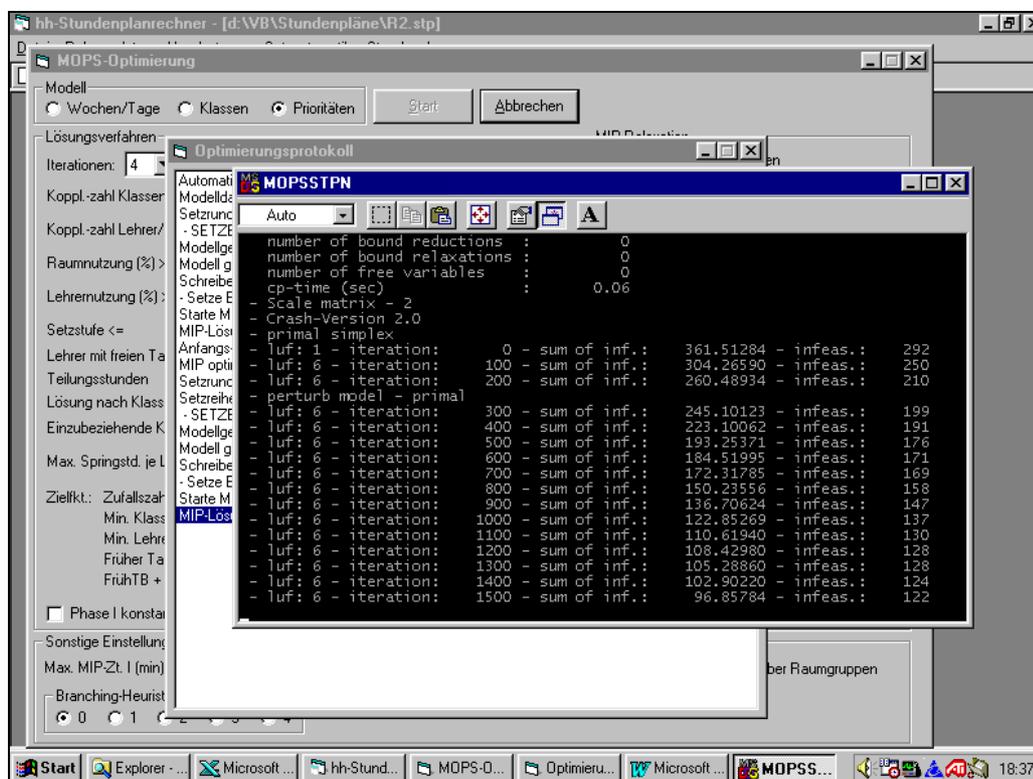
Neben der Möglichkeit einer flexiblen Handhabung von Knotenwahlstrategie und Branching-Heuristik verfügt die MOPS-Software über zwei weitere Bestandteile, die die Effizienz des Branch-and-Bound-Verfahrens positiv beeinflussen können: das Supernode Processing und die MIP-Heuristik. Aufgabe des Supernode Processing ist es, durch die Ausnutzung nicht explizit formulierter, aber aus dem Modell ableitbarer Beziehungen zwischen den Modellvariablen und den Restriktionen Verschärfungen der Modellformulierung abzuleiten (vgl. Suhl und Szymanski [1994]). Die Modellverschärfungen dienen dazu, den Lösungsraum für die LP-Relaxation des Startknotens so weit wie möglich zu reduzieren, ohne dabei die Menge der ganzzahligen Modelllösungen zu verändern. Tendenziell erhöht sich durch die Verengung des LP-Lösungsraumes die Wahrscheinlichkeit, dass Lösungen von LP-Relaxationen ganzzahlig sind und damit zulässige Lösungen des gemischt-ganzzahligen Modells darstellen.

Die MIP-Heuristik kann direkt nach der Lösung der LP-Relaxation des Startknotens im Branch-and-Bound-Prozess aufgerufen werden. Sie setzt nach einer durch den MOPS-Anwender auszuwählenden Regel die fraktionellen Variablen auf einen ganzzahligen Wert und durchläuft für eine vorgegebene Zahl von Entscheidungsbaumknoten einen Branch-and-Bound-Prozess nach dem LIFO-Prinzip. Gelingt es dabei, eine optimale ganzzahlige Lösung zu entdecken, so ist der Lösungsprozess für das betrachtete Modell beendet. Anderfalls wird im Anschluss an die MIP-Heuristik, wiederum beim Startknoten beginnend, der normale Branch-and-Bound-Prozess durchlaufen. Dabei wird ggf. die Zielbewertung der besten ganzzahligen Lösung, die durch die MIP-Heuristik gefunden wurde, für die Selektion dominierter Entscheidungsbaumknoten eingesetzt.

Für die Einbindung der MOPS-Funktionalitäten in übergeordnete Anwendersysteme stehen verschiedene Schnittstellen-Varianten zur Verfügung (vgl. Suhl [2000]). So kann MOPS als eigenständiges Programm in Form eines DOS- oder Windows-Lademodul verwendet werden. Dabei erfolgt die Kommunikation zwischen Anwendungsprogramm und MOPS über den Austausch von Dateien. Alternativ ist es aber auch möglich, MOPS als FORTRAN90-Objektbibliothek oder als Dynamic Link Library (DLL) direkt in das Anwendungsprogramm einzugliedern. In diesem Fall erfolgt der gegenseitige Datenaustausch über direkte Funktionsaufrufe. Das Programm „Stundenplanrechner“ stellt hinsichtlich der Einbindung von MOPS eine Zwitterlösung dar. Es bedient sich zwar zur Modellgenerierung der für die Windows-Programmierung in Visual Basic prädestinierten DLL-Schnittstelle, doch wird für die Optimierung selbst die Lademodul-Version von MOPS verwendet. Sie wird in einer DOS-Box ausgeführt. Der Grund für die Nutzung des Lademoduls liegt darin, dass sich in der DOS-Box die Optimierung des Start-LPs im Branch-and-Bound-Prozess optisch mitverfolgen lässt (vgl. [Abbildung 5.2](#)). Nennenswerte Laufzeitverluste sind mit dieser provisorischen Schnittstellengestaltung nicht verbunden, da der für die

Kommunikation zwischen „Stundenplanrechner“ und MOPS-Lademodul erforderliche Aufwand für die Dateiverarbeitung im Bereich weniger Sekunden liegt.

Abbildung 5.2: Laufende MOPS-Optimierung in der Windows95-DOS-Box



5.1.2 Anwendungsprogramm „Stundenplanrechner“

Das Programm „Stundenplanrechner“ habe ich in der Microsoft-Entwicklungsumgebung Visual Basic 5.0 selbst erstellt. Es wird für die Eingabe, Ansicht, Veränderung und Speicherung der Problemdaten, aber auch für die Steuerung des Lösungsprozesses nach den Vorgaben des jeweiligen Lösungsansatzes genutzt. Bestandteil des Programms ist ein Modellgenerator, der die erfassten Problemdaten mit Hilfe der MOPS-Dynamic Link Library für die Windows-Programmierung in das gemischt-ganzzahlige Modell transformiert, welches jeweils für die Fortsetzung des Lösungsprozesses benötigt wird. Ebenso sind Routinen für die Aufbereitung durch MOPS erzeugter ganzzahliger Modelllösungen implementiert. Die Interaktion mit dem Benutzer erfolgt über eine graphische Benutzeroberfläche, die für die Bearbeitung der Problemdaten, die Steuerung des Lösungsprozesses und die Visualisierung erzeugter Stundenpläne eine Reihe von Bildschirmmasken bereitstellt. Beispielhaft sind in [Abbildung 5.3](#) die Maske für die Bearbeitung der Lehrerdaten und in [Abbildung 5.4](#) die Maske für die Bearbeitung der Unterrichtseinheiten dargestellt. Ein Beispiel für die Anzeige eines erzeugten Stundenplanes gibt [Abbildung 5.5](#).

Abbildung 5.3: Bildschirmmaske für die Bearbeitung von Lehrerdaten

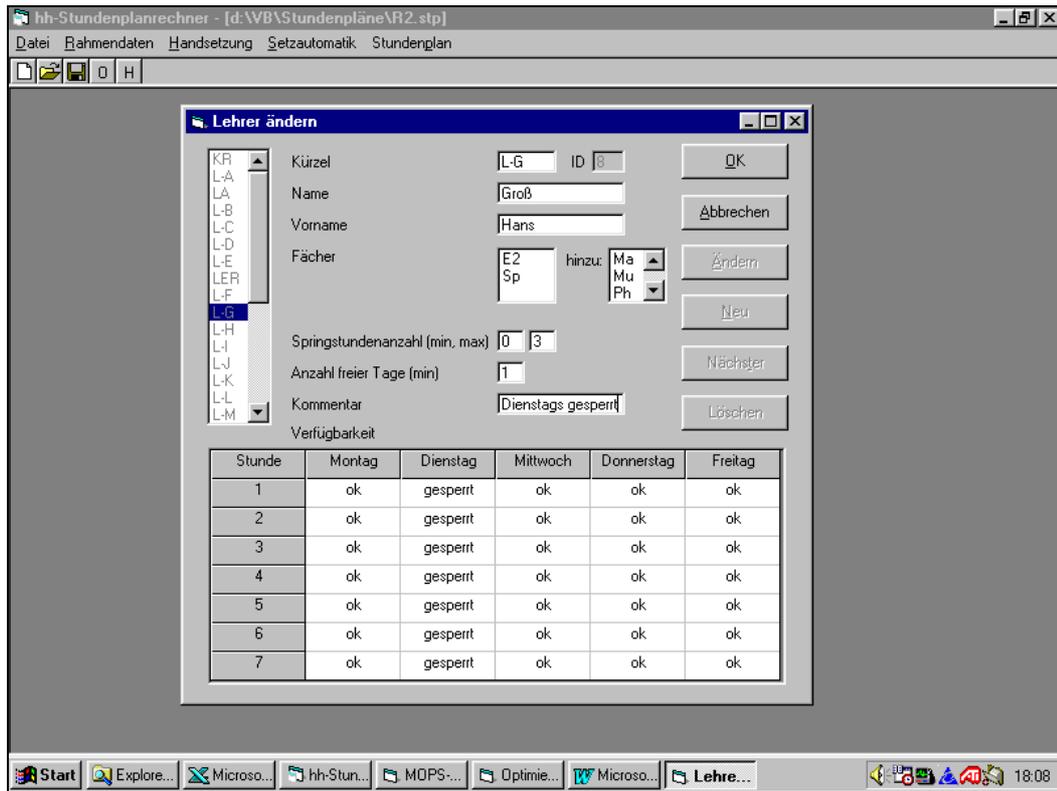


Abbildung 5.4: Bildschirmmaske für die Bearbeitung der Unterrichtseinheiten

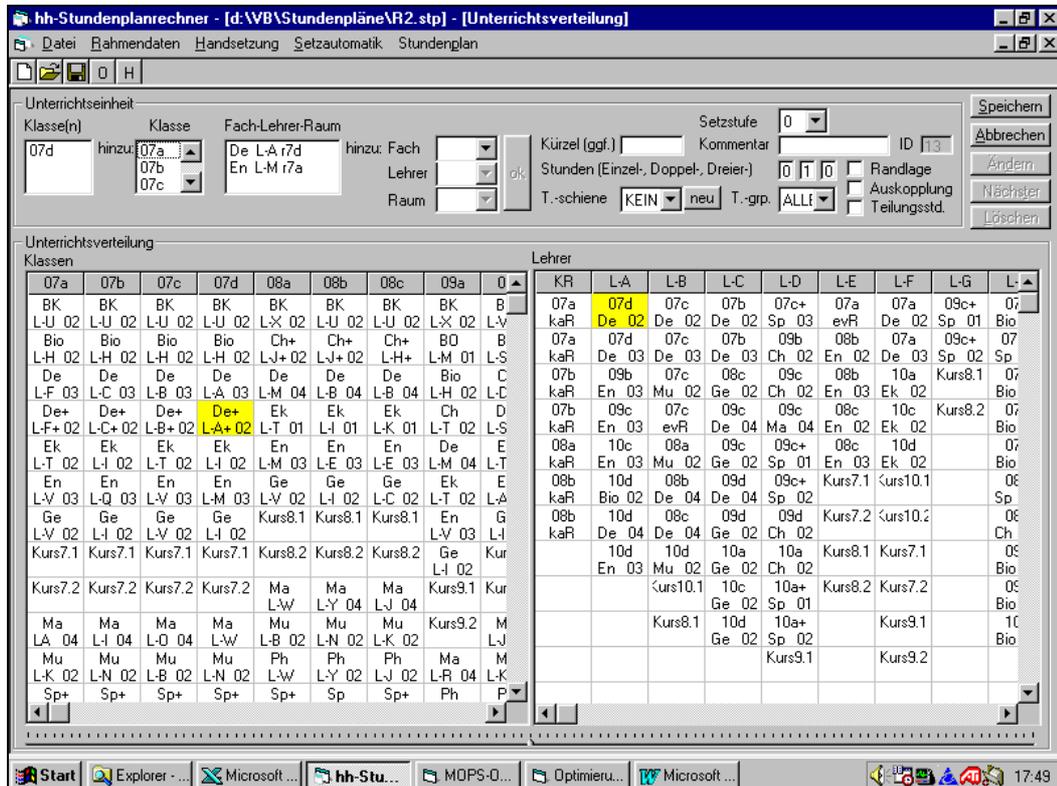


Abbildung 5.5: Bildschirmmaske für die Ansicht eines erzeugten Stundenplans

5.1.3 Microsoft Excel97-Arbeitsmappe

Da das Programm „Stundenplanrechner“ nur für Testzwecke entwickelt wurde, beinhaltet es keine eigene Druckroutine. Für eine vielfältig variierbare Ansicht und die Nutzung der Druckfunktionen wird stattdessen die Tabellenkalkulationssoftware Microsoft Excel97 genutzt. Dabei werden mit Hilfe eines Makros die Stundenplandaten aus der von „Stundenplanrechner“ angelegten Datei eingelesen, aufbereitet und in entsprechend vorbereitete Tabellen eingetragen. Der Benutzer kann in beliebiger Weise die Excel-Funktionalitäten nutzen, um die Planansicht zu verändern und ggf. den Plan auszudrucken.

Ebenfalls Aufgabe des Excel-Makros für die Datenaufbereitung ist die Durchführung der Raumzuordnung, die nicht Bestandteil der gemischt-ganzzahligen Modelle ist (vgl. Abschnitt 4.1.3). Sie stellt kein schwieriges Problem dar, da durch entsprechende Kapazitätsrestriktionen der Modelle sichergestellt ist, dass in jeder Planungsperiode p von jeder Raumgruppe höchstens so viele Räume benötigt werden, wie in p tatsächlich zur Verfügung stehen. Die Zuordnung der Räume erfolgt innerhalb der jeweils spezifizierten Raumgruppe willkürlich in der Reihenfolge der Speicherung. Einzige Ausnahme von dieser Regel stellen Klassenräume dar. Ist in einer beliebigen Periode p eine Klasse k für eine Sitzung verplant, für die k ein Raum aus der Gruppe der Klassenräume zuzuteilen ist, so wird k bevorzugt der eigene Klassenraum zugeordnet. Dies ist problemlos möglich, da jeder Raum nur maximal einer Klasse als Klassenraum zugewiesen ist und in p nicht mehr Klassen einen Klassenraum beanspruchen, als zur Verfügung stehen.

Zwei Beispiel-Stundenpläne, die mit Hilfe des Prototypen für zwei der im nächsten Unterkapitel vorgestellten Testfälle generiert und als Excel-Tabellen aufbereitet wurden, finden sich in Anhang 8.3.

5.2 Testfallkatalog

Um eine Aussage über die Effektivität der neuen Lösungsansätze treffen zu können, bedarf es eines geeigneten Testfallkatalogs. Dieser sollte aus Praxisfällen bestehen, um einerseits eine enge Orientierung der Testrechnungen an den realen Anforderungen der Planung zu gewährleisten und andererseits eine aussagekräftige Beurteilung der erzeugten Pläne durch die Stundenplaner der getesteten Schulen zu ermöglichen.

