Konrad-Zuse-Zentrum
für Informationstechnik Berlin

Takustraße 7
D-14195 Berlin-Dahlem
Germany

ANDREAS BLEY
ADRIAN ZYMOLKA

Planung kostenoptimaler Informations- und Kommunikations-Infrastrukturen

ZIB-Report 03–37 (November 2003)

Planung kostenoptimaler Informations- und Kommunikations-Infrastrukturen

Andreas Bley   Adrian Zymolka

1 Einleitung

Moderne Informations- und Kommunikationsnetze sind sehr komplizierte Systeme, die sich aus zahlreichen Bausteinen zusammensetzen. Für die einzelnen Funktionalitäten gibt es eine große Vielfalt von technischen Geräten, verkehrssteuernden Verbindungsprotokollen und Softwareschnittstellen. Erst durch ein reibungsloses Zusammenspiel aller Bestandteile entsteht eine Infrastruktur, auf der verschiedene Informations- und Kommunikationsdienste realisiert werden können.

Beim Entwurf und Ausbau solcher Kommunikationssysteme müssen zahlreiche interdependente Entscheidungen getroffen und gleichzeitig mannigfaltige Bedingungen berücksichtigt werden, um ein funktionstüchtiges, qualitativ hochwertiges und kostengünstiges Netzwerk zu gestalten. Im Rahmen der Netzplanung ergeben sich dabei viele interessante und nur schwer lösbare Fragestellungen. Neben der Größe der Netze bestimmt in erster Linie die Vielfalt an Alternativen und Randbedingungen die Komplexität dieser Aufgaben. Die meisten Funktionalitäten und Dienste lassen sich mit technisch verschiedenen Konzepten realisieren. So kann zum Beispiel die Datenübertragung zwischen zwei Punkten über selbstverlegte optische Glasfasern, permanente Mietleitungen oder temporäre GSM-Verbindungen erfolgen. In ähnlicher Weise gibt es für praktisch jede Funktionalität Geräte oder ganze Systeme verschiedener Hersteller in den unterschiedlichsten Leistungs- und Preisklassen. Für IP-Knotenpunkte etwa ist ein ganzes Spektrum technischer Varianten vom DSL-Router für ein Heimnetzwerk bis zum modular aufgebauten Gigabit-Router für Hochgeschwindigkeitsnetze verfügbar. Außerdem lassen sich verschiedene operative Anforderungen, wie zum Beispiel die Ausfallsicherheit des Netzes, meist auf verschiedenen Ebenen mit unterschiedlichen Konzepten realisieren.

Die zu berücksichtigenden technischen und organisatorischen Alternativmöglichkeiten und Randbedingungen sind normalerweise so vielfältig und komplex, dass eine manuelle Planung praktisch nicht mehr möglich ist. Nur durch den Einsatz mathematisch basierter Lösungsansätze und automatisierter Verfahren können eine hohe Planungsqualität und -sicherheit gewährleistet und die vorhandenen Verbesserungspotentiale voll ausgeschöpft werden. Die mathematische Optimierung stellt die geeigneten Mittel zur Lösung solcher komplexen Planungsprobleme zur Verfügung. Sie konnte sich als erfolgreiches Werkzeug für vielerlei anwendungsorientierte Fragestellungen etablieren und hat als Ergebnis langjähriger Forschung und Entwicklung ein umfangreiches Sortiment an anwendbaren Lösungsansätzen und -methoden anzubieten, siehe auch [5]. Basierend auf diesen mathematischen Modellen und Theorien lassen sich effiziente Algorithmen und automatisierte Planungswerkzeuge für zahlreiche praktische Probleme entwickeln.

Ziel dieses Artikels ist es, das Potential und die Methodik der mathematischen Optimierung bei der kostenoptimalen Planung von Kommunikationsnetzen darzustellen, siehe auch [3] und [8]. Dabei orientieren wir uns exemplarisch an einer typischen praktischen Aufgabe, der Struktur- und Konfigurationsplanung beim Aufbau eines mehrstufigen Telekommunikationsnetzwerkes. Im Folgenden stellen wir zunächst diese kombinatorische Planungsaufgabe im Detail vor. Anschließend gehen wir auf die Methodik der mathematischen Optimierung ein und skizzieren kurz die wesentlichen Modellierungstechniken und einige charakteristische Verfahrensansätze. Als weitere Anwendung greifen wir abschließend die Planung einer adäquaten Informations- und Kommunikations-Infrastruktur für ein dezentrales Energieversorgungsnetz auf. Wir beschreiben mögliche grundsätzliche Strukturalternativen und zeigen auf, in welcher Form die mathematische Optimierung den Planungsprozess und die Auswahl der günstigsten Infrastruktur begleiten und unterstützen kann.