Für die Testphase haben mir die Stundenplaner mehrerer allgemeinbildender Schulen des Bundeslandes Berlin Fälle zur Verfügung gestellt und erläutert. Es handelt sich dabei um die Basisdaten bereits eingesetzter Stundenpläne aus den Schuljahren 1997/98 und 1998/99.⁴⁸ Sämtliche Tests wurden mit diesen Vergangenheitsdaten aus einer ex post-Situation heraus durchgeführt. Hingegen wurden keine Tests unter den Bedingungen einer aktuellen Planungssituation unternommen. Hierfür waren folgende Gründe ausschlaggebend:

1. Die Stundenplanerstellung ist eine saisonale Aufgabe, deren Bearbeitung i.d.R. nicht öfter als zweimal jährlich, jeweils vor Beginn eines Schulhalbjahres, anfällt. Die Abstimmung der Testphase auf diese Termine wäre mit erheblichen Schwierigkeiten für die Zeitplanung der Studie verbunden gewesen. Zudem hätte aufgrund der erforderlichen Intensität der Kooperation gleichzeitig nur die Zusammenarbeit mit einer oder maximal zwei Schulen erfolgen können. Der zusätzliche Arbeitsaufwand für die betroffenen Stundenplaner wäre diesen angesichts ihrer ohnehin bereits sehr hohen Belastung durch den Schulalltag nicht zuzumuten gewesen.
2. Die Verwendung der Basisdaten bereits erprobter Stundenpläne hat den Vorteil, dass die Existenz einer zulässigen Lösung für die jeweils betrachtete Datenkonstellation bereits bewiesen ist. Ein Vergleich der über die neuen Lösungsansätze gewonnenen Stundenpläne mit dem jeweils tatsächlich in die Praxis umgesetzten Plan ist daher zumindest prinzipiell möglich. Einschränkend hierzu muss allerdings erwähnt werden, dass nicht alle Schulen die Daten im Format eines fertigen Stundenplanes liefern konnten, so dass der direkte Vergleich erschwert war. Auch waren aus den zur Verfügung gestellten Daten nicht alle konkreten Anforderungen ersichtlich, so dass für die Testläufe plausible Annahmen, z.B. hinsichtlich der maximal erlaubten Springstundenanzahl je Lehrer, getroffen werden mussten.

Einen Überblick über die verwendeten Testfälle gibt [Tabelle 5.2](#). Von den insgesamt acht Fällen stammen vier von drei Realschulen R1 bis R3 und weitere vier von zwei Gymnasien G1 und G2. Realschule R1 lieferte die Daten zu zwei Problemen R1.A und R1.B aus unterschiedlichen Schuljahren, die beiden anderen Realschulen die Probleme jeweils eines Schuljahres. Auch die beiden Gymnasien gaben jeweils einen Testfall, doch habe ich aus

⁴⁸ Die Daten, welche seitens der Schulen an mich abgegeben wurden, waren entsprechend den Erfordernissen des Datenschutzes anonymisiert.

den Gymnasialproblemen durch die Differenzierung zweier unterschiedlicher unterstellter Planungssituationen vier Testfälle gebildet. Die erste Planungssituation der Gymnasien wird durch die Fälle G1 und G2 beschrieben. Sie unterstellt, dass sämtliche Unterrichtseinheiten, also auch die Kursschienen der Oberstufe, durch den Setzalgorithmus verarbeitet werden sollen. Die zweite Planungssituation ist durch die Fälle G1.MS⁴⁹ und G2.MS vertreten. Sie setzt, entsprechend den Gepflogenheiten der betroffenen Schulen, voraus, dass die Kursschienen bereits vor Beginn der automatischen Setzung manuell fixiert wurden (vgl. die Zeilen (9) und (11) in der Tabelle). Die manuellen Fixierungen wurden dabei für die Tests aus dem jeweils tatsächlich implementierten Stundenplan übernommen.

Tabelle 5.2: Testfallkatalog

		TESTFALL							
		R1.A	R1.B	R2	R3	G1	G1.MS	G2	G2.MS
(1)	Schultyp	Reals.	Reals.	Reals.	Reals.	Gymn.	Gymn.	Gymn.	Gymn.
(2)	Jahrgangsstufen (von – bis)	7 - 10	7 - 10	7 - 10	7 - 10	7 - 13	7 - 13	7 - 13	7 - 13
(3)	Klassen ($ K $)	13	12	15	16	19	19	17	17
(4)	Lehrer ($ L $)	28	26	28	43	43	43	55	55
Raumsituation									
(5)	Raumgruppen ($ R $)	10	10	8	10	12	12	17	17
(6)	Räume	28	28	25	27	40	40	43	43
(7)	Gebäudekomplexe ($ G $)	1	1	1	1	1	1	1	1
(8)	Unterrichtseinheiten ($ U $)	170	156	176	198	221	221	224	224
(9)	- davon: manuell gesetzt	0	0	0	0	0	24	0	48
(10)	Gesamtdauer aller Sitzungen (in Perioden)	354	327	398	435	532	532	458	458
(11)	- davon: manuell erzeugt	0	0	0	0	0	64	0	75
Zeitdimension									
(12)	Planungstage ($ T $)	5	5	5	5	5	5	5	5
(13)	Planungsperioden ($ P $)	7	7	7	7	8	8	7	7
(14)	Planungshorizont ($ T \cdot P $)	35	35	35	35	40	40	35	35
Lehrer mit freien Tagen									
(15)	Anzahl	14	11	6	27	11	11	31	31
(16)	Anteil an L ($= (15) / (4)$)	50,0%	42,3%	21,4%	62,8%	25,6%	25,6%	56,4%	56,4%
(17)	Summe der freien Tage	20	15	9	30	13	13	39	39
(18)	- davon: bereits zeitl. fixiert	0	0	5	28	0	0	0	0
Belegungsgrad (\emptyset)									
(19)	Klassen ($= (10) / [(3) \cdot (14)]$)	77,8%	77,9%	75,8%	77,7%	70,0%	70,0%	77,0%	77,0%
(20)	Lehrer ($= (10) / [(4) \cdot (14) - (17) \cdot (13)]$)	40,5%	42,5%	43,4%	33,6%	32,9%	32,9%	27,7%	27,7%
(21)	Räume ($= (10) / [(6) \cdot (14)]$)	36,1%	33,4%	45,5%	46,0%	33,3%	33,3%	30,4%	30,4%
(22)	Bemerkungen				s. Anm. ¹		s. Anm. ²		s. Anm. ³

Abkürzungen: Realsch. = Realschule; Gymn. = Gymnasium; Anm. = Anmerkung

Anmerkungen:

¹ Vier Integrationsklassen; zahlreiche Lehrer zusätzlich abends tätig

² wie G1, jedoch Kursschienen manuell gesetzt

³ wie G2, jedoch Kursschienen manuell gesetzt

Die Testfälle der Realschulen umfassen je vier, die der Gymnasien je sieben Jahrgangsstufen. Die Stufen 12 und 13 der Gymnasien werden dabei vollständig im Kurssystem unterrichtet. Sie werden in den Modellen jeweils als eine Klasse behandelt, wobei jede Kursschiene eine Teilung im Sinne der Definition 2.5 darstellt. Die Gesamtzahl aller Klas-

⁴⁹ Die Erweiterung „MS“ im Fallkürzel steht für „manuelle Setzung“.

sen liegt zwischen zwölf und 19 Klassen. Für den Unterricht stehen je nach Fall zwischen 25 und 55 Lehrer zur Verfügung, wobei insbesondere an Schulen mit einem im Verhältnis zur Klassenzahl besonders großen Lehrerkollegium zahlreiche Ansprüche auf freie Tage bestehen. Diese Ansprüche spiegeln eine hohe Teilzeitquote unter der Lehrerschaft der betroffenen Schulen wider. Für die meisten Fälle kann davon ausgegangen werden, dass die konkrete zeitliche Bestimmung der freien Tage der Lehrer im Ermessen des Stundenplaners liegt. Eine Ausnahme stellt in dieser Hinsicht allerdings die Realschule R3 dar, an der zahlreiche Lehrer, die Anspruch auf einen oder mehrere freie Tage haben, zusätzlich zum regulären Unterricht in Abendschulkursen aktiv sind. Aus diesem Grund werden die freien Tage dieser Lehrer nicht als frei wählbar betrachtet, sondern sind entsprechend den Vorgaben des tatsächlich umgesetzten Plans zeitlich fixiert (vgl. Zeile (18) in der Tabelle). Auch für R2 sind fünf der zehn insgesamt zu berücksichtigenden freien Tage bereits manuell fixiert, da entsprechende Vorgaben vorlagen.

Die Zahl der Räume rangiert zwischen 25 und 43. Sie sind in acht bis 17 verschiedene Raumgruppen aufgeteilt. Die Raumgruppenaufteilung wurde ohne Absprache mit den jeweiligen Stundenplanern durch mich vorgenommen. Dabei wurden in vorsichtiger Weise nur solche Räume zu jeweils einer Gruppe zusammengefasst, bei denen mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit von einer Gleichwertigkeit ausgegangen werden konnte. In der praktischen Anwendung dürfte die Zusammenfassung daher eher mit einer geringeren Raumgruppenzahl auskommen. Keine der betrachteten Schulen weist eine Raumsituation auf, die eine Unterscheidung mehrerer Gebäudekomplexe mit langen Wegezeiten erfordert. Entsprechend sind die Modellrestriktionen für die Berücksichtigung von Wegezeiten aus den Tests der Lösungsansätze ausgeschlossen.

Die Zeilen (19) bis (21) der Tabelle geben Auskunft über den durchschnittlichen Grad der zeitlichen Belegung von Klassen, Lehrern und Räumen, ermittelt als Quotient zwischen der in Zeile (10) enthaltenen Gesamt-Unterrichtsbelastung und der Maximalkapazität der jeweiligen Dimension. Die Maximalkapazität errechnet sich aus dem Produkt der Anzahl der verfügbaren Klassen bzw. Lehrer bzw. Räume einerseits und der Gesamtzahl aller Perioden des Planungshorizontes andererseits. Sie ist im Falle der Lehrer um die Anzahl der durch freie Tage verlorenen Perioden reduziert. Der durchschnittliche Belegungsgrad, der sich aus dieser Formel ergibt, ist mit äußerster Vorsicht zu interpretieren, da er etwaige Engpasssituationen nicht erfasst. So sind zwar in allen Testfällen die vorhandenen Räume im Durchschnitt nur zu unter 50% genutzt, doch gilt dies keineswegs in gleicher Weise für jeden einzelnen Raum. Vor allem Turnhallen sowie bestimmte Fachräume weisen häufig eine Nutzung von über 80% auf und erschweren damit die Planung.

Dennoch können die Durchschnittszahlen als ein Indikator für den Planungsspielraum angesehen werden, mit dem die Dimensionen Klasse, Lehrer und Raum zu handhaben sind. So bieten die Klassen mit einer durchschnittlichen Belegung von 70% und mehr deutlich weniger Ausweichmöglichkeiten für die zeitliche Verschiebung von Sitzungen als Lehrer und Räume, die durchschnittlich nur in etwa 30 – 45% der verfügbaren Planungsperioden beansprucht werden. Als alleiniger Flexibilitätsmaßstab taugt der Belegungsgrad jedoch nicht, denn er lässt einige relevante Einschränkungen unbeachtet, z.B.

die Tatsache, dass Lehrern nur eine begrenzte Zahl an Springstunden zugemutet werden kann und Klassenpläne sogar überhaupt keine Springstunden aufweisen dürfen.

Über eine individuelle Besonderheit verfügt die Realschule R3. Unter ihren 16 Klassen befinden sich vier Integrationsklassen, eine je Jahrgangsstufe, in denen behinderte und nicht behinderte Kinder gemeinsam unterrichtet werden. Um den Integrationsunterricht angemessen gestalten zu können, sind jeder Unterrichtseinheit der Integrationsklassen mindestens zwei Lehrer zugeordnet, die den Unterricht im Team durchführen. Da diese Unterrichtseinheiten nur solchen Planungsperioden zugeordnet werden können, in denen jeweils beide beteiligten Lehrer verfügbar sind, ist die Flexibilität der Planung durch die Integrationsklassen erheblich eingeschränkt.

5.3 Testergebnisse

Die folgenden Abschnitte enthalten die Ergebnisse, welche mit Hilfe des prototypischen Softwaresystems und der drei Lösungsansätze ToMIP, HiMIP und SeMIP für die im vorangehenden Unterkapitel präsentierten Testfälle erzielt wurden. Sämtliche Testrechnungen wurden auf einem IBM-kompatiblen PC mit Intel-Pentium-500 MHz-Prozessor und 128 MB Arbeitsspeicher durchgeführt. Alle Angaben zu Laufzeiten beziehen sich auf diese Hardware.

5.3.1 ToMIP

Bereits in der Entwurfsphase des ToMIP-Ansatzes entstand die Vermutung, dass Größe und Komplexität des Modells eine Lösung realer Problemstellungen in einer in Stunden zu messenden Zeitspanne unwahrscheinlich machen würden. Diese Befürchtung hat sich bewahrheitet. Für keinen der beschriebenen Testfälle konnte innerhalb von 24 Stunden eine zulässige Lösung des zugehörigen ToMIP-Modells erreicht werden. Dabei waren die verwendeten Modelle durch die Auslassung der Wegezeitenrestriktionen (ToMIP-KlaWeg) und (ToMIP-LeWeg) sowie der Restriktionen (ToMIP-VB) für die Sicherung einer Vertretungsbereitschaft gegenüber der allgemeinen Formulierung vereinfacht. Auch die in der Modellbeschreibung vorgesehenen Relaxationsmöglichkeiten und die Anwendung der Kernzeitvariante des Modells führten nicht zu einer Lösung.

[Tabelle 5.3](#) gibt eine Übersicht der ToMIP-Modellgrößen, die sich bei Anwendung der Kernzeitvariante für die einzelnen Testfälle ergaben. Für die dargestellten Modelle wurde in Analogie zum SeMIP-Ansatz (vgl. Abschnitt 5.3.3.1) unterstellt, dass jedem Lehrer l maximal $alss_{max}(l) = 3$ Springstunden zugemutet werden dürfen. Ferner wurde angenommen, dass die tägliche Kernzeit von einschließlich der zweiten bis einschließlich zur fünften Periode andauert. Mit Ausnahme der beiden Fälle G1 und G1.MS wurde die Testrechnung ohne Wahrnehmung von Relaxationsmöglichkeiten durchgeführt. Die Ausnahme für G1 und G1.MS besteht in der Behandlung der Springstundenbegrenzung der Lehrer, für die eine Relaxation um maximal $alss_{max}^{Relax}(l) = 3$ zusätzliche Springstunden zugelassen wurde. Der Grund hierfür lag darin, dass das jeweilige unrelaxierte Modell unter der allgemeinen Annahme $alss_{max}(l) = 3$ unzulässig war.

Die hohe Anzahl von bis zu 10.000 0/1-Variablen weist auf die hohe kombinatorische Komplexität praktischer Setzungsmodelle hin. Allerdings lassen die Größenindikatoren Variablen-, Restriktionen- und Nichtnullelementezahl nur vage Schlüsse auf den zu erwartenden Lösungsaufwand eines Modells zu, da dieser nicht nur von der Größe des Modells, sondern vor allem auch von seiner Struktur bestimmt wird. Ein direktes Komplexitätsmaß findet sich in den Laufzeiten, die für die Lösung der LP-Relaxationen der jeweiligen Startknoten im Branch-and-Bound-Prozess benötigt wurden. Diese Laufzeiten betragen zwischen acht und 54 Minuten. Führt man sich vor Augen, dass damit jeweils nur ein einziger, wenn auch der schwierigste, Knoten des Entscheidungsbaumes untersucht wurde, so verwundert es nicht, dass das Auffinden einer ganzzahligen Lösung des Modells innerhalb eines 24-Stunden-Zeitraums nicht gelingen konnte.

Tabelle 5.3: ToMIP-Testergebnisse für die LP-Relaxationen der Startknoten

	TESTFALL							
	R1.A	R1.B	R2	R3	G1	G1.MS	G2	G2.MS
Modelldimensionen								
• Strukturvariablen	7.133	6.741	5.667	8.236	10.098	10.098	9.140	9.140
davor: 0/1-Variablen	7.105	6.715	5.639	8.193	10.012	10.012	9.085	9.085
davor: manuell fixierte 0/1-Variablen	0	0	0	0	0	41	0	49
• Restriktionen	5.678	5.243	5.361	10.436	9.864	9.864	9.030	9.030
• Nichtnullelemente	50.463	47.726	39.070	61.463	77.775	77.775	73.936	73.936
Anzahl LP-Iterationen								
• bis zur Zulässigkeit	44.020	38.809	47.114	69.214	106.768	36.292	90.688	31.272
• bis zum Optimalitätsbeweis	62.821	50.865	52.815	90.637	141.045	47.783	111.308	43.078
Laufzeit (min:sec)	13:01	09:54	07:53	32:25	54:29	12:09	36:08	09:00

Bemerkenswert ist die Aufwandsreduktion von ca. 75%, die sich für die Fälle G1.MS und G2.MS gegenüber ihren Ausgangsfällen G1 und G2 allein durch die manuelle Fixierung der Kursschienen ergab, obwohl hierdurch weniger als ein halbes Prozent der 0/1-Variablen betroffen waren.

Da für keinen Testfall mit Hilfe des ToMIP-Ansatzes ein Stundenplan erzeugt werden konnte, muss dieser Ansatz im Rahmen dieser Studie als gescheitert betrachtet werden.

5.3.2 HiMIP

Ähnlich wie für den Totalansatz ToMIP zeichnete sich auch für den Dekompositionsansatz HiMIP frühzeitig ein Scheitern ab. Obwohl das Wochenmodell regelmäßig in wenigen Minuten gelöst werden konnte, gelang es anschließend nie, auch für jedes Tagesmodell eine zulässige Lösung zu finden. Selbst eine vielfache Iteration des Modellzyklus‘ in einem 24-stündigen Lauf führte zu keiner zulässigen Gesamtlösung. Dieses negative Resultat ergab sich, obwohl die Testläufe mit stark reduzierten Modellen durchgeführt wurden. So enthielten die Modelle weder Randstundenrestriktionen noch Fixierungen, Wegezeitenrestriktionen, Restriktionen für die Sicherung unterrichtsfreier Tage für Lehrer oder Restriktionen für die Sicherung einer Vertretungsbereitschaft. Auch waren Dauer und Lage der Unterrichtstage in keiner Weise beschränkt.

Vor dem Hintergrund der Tatsache, dass selbst mit einer stark vereinfachten Modellierung keine zulässige Gesamtlösung erzielt werden konnte, ist die Wahrscheinlichkeit, durch Anwendung des HiMIP-Ansatzes praktisch realisierbare Stundenpläne erzeugen zu können, als äußerst gering anzusehen. Der Ansatz muss daher als ungeeignet bewertet werden.

5.3.3 SeMIP

5.3.3.1 Vorbemerkungen

Im Gegensatz zu den gescheiterten Ansätzen ToMIP und HiMIP gelang es mit Hilfe der SeMIP-Dekomposition durchaus, zulässige Gesamtlösungen für verschiedene Testfälle

innerhalb weniger Stunden zu erzielen. Aus diesem Grund wurde für den SeMIP-Ansatz ein umfangreiches Testprogramm aufgelegt. Ziel war es dabei festzustellen, mit welchen Einstellungen von Modell- und Verfahrensparametern in möglichst kurzer Zeit möglichst viele zulässige und im Sinne der Zielsetzungen gute Lösungen zu erzeugen sind. Um dieses Testprogramm überschaubar zu halten, wurden folgende Vereinfachungen vorgenommen:

1. Von den drei in der Zielfunktion (SeMIP-Ziel)⁵⁰ enthaltenen Zielgrößen des frühen Tagesbeginns der Klassen, der Minimierung der Lehrerspringstundenzahl und der Sicherung einer Vertretungsbereitschaft wurden nur die ersten beiden in die Tests einbezogen. Die Sicherung einer Vertretungsbereitschaft wurde hingegen nicht implementiert, so dass der entsprechende Zielfunktionsterm, die Restriktionen (SeMIP-Vb) und die Variablen v_{ltp} und uvb_{ltp} entfielen. Dieses Vorgehen bedeutete eine Anpassung an die schulische Praxis. Dort wird zwar die Sicherung einer Vertretungsbereitschaft durchaus als wichtige Zielgröße der Setzung betrachtet (vgl. Abschnitt 2.2.2), doch wird sie selten direkt in die Planerstellung einbezogen. Der Grund für dieses scheinbar widersprüchliche Verhalten liegt darin, dass durch die unvermeidlich im Ergebnisplan enthaltenen Lehrerspringstunden ohnehin in den meisten Perioden eine Mehrzahl von Lehrern für Vertretungen bereitsteht, so dass eine explizite Berücksichtigung der Vertretungsproblematik nicht erforderlich ist.
2. Für die Zielfunktionen der Teilmodelle innerhalb der Klassenphase wurden die beiden nicht ausgeschlossenen Zielgrößen des frühen Tagesbeginns für Klassen und der Minimierung der Lehrerspringstundenzahl sowohl als alternative Einzelziele wie auch in einer kombinierten Zielfunktion betrachtet. Als Ersatz für die Zielfunktion (SeMIP-Ziel) der ursprünglichen Modellformulierung ergaben sich auf diese Weise die Formulierungen

$$\text{minimiere } \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} \left[\sum_{p=1}^{bkt_{\max}(k)-1} kb_{ktp} + 2 \cdot \sum_{p=bkt_{\max}(k)}^{bkt_{\max}(k)+dkt_{\min}(k)-1} kb_{ktp} + 3 \cdot \sum_{p=bkt_{\max}(k)+dkt_{\min}(k)}^{|P|} kb_{ktp} \right] \quad (\text{SeMIP-Ziel-FTB})$$

für das ausschließliche Streben nach einem frühen Unterrichtsbeginn der Klassen,

$$\text{minimiere } \sum_{l \in L} lss_l \quad (\text{SeMIP-Ziel-LeSS})$$

für eine ausschließliche Minimierung der Lehrerspringstundenzahl und

⁵⁰ Eine tabellarische Zusammenfassung der SeMIP-Modellformulierung findet sich im Anhang 8.2.3. Für eine umfassende Beschreibung vgl. die Erläuterung des strukturgleichen ToMIP-Modells in Abschnitt 4.2.2.

$$\begin{aligned} \text{minimiere} \quad & \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} \left[\sum_{p=1}^{bkt_{\max}(k)-1} kb_{ktp} + 2 \cdot \sum_{p=bkt_{\max}(k)}^{bkt_{\max}(k)+dkt_{\min}(k)-1} kb_{ktp} + 3 \cdot \sum_{p=bkt_{\max}(k)+dkt_{\min}(k)}^{|P|} kb_{ktp} \right] & (\text{SeMIP-} \\ & & \text{Ziel-F+L}) \\ & + \sum_{l \in L} lss_l \end{aligned}$$

für eine gleichgewichtige Kombination beider Zielgrößen. Soweit Relaxationen vorzunehmen waren, wurden die jeweils relevanten Strafterme analog zur Bildung von (SeMIP-Ziel-R) in die angewendete Zielfunktion integriert.

3. Für alle Klassenmodelle, die derselben Modellsequenz angehörten, wurde stets dieselbe Zielfunktionsvariante verwandt.
4. Für die in der Prioritätsphase anzuwendende Zielfunktionsdefinition (SeMIP-Ziel-ZZ) wurde als Wahrscheinlichkeit, dass ein beliebiger Zielfunktionskoeffizient $zz(u, d, t, p)$ den Wert 2 annimmt, die Spezifikation $prob(2) = 0,02$ angesetzt. Die Wahl dieses niedrigen Wertes für $prob(2)$ erwies sich als vorteilhaft, da so nur wenige Variablen des jeweiligen Teilmodells den Zielfunktionskoeffizienten 2 erhielten. Diesen Variablen konnte MOPS i.d.R. leicht den Wert 0 zuweisen, so dass schnell eine optimale Lösung für die jeweilige LP-Relaxation erreicht war. Andererseits war $prob(2)$ ausreichend hoch gewählt, um zu garantieren, dass nie alle Variablen den Zielfunktionskoeffizient 1 erhielten, so dass die gewünschte Veränderung des Lösungspfades zwischen den Iterationen der Modellsequenz sichergestellt war.
5. Für die Auswahl der Unterrichtseinheiten, die in den einzelnen Teilmodellen der Prioritätsphase gesetzt werden sollten, wurden zwei alternativ oder auch ergänzend anzuwendende Regeln definiert. Nach der ersten Regel wurde eine Unterrichtseinheit u dem betreffenden Teilmodell zugeordnet, wenn sie mindestens $AnzK_{\min}(u)$ Klassen oder mindestens $AnzL_{\min}(u)$ Lehrer band. Die zweite Regel bestand darin, solche u auszuwählen, die durch Setzen eines Parameters $Mark(u)$ auf den Wert „ja“ manuell für die Auswahl markiert waren. Diese Variante war vor allem für die direkte Priorisierung schwieriger Kursschienen der gymnasialen Oberstufe interessant und wurde daher nur für die Testfälle G1 und G2 verwandt.
6. Die Anzahl der Teilmodelle in der Klassenphase sowie die Anzahlen der Klassen je Teilmodell wurden für jeden Fall und jeden Testlauf individuell festgelegt. Für die konkrete Aufteilung der Klassen auf die verschiedenen Teilmodelle der Klassenphase wurde jedoch eine allgemeine Prioritätsregel definiert. Nach dieser Regel wurde eine Klasse k einem umso früher zu lösenden Teilmodell zugeordnet, je höher der Parameter

$$kompl_{ges}(k) := \sum_{u \in U_k} kompl(u)$$

für k ausfiel. $komp_{ges}(k)$ kann dabei als globale setztechnische Komplexität der Klasse k verstanden werden.⁵¹

7. Für alle Testfälle wurde einheitlich unterstellt, dass der Unterricht für alle Klassen an jedem Tag spätestens in der zweiten Periode zu beginnen und mindestens fünf Perioden anzudauern hat, d.h. $bkt_{max}(k) = 2 \wedge dkt_{min}(k) = 5; \forall k \in K$. Eine Obergrenze $dkt_{max}(k)$ für die Dauer der Klassenunterrichtstage wurde nicht gesetzt, so dass die Modellrestriktionen (SeMIP-KlaTa.2) entfielen. Für die Kernzeitvariante des Modells wurde angenommen, dass die Kernzeit mit der Periode $bkz = 2$ beginnt und mit der Periode $ekz = 5$ endet.
8. Die maximale Anzahl $alss_{max}(l)$ der für jeden Lehrer l erlaubten Springstunden wurde zum Zwecke der besseren Vergleichbarkeit der Ergebnisse für alle Testfälle und alle Lehrer einheitlich auf den Wert 3 festgelegt. Diese Höchstzahl steht nach meiner Beobachtung mit den Gegebenheiten der meisten Schulen im Einklang.
9. Für jeden der betrachteten Testfälle wurden zusätzlich zu den in Tabelle 2.11 zusammengefassten Restriktionstypen sowohl die Forderung nach der Einplanung mehrerer Sitzungen einer Teilung am selben Tag als auch das Verbot zweiperiodiger Sitzungen über große Pausen hinweg als relevant unterstellt.
10. Als Relaxationsmöglichkeiten wurden die Relaxation der Begrenzung der Springstundenzahl für Lehrer einerseits und die Relaxation freier Tage für Lehrer andererseits mit in die Tests einbezogen. Alle übrigen im Rahmen der Modellformulierung vorgestellten Relaxationsmöglichkeiten wurden ausgeschlossen, um Unzulässigkeiten der erzielten Lösungen so weit wie möglich zu vermeiden. Die Relaxation der Begrenzung der Lehrerspringstundenzahl wurde einheitlich auf maximal $alss_{max}^{Relax}(l) = 3$ zusätzliche Springstunden für jeden Lehrer $l \in L$ beschränkt, so dass für jeden Lehrer unter Inanspruchnahme dieser Relaxationsmöglichkeit insgesamt maximal sechs Springstunden eingeplant werden konnten. Generell wurden Relaxationsmöglichkeiten nur in die Modelle derjenigen Testfälle aufgenommen, für die sich auf andere Weise keine zulässige Gesamtlösung erreichen ließ. Dabei wurde Relaxation der eher weichen Springstundenbegrenzung gegenüber der Relaxation der harten Forderung nach Einräumung freier Tage für Lehrer der Vorrang eingeräumt.
11. Die Laufzeitbegrenzungen waren für alle Teilmodelle der Prioritätsphase und für alle Teilmodelle der Klassenphase jeweils identisch. Dabei war die Laufzeitbegrenzung für die Teilmodelle der Prioritätsphase regelmäßig niedriger als für die Klassenphase, da erstere i.d.R. leichter gelöst werden konnten als letztere.
12. Die Festlegung der Branching-Heuristik und der Strategie der Knotenwahl im Branch-and-Bound-Prozess erfolgte für alle Teilmodelle der Lösungssequenz einheitlich.

⁵¹ Für die Definition von $komp(u)$ vgl. Abschnitt 5.1.1.

13. Die in MOPS integrierte MIP-Heuristik (vgl. Abschnitt 5.1.1) wurde für das Testprogramm nicht eingesetzt, da sie in keinem der mit ihr durchgeführten Probeläufe eine ganzzahlige Lösung finden konnte.

Einen Überblick des im Rahmen der Testserie verwendeten Katalogs variierbarer Modell- und Verfahrensparameter gibt [Tabelle 5.4](#).

Tabelle 5.4: Modell- und Verfahrensparameter für die SeMIP-Testserie

Kürzel	Dimension	Bedeutung
Parameter für die Teilmodelle der Prioritätsphase		
AnzPrioMod	Anzahl	Anzahl der Teilmodelle
Kriterien für die Bestimmung der in die einzelnen Teilmodelle einzubeziehenden Unterrichtseinheiten u :		
AnzK_{min}(u)	Anzahl	- Mindestzahl der durch u gebundenen Klassen
AnzL_{min}(u)	Anzahl	- Mindestzahl der durch u gebundenen Lehrer
Mark(u)	ja / nein	- Individuelle Markierung von u für die Einbeziehung in das aktuelle Teilmodell (jeweils erläutert)
Zeit_{max}Prio	Minuten	Laufzeitbegrenzung für ein einzelnes Teilmodell
Parameter für die Teilmodelle der Klassenphase		
AnzKlaMod	Anzahl	Anzahl der Teilmodelle
AnzKla	Anzahl	Anzahlen der in den einzelnen Teilmodellen behandelten Klassen
ZielKla	-	Zielfunktion mit den möglichen Ausprägungen: - FTB: Anwendung der Zielkomponente „Früher Tagesbeginn für Klassen“ (SeMIP-Ziel-FTB) - LeSS: Anwendung der Zielkomponente „Minimierung der Springstundenzahl für Lehrer“ (SeMIP-Ziel-LeSS) - F+L: Kombination von FTB und LeSS mit Gewichtungsverhältnis 1 : 1 (SeMIP-Ziel-F+L)
Zeit_{max}Kla	Minuten	Laufzeitbegrenzung für ein einzelnes Teilmodell
Übergreifende Parameter		
AnzIter	Anzahl	Anzahl der Iterationsschritte (Durchläufe der Modellsequenz)
RelaxLSS	ja / nein	Relaxation der Begrenzung der Lehrerspringstunden um maximal drei Springstunden je Lehrer
RelaxFTL	ja / nein	Relaxation der Restriktionen für die Berücksichtigung freier Tage für Lehrer
BraHeu ($xbrheu$) ¹	-	Branching-Heuristik mit den möglichen Ausprägungen: - HiCo-0: Setze fraktionale Variable mit höchsten Kosten auf 0 ($xbrheu = 0$) - LoCo-1: Setze fraktionale Variable mit geringsten Kosten auf 1 ($xbrheu = 1$) - HiFrac-Rd: Setze am stärksten fraktionale Variable durch kaufmännische Rundung ($xbrheu = 2$) - Kompl-1: Setze fraktionale x_{udtp} -Variable mit höchster Komplexität $komp(u)$ auf 1 ($xbrheu = 4$)
KnoWahl ($xnodse$) ¹	-	Strategie der Knotenwahl mit den möglichen Ausprägungen: - LIFO: LIFO-Kriterium ($xnodse = 0$) - BeBnd: Best Bound-Kriterium ($xnodse = 1$) - LoInf: Lowest Infeasibility-Kriterium ($xnodse = 2$) - BP-Beale: Best Projection-Kriterium nach Beale [1979] ($xnodse = 3$) - BP-Forrest: Best Projection-Kriterium nach Forrest / Hirst / Tomlin [1974] ($xnodse = 4$)

Anmerkung:

¹ Für eine Erläuterung der MOPS-Parameter $xbrheu$ und $xnodse$ vgl. Abschnitt 5.1.1

Die große Vielfalt der regulierbaren Modell- und Verfahrensparameter schließt die Durchführung eines Testprogramms, in welchem alle Kombinationen dieser Parameter geprüft werden, von vornherein aus. Die Erprobung des SeMIP-Ansatzes wurde daher an sechs Fragen orientiert, deren Beantwortung nach meiner Auffassung eine hohe Bedeutung für die Potenzialeinschätzung dieses Lösungsansatzes haben. Diese Fragen lauten:

1. Welches sind die besten Ergebnisse, die sich in Bezug auf die Einhaltung der Restriktionen und die Verwirklichung der Ziele des Setzungsproblems durch den SeMIP-Ansatz erzeugen lassen?
2. Welche Effizienz- und Effektivitätssteigerung ergibt sich aus der Verwendung der Kernzeitvariante der SeMIP-Modellstruktur gegenüber der Modellierung ohne Kernzeit?
3. Welchen Einfluss hat der für die Klassenphase gewählte Zielfunktionsstyp auf die Effizienz und Effektivität des SeMIP-Ansatzes?
4. Welchen Einfluss hat die Knotenwahlstrategie innerhalb des Branch-and-Bound-Prozesses auf die Effizienz und Effektivität des SeMIP-Ansatzes?
5. Welchen Einfluss hat die Branching-Heuristik innerhalb des Branch-and-Bound-Prozesses auf die Effizienz und Effektivität des SeMIP-Ansatzes?
6. Gibt es eine einheitliche Parametereinstellung, die für alle Testfälle zu einem befriedigenden Ergebnis führt?

Die erste dieser sechs Fragen stellt zugleich die wichtigste Frage dar. Sie zielt auf die Qualität der Stundenpläne, die sich mit Hilfe des SeMIP-Ansatzes erzeugen lassen. Bevor die Testergebnisse im Einzelnen vorgestellt werden, soll daher zunächst kurz auf die verwendeten Qualitätsmerkmale eingegangen werden, die der Beurteilung der Pläne zugrunde gelegt sind.