2 Netzstruktur- und Konfigurationsplanung

Informations- und Kommunikationsnetze sollen in der Praxis verschiedene an sie gestellte Aufgaben erfüllen. Ihr Zweck kann es sein, Telefongespräche zwischen verschiedenen Standorten zu vermitteln, Informationsdienste für mehrere Nutzer zur Verfügung zu stellen oder spezielle technische Anlagen zu überwachen und zu steuern. Damit sie diese Aufgaben effizient erfüllen können, müssen die Netzwerke für die erwarteten Übertragungs- oder Dienstanforderungen passend strukturiert und dimensioniert sein.

In vielen Anwendungsfällen ist es aus technischen oder organisatorischen Gründen unvorteilhaft oder sogar unmöglich, alle Netzelemente gleich zu behandeln und ein alles umfassendes Netz aufzubauen. Insbesondere größere Netze werden deshalb üblicherweise partitioniert und in mehrere Hierarchieebenen gegliedert. Dadurch entstehen für die Planung und den Betrieb leichter handhabbare Teilnetze. Netzelemente verschiedener Ebenen erfüllen dabei häufig unterschiedliche Aufgaben. Bei der Vermittlung und Signalisierung in Telefonnetzen sind die Nutzeranschlüsse die Netzelemente der untersten Ebene. Ihnen übergeordnet sind die Nebenvermittlungsstellen, die zwar Leitungen zusammenfassen, aber noch keine

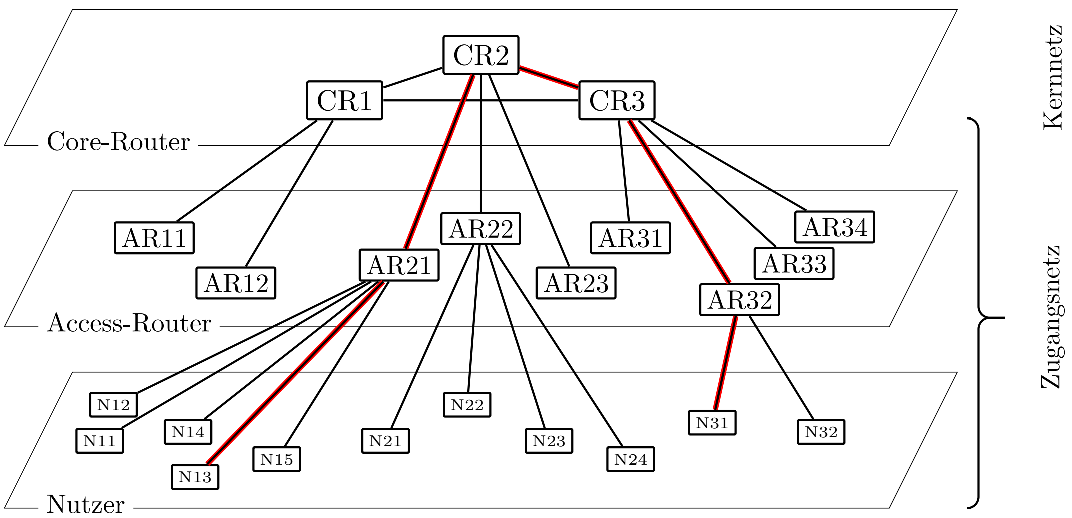

Abbildung 1: Schematischer Aufbau eines IP-Netzes mit drei Netzebenen.

Gespräche vermitteln können. Die oberste Ebene besteht schließlich aus den Vollvermittlungsstellen, die neben der Signalisierung auch die Gebührenerfassung abwickeln. Ähnlich sind auch verteilte Informationssysteme mit Servern, Proxies und Clients oder Teilnetze des Internet mit Kernnetzknoten, Zugangsknoten und Nutzeranschlüssen aufgebaut, wie in Abbildung 1 dargestellt.

Der Entwurf solcher mehrschichtigen Netze ist eine komplexe strategische Planungsaufgabe. Dabei ist eine Vielzahl langfristiger und kostspieliger Entscheidungen zu treffen, die sich später nicht mehr oder nur mit sehr hohem Aufwand revidieren lassen, und es müssen zahlreiche technische und organisatorische Bedingungen berücksichtigt werden. Im Folgenden diskutieren wir die verschiedenen relevanten Aspekte der Netzstruktur- und Konfigurationsplanung exemplarisch anhand der Planung eines großen IP-Netzes, des Gigabit-Wissenschaftsnetzes G-WiN, vgl. [1], [2].