Grundsätzlich ist die Qualität eines Stundenplans daran zu messen, inwieweit er die Zielsetzungen, die an die Setzung herangetragen werden, verwirklicht, ohne eine der für das Problem gültigen Restriktionen zu verletzen. Die Einhaltung der Restriktionen stellt dabei ein Muss-Kriterium dar, dessen Bedeutung die Ziele der Setzung dominiert. Aus diesem Grunde ist in der Testversion des SeMIP-Ansatzes nur für den Restriktionstyp „Freie Tage für Lehrer“ (R-12) eine Relaxationsmöglichkeit vorgesehen, die zudem nur für solche Testfälle eingesetzt wird, für die anderweitig keine zulässige Gesamtlösung der Modellsequenz erzielt werden kann. Die Anzahl der freien Tage, die aufgrund einer Inanspruchnahme dieser Relaxationsmöglichkeit gestrichen werden, stellt ein wichtiges Qualitätsmerkmal der erzeugten Pläne dar.

Von den fünf Zielsetzungen, die gemäß der Festlegung in Unterkapitel 2.4 für das Setzungsproblem an allgemeinbildenden Schulen zu betrachten sind, werden in der Testversion des SeMIP-Ansatzes zwei in Form von Modellzielen abgebildet: der möglichst frühe tägliche Unterrichtsbeginn für die Klassen (Z-02) und die Minimierung der Springstundenzahl für die Lehrer (Z-06). Der Umfang der Erreichung dieser beiden Ziele durch die

erzeugten Pläne ist ebenfalls durch entsprechende Qualitätsmerkmale zu messen. Dabei sind in Bezug auf die Lehrerspringstundenzahl solche Springstunden gesondert zu betrachten, die für den betroffenen Lehrer l zu einer Überschreitung der pauschal gesetzten Obergrenze $alss_{max}(l) = 3$ führen. Diese Überschreitung ist nur unter Inanspruchnahme einer Relaxationsmöglichkeit zulässig und besitzt daher gegenüber der Gesamtzahl der Springstunden ein stärkeres, wenn auch nicht unbedingt dominierendes Gewicht.

Hinsichtlich der drei übrigen für das Setzungsproblem definierten Ziele der möglichst gleichmäßig langen Unterrichtstage der Klassen (Z-01), der Sicherung einer ausreichenden Vertretungsbereitschaft (Z-10) und der Vermeidung des Unterrichts bestimmter Fächerpaare am selben Tag in derselben Klasse (Z-12) kann von einer ausreichenden Zielerreichung ausgegangen werden, so dass ihre explizite Berücksichtigung in der Qualitätsbewertung nicht erforderlich ist. Dabei wird die weitgehende Nivellierung der Klassen-Unterrichtstage durch die Parametersetzung $dkt_{min}(k) = 5$ für alle Klassen k erzwungen. Die ausreichende Sicherung einer Vertretungsbereitschaft ergibt sich aus der Tatsache, dass es trotz angestrebter Minimierung der Lehrerspringstundenzahl in jeder Periode p einige unterrichtsfreie Lehrer gibt, die in der vorangehenden Periode $p-1$ und/oder in der nachfolgenden Periode $p+1$ unterrichten müssen und denen ein Vertretungseinsatz in p daher bei Bedarf zugemutet werden kann. Das Ziel der Vermeidung einer Erteilung unerwünschter Fächerkombinationen am selben Tag in derselben Klasse wird durch die Stundenpläne in jedem Fall dadurch optimal erfüllt, dass die betroffenen Fächer unter eine gemeinsame Bezeichnung zusammengeführt und ihre Unterrichtseinheiten den Restriktionen des Doppelunterrichtsverbots unterstellt werden (vgl. Abschnitt 4.2.2.4).

Eine Zusammenstellung der im Weiteren betrachteten Qualitätsmerkmale gibt [Tabelle 5.5](#).

Tabelle 5.5: Qualitätsmerkmale für die Beurteilung der durch SeMIP erzeugten Stundenpläne

Merkmal	Erläuterung
ZIELORIENTIERTE MERKMALE	
Ziel: Früher Unterrichtsbeginn für Klassen (Z-02)	
Klassen-Unterrichtstage, die erst in Periode 2 beginnen	
→ Anzahl (zu minimieren)	Über alle Klassen summierte Anzahl der im Stundenplan enthaltenen Klassen-Unterrichtstage, die erst in Periode 2 beginnen. Ein späterer Unterrichtsbeginn als in Periode 2 ist aufgrund der Parametereinstellung $ktb_{max}(k) = 2$ für alle Klassen $k \in K$ nicht möglich.
→ Prozentsatz aller Klassen-Unterrichtstage (zu minimieren)	Quotient aus der Anzahl der Klassen-Unterrichtstage, die erst in Periode 2 beginnen, und der Gesamtzahl aller Klassen-Unterrichtstage. Die Gesamtzahl aller Unterrichtstage entspricht dem Produkt $ K \cdot T $.
Ziel: Minimierung der Lehrerspringstundenzahl (Z-06)	
Lehrerspringstunden gesamt (zu minimieren)	$= \sum_{l \in L} lss_l$
Lehrerspringstunden je Lehrer (zu minimieren)	$= \sum_{l \in L} lss_l / L $
zusätzliche Lehrerspringstunden durch Relaxation (zu minimieren)	$= \sum_{l \in L} lss_l^{Relax}$
RESTRIKTIONENORIENTIERTES MERKMAL	
gestrichene freie Tage durch Relaxation (zu minimieren)	$= \sum_{l \in L} l_f^{Relax}$

5.3.3.2 Frage 1: Beste erzielbare Ergebnisse

Die besten Ergebnisse, die sich für jeden Testfall in einem Lauf zu jeweils 50 Iterationen der SeMIP-Modellsequenz erzielen ließen, und die hierfür verwendeten Parametereinstellungen zeigt [Tabelle 5.6](#). Dabei wird die Qualität der Stundenpläne mit Hilfe der oben beschriebenen Qualitätsmerkmale gemessen.

Das bedeutendste Resultat dieses Tests ist, dass für jeden der Fälle mindestens ein Stundenplan erzeugt werden konnte. Der SeMIP-Ansatz ist demnach grundsätzlich in der Lage, eine automatisierte Setzung erfolgreich durchzuführen. Besonders erfreulich ist, dass alle Fälle mit Ausnahme von G2 ohne Relaxation der Freie-Tage-Restriktionen für Lehrer (SeMIP-LeFT.1) gelöst werden konnten. Die erzielten Stundenpläne waren damit in der weit überwiegenden Zahl der Testfälle hinsichtlich aller relevanten Problemrestriktionen⁵² zulässig und damit im Sinne der in dieser Studie verwendeten Problemdefinition realisierbar. Die Tatsache, dass für den Testfall G2 eine Relaxation der Freie-Tage-Restriktionen in Kauf genommen werden musste, bedeutet dabei keinen schwerwiegenden Misserfolg, da die Planungssituation, die diesem Fall zugrunde liegt, durch den Ausschluss der manuellen Vorab-Setzung der Kursschienen eine künstliche Verschärfung gegenüber der gymnasialen Paxis darstellt.

⁵² Relevant waren sämtliche in [Tabelle 2.11](#) aufgeführten Restriktionstypen mit Ausnahme der Wegezeitenrestriktionen (vgl. [Unterkapitel 5.2](#)).

Tabelle 5.6: SeMIP-Testergebnisse bei jeweils erfolgreichster Parametereinstellung
(zur Erläuterung der Parameter vgl. [Tabelle 5.4, S.220](#))

	TESTFALL							
	R1.A	R1.B	R2	R3	G1	G1.MS	G2	G2.MS
PARAMETEREINSTELLUNGEN								
Prioritätsphase								
- <i>AnzPrioMod</i>	1	1	1	1	2	1	2	1
- <i>AnzK_{min}(u)</i> ¹	2	2	3	3	∞ : 3	2	∞ : 3	3
- <i>AnzL_{min}(u)</i> ¹	3	3	4	4	∞ : 3	2	∞ : 3	3
- <i>Mark(u) verwendet?</i> ¹	nein	nein	nein	nein	ja ² : nein	nein	ja ³ : nein	nein
- <i>Zeit_{max}Prio (min)</i>	5	5	5	5	5	5	5	5
Klassenphase								
- <i>AnzKlaMod</i>	2	2	2	3	2	2	2	2
- <i>AnzKla</i> ⁴	6 : 7	6 : 6	7 : 8	5 : 5 : 6	8 : 11	8 : 11	7 : 10	7 : 10
- <i>ZielKla</i>	F+L	F+L	FTB	FTB	FTB	FTB	FTB	FTB
- <i>Zeit_{max}Kla (min)</i>	10	10	10	10	10	10	10	10
übergreifend								
- <i>AnzIter</i>	50	50	50	50	50	50	50	50
- <i>RelaxLSS</i>	nein	nein	nein	ja	ja	ja	ja	ja
- <i>RelaxFTL</i>	nein	nein	nein	nein	nein	nein	ja	nein
- <i>BraHeu</i>	Kompl-1	Kompl-1	Kompl-1	Kompl-1	Kompl-1	Kompl-1	Kompl-1	Kompl-1
- <i>KnoWahl</i>	BP-Beale	BP-Beale	BP-Beale	BP-Beale	BP-Beale	BP-Beale	BP-Beale	BP-Beale
ERGEBNISSE								
Anzahl erzeugter Stundenpläne								
	5	4	1	3	10	11	3	4
Anzahl gescheiterter Versuche (Spaltenaufteilung: Summe wegen Zeitlimit wegen Unzulässigkeit)								
- Modellsequenz gesamt	45 35 10	46 34 12	49 14 35	47 5 42	40 11 29	39 6 33	47 2 45	46 4 42
- Prioritätsphase Teilmod. 1	0 0 0	0 0 0	0 0 0	0 0 0	0 0 0	0 0 0	0 0 0	0 0 0
- Prioritätsphase Teilmod. 2	- - -	- - -	- - -	- - -	1 1 0	- - -	38 2 36	- - -
- Klassenphase Teilmodell 1	31 27 4	33 33 0	10 10 0	3 2 1	0 0 0	0 0 0	1 0 1	3 3 0
- Klassenphase Teilmodell 2	14 8 6	13 1 12	39 4 35	13 3 10	39 10 29	39 6 33	8 0 8	43 1 42
- Klassenphase Teilmodell 3	- - -	- - -	- - -	31 0 31	- - -	- - -	- - -	- - -
Qualitätsmerkmale der erzeugten Stundenpläne (Spaltenaufteilung: Minimum Maximum Durchschnitt)								
- Klassen-Unterrichtstage, die erst in Periode 2 beginnen								
→ Anzahl	3 8 5,2	1 4 2,8	0 0 0,0	0 2 1,3	3 9 6,9	2 9 4,7	5 9 6,3	1 6 3,0
→ Prozentsatz ⁵	4,6 12 8,0	1,7 6,7 4,6	0 0 0,0	0 2,5 1,7	3,2 9,5 7,2	2,1 9,5 5,0	5,9 11 7,5	1,2 7,1 3,6
- LSS ⁶ gesamt	34 54 44	31 50 37	70 70 70	92 98 95	95 137 119	107 136 114	139 150 144	140 148 143
- LSS ⁶ je Lehrer (∅)	1,2 1,9 1,6	1,2 1,9 1,4	2,5 2,5 2,5	2,1 2,3 2,2	2,2 3,2 2,8	2,5 3,1 2,7	2,5 2,7 2,6	2,6 2,7 2,6
- zusätzl. LSS ⁶ durch Relaxation	0 0 0	0 0 0	0 0 0	1 2 1,7	1 22 13	7 21 12	7 13 10	7 15 12
- gestrichene freie Tage durch Relaxation	0 0 0	0 0 0	0 0 0	0 0 0	0 0 0	0 0 0	3 7 4,7	0 0 0
Laufzeit (h:min)	10:47	10:05	11:59	07:20	11:26	07:34	04:42	09:08
Laufzeit-∅ je zulässiger Gesamtlösung (h:min)	02:09	02:31	11:59	02:27	01:09	00:41	01:34	02:17

Anmerkungen:

¹ Bei mehreren Teilmodellen in der Prioritätsphase (Fälle G1 u. G2): Einstellung für Teilmodell 1 : Einstellung für Teilmodell 2

² In Teilmodell 1 der Prioritätsphase zu G1.MS wurden als markierte Unterrichtseinheiten gesetzt: zwei jahrgangsübergreifende Grundkursschienen sowie zwei jahrgangsübergreifende Leistungskursschienen der Jahrgänge 12 und 13

³ In Teilmodell 1 der Prioritätsphase zu G2.MS wurden als markierte Unterrichtseinheiten gesetzt: sechs Leistungskursschienen des Jahrganges 12 sowie weitere sechs Leistungskursschienen des Jahrganges 13

⁴ Anzahl Klassen in Teilmodell 1 : Anzahl Klassen in Teilmodell 2 : (ggf.) Anzahl Klassen in Teilmodell 3

⁵ Berechnungsformel = Anzahl Klassen-Unterrichtstage mit späterem Beginn als Periode 1 / (Anzahl Klassen × Anzahl Tage) × 100

⁶ LSS = Lehrerspringstunden

Für alle Testfälle lag der durchschnittliche Anteil der Klassen-Unterrichtstage, die erst in der zweiten Periode begannen, unter 10%. In sechs der acht Fälle lag dieser Anteil sogar bei höchstens 5%, so dass bei fünf Unterrichtstagen je Klasse das Ziel für mindestens 75% der Klassen optimal erfüllt war. Die Entfernung der minimalen und der maximalen Zielerfüllung vom Durchschnittswert des jeweiligen Testfalles lag dabei zwischen 50% und 100% des Durchschnittswertes, wobei es in den Fällen R2 und R3 sogar gelang, einzelne Pläne zu erzeugen, in denen alle Unterrichtstage aller Klassen in der ersten Stunde begannen. In Bezug auf das Ziel des frühen Unterrichtstagesbeginns kann der SeMIP-Ansatz daher als sehr effektiv angesehen werden. Dies dürfte seinen Grund nicht zuletzt darin haben, dass es in allen Fällen möglich war, eine der beiden Zielfunktionsalternativen FTB und F+L erfolgreich anzuwenden, die die Zielgröße des frühen Unterrichtstagesbeginns berücksichtigen.

Das Ziel der Minimierung der Springstundenzahl für Lehrer konnte in den Fällen R1.A und R1.B durch die Anwendung der Zielfunktion F+L direkt als Modellziel berücksichtigt werden. Dadurch gelang es, mit geringen Schwankungen zwischen den einzelnen Stundenplänen, eine durchschnittliche Springstundenzahl je Lehrer und Woche auf 1,6 bzw. 1,4 Stunden zu erzielen. Eine Relaxation der Obergrenze von drei Springstunden je Lehrer war nicht erforderlich. In den übrigen Testfällen hingegen wurde die Springstundenminimierung durch die Verwendung der Zielfunktion FTB nicht explizit als Zielgröße berücksichtigt, da der Einsatz der Alternativen LeSS und F+L zu einer deutlichen Beeinträchtigung des Lösungsprozesses geführt hätte (vgl. Abschnitt 5.3.3.4). Für diese Fälle lag die durchschnittliche Springstundenzahl je Lehrer daher mit 2,2 bis 2,8 Stunden deutlich höher. Dabei war insbesondere für die Gymnasialfälle die Inanspruchnahme der Relaxationsmöglichkeit für die Begrenzung der Springstundenzahl signifikant. In der Summe über alle Lehrer betrug diese Inanspruchnahme regelmäßig mehr als zehn Stunden.⁵³

Für die Dekomposition der Unterrichtseinheitenmenge U wurden je nach Testfall drei bis vier Teilmodelle gebildet, von denen für die beiden schwierigen Gymnasialfälle G1 und G2 jeweils zwei Teilmodelle und für alle übrigen Testfälle jeweils ein Teilmodell der Prioritätsphase zugeordnet wurden. Die optimalen Einstellungen der Auswahlparameter für die Prioritätsphase fielen dabei für alle Fälle unterschiedlich aus, mit Ausnahme der Fälle R1.A und R1.B, für die identische Einstellungen verwendet werden konnten. Diese Ausnahme ist von hoher Bedeutung, da sie als Indiz dafür gewertet werden kann, dass die optimale Paramtereinstellung zwar von der jeweiligen Schule, nicht aber unbedingt von der Situation des betrachteten Schuljahres abhängt. Sollte sich die Gültigkeit dieser These als Regelfall erweisen, so hätte dies eine sehr vereinfachte Anwendung des SeMIP-Ansatzes zur Folge, da jeder Stundenplaner nur einmalig eine für seine Schule geeignete Paramtereinstellung bestimmen müsste.