2.1 Netzstrukturplanung

Bei der Netzstrukturplanung ist zu entscheiden, an welchen Standorten Netzknoten welcher Ebene eingerichtet und wie diese untereinander zu Teilnetzen verbunden werden. Ausgangspunkt dafür ist die Menge aller relevanten Standorte. Dazu zählen alle Nutzeranschlüsse oder Clients, zwischen denen Daten übertragen werden sollen bzw. von denen Dienste in Anspruch genommen werden. Ferner zählen auch die Standorte aller möglichen Transit- oder Serviceknoten dazu, siehe Abbildung 2.

An jedem Standort können Netzknoten einer oder mehrerer Hierarchieebenen eingerichtet werden. Allerdings gibt es Einschränkungen, an welchen Standorten Knoten welcher Ebenen eingerichtet werden müssen oder können. Außerdem kann die Anzahl der Knoten in den

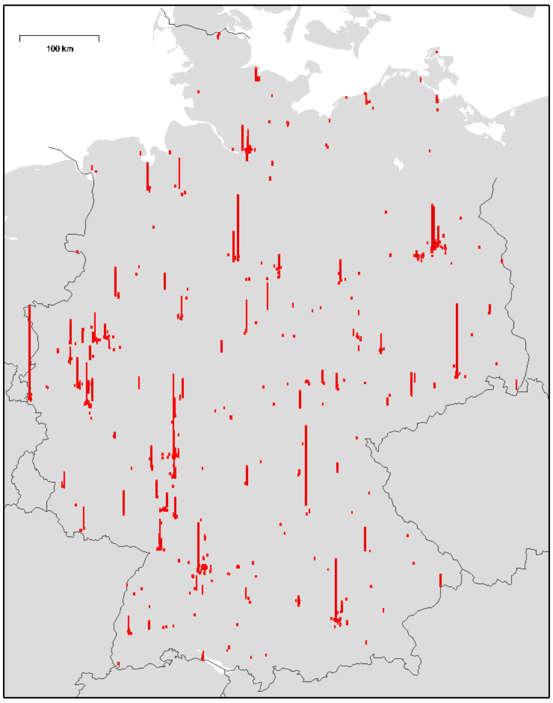

Abbildung 2: G-WiN-Standorte mit Quellen-Verkehrsanforderungen.

verschiedenen Teilnetzen oder Hierarchieebenen aus technischen oder planerischen Gründen beschränkt sein. Im G-WiN konnten Kernnetzknoten der höchsten Ebene zum Beispiel nur an solchen Standorten aufgebaut werden, die über die nötigen technischen Voraussetzungen sowie Wartungs- und Servicepersonal verfügten. Zudem durften einem einzelnen Kernnetzknoten nicht zu viele Nutzeranschlüsse zugeordnet werden, um Überlastungen zu vermeiden.

Zwischen den Netzknoten können verschiedene Verbindungen eingerichtet werden. Durch die Auswahl der Verbindungen wird die topologische Struktur der Teilnetze festgelegt. Welche Verbindungen zwischen den Knoten möglich sind, kann dabei sowohl von der geografischen Lage der Standorte als auch von der Hierarchieebene der Netzknoten abhängen. So kann zum Beispiel zwischen zwei Standorten eine Verbindung möglich sein, wenn an beiden ein Kernnetzknoten eingerichtet ist, während eine Anbindung des einen Standortes an den anderen nicht möglich ist, wenn einer der Standorte nur ein einfacher Nutzeranschluss ist.

Je nach praktischer Anwendung kann es zusätzliche Bedingungen an die einzelnen Teilnetze geben. Beispielsweise dürfen die Zugangsnetze oft aus technischen Gründen nur streng hierarchisch aufgebaut sein: jeder Knoten (bis auf die der obersten Ebene) muss an genau einen Knoten der nächsthöheren Ebene angebunden sein. Das Kernnetz, welches die Knoten der höchsten Ebene miteinander verbindet, muss in der Regel erhöhten Sicherheitsanforderungen genügen. Bei der Planung des G-WiN musste das Kernnetz so stark vermascht sein, dass es beim Ausfall einzelner Knoten oder Links nicht in mehrere Teile zerfällt. Eine mögliche Lösung ist in Abbildung 3 dargestellt.

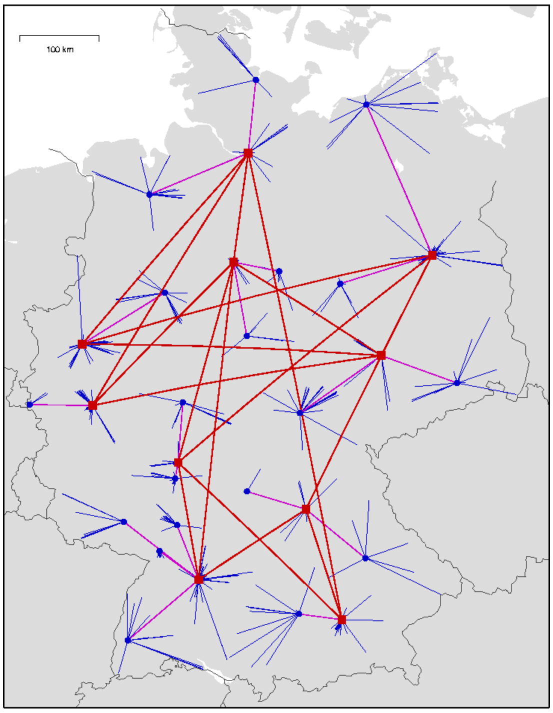

Abbildung 3: Erste Ausbaustufe des G-WiN: das Ebene-Eins-Kernnetz ist zweifach zusammenhängend.

2.2 Netzkonfiguration

Im zweiten Teil der Aufgabe, bei der Netzkonfiguration, sind die Netzelemente so zu dimensionieren, dass das Gesamtnetz die erwarteten Übertragungs- oder Dienstanforderungen erfüllen kann. Dies umfasst neben der Konfiguration der Hardware auch die Festlegung der Kommunikationswege.

Im Einzelnen ist zu entscheiden, welche Versorgung, Gerätetechnik oder Softwarekomponente an den Knoten und welche Verbindungstypen eingerichtet werden sollen. Je nach Anwendungsproblem können dabei an den Knoten Gebäude, Stellflächen, Klima- und Stromversorgung, Switches, Router, Interface-Karten, Geräte für Backup, Accounting oder Gebührenerfassung, Betriebs- und Administrationspersonal oder Softwarelizenzen zu berücksichtigen sein. Es kann wiederum sowohl vom Standort als auch von der Hierarchieebene abhängen, welche Komponenten an welchem Knoten wie oft verfügbar sind und ob an bestimmten Knoten spezielle Komponenten installiert werden müssen.

Die Verbindungstypen entsprechen meist den möglichen Übertragungskapazitäten. Sie können aber auch komplexere Installationen darstellen, wie Doppelanbindungen aus Paaren von jeweils physikalisch getrennt verlaufenden Leitungen zwischen zwei Punkten. Auch bei den Verbindungen kann es von den geografischen Standorten, den gewählten Netzebenen und den Konfigurationen der Knoten abhängen, welche Typen jeweils verfügbar sind. Bestimmte Technologien oder Kapazitätsstufen wie DSL dienen zum Beispiel nur für die Anbindung von Nutzeranschlüssen, und Doppelanbindungen können aus Sicherheitsgründen für die Verbindungen zwischen den Knoten der oberen Netzebenen zwingend gefordert sein.

Die Komplexität der Konfigurationsplanung ergibt sich aus den zahlreichen technischen und planerischen Nebenbedingungen, die berücksichtigt werden müssen. Komponenten und Verbindungstypen können etwa nur so installiert werden, dass überall technische Kompatibilität gewährleistet ist: Verbindungstypen, Gerätetechnik und Software müssen zusammenpassen. Exemplarisch sind in Abbildung 4 die wesentlichen Beziehungen bei der Konfiguration eines Kernnetz-IP-Routers skizziert.

Über die technische Kompatibilität hinaus muss die Konfiguration auch ausreichende Kapazitäten zur Erfüllung der Übertragungs- oder Dienstanforderungen bereitstellen. Je nach konkreter Anwendung muss daher auch entschieden werden, wie die Anforderungen von den installierten Servern bedient bzw. durch das Netz geleitet werden.