⁵³ Bei der Betrachtung der Fälle G1 und G1.MS muss berücksichtigt werden, dass für sie bei unrelaxierter Vorgabe einer Obergrenze von drei Springstunden für jeden Lehrer keine zulässige Lösung existiert. Diese durch die Unzulässigkeit des jeweiligen ToMIP-Modells bewiesene Erkenntnis verdeutlicht die Tatsache, dass Misserfolge der automatischen Setzung nicht immer auf Mängel der verwendeten Verfahren zurückzuführen sind, sondern ihre Ursache auch in einer unzulässigen Problemformulierung durch den Stundenplaner haben können.

Einige Parametereinstellungen erwiesen sich für alle Testfälle als gleichermaßen gut geeignet. Dies betrifft die einheitliche Verwendung der problemspezifischen komplexitätsorientierten Branching-Heuristik ebenso wie die Anwendung des Bealeschen Best Projection-Kriteriums für die Knotenwahl innerhalb des Branch-and-Bound-Prozesses. Mit Ausnahme des Falls R3, der aufgrund der in ihm enthaltenen Integrationsklassen eine besondere Struktur aufweist, war zudem für alle Testfälle eine Unterteilung der Klassenphase in nur zwei Teilmodelle ausreichend, wobei die zahlenmäßige Aufteilung der Klassen auf diese Teilmodelle überwiegend gleichmäßig erfolgte. Tendenziell erwies es sich als gut, eine Mehrzahl der Klassen dem letzten Teilmodell zuzuordnen, da auf diese Weise die Zahl der fixierten Variablen innerhalb dieses Modells und damit das Risiko seiner Unzulässigkeit gering gehalten werden konnte.

Für die Lösung jedes Teilmodells wurde eine Laufzeitbegrenzung von fünf Minuten innerhalb der Prioritätsphase und zehn Minuten innerhalb der Klassenphase vorgegeben. Während die Teilmodelle der Prioritätsphase i.d.R. innerhalb dieser Zeitbegrenzung optimal gelöst wurden, schöpften die Teilmodelle der Klassenphase die verfügbare Laufzeit zumeist voll aus, sofern sie sich nicht bereits in der Lösung der Start-LP-Relaxation als unzulässig erwiesen. Ein Optimalitätsbeweis wurde für die meisten Teilmodelle der Klassenphase nicht erzielt. Durch die weitgehende Ausnutzung der Laufzeitbegrenzungen in der Klassenphase fielen die Gesamtlaufzeiten für die jeweils 50 Iterationen des SeMIP-Lösungsprozesses mit viereinhalb bis zwölf Stunden recht lang aus. Da jedoch für die meisten Testfälle mehrere Stundenpläne erzeugt werden konnten, betrug die durchschnittliche Laufzeit bis zur Erzielung eines Stundenplanes i.d.R. nur zwischen 40 und 150 Minuten. Ein besonders schlechtes Lösungsverhalten ergab sich für den Fall R2, der nicht nur die längste Gesamtlaufzeit, sondern auch die geringste Anzahl erzielter Stundenpläne aufwies. Generell ist bei der Beurteilung der durchschnittlichen Laufzeiten je erzeugtem Plan zu berücksichtigen, dass die Pläne nicht in gleichmäßigen Zeitabständen erzeugt werden, sondern dass diese Zeitabstände stochastischen Einflüssen unterliegen.

In allen Testfällen wurde erwartungsgemäß der überwiegende Teil der jeweils 50 SeMIP-Iterationen ohne einen Stundenplan beendet. Die Analyse der gescheiterten Setzversuche ergab, dass in den meisten Fällen die Ursache für das Scheitern einer Modelliteration in der (fixierungsbedingten) Unzulässigkeit des letzten Teilmodells lag, während Unzulässigkeiten vorgelagerter Teilmodelle oder das Erreichen des Zeitlimits weitaus seltener zu einem Fehlversuch führten. Eine Ausnahme von dieser Regel stellte der Testfall G2 dar, für den die meisten Setzversuche bereits am zweiten Teilmodell der Prioritätsphase scheiterten. Ebenfalls ein anderes Lösungsverhalten zeigten die Fälle R1.A und R1.B, in denen zumeist das Erreichen des Zeitlimits im ersten Teilmodell der Klassenphase zum Abbruch einer Modelliteration führte.

Obwohl die Aufteilung der Unterrichtseinheiten auf die verschiedenen Teilmodelle der Prioritäts- und der Klassenphase für jeden Testfall individuell festgelegt war, bestand eine große Ähnlichkeit zwischen jenen Teilmodellen, die jeweils dieselbe Position innerhalb des Lösungsprozesses innehatten. Dies zeigt ein Vergleich der Modellgrößen, die sich durchschnittlich für die Teilmodelle ergaben und die innerhalb derselben Lösungsstufe

sehr ähnlich ausfielen (vgl. [Tabelle 5.7](#)).⁵⁴ Das Ergebnis erscheint zunächst überraschend, da die Bestimmung der Parametereinstellung für die Modellaufteilung ohne explizite Beachtung der Modellgrößen erfolgt war. Offensichtlich besteht eine starke, vom Individualfall unabhängige Beziehung zwischen der Größe der Teilmodelle und dem Lösungsverhalten des Branch-and-Bound-Prozesses. Es stellt sich daher die Frage, ob eine fallunabhängige Regel definiert werden kann, nach der die Modellaufteilung automatisch vorgenommen werden kann.

Eine genauere Untersuchung dieser Frage durch die vorliegende Studie würde den Rahmen sprengen, der diesem Forschungsprojekt gesetzt ist. Die Beantwortung der Frage ist jedoch für die Beurteilung des manuellen Aufwandes, mit dem der SeMIP-Ansatz an den jeweiligen Anwendungsfall angepasst werden muss, ausgesprochen bedeutsam. Je niedriger dieser Aufwand ist, desto höher sind die Effizienz und möglicherweise auch die Effektivität des Zusammenwirkens von Stundenplaner und automatischer Setzung.

Tabelle 5.7: Größen der Teilmodelle für die in [Tabelle 5.6](#) dokumentierten Testläufe
(Durchschnittliche Werte, auf 100 gerundet)

TESTFALL	R1.A	R1.B	R2	R3	G1	G1.MS	G2	G2.MS
PRIORITÄTSPHASE								
Teilmodell 1								
Variablen	1.400	1.100	900	1.700	1.500	4.000	1.300	3.600
Restriktionen	3.000	2.800	3.200	5.300	4.700	8.000	3.500	7.000
Nichtnullelemente	16.500	13.600	11.900	16.800	18.800	45.000	14.100	41.400
Teilmodell 2								
Variablen	-	-	-	-	3.100	-	2.800	-
Restriktionen	-	-	-	-	7.300	-	6.400	-
Nichtnullelemente	-	-	-	-	29.700	-	26.700	-
KLASSENPHASE								
Teilmodell 1								
Variablen	3.000	3.100	2.500	2.700	3.400	3.300	3.500	3.500
Restriktionen	3.700	3.600	3.500	6.300	6.000	6.000	5.300	5.300
Nichtnullelemente	19.500	20.300	16.100	22.700	22.800	22.700	22.600	22.600
Teilmodell 2								
Variablen	2.500	2.400	2.400	2.500	3.300	3.300	3.400	3.300
Restriktionen	3.300	3.300	3.200	5.100	5.700	5.800	5.400	5.300
Nichtnullelemente	14.400	14.100	13.300	18.000	21.800	21.700	20.300	20.300
Teilmodell 3								
Variablen	-	-	-	2.700	-	-	-	-
Restriktionen	-	-	-	4.700	-	-	-	-
Nichtnullelemente	-	-	-	17.000	-	-	-	-

⁵⁴ Die unter den Teilmodellen 1 der Prioritätsphase herausragende Dimensionierung der Gymnasialfälle G1.MS und G2.MS ist auf die jeweilige Einbeziehung der manuell fixierten Kursschienen der Oberstufe zurückzuführen.

5.3.3.3 Frage 2: Effizienz- und Effektivitätssteigerung durch die Kernzeitvariante

Die SeMIP (= ToMIP)-Modellstruktur unterscheidet zwei alternative Modellierungsvarianten: die Modellierung ohne (= Basisversion) und die Modellierung mit Einbeziehung einer Kernzeit. Die Kernzeitvariante wurde, angeregt durch die empirische Beobachtung der Existenz einer solchen Kernzeit an allen mir bekannten Schulen, als Alternative zur Basisversion entwickelt, um durch Reduktion der Variablen- und Restriktionszahl eine Vereinfachung und damit bessere Lösbarkeit der Modelle zu erzielen (vgl. Abschnitt 4.2.2.7).

Das Ergebnis eines Vergleichstests, der mit Hilfe der vier Fälle R1.A, R2, G1.MS und G2.MS bezüglich der SeMIP-Modellvarianten ohne und mit Kernzeit durchgeführt wurde, enthält [Tabelle 5.8](#). Aus der Tabelle geht hervor, dass bei ansonsten identischer Parametereinstellung mit der Kernzeitvariante der Modellformulierung für alle vier Fälle mehr Stundenpläne erzeugt werden konnten als mit der Modellvariante ohne Kernzeit. Eine signifikante generelle Qualitätssteigerung wurde jedoch durch die Einbeziehung der Kernzeit ebenso wenig erzielt wie eine Reduktion der Gesamtlaufzeit. Zudem wiesen beide Varianten sehr ähnliche Verhaltensmuster hinsichtlich des Zeitpunkts und der Ursache des Abbruchs gescheiterter Setzversuche auf. Insgesamt liegt der Schluss nahe, dass die Modellformulierung auf Kernzeitbasis gegenüber der Modellformulierung ohne Kernzeit keinen signifikanten qualitativen Fortschritt, wohl aber eine quantitative Verbesserung bedeutet, da sie tendenziell mehr Lösungen hervorbringt. Diese Eigenschaft ist insbesondere für Fälle wie R2 bedeutsam, für die zulässige Lösungen nur mit großem Aufwand gefunden werden können. Es wurde daher für alle Testrechnungen, die der Beantwortung der Fragen 1 sowie 3 bis 6 zugrunde liegen, die Kernzeitvariante der SeMIP-Modellformulierung verwendet.

Tabelle 5.8: SeMIP-Testergebnisse für Modellvarianten ohne und mit Kernzeit
(zur Erläuterung der Parameter vgl. [Tabelle 5.4, S.220](#))

Modellvariante (K.=Kernzeit)	TESTFALL																							
	R1.A		R2		G1.MS		G2.MS																	
	ohne K.	mit K.																						
PARAMETEREINSTELLUNGEN																								
Prioritätsphase																								
- <i>AnzPrioMod</i>	1		1		1		1																	
- <i>AnzK_{min}(u)</i>	2		3		2		3																	
- <i>AnzL_{min}(u)</i>	3		4		2		3																	
- <i>Mark(u)</i> verwendet?	nein		nein		nein		nein																	
- <i>Zeit_{maxPrio}</i> (min)	5		5		5		5																	
Klassenphase																								
- <i>AnzKlaMod</i>	2		2		2		2																	
- <i>AnzKla</i> ¹	6 : 7		7 : 8		8 : 11		7 : 10																	
- <i>ZielKla</i>	F+L		FTB		FTB		FTB																	
- <i>Zeit_{maxKla}</i> (min)	10		10		10		10																	
übergreifend																								
- <i>AnzIter</i>	50		50		50		50																	
- <i>RelaxLSS</i>	nein		nein		ja		ja																	
- <i>RelaxFTL</i>	nein		nein		nein		nein																	
- <i>BraHeu</i>	Kompl-1		Kompl-1		Kompl-1		Kompl-1																	
- <i>KnoWahl</i>	BP-Beale		BP-Beale		BP-Beale		BP-Beale																	
ERGEBNISSE																								
Anzahl erzeugter Stundenpläne																								
	4	5	0	1	3	11	2	4																
Anzahl gescheiterter Versuche (Spaltenteilung: Summe wegen Zeitlimit wegen Unzulässigkeit)																								
- Modellsequenz gesamt	46	33	13	45	35	10	50	13	37	49	14	35	47	14	33	39	6	33	48	6	42	46	4	42
- Prioritätsphase	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
- Klassenphase Teilmodell 1	35	32	3	31	27	4	11	11	0	10	10	0	2	0	2	0	0	0	5	5	0	3	3	0
- Klassenphase Teilmodell 2	11	1	10	14	8	6	39	2	37	39	4	35	45	14	31	39	6	33	43	1	42	43	1	42
Qualitätsmerkmale der erzeugten Stundenpläne (Spaltenteilung: Minimum Maximum Durchschnitt)																								
- Klassen-Unterrichtstage, die erst in Periode 2 beginnen																								
→ Anzahl	4	7	5,3	3	8	5,2	-	-	-	0	0	0,0	5	7	6,3	2	9	4,7	0	2	1,0	1	6	3,0
→ Prozentsatz ²	6,2	11	8,1	4,6	12	8,0	-	-	-	0	0	0,0	5,3	7,4	6,7	2,1	9,5	5,0	0	2,4	1,2	1,2	7,1	3,6
- LSS ³ gesamt	49	56	52	34	54	44	-	-	-	70	70	70	109	116	112	107	136	114	139	143	141	140	148	143
- LSS ³ je Lehrer (Ø)	1,8	2,0	1,9	1,2	1,9	1,6	-	-	-	2,5	2,5	2,5	2,5	2,7	2,6	2,5	3,1	2,7	2,5	2,6	2,6	2,6	2,7	2,6
- zusätzl. LSS ³ durch Relaxation	0	0	0	0	0	0	-	-	-	0	0	0	7	13	10	7	21	12	13	17	15	7	15	12
- gestrichene freie Tage durch Relaxation	0	0	0	0	0	0	-	-	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Laufzeit (h:min)	10:10		10:47		09:14		11:59		10:11		07:34		09:16		09:08									
Laufzeit-Ø je zulässiger Gesamtlösung (h:min)	02:32		02:09		-		11:59		03:23		00:41		04:38		02:17									

Anmerkungen:

¹ Anzahl Klassen in Teilmodell 1 : Anzahl Klassen in Teilmodell 2

² Berechnungsformel = Anzahl Klassen-Unterrichtstage mit späterem Beginn als Periode 1 / (Anzahl Klassen × Anzahl Tage) × 100

³ LSS = Lehrerspringstunden

5.3.3.4 Frage 3: Einfluss der für die Klassenphase gewählten Zielfunktion

Grundsätzlich ist bei der Auswahl der Zielfunktion für die Klassenphase zu erwarten, dass die Anwendung der Alternative F+L, in die sowohl das Ziel des frühen Unterrichtsbeginns für Klassen als auch das Ziel der Springstundenminimierung für Lehrer einfließen, die besten Ergebnisse im Sinne einer ausgewogenen Verwirklichung beider Ziele hervorbringt. Andererseits hat die Wahl der Zielfunktion einen erheblichen Einfluss auf das Lösungsverhalten des Branch-and-Bound-Prozesses und damit des Ansatzes insgesamt. Anhand des Realschulfalls R1.A und des Gymnasialfalls G1.MS wurden daher die Auswirkungen der Zielfunktionswahl auf die Qualität der erzeugten Stundenpläne und das Lösungsverhalten insgesamt näher untersucht. Die Fälle R1.A und G1.MS wurden als Repräsentanten der beiden Fallgruppen Realschulen und Gymnasien für diesen Test ausgewählt, da für beide Fälle Einstellungen bekannt waren, die zu einer Vielzahl von Lösungen führten. Die Ergebnisse der Zielfunktionsanalyse sind in [Tabelle 5.9](#) zusammengefasst.

Die Resultate fallen für beide Testfälle sehr unterschiedlich aus. Während für R1.A bei ansonsten gleicher Parametereinstellung mit jeder Zielfunktionsalternative in 30 SeMIP-Iterationen zwischen vier und sechs Stundenpläne erzeugt werden konnten, musste für die Lösung von G1.MS erst eine Verdoppelung der Laufzeitbegrenzung in der Klassenphase eingeräumt werden, damit mit den Zielfunktionen LeSS und F+L überhaupt zulässige Lösungen erzielt werden konnten. Die wenigen Stundenpläne, die sich dann für G1.MS generieren ließen, wiesen gegenüber jenen Plänen, die mit der Zielfunktion FTB erzeugt wurden, eine deutliche Verschlechterung hinsichtlich der Verwirklichung des frühen Tagesbeginns für Klassen auf. Im Verhältnis zu dieser Verschlechterung fiel die Senkung der durchschnittlichen Springstundenzahl je Lehrer mit 0,6 bzw. 0,7 Stunden eher bescheiden aus. Deutlich verringert wurde zwar im Durchschnitt, nicht aber in der jeweils besten Lösung, die Inanspruchnahme der Springstundenrelaxation. Weder die Zielfunktion LeSS noch die Zielfunktion F+L erschienen daher für den Fall G1.MS als lohnende Alternative gegenüber der Verwendung der Formulierung FTB, welche einseitig auf die Sicherung des frühen Unterrichtsbeginns ausgerichtet ist.

Ein deutlich anderes Resultat ergab sich für den Fall R1.A. Zwar wurde auch hier durch die Wahl des kombinierten Ziels F+L anstelle der Version FTB eine Erhöhung der Quote der erst in der Periode 2 beginnenden Klassen-Unterrichtstage verursacht, doch blieb die durchschnittliche Quote mit 6,5% moderat. Demgegenüber konnte die Springstundenzahl je Lehrer von durchschnittlich 2,6 auf 1,5 Stunden deutlich reduziert werden. Bemerkenswert ist, dass die durchschnittliche Lösungsqualität des F+L-Ziels diejenige des LeSS-Ziels dominierte, da sie eine deutlich bessere Früher-Tagesbeginn-Bewertung, aber keine schlechtere Springstundenbewertung aufwies. Demnach stellte die F+L-Zielsetzung für das Problem R1.A die optimale Zielfunktionswahl dar.

Insgesamt ist zu konstatieren, dass die kombinierte Zielfunktion F+L zu besseren Ergebnissen als die alternativen Formulierungen FTB und LeSS führen kann, dies aber keineswegs garantiert ist. FTB ist in jedem Fall gegenüber der Funktion LeSS zu bevorzugen, da letztere die Forderung nach einem frühen Unterrichtstagesbeginn der Klassen völlig außer

Acht lässt. Weniger eindeutig ist das Verhältnis zwischen F+L und FTB, da durch die allgemeine Springstundenbegrenzung ein Mindestniveau der Springstundenminimierung auch bei Anwendung von FTB gesichert ist.

Tabelle 5.9: SeMIP-Testergebnisse mit unterschiedlichen Zielfunktionen für die Klassenphase
(zur Erläuterung der Parameter vgl. [Tabelle 5.4, S.220](#))

	TESTFALL																								
	R1.A			G1.MS																					
PARAMETEREINSTELLUNGEN																									
Prioritätsphase																									
- AnzPrioMod	1			1																					
- AnzK _{min} (u)	2			2																					
- AnzL _{min} (u)	3			2																					
- Markt(u) verwendet?	nein			nein																					
- Zeit _{max} Prio (min)	5			5																					
Klassenphase																									
- AnzKlaMod	2			2																					
- AnzKla ¹	6 : 7			8 : 11																					
- ZielKla	FTB	LeSS	F+L	FTB	LeSS	F+L	LeSS	F+L																	
- Zeit _{max} Kla (min)	10			10			20																		
übergreifend																									
- AnzLer	30			30																					
- RelaxLSS	nein			ja																					
- RelaxFTL	nein			nein																					
- BraHeu	Kompl-1			Kompl-1																					
- Knowahl	BP-Beale			BP-Beale																					
ERGEBNISSE																									
Anzahl erzeugter Stundenpläne																									
	4	6	5	6	0	0	1	2																	
Anzahl gescheiterter Versuche (Spaltenaufteilung: Summe wegen Zeitlimit wegen Unzulässigkeit)																									
- Modellsequenz gesamt	26	11	15	24	15	9	25	19	6	24	4	20	30	28	2	30	29	1	29	13	16	28	19	9	
- Prioritätsphase	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
- Klassenphase Teilmodell 1	13	10	3	12	11	1	17	14	3	0	0	0	29	28	1	30	29	1	13	12	1	19	19	0	
- Klassenphase Teilmodell 2	13	1	12	12	4	8	8	5	3	24	4	20	0	0	1	0	0	0	16	1	15	9	0	9	
Qualitätsmerkmale der erzeugten Stundenpläne (Spaltenaufteilung: Minimum Maximum Durchschnitt)																									
Klassen-Unterrichtstage, die erst in Periode 2 beginnen																									
→ Anzahl	1	3	2,0	16	22	18	3	5	4,2	1	6	3,3	-	-	-	-	-	-	14	14	14	9	11	10	
→ Prozentsatz ²	1,5	4,6	3,1	25	34	28	4,6	7,7	6,5	1,1	6,3	3,5	-	-	-	-	-	-	15	15	15	9,5	12	11	
- LSS ³ gesamt	70	75	74	39	47	43	34	52	41	107	123	114	-	-	-	-	-	-	83	83	83	85	88	87	
- LSS ³ je Lehrer (Ø)	2,5	2,7	2,6	1,4	1,7	1,5	1,2	1,9	1,5	2,5	2,9	2,6	-	-	-	-	-	-	1,9	1,9	1,9	2,0	2,1	2,0	
- zusätzl. LSS ³ durch Relaxation	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	14	9,3	-	-	-	-	-	-	7	7	7	4	4	4	
- gestrichene freie Tage durch Relaxation	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-	-	-	-	-	-	0	0	0	0	0	0	
Laufzeit (h:min)	05:20	07:05	06:44	04:44	05:31	05:26	11:01	11:28																	
Laufzeit-Ø je zulässiger Gesamtlösung (h:min)	01:20	01:10	01:20	00:47	-	-	11:01	05:44																	

Anmerkungen:

¹ Anzahl Klassen in Teilmodell 1 : Anzahl Klassen in Teilmodell 2

² Berechnungsformel = Anzahl Klassen-Unterrichtstage mit späterem Beginn als Periode 1 / (Anzahl Klassen × Anzahl Tage) × 100

³ LSS = Lehrerspringstunden

5.3.3.5 Frage 4: Einfluss der Knotenwahlstrategie

Effizienz und Effektivität des Branch-and-Bound-Prozesses hängen entscheidend von der Verwendung einer geeigneten Knotenwahlstrategie ab. Aus diesem Grund wurden, wiederum anhand der Fälle R1.A und G1.MS, alle durch die Optimierungssoftware MOPS zur Verfügung gestellten Auswahlmöglichkeiten durchgetestet. Die Ergebnisse für R1.A zeigt [Tabelle 5.10](#). Danach erbrachten die Best Bound-Strategie (BeBnd) und das Best Projection-Kriterium nach Forrest, Hirst und Tomlin [1974] (BP-Forrest) die schlechteste Leistung. Sie konnten nach 30 SeMIP-Iterationen keinen erzeugten Stundenplan vorweisen. Nur ein Stundenplan ging aus der Anwendung der LIFO-Strategie (LIFO) hervor, während das Lowest Infeasibility-Kriterium (LoInf) vier und das Best Projection-Kriterium nach Beale [1979] (BP-Beale) fünf Stundenpläne produzierten. Die Qualität der erzeugten Stundenpläne fiel bei Anwendung von BP-Beale sowohl im Durchschnitt als auch in den Extremen eindeutig am besten aus. Da auch die durchschnittliche Laufzeit je erzeugtem Plan für BP-Beale am geringsten war, kann diese Knotenwahlstrategie als optimale Alternative zumindest für die Lösung von R1.A betrachtet werden.

Die Testergebnisse für den Fall G1.MS enthält die [Tabelle 5.11](#). Auch bei diesem Versuch konnten mit BeBnd und BP-Forrest keine Stundenpläne erzielt werden. Etwas anders als im Fall R1.A fiel hingegen der Vergleich der übrigen Strategien aus. So lieferte LIFO für G1.MS die meisten Resultate, gefolgt von LoInf an zweiter und BP-Beale erst an dritter Stelle. Im Qualitätsvergleich der erzeugten Stundenpläne schnitt jedoch BP-Beale ähnlich wie bei R1.A mit den besten Durchschnittswerten ab, dicht gefolgt von LoInf. LIFO lieferte hingegen deutlich schlechtere Stundenpläne. Die Laufzeit je erzeugtem Plan war für BP-Beale, bedingt durch die verhältnismäßig geringe Anzahl der erzeugten Pläne, am längsten, während die Gesamtlaufzeit am kürzesten ausfiel. Insgesamt kann für den Fall G1.MS eine ähnlich gute Eignung der Knotenwahlstrategien LoInf und BP-Beale konstatiert werden. Die LIFO-Strategie hingegen erwies sich gegenüber diesen Alternativen als eindeutig dominiert.

In Zusammenfassung der Testergebnisse für R1.A und G1.MS kann festgestellt werden, dass das Best Projection-Kriterium nach Beale die beste Knotenwahlstrategie darstellt, da sie für beide Fälle die höchste Lösungsqualität garantiert. Dass diese Strategie auch für die übrigen Testfälle eine zumindest geeignete Wahl darstellt, beweisen die in [Tabelle 5.6](#) dokumentierten Ergebnisse, die in allen Fällen unter Einsatz von BP-Beale erzeugt wurden.

Tabelle 5.10: SeMIP-Testergebnisse – Knotenwahlstrategie für Testfall R1.A
(zur Erläuterung der Parameter vgl. [Tabelle 5.4, S.220](#))

		R1.A													
PARAMETEREINSTELLUNGEN															
Prioritätsphase															
- AnzPrioMod	1														
- AnzK _{min} (u)	2														
- AnzL _{min} (u)	3														
- Mark(u) verwendet?	nein														
- Zeit _{max} Prio (min)	5														
Klassenphase															
- AnzKlaMod	2														
- AnzKla ¹	6 : 7														
- ZielKla	F+L														
- Zeit _{max} Kla (min)	10														
übergreifend															
- AnzIter	30														
- RelaxLSS	nein														
- RelaxFTL	nein														
- BraHeu	Kompl-1														
- KnoWahl	LIFO	BeBnd	Lolnf	BP-Beale	BP-Forrest										
ERGEBNISSE															
Anzahl erzeugter Stundenpläne															
	1	0	4	5	0										
Anzahl gescheiterter Versuche (Spaltenaufteilung: Summe wegen Zeitlimit wegen Unzulässigkeit)															
- Modellsequenz gesamt	29	22	7	30	30	0	26	17	9	25	19	6	30	30	0
- Prioritätsphase	0	0	0	30	30	0	0	0	0	0	0	0	30	30	0
- Klassenphase Teilmodell 1	20	17	3	0	0	0	16	14	2	17	14	3	0	0	0
- Klassenphase Teilmodell 2	9	5	4	0	0	0	10	3	7	8	5	3	0	0	0
Qualitätsmerkmale der erzeugten Pläne (Spaltenaufteilung: Minimum Maximum Durchschnitt)															
- Klassen-Unterrichtstage, die erst in Periode 2 beginnen															
→ Anzahl	6	6	6,0	-	-	-	3	11	6,3	3	5	4,2	-	-	-
→ Prozentsatz ²	9,2	9,2	9,2	-	-	-	4,6	17	9,6	4,6	7,7	6,5	-	-	-
- LSS ³ gesamt	54	54	54	-	-	-	44	63	50	34	52	41	-	-	-
- LSS ³ je Lehrer (∅)	1,9	1,9	1,9	-	-	-	1,6	2,3	1,8	1,2	1,9	1,5	-	-	-
- zusätzl. LSS ³ durch Relaxation	0	0	0	-	-	-	0	0	0	0	0	0	-	-	-
- gestrichene freie Tage durch Relaxation	0	0	0	-	-	-	0	0	0	0	0	0	-	-	-
Laufzeit (h:min)	06:01	02:34	06:30	06:44	02:34										
Laufzeit-∅ je zulässiger Gesamtlösung (h:min)	06:01	-	01:37	01:20	-										

Anmerkungen:

¹ Anzahl Klassen in Teilmodell 1 : Anzahl Klassen in Teilmodell 2

² Berechnungsformel = Anzahl Klassen-Unterrichtstage mit späterem Beginn als Periode 1 / (Anzahl Klassen × Anzahl Tage) × 100

³ LSS = Lehrerspringstunden

Tabelle 5.11: SeMIP-Testergebnisse – Knotenwahlstrategie für Testfall G1.MS
(zur Erläuterung der Parameter vgl. [Tabelle 5.4, S.220](#))

		G1.MS													
PARAMETEREINSTELLUNGEN															
Prioritätsphase															
- AnzPrioMod	1														
- AnzK _{min} (u)	2														
- AnzL _{min} (u)	2														
- Mark(u) verwendet?	nein														
- Zeit _{max} Prio (min)	5														
Klassenphase															
- AnzKlaMod	2														
- AnzKla ¹	8 : 11														
- ZielKla	FTB														
- Zeit _{max} Kla (min)	10														
übergreifend															
- AnzIter	30														
- RelaxLSS	ja														
- RelaxFTL	nein														
- BraHeu	Kompl-1														
- KnoWahl	LIFO	BeBnd	LoInf	BP-Beale	BP-Forrest										
ERGEBNISSE															
Anzahl zulässiger Gesamtlösungen															
	12	0	9	6	0										
Anzahl gescheiterter Versuche (Spaltenaufteilung: Summe wegen Zeitlimit wegen Unzulässigkeit)															
- Modellsequenz gesamt	18	2	16	30	29	1	21	5	16	24	4	20	30	30	0
- Prioritätsphase	0	0	0	15	15	0	0	0	0	0	0	0	10	10	0
- Klassenphase Teilmodell 1	2	2	0	15	14	1	3	2	1	0	0	0	20	20	0
- Klassenphase Teilmodell 2	16	0	16	0	0	0	18	3	15	24	4	20	0	0	0
Qualitätsmerkmale der erzeugten Pläne (Spaltenaufteilung: Minimum Maximum Durchschnitt)															
- Klassen-Unterrichtstage, die erst in Periode 2 beginnen															
→ Anzahl	4	11	7,3	-	-	-	1	5	3,6	1	6	3,3	-	-	-
→ % aller Kla.-Unt.-tage ²	4,2	12	7,7	-	-	-	1,1	5,3	3,8	1,1	6,3	3,5	-	-	-
- LSS ³ gesamt	126	152	136	-	-	-	106	133	113	107	123	114	-	-	-
- LSS ³ je Lehrer (Ø)	2,9	3,5	3,2	-	-	-	2,5	3,1	2,6	2,5	2,9	2,6	-	-	-
- zusätzl. LSS ³ durch Relaxation	16	35	26	-	-	-	5	21	10	4	14	9,3	-	-	-
- gestrichene freie Tage durch Relaxation	0	0	0	-	-	-	0	0	0	0	0	0	-	-	-
Laufzeit (h:min)	07:01	04:26	05:35	04:44	05:15										
Laufzeit-Ø je zulässiger Gesamtlösung (h:min)	00:35	-	00:37	00:47	-										

Anmerkungen:

¹ Anzahl Klassen in Teilmodell 1 : Anzahl Klassen in Teilmodell 2

² Berechnungsformel = Anzahl Klassen-Unterrichtstage mit späterem Beginn als Periode 1 / (Anzahl Klassen × Anzahl Tage) × 100

³ LSS = Lehrerspringstunden

5.3.3.6 Frage 5: Einfluss der Branching-Heuristik

Auch die Wahl einer geeigneten Branching-Heuristik hat einen großen Einfluss auf den Verlauf des Branch-and-Bound-Prozesses. Aus diesem Grund wurden Tests auch für die von MOPS vorgesehenen Einstellungen dieses Parameters durchgeführt. Dabei wurde die für problemspezifische Variablenpriorisierungen reservierte Alternative $xbrheu = 4$ für die Anwendung der in Abschnitt 5.1.1 präsentierten komplexitätsorientierten Branching-Heuristik genutzt. Für die Vergleichsrechnungen wurden wiederum die Testfälle R1.A und G1.MS genutzt.

Tabelle 5.12 zeigt die erzielten Ergebnisse. Bezogen auf den Fall R1.A, kann die Branching-Heuristik „Setze die fraktionelle Variable mit dem geringsten Zielfunktionskoeffizienten auf 1“ (LoCo-1) ebenso als ungeeignet betrachtet werden wie die Strategie „Wähle die am stärksten fraktionelle Variable und runde sie nach kaufmännischer Regel ganzzahlig“ (HiFrac-Rd). Keine dieser drei Strategien führte innerhalb von 30 SeMIP-Iterationen für diesen Fall zu einem Stundenplan. Ein Plan ergab sich bei Anwendung der Regel „Setze die fraktionelle Variable mit dem höchsten Zielfunktionskoeffizienten auf 0“ (HiCo-0), während die problemspezifische Heuristik „Setze die fraktionelle x_{udp} -Variable mit der höchsten Komplexität $kompl(u)$ auf 1“ (Kompl-1) fünf Stundenpläne lieferte. Die durchschnittliche Qualität der mit Kompl-1 erzielten Pläne lag dabei deutlich über der Qualität des mit HiCo-0 erzeugten Planes. Für den Problemfall R1.A stellte sich die Strategie Kompl-1 daher als eindeutig beste Branching-Heuristik dar.

Auch für G1.MS konnten mit Hilfe der Branching-Heuristik LoCo-1 keine Stundenpläne erzeugt werden. Deutlich erfolgreicher als in der Anwendung auf den Fall R1.A erwies sich hingegen die Strategie HiFrac-Rd, die mit fünf Stundenplänen fast ebensoviele Setzerfolge verzeichnete wie die Strategie Kompl-1. Die Durchschnittswerte der Qualitätsmerkmale lagen dabei für HiFrac-Rd etwas besser als für Kompl-1, die Laufzeit je Plan und vor allem die Gesamtlaufzeit hingegen deutlich schlechter. Beide Heuristiken dominierten die Strategie HiCo-0, die nur einen Stundenplan hervorbrachte, der zudem deutlich schlechter war als die mit HiFrac-Rd und Kompl-1 erzeugten Pläne. Insgesamt war daher für den Fall G1.MS festzustellen, dass die Branching-Heuristiken HiFrac-Rd und Kompl-1 etwa gleichrangig die besten Strategien waren.