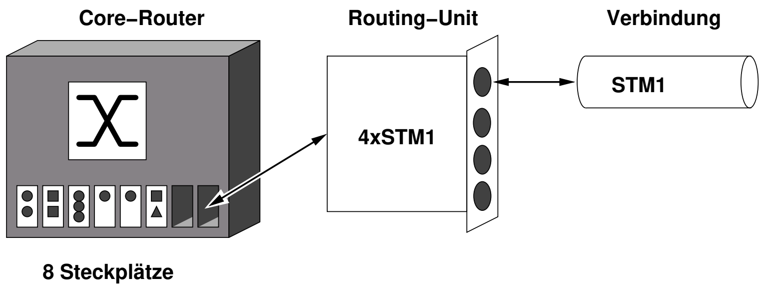

Abbildung 4: Schematischer Aufbau eines IP-Kernnetz-Routers.

2.3 Zielstellung

Primäres Ziel dieser Planungsaufgabe ist die Minimierung der Gesamtnetzkosten, aber auch die Robustheit des Netzes gegenüber Ausfällen einzelner Netzelemente ist von Bedeutung. Kosten entstehen sowohl durch das Einrichten von Knoten und Verbindungen als auch für die Installation der verschiedenen Komponenten und Verbindungstypen.

Die beschriebene Netzstruktur- und Konfigurationsplanung ist eine typische kombinatorische Optimierungsaufgabe, bei der im wesentlichen „Ja/Nein"- und Anzahl-Entscheidungen zu treffen sind. Im folgenden Teil stellen wir nun die Grundtechniken vor, um solche Planungsaufgaben mathematisch abzubilden und zu lösen.

3 Methoden der kombinatorischen Optimierung

Eine ganze mathematische Fachrichtung, die mathematische Programmierung, befasst sich mit der Modellierung verschiedener Optimierungsprobleme und der Entwicklung geeigneter Lösungsverfahren. In den letzten Jahren und Jahrzehnten wurden zahlreiche Optimierungsprobleme aus den unterschiedlichsten Anwendungsbereichen wissenschaftlich untersucht. Für viele dieser Probleme werden die dabei entwickelten Algorithmen und Verfahren sehr erfolgreich bei der Lösung praktischer Planungsaufgaben genutzt.

3.1 Mathematische Modellierung

Um mathematische Optimierungsmethoden zur Lösung eines praktischen Problems einsetzen zu können, ist es nötig, das Problem zunächst abstrakt in einem Modell aus Parametern, Variablen, Nebenbedingungen und einer Zielfunktion darzustellen.

Eine solche Modellierung dient im Wesentlichen zwei Zwecken. Zum einen wird die bis dahin verbal mehr oder weniger genau umrissene Aufgabenstellung präzisiert. Durch das Modell wird letztlich beschrieben, welche Aspekte des realen Planungsproblems in welcher Form berücksichtigt werden. Nur so lassen sich später Lösungen oder theoretische Aussagen auch praktisch korrekt einordnen. Daneben erfolgt durch das Erstellen eines Modells eine Abstraktion, durch die das Problem den mathematischen Methoden zugänglich gemacht wird.

Oft lässt sich ein praktisches Problem auf verschiedene Arten als mathematisches Modell darstellen. Zum Abbilden und Lösen von kombinatorischen Optimierungsproblemen, wie der oben beschriebenen Netzstruktur- und Konfigurationsplanung, haben sich gemischt-ganzzahlige lineare Programme als sehr erfolgreich erwiesen. Dabei werden ganzzahlige Variablen zur Abbildung der diskreten Entscheidungen verwendet, beispielsweise für die Anzahl der zu installierenden Schnittstellenkarten eines bestimmten Typs an einem Standort. Kontinuierliche Variablen werden für Entscheidungen verwendet, bei denen auch gebrochene Werte zulässig sind, wie etwa den Datenflüssen über einzelne Verbindungen. „Ja/Nein"-Entscheidungen werden durch 0/1-Variablen abgebildet, einen Spezialfall der ganzzahligen Variablen. Die Nebenbedingungen des Problems werden ausschließlich durch lineare Gleichungen oder Ungleichungen beschrieben. Zur Veranschaulichung ist in Abbildung 5 die Modellierung eines stark vereinfachten Clusteringproblems mit zwei Netzebenen als gemischt-ganzzahliges lineares Programm dargestellt.

Gegeben sei die Menge aller Nutzerstandorte U sowie die Menge aller möglichen Ebene-Eins-Standorte V. Diese Mengen können sich überschneiden, d.h. es können an einigen Standorten Netzknoten beider Ebenen eingerichtet werden. Wir nehmen zur Vereinfachung an, dass alle eingerichteten Ebene-Eins-Knoten identisch konfiguriert sind. Im folgenden seien $u \in U$ und $v \in V$ Standorte.