Als Fazit aus dem Vergleich der Branching-Heuristiken kann festgehalten werden, dass die problemspezifische komplexitätsorientierte Regel Kompl-1 generell die beste Variante darstellt, auch wenn für einzelne Testfälle die Regel HiFrac-Rd vergleichbar gute Ergebnisse liefert. Die generelle Eignung von Kompl-1 wird durch die durchgängige erfolgreiche Verwendung dieser Regel für die in Tabelle 5.6 dokumentierten Testläufe bestätigt.

Tabelle 5.12: SeMIP-Testergebnisse mit unterschiedlichen Branching-Heuristiken
(zur Erläuterung der Parameter vgl. [Tabelle 5.4, S.220](#))

	TESTFALL																							
	R1.A						G1.MS																	
PARAMETEREINSTELLUNGEN																								
Prioritätsphase																								
- AnzPrioMod	1						1																	
- AnzK _{min} (u)	2						2																	
- AnzL _{min} (u)	3						2																	
- Mark(u) verwendet?	nein						nein																	
- Zeit _{max} Prio (min)	5						5																	
Klassenphase																								
- AnzKlaMod	2						2																	
- AnzKla ¹	6 : 7						8 : 11																	
- ZielKla	F+L						FTB																	
- Zeit _{max} Kla (min)	10						10																	
übergreifend																								
- AnzIter	30						30																	
- RelaxLSS	nein						ja																	
- RelaxFTL	nein						nein																	
- BraHeu	HiCo-0	LoCo-1	HiFrac-Rd	Kompl-1	HiCo-0	LoCo-1	HiFrac-Rd	Kompl-1	HiCo-0	LoCo-1	HiFrac-Rd	Kompl-1												
- KnoWahl	BP-Beale						BP-Beale																	
ERGEBNISSE																								
Anzahl erzeugter Stundenpläne																								
	1		0		0		5		1		0		5		6									
Anzahl gescheiterter Versuche (Spaltenaufteilung: Summe wegen Zeitlimit wegen Unzulässigkeit)																								
- Modellsequenz gesamt	29	27	2	30	29	1	30	29	1	25	19	6	29	8	21	30	11	19	25	10	15	24	4	20
- Prioritätsphase	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0
- Klassenphase Teilmodell 1	26	25	1	29	28	1	30	29	1	17	14	3	1	0	1	3	2	1	2	2	0	0	0	0
- Klassenphase Teilmodell 2	3	2	1	0	0	0	0	0	0	8	5	3	28	8	20	26	8	18	23	8	15	24	4	20
Qualitätsmerkmale der erzeugten Pläne (Spaltenaufteilung: Minimum Maximum Durchschnitt)																								
Klassen-Unterrichtstage, die erst in Periode 2 beginnen																								
→ Anzahl	11	11	11	-	-	-	-	-	-	3	5	4,2	9	9	9,0	-	-	-	1	7	3,0	1	6	3,3
→ Prozentsatz ²	17	17	17	-	-	-	-	-	-	4,6	7,7	6,5	9,5	9,5	9,5	-	-	-	1,1	7,4	3,2	1,1	6,3	3,5
- LSS ³ gesamt	57	57	57	-	-	-	-	-	-	34	52	41	112	112	112	-	-	-	93	107	101	107	123	114
- LSS ³ je Lehrer (Ø)	1,7	1,7	1,7	-	-	-	-	-	-	1,2	1,9	1,5	2,6	2,6	2,6	-	-	-	2,2	2,5	2,4	2,5	2,9	2,6
- zusätzl. LSS ³ durch Relaxation	0	0	0	-	-	-	-	-	-	0	0	0	6	6	6	-	-	-	4	9	5,8	4	14	9,3
- gestrichene freie Tage durch Relaxation	0	0	0	-	-	-	-	-	-	0	0	0	0	0	0	-	-	-	0	0	0	0	0	0
Laufzeit (h:min)	05:52		05:30		05:24		06:44		05:05		05:38		06:11		04:44									
Laufzeit-Ø je zulässiger Gesamtlösung (h:min)	05:52		-		-		01:20		05:05		-		01:14		00:47									

Anmerkungen:

¹ Anzahl Klassen in Teilmodell 1 : Anzahl Klassen in Teilmodell 2

² Berechnungsformel = Anzahl Klassen-Unterrichtstage mit späterem Beginn als Periode 1 / (Anzahl Klassen × Anzahl Tage) × 100

³ LSS = Lehrerspringstunden

5.3.3.7 Frage 6: Existenz einer befriedigenden globalen Parametereinstellung

Der Nutzen eines automatisierten Setzverfahrens ist für den Stundenplaner tendenziell umso größer, je weniger Parametereinstellungen er durch ein Versuch-und-Irrtum-Verfahren selbst bestimmen muss. Es stellt sich daher die Frage, ob es generelle Parametereinstellungen gibt, die für alle Testprobleme befriedigende Ergebnisse liefert, auch wenn diese möglicherweise nicht ebenso gut ausfallen wie die in [Tabelle 5.6](#) präsentierten Resultate. Die Ergebnisse dieses Tests enthält [Tabelle 5.13](#). Die Parameterwerte, welche für die dort dokumentierten Testläufe verwendet wurden, basierten auf einer Durchschnittsbildung über die für die Beantwortung der Frage 1 verwendeten Einstellungen. Nicht alle Parameter wurden dabei egalisiert. So enthielt die Prioritätsphase für die Fälle G1 und G2 nach wie vor zwei Teilmodelle, während ihr in allen anderen Fällen nur ein Teilmodell zugeordnet wurde. Auch wurden für die Gymnasialfälle die Relaxationsmöglichkeiten beibehalten, während die Realschulfälle sämtlich ohne Relaxation gelöst wurden. Der zeitliche Spielraum wurde durch Anheben des Zeitlimits für die Teilmodelle der Prioritätsphase auf zehn Minuten und für die Teilmodelle der Klassenphase auf 15 Minuten deutlich erhöht.

Das Ergebnis, welches mit Hilfe dieser Einstellungen erzielt wurde, ist insgesamt ernüchternd. Für fünf der acht Testfälle konnte in 30 SeMIP-Iterationen kein Stundenplan erzeugt werden. In weiteren zwei Fällen ergab sich nur ein einziger Plan. Nur für die Fälle G1 und G2.MS wurden mehrere Stundenpläne erzeugt. Dieser Erfolg erschien jedoch wenig überraschend, da die für den hiesigen Vergleich verwendeten Globaleinstellungen den Individualeinstellungen dieser beiden Fälle in den Testläufen zu Frage 1 sehr ähnlich waren.

Vor dem Hintergrund der in diesem Vergleichstest erzielten Ergebnisse muss der Versuch, in Bezug auf *alle* für dieses Testprogramm definierten Parameter eine global erfolgreiche Einstellung zu definieren, als vorläufig gescheitert betrachtet werden. Allerdings schließt dies nicht grundsätzlich aus, dass Regeln definiert werden können, nach denen eine für den individuellen Problemfall geeignete Parametereinstellung automatisch aus den Problem-*daten* abgeleitet werden kann.⁵⁵ Auch konnte in den Untersuchungen der Fragen 4 und 5 und nicht zuletzt durch die Ergebnisse zu Frage 1 gezeigt werden, dass für die wichtigen verfahrensinternen Parameter der Knotenwahl- und der Branching-Strategie sehr wohl einheitliche Werte verwendbar sind. Auch weist die Tatsache, dass die beiden Fälle R1.A und R1.B in der Untersuchung zu Frage 1 mit quasi identischen Parametereinstellungen gelöst werden konnten, darauf hin, dass der Aufwand für die Anpassung der Parameter bei wiederholter Anwendung des Verfahrens an derselben Schule stark zurückgehen kann.

⁵⁵ Vgl. hierzu die Ausführungen zur beobachteten Ähnlichkeit der Teilmodellgrößen in Abschnitt 5.3.3.2.

Tabelle 5.13: SeMIP-Testergebnisse mit globaler Parametereinstellung
(zur Erläuterung der Parameter vgl. [Tabelle 5.4, S.220](#))

	TESTFALL							
	R1.A	R1.B	R2	R3	G1	G1.MS	G2	G2.MS
PARAMETEREINSTELLUNGEN								
Prioritätsphase								
- <i>AnzPrioMod</i>	1	1	1	1	2	1	2	1
- <i>AnzK_{min}(u)¹</i>	3	3	3	3	∞ : 3	3	∞ : 3	3
- <i>AnzL_{min}(u)¹</i>	3	3	3	3	∞ : 3	3	∞ : 3	3
- <i>Mark(u) verwendet?¹</i>	nein	nein	nein	nein	ja ² : nein	nein	ja ³ : nein	nein
- <i>Zeit_{maxPrio} (min)</i>	10	10	10	10	10	10	10	10
Klassenphase								
- <i>AnzKlaMod</i>	2	2	2	2	2	2	2	2
- <i>AnzKla⁴</i>	6 : 7	6 : 6	7 : 8	8 : 8	9 : 10	9 : 10	8 : 9	8 : 9
- <i>ZielKla</i>	FTB	FTB	FTB	FTB	FTB	FTB	FTB	FTB
- <i>Zeit_{maxKla} (min)</i>	15	15	15	15	15	15	15	15
übergreifend								
- <i>AnzIter</i>	30	30	30	30	30	30	30	30
- <i>RelaxLSS</i>	nein	nein	nein	nein	ja	ja	ja	ja
- <i>RelaxFTL</i>	nein	nein	nein	nein	nein	nein	ja	nein
- <i>BraHeu</i>	Kompl-1	Kompl-1	Kompl-1	Kompl-1	Kompl-1	Kompl-1	Kompl-1	Kompl-1
- <i>KnoWahl</i>	BP-Beale	BP-Beale	BP-Beale	BP-Beale	BP-Beale	BP-Beale	BP-Beale	BP-Beale
ERGEBNISSE								
Anzahl erzeugter Stundenpläne								
	0	0	0	1	2	1	0	4
Anzahl gescheiterter Versuche (Spaltenaufteilung: Summe wegen Zeitlimit wegen Unzulässigkeit)								
- <i>Modellsequenz gesamt</i>	30 5 25	30 6 24	30 1 29	29 7 22	28 2 26	29 2 27	30 3 27	26 9 17
- <i>Prioritätsphase Teilmod. 1</i>	0 0 0	0 0 0	0 0 0	0 0 0	0 0 0	0 0 0	0 0 0	0 0 0
- <i>Prioritätsphase Teilmod. 2</i>	- - -	- - -	- - -	- - -	0 0 0	- - -	23 1 22	- - -
- <i>Klassenphase Teilmodell 1</i>	5 5 0	6 6 0	19 1 18	23 7 16	1 1 0	2 2 0	2 2 0	9 9 0
- <i>Klassenphase Teilmodell 2</i>	25 0 25	24 0 24	11 0 11	6 0 6	27 1 26	27 0 27	5 0 5	17 0 17
Qualitätsmerkmale der erzeugten Stundenpläne (Spaltenaufteilung: Minimum Maximum Durchschnitt)								
- <i>Klassen-Unterrichtstage, die erst in Periode 2 beginnen</i>								
→ <i>Anzahl</i>	- - -	- - -	- - -	5 5 5,0	8 11 9,5	3 3 3,0	- - -	2 5 3,8
→ <i>Prozentsatz⁵</i>	- - -	- - -	- - -	6,3 6,3 6,3	8,4 12 10	3,2 3,2 3,2	- - -	2,4 5,9 4,4
- <i>LSS⁶ gesamt</i>	- - -	- - -	- - -	88 88 88	132 137 135	124 124 124	- - -	130 155 146
- <i>LSS⁶ je Lehrer (Ø)</i>	- - -	- - -	- - -	2,1 2,1 2,1	3,1 3,2 3,1	2,9 2,9 2,9	- - -	2,4 2,8 2,7
- <i>zusätzl. LSS⁶ durch Relaxation</i>	- - -	- - -	- - -	0 0 0	19 27 23	12 12 12	- - -	11 16 14
- <i>gestrichene freie Tage durch Relaxation</i>	- - -	- - -	- - -	0 0 0	0 0 0	0 0 0	- - -	0 0 0
Laufzeit (h:min)	06:20	06:45	03:08	05:06	09:09	07:40	03:20	08:51
Laufzeit-Ø je zulässiger Gesamtlösung (h:min)	-	-	-	05:06	04:34	07:40	-	02:12

Anmerkungen:

- ¹ Bei mehreren Teilmodellen in der Prioritätsphase (Fälle G1 u. G2): Einstellung für Teilmodell 1 : Einstellung für Teilmodell 2
- ² In Teilmodell 1 der Prioritätsphase zu G1.MS wurden als markierte Unterrichtseinheiten gesetzt: zwei jahrgangsübergreifende Grundkursschienen sowie zwei jahrgangsübergreifende Leistungskursschienen der Jahrgänge 12 und 13
- ³ In Teilmodell 1 der Prioritätsphase zu G2.MS wurden als markierte Unterrichtseinheiten gesetzt: sechs Leistungskursschienen des Jahrganges 12 sowie weitere sechs Leistungskursschienen des Jahrganges 13
- ⁴ Anzahl Klassen in Teilmodell 1 : Anzahl Klassen in Teilmodell 2
- ⁵ Berechnungsformel = Anzahl Klassen-Unterrichtstage mit späterem Beginn als Periode 1 / (Anzahl Klassen × Anzahl Tage) × 100
- ⁶ LSS = Lehrerspringstunden

5.4 Kritische Würdigung in Theorie und Praxis

Anhand acht verschiedener Praxisfälle unterschiedlicher Schultypen wurden die vorgestellten Lösungsansätze ToMIP, HiMIP und SeMIP getestet, die auf der Methodik der Gemischt-ganzzahligen Programmierung basieren. Dabei wurden alle in den jeweiligen Modellen der drei Ansätze abgebildeten Problemrestriktionen und -zielsetzungen bis auf zwei Ausnahmen berücksichtigt. Ausgenommen wurden zum einen die Wegezeitenrestriktionen (R-09), da sie für keine der getesteten Schulen relevant waren. Zum anderen wurde die Zielsetzung der Sicherung einer ausreichenden Vertretungsbereitschaft der Lehrer (Z-10) ausgeschlossen, weil ihre ausreichende Erfüllung als eine automatische Folge der unvermeidlich in den Stundenplänen enthaltenen Springstunden der Lehrer unterstellt wurde. Diese Annahme steht nach meiner Beobachtung in Einklang mit der planerischen Praxis, in der die Sicherung der Vertretungsbereitschaft sehr wohl bei der Ausführung, selten jedoch bereits bei der Erstellung des Stundenplanes größere Bedeutung erlangt.

Musste mit dem Scheitern des ToMIP-Ansatzes aufgrund der enormen Größe und Komplexität des ToMIP-Gesamtmodells gerechnet werden, so erscheint der frühzeitige Misserfolg der Wochen-Tage-Dekomposition des HiMIP-Ansatzes zunächst überraschend. Der Grund für dieses Scheitern liegt nach meiner Auffassung darin, dass die über das HiMIP-Wochenmodell vorgenommene Aufteilung des Problems auf i.d.R. mindestens fünf Tagesmodelle die Planungsflexibilität zu stark einschränkt, da zu viele zu kleine Teilmodelle gebildet werden. Diesbezüglich ist die SeMIP-Dekomposition wesentlich flexibler handhabbar, da die Zahl der Teilmodelle beliebig wählbar ist. Die umfangreichen Tests des SeMIP-Ansatzes haben gezeigt, dass eine Aufteilung des Problems auf drei bis vier Teilmodelle ausreicht, um innerhalb einer in Stunden zu messenden Laufzeit mehrere zulässige Gesamtlösungen generieren zu können.

Im Gegensatz zu den Ansätzen ToMIP und HiMIP kann der SeMIP-Ansatz als umfassender Erfolg angesehen werden. Mit diesem Ansatz gelang es, für sieben der acht Testfälle Stundenpläne zu erzeugen, die sämtliche vorgegebenen Problemrestriktionen berücksichtigten. Nur in einem der Fälle war es erforderlich, den Anspruch von Lehrern auf die Einräumung unterrichtsfreier Tage zu relaxieren. Die Ergebnisse des SeMIP-Verfahrens gehen damit über die Leistungen hinaus, die hinsichtlich der Einhaltung der für das Setzungsproblem allgemeinbildender Schulen relevanten Restriktionen für frühere Lösungsansätze dokumentiert sind. Die durchschnittliche Laufzeit je Lösung betrug in fast allen Fällen zwischen 40 und 150 Minuten auf einem Pentium III-PC mit Intel-500 MHz-Prozessor. Lediglich im Fall R3, der aufgrund des Abendschulunterrichts zahlreicher Lehrer und der vier Integrationsklassen mit erhöhter Lehrerbindung eine besondere Komplexität aufweist, konnte innerhalb von zwölf Stunden nur eine einzige Lösung gefunden werden.