Wir benutzen folgende Notation für die Problemparameter:

k_{uv}	für die Anbindungskosten von u nach v,
k_v	für die Einrichtungskosten eines Ebene-Eins-Knotens in v,
c	für die Kapazität eines Ebene-Eins-Knotens, und
d_u	für die Verkehrsanforderung des Nutzerstandortes u.

Mit den 0/1-Entscheidungsvariablen

x_{uv}	$= 1$, wenn u an v angebunden wird, und
y_v	$= 1$, wenn in v ein Ebene-Eins-Knoten eingerichtet wird,

lässt sich das Clustering-Problem, also die Auswahl der Ebene-Eins-Standorte und die Zuordnung der Nutzerstandorte zu den Ebene-Eins-Standorten, folgendermaßen modellieren:

Zielfunktion

$$\min \sum_v k_v y_v + \sum_{uv} k_{uv} x_{uv}$$

Nebenbedingungen

Jeder Nutzerstandort muss an genau einen Ebene-Eins-Knoten angeschlossen werden:

$$\sum_v x_{uv} = 1 \qquad \forall \ u \in U$$

Wird ein Nutzerstandort an einen Ebene-Eins-Knoten angeschlossen, so muss dieser Ebene-Eins-Knoten auch eingerichtet werden:

$$x_{uv} \leq y_v \qquad \forall \ u \in U, \ v \in V$$

Die Kapazität eines eingerichteten Ebene-Eins-Knotens muss mindestens so groß wie die Summe der Verkehrsanforderungen aller angeschlossenen Nutzerstandorte sein:

$$\sum_u d_u x_{uv} \leq c\, y_v \qquad \forall \ v \in V$$

Abbildung 5: Mathematisches Modell eines Clustering-Problems.

Häufig werden erst durch die Abstraktion der Modellierung Parallelen zwischen Problemen erkennbar, die aus praktischer Sicht scheinbar verschieden sind. Teile von Modellen lassen sich unter Umständen auch als Bausteine in Modellen anderer realer Probleme wiederverwenden. Ist dies der Fall, so können oft auch die entsprechenden mathematischen Resultate und Strukturaussagen, algorithmischen Ideen oder Verfahrensansätze übertragen werden.

3.2 Algorithmische Grundverfahren

Aus Sicht der Komplexitätstheorie, einer Teildisziplin, die sich sowohl mit theoretischen als auch praktischen Fragen der Berechenbarkeit beschäftigt, sind viele der praktisch interessanten Planungsprobleme sehr schwer (genauer: NP-schwer). Für solche Probleme gibt es keine Algorithmen, die immer eine Optimallösung liefern und deren Laufzeit nur moderat mit der Problemgröße wächst. Diese Optimierungsprobleme lassen sich für praktisch relevante Größenordnungen häufig nur durch den Einsatz verschiedener, meist sehr problem- bzw. modellspezifischer Techniken lösen. Prinzipiell unterscheidet man zwei Arten von Lösungsverfahren: die Heuristiken und die exakten Verfahren.

Heuristiken sind Verfahren, die versuchen, kostengünstige zulässige Lösungen zu produzieren. Sie garantieren aber nicht, eine optimale Lösung zu finden. Obwohl sie oft sehr effizient sind, besteht ihr wesentlicher Nachteil darin, dass die Qualität der erzeugten Lösungen nicht sinnvoll beurteilt werden kann. Bei einer Lösung, die mit einer Greedy-, einer Verbesserungs- oder einer Metaheuristik berechnet wurde, bleibt in der Regel unklar, ob es noch kostengünstigere Lösungen gibt und um wieviel die Kosten noch verringert werden können. Es kann auch vorkommen, dass Heuristiken gar keine Lösung finden, obwohl das Problem lösbar ist.

Dem gegenüber finden exakte Verfahren garantiert immer eine optimale Lösung, sofern eine solche existiert. Sie nutzen meist mehrere mathematische Ideen und algorithmische Grundkonzepte. Fast alle exakten Verfahren für die Lösung gemischt-ganzzahliger Programme basieren auf einer Kombination aus Enumeration und geeigneten linearen Relaxierungen.

Die Enumerationskomponente sorgt dafür, dass der Lösungsraum tatsächlich vollständig nach der Optimallösung abgesucht wird. Wie bei Divide-and-Conquer wird das Problem dabei sukzessive in viele kleinere Teilprobleme zerlegt. Die lineare Relaxierung eines gemischt-ganzzahligen linearen Programms ist eine Vereinfachung, bei der die Variablen auch gebrochene Werte annehmen dürfen, siehe Abbildung 6. Diese Relaxierung ist somit ein lineares Programm und lässt sich effizient mit Standardalgorithmen lösen, etwa mit der Simplex-

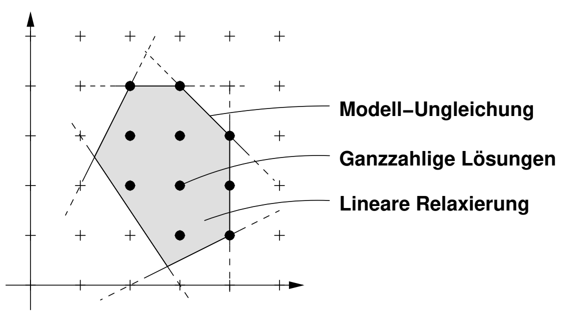

Abbildung 6: Zusammenhang zwischen linearer Relaxierung und ganzzahligen Lösungen.

Methode [4] oder mit Innere-Punkte-Verfahren [9]. Zudem liefert die Optimallösung einer Relaxierung immer eine untere Kostenschranke für das ursprüngliche gemischt-ganzzahlige lineare Programm.

Die Integration der Relaxierung erlaubt es, den Suchraum bei der Enumeration frühzeitig zu beschränken und nicht übermäßig viele unnötige Teilprobleme zu erzeugen. Ist für eines der Teilprobleme aus der Enumeration bereits der Optimalwert der zugehörigen linearen Relaxierung höher als die Kosten der besten bisher für das Problem gefundene Lösung oder ist die Relaxierung nicht lösbar, so braucht dieses Teilproblem nicht weiter untersucht oder mit Divide-and-Conquer zerlegt zu werden: es kann keine bessere Lösung für das Gesamtproblem liefern. Auch wenn die Optimallösung der Relaxierung nur ganzzahlige Variablenwerte annimmt, braucht man das jeweilige Teilproblem nicht weiter zu untersuchen. In diesem Fall ist die Optimallösung der Relaxierung bereits eine Optimallösung des Teilproblems. Dieses Verfahren wird als Branch-and-Bound bezeichnet. In Abbildung 7 ist dieses Verfahren für ein einfaches ganzzahliges lineares Programm veranschaulicht.

Darüber hinaus kann zu jedem Zeitpunkt aus den unteren Kostenschranken der noch nicht vollständig abgearbeiteten Teilprobleme eine untere Kostenschranke für das Gesamtproblem abgeleitet werden. Bricht man das Branch-and-Bound-Verfahren aus Zeitgründen vorzeitig ab, also bevor der Lösungsraum komplett durchsucht wurde, so hat man neben der besten bis dahin gefundenen Lösung auch eine Qualitätsgarantie, einen algorithmisch bewiesenen unvermeidbaren Mindestkostenwert.