Wichtiger als die Sicht des Theoretikers ist für den praktischen Erfolg des SeMIP-Ansatzes jedoch das Urteil der Stundenplaner als potenzielle Anwender des Verfahrens. Aus diesem Grunde habe ich im Frühjahr 2000 an die Stundenplaner der an der Testreihe teilnehmenden Schulen jeweils einen mit Hilfe des Software-Prototypen erzeugten Stundenplan verschickt. Versandt wurden an die Schule R1 eine Lösung des Problems R1.A, an G1 eine

Lösung für G1.MS, an G2 eine Lösung für G2.MS und an R2 und R3 jeweils eine Lösung der Probleme R2 bzw. R3. Die Planer wurden gebeten, auf einem eigens zu diesem Zweck formulierten Kurzfragebogen, dessen Wortlaut in Anhang 8.4 abgedruckt ist, Angaben zur Beurteilung des jeweiligen Plans und des zu seiner Erzeugung verwendeten Setzverfahrens zu machen. Da seitens der Stundenplanerin der Schule R2 leider keine Bewertung erfolgte, liegen lediglich Urteile für die vier Fälle R1.A, R3, G1.MS und G2.MS vor. Anhand dieser Urteile soll im Folgenden ein Bild vom gegenwärtigen Stand der Praxistauglichkeit des SeMIP-Ansatzes entwickelt werden.

Gefragt wurde zunächst nach der individuellen Bedeutung, die die Stundenplaner verschiedenen Zielsetzungen der Stundenplansetzung zumessen, und nach der Bewertung, die sie dem jeweils zugesandten Plan hinsichtlich der Erfüllung dieser Zielsetzungen zuordnen. Der Kreis der Zielsetzungen wurde dabei gegenüber der Problemdefinition nach Tabelle 2.11 bewusst um zwei in der SeMIP-Modellstruktur nicht explizit abgebildete Anforderungen erweitert, um herauszufinden, inwieweit nicht explizit formulierte Anforderungen dennoch durch den Plan berücksichtigt werden. Die Anforderungen betreffen zum einen das Ziel, Unterrichtsstunden, die dasselbe Fach und dieselbe Klasse binden, möglichst gleichmäßig über die Woche zu verteilen (Z-04)⁵⁶, zum anderen das Ziel, bestimmte Fächer, z.B. verschiedene Fremdsprachen, in derselben Klasse nicht in direkt aufeinander folgenden Perioden unterrichten zu lassen (Z-11). Nicht gefragt wurde hingegen nach der Sicherung der Vertretungsbereitschaft, die aus oben genannten Gründen aus den Testrechnungen ausgeklammert war. Die Antworten der Stundenplaner sind in [Tabelle 5.14](#) zusammengefasst.

Tabelle 5.14: Wichtigkeitseinstufung verschiedener Zielsetzungen und Bewertung verschickter Stundenpläne durch die Praktiker

Zielsetzung	Wichtigkeit (u = unwichtig, w = wichtig, sw = sehr wichtig)				Bewertung (Schulnoten von 1 = „sehr gut“ bis 6 = „ungenügend“)			
	R1.A	R3	G1. MS	G2. MS	R1.A	R3	G1. MS	G2. MS
Gleichlange Klassen-Unterrichtstage (Z-01)	sw	u	w	sw	5	2	1	k.A.
Früher Unterrichtsbeginn für Klassen (Z-02)	sw	u	sw	w	5	2	1	k.A.
Springstundenminimierung für Lehrer (Z-06)	u-w	w	w	sw	3	2	4	k.A.
Bestimmte Fächer, z.B. Sport u. Schwimmen, nicht am selben Tag (Z-12)	u	u	u	u	k.A.	2	1	k.A.
Gleichmäßige Verteilung der Unterrichtsstunden eines Fachs in einer Klasse über die Woche (Z-04)	w	sw	w	sw	3	1	2	k.A.
Ähnliche Fächer, z.B. verschiedene Fremdsprachen, möglichst nicht in aufeinanderfolgenden Perioden (Z-11)	u	u	u	u	k.A.	2	2	k.A.

Abkürzung: k.A. = keine Angabe

⁵⁶ Vgl. Abschnitt 2.2.2.

Auffallend an der Wichtigkeitseinstufung der Zielsetzungen ist zunächst, dass das Ziel, bestimmte Fächerkombinationen nicht demselben Tag zuzuordnen, von allen Befragten als unwichtig eingestuft wird, obwohl ihm in der Umfrage vom Winter 1997/98 eine hohe Relevanz zugeordnet wurde (vgl. Abbildung 2.6). Bestätigt wurde jene Umfrage hingegen hinsichtlich der Forderung, ähnliche Fächer in derselben Klasse möglichst nicht direkt nacheinander unterrichten zu lassen. Diese Forderung wurde durchweg als unwichtig angesehen. Alle übrigen Zielsetzungen werden von den Beteiligten demgegenüber zumeist als wichtig bis sehr wichtig eingestuft, wobei die Einschätzung des Stundenplaners der Schule R3 bezüglich der Zielsetzungen der gleichmäßigen Länge und des frühen Beginns der Klassen-Unterrichtstage auffallend abweicht.

Die durch die Praktiker vorgenommene Bewertung der mit Hilfe des SeMIP-Ansatzes erzeugten Stundenpläne hinsichtlich der genannten Zielsetzungen ist ausgesprochen unterschiedlich. Während die Bewertungen der erzeugten Pläne zu R3 und G1.MS überwiegend gut bis sehr gut ausfielen, äußerte der Planer der Schule R1 erhebliche Bedenken bezüglich der Qualität der Lösung zu R1.A. Vor allem die beiden Zielgrößen, welche Beginn und Gleichmäßigkeit der Unterrichtstage betreffen, wurden von diesem Praktiker für nur mangelhaft erfüllt angesehen. Als Begründung für sein Urteil gab er an, dass siebente Stunden für ihn nur dann akzeptabel seien, wenn für die betreffenden Klassen an jedem Planungstag die Stunden 1 bis 6 bereits mit Unterricht belegt seien. Diese Forderung kommt der Definition einer Kernzeit von Periode 1 bis Periode 6 gleich. Die für die Planerzeugung zugrunde gelegte Kernzeit von Periode 2 bis Periode 5 war daher für diesen Fall offensichtlich zu knapp bemessen. Für den Stundenplan zu G2.MS wurde hinsichtlich der Zielsetzungen keine Bewertung abgegeben.

Zusätzlich zu den in [Tabelle 5.14](#) aufgeführten Zielgrößen wurden die Beurteilenden aufgefordert, weitere für sie wichtige bis sehr wichtige Zielsetzungen zu nennen und den jeweiligen Plan hinsichtlich dieser Zielsetzungen zu bewerten. Die daraufhin erfolgten Antworten sind in [Tabelle 5.15](#) zusammengefasst. Sie geben eine überwiegend schlechte Bewertung der verschickten Pläne hinsichtlich einer Reihe von Anforderungen wieder, die teilweise sehr schulspezifisch sind (z.B. Nr.2), teilweise jedoch, entsprechend verallgemeinert, durchaus einen größeren Anwenderkreis betreffen könnten (z.B. Nr.3 bis 5). Es muss daher eingeräumt werden, dass der SeMIP-Ansatz in seiner gegenwärtigen Form noch nicht ausreichend an die Bedürfnisse der Praxis angepasst ist.

Tabelle 5.15: Weitere aus Sicht der Praktiker wichtige Zielsetzungen und ihre Berücksichtigung durch die verschickten Stundenpläne

Nr.	Zielsetzung	betroffener Testfall	Bewertung ¹
1	Möglichst wenige siebente Stunden	R1.A	5
2	Siebente Stunden nur montags und mittwochs	R3	6
3	Maximal sechs Unterrichtsstunden pro Tag für Lehrer	G1.MS	5
4	Keine Tage mit acht Stunden (inkl. Springstunden) Anwesenheit für Lehrer	G1.MS	4
5	Keine Tage mit nur einer Unterrichtsstunde für Lehrer	G1.MS	4
6	Flexible Festlegung der Springstundenzahl für Lehrer	R3	5
7	Teilungsstunden als Doppelstunden [am selben Tag]	R3	5
8	„Harte“ Fächer eher früh, Teilungen eher spät	R1.A	3

¹ Bewertung durch die Stundenplaner; Schulnoten von 1 = „sehr gut“ bis 6 = „ungenügend“

Bestätigt wird diese Einschätzung durch die Reaktionen der Stundenplaner auf die Frage, ob der jeweils zugesandte Stundenplan besser oder schlechter sei als der in dem betreffenden Schuljahr tatsächlich implementierte Plan. Hierauf antworteten die Vertreter der Schulen R1 und R3 eindeutig, dass der vorgelegte Plan schlechter sei und begründeten dies mit zahlreichen nicht erfüllten, teilweise stark schulspezifischen Anforderungen, die mir zum Zeitpunkt der Planerzeugung nicht bekannt waren. Der Planer der Schule G1 stufte den Testplan zwar aus Sicht der Schüler als besser ein, aus Sicht der Lehrer jedoch als schlechter. Der Vertreter der Schule G2 schließlich hielt den ihm zugeschickten Testplan zwar für besser als den tatsächlichen, schränkte diese Aussage jedoch auf solche Beurteilungskriterien ein, die mir als Schulexternem geläufig sein konnten. So seien z.B. Sperrungen von Referendaren in ihren Seminarzeiten nicht angemessen berücksichtigt. In der Folge ihrer Detailanalyse schätzten alle Befragten den manuellen Aufwand, der zur Weiterentwicklung des jeweiligen Planes bis hin zur praktischen Einsatzfähigkeit erforderlich sein würde, auf einer Skala von „niedrig“ über „mittel“ bis „hoch“ zumindest als „mittel“, überwiegend jedoch sogar als „hoch“ ein. Die Idealvorstellung, mit Hilfe der automatischen Setzung einen Plan erzeugen zu können, der ohne manuelle Änderung direkt in die Praxis umsetzbar ist, konnte demnach mit Hilfe des aktuellen Prototypen noch nicht verwirklicht werden.

Relativiert wird dieses zunächst negativ erscheinende Ergebnis durch die Antworten auf die Frage, ob der jeweils vorgelegte Plan den Praktikern die Erstellung des Stundenplanes für das betreffende Schuljahr nennenswert erleichtert hätte. Von den vorgegebenen Antwortmöglichkeiten „nein“, „ja, etwas“, „ja, sehr“ und „weiß nicht“ entschieden sich zwei der Planer für das Urteil „ja, etwas“, einer für das Prädikat „ja, sehr“. Der vierte Stundenplaner mochte oder konnte sich nicht auf ein Urteil festlegen und kreuzte daher „weiß nicht“ an. Auf die Frage, ob nach ihrer Einschätzung aufgrund des jeweils vorgelegten Planes das zu seiner Erzeugung verwendete Verfahren besser, gleich gut oder schlechter arbeite als die Setzautomatiken anderer, ihnen jeweils bekannter Stundenplanprogramme, antworteten zwei der Befragten mit „gleich gut“, ein weiterer mit „weiß nicht“. Ein sehr positives Urteil gab der Planer der Schule G2 ab, der den übersandten Plan für besser ein-

stufte als das mit dem kommerziellen Programm PC-Untis (vgl. Tabelle 3.1) vermutlich erzielbare Ergebnis. Vor dem Hintergrund der Tatsache, dass der getestete SeMIP-Ansatz bislang nur prototypisch implementiert ist, während es sich bei Untis um ein in drei Jahrzehnten ausgereiftes Programmpaket handelt, stimmt diese Einzelaussage besonders hoffnungsvoll.

Zum Abschluss der Befragung wurden die Stundenplaner gebeten, auf Basis des jeweils vorgelegten Planes ein Gesamturteil über das zu seiner Erzeugung verwendete Setzverfahren zu fällen und ggf. weitere Bemerkungen und Anregungen zu äußern. Zu diesen Punkten machte der Planer der Schule G2 keine Angaben. Der Vertreter von G1 schrieb, das perfekte Programm sei leider nicht gegeben, aber die Ausgangsangebote könnten eine Hilfe sein. Während die Gesamtbewertung des Planers der Schule R1 mit „muss noch verbessert werden“ sehr knapp und streng ausfiel, äußerte sich der Planer der Schule R3 sehr ausführlich und positiv. Er urteilte: „Das Setzverfahren arbeitet offensichtlich gut. Meine Beanstandungen beziehen sich auf falsche bzw. unvollständige Vorgaben oder Eingaben.“ und „Abschließend möchte ich aber bemerken, dass Ihr Ansatz offensichtlich recht gut ist, denn das Ergebnis kann sich auch für die ... [Realschule R3] durchaus sehen lassen – trotz der an dieser Schule mörderischen Bedingungen: Integrationsklassen mit durchgehenden Kopplungen, Abendschuleinsatz der meisten Kollegen mit der Folge eines zwingenden freien Tages, Sport als 3er-Block wegen der fernen Turnhalle. Schön wäre es, wenn daraus ein bedienerfreundliches Programm mit flexiblen Ausdrucksmöglichkeiten werden könnte!“ Dieses Urteil ist umso erfreulicher, als es auf dem einzigen Plan basiert, der für R3 im Testlauf zu Frage 1 erzeugt wurde. Der Erfolg des Ansatzes dürfte noch größer für solche Fälle sein, in denen den Stundenplanern mehrere Pläne zur Auswahl vorgelegt werden können.

Die Beurteilung des SeMIP-Lösungsansatzes bzw. der damit erzeugten Stundenpläne durch die Planentwickler der vier an der Befragung teilnehmenden Schulen R1, R3, G1 und G2 kann nach meiner Auffassung wie folgt zusammengefasst und bewertet werden:

1. Der SeMIP-Ansatz berücksichtigt trotz starker Orientierung an den Ergebnissen der Umfrage unter Berliner Stundenplanern vom Winter 1997/98 die an die erzeugten Stundenpläne gestellten Ansprüche noch nicht in ausreichendem Maße. Für solche Kriterien, die mutmaßlich eine generelle Praxisrelevanz besitzen, z.B. die Begrenzung der täglichen Unterrichtsbelastung und Anwesenheitszeit für Lehrer, müssen daher entsprechende Modellerweiterungen formuliert und umgesetzt werden.
2. Aufgrund der unter 1. genannten Mängel der Abbildungsgenauigkeit sind die mit Hilfe des SeMIP-Ansatzes erzeugten Pläne derzeit noch nicht ohne manuelle Nachbearbeitung in die Praxis umsetzbar. Ob sich die SeMIP-Modellstruktur in einer Weise an die realen Gegebenheiten anpassen lässt, die eine solche Nachbearbeitung vollständig überflüssig macht, muss angesichts der geäußerten, teilweise sehr individuellen Anforderungen, die an den Plan gestellt werden, vorsichtig beurteilt werden. Zumindest dürfte jedoch eine signifikante Reduktion

des derzeit überwiegend als hoch eingeschätzten Nachbearbeitungsaufwandes erzielbar sein.

3. Trotz der unter 1. genannten Mängel der Abbildungsgenauigkeit wird bereits jetzt der SeMIP-Lösungsansatz im Vergleich mit anderen den Beurteilenden bekannten Setzverfahren als gleich gut oder sogar besser eingestuft. Es ist daher damit zu rechnen, dass bei entsprechender Weiterentwicklung des SeMIP-Ansatzes eine signifikante Qualitätssteigerung der automatisierten Stundenplanung gegenüber den bisher in der Praxis gebräuchlichen Verfahren erzielt werden kann.

Insgesamt kann vor dem Hintergrund der erzielten Testergebnisse und der durch die Praktiker abgegebenen Urteile als erwiesen betrachtet werden, dass der SeMIP-Lösungsansatz zur automatisierten Setzung von Stundenplänen allgemeinbildender Schulen bereits in der im Zuge dieser Studie entwickelten prototypischen Fassung geeignet ist, innerhalb einer akzeptablen Zeitspanne Stundenpläne zu erzeugen, deren Qualität zumindest nicht schlechter ist als die Qualität solcher Pläne, die mit bisher bekannten automatisierten Setzverfahren generiert werden können.

Als ein besonderer Vorteil des stochastisch beeinflussten SeMIP-Ansatzes ist schließlich hervorzuheben, dass bei gleicher Einstellung von Modell- und Verfahrensparametern in einem Setzlauf unterschiedliche Stundenpläne erzeugt werden können, die der jeweilige Planer individuell anhand der für ihn wichtigen Beurteilungskriterien vergleichen und selektieren kann. Dieser Eigenschaft des Verfahrens ist in Anbetracht der Mehrfachzielsetzung, die dem Problem innewohnt, und der Tatsache, dass kein Modell die subjektive Präferenzstruktur eines menschlichen Entscheiders exakt abbilden und die zu erzeugende Lösung entsprechend optimieren kann, ein hoher praktischer Nutzen zuzuordnen.