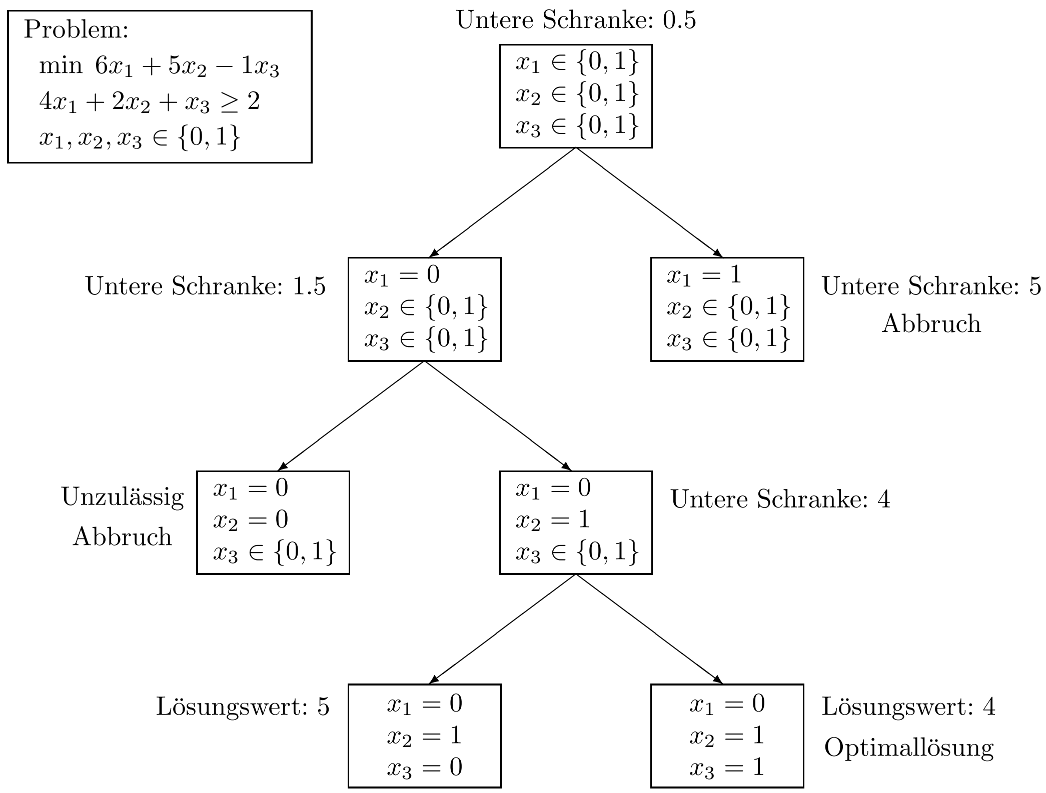

Abbildung 7: Branch-and-Bound-Suchbaum für ein einfaches ganzzahliges lineares Programm.

3.3 Problemspezifische Mathematik

Die beschriebenen Grundtechniken und -algorithmen kommen in verschiedenen kommerziellen Softwareprodukten zum Lösen linearer und gemischt-ganzzahliger linearer Programme zum Einsatz, wie zum Beispiel in [6] oder [7]. Häufig lassen sich praktische Planungsprobleme aber nicht einfach als gemischt-ganzzahliges lineares Programm formulieren und mit Standardsoftware bearbeiten. Selbst die besten Solver können die großen und komplexen Modelle nicht in vertretbarer Zeit bis zur Optimalität lösen.

Durch mathematische Studien lassen sich jedoch oft spezielle strukturelle Eigenschaften der Probleme und Modelle erkennen und algorithmisch ausnutzen. Hauptschwerpunkte dabei sind zum einen die qualitative Verbesserung der Modelle und zum anderen die Entwicklung und Analyse verbesserter oder alternativer Methoden und Lösungsverfahren.

Viele reale Probleme lassen sich auf vielfältige Weise mathematisch modellieren. Die praktische Lösbarkeit hängt aber stark von den Merkmalen der Modelle ab. Häufig ist dasjenige Modell am besten, dessen lineare Relaxierung besonders stark ist, die also auch ohne Ganzzahligkeitsbedingung das Problem noch möglichst genau abbildet. Die Wahl eines geeigneten Modells ist daher von entscheidender Bedeutung. Daneben lässt sich die lineare Relaxierung eines Modells meist durch das Hinzufügen weiterer Bedingungen, sogenannter Schnittebenen, deutlich verbessern. Schnittebenen sind lineare Ungleichungen, die zwar nicht explizit zum Modell und somit auch nicht zu der linearen Relaxierung gehören, die aber dennoch von allen Lösungen des gemischt-ganzzahligen Programms erfüllt werden, siehe Abbildung 8. Viele dieser implizit gegebenen Bedingungen findet man nur durch intensive Analyse der Modell- und Problemstruktur.

Gerade große Planungsprobleme mit komplexen Nebenbedingungen können häufig nur mit Hilfe sogenannter Separierungs- oder Spaltengenerierungsverfahren gelöst werden. Dabei wird zu Beginn des Algorithmus nur ein Bruchteil der Nebenbedingungen oder Variablen des Modells erzeugt und dieses Teilmodell gelöst. Dann wird algorithmisch entschieden, ob und welche Nebenbedingungen des Modells noch verletzt sind oder ob und welche Variablen noch Verbesserungen erlauben würden. In einem iterativen Prozess werden diese dann hinzugefügt, Nebenbedingungen und Variablen werden also erst bei Bedarf tatsächlich erzeugt. Mit diesen mathematisch sehr anspruchsvollen Techniken lassen sich heutzutage Probleme mit mehreren Millionen ganzzahligen Variablen oder Nebenbedingungen praktisch optimal lösen.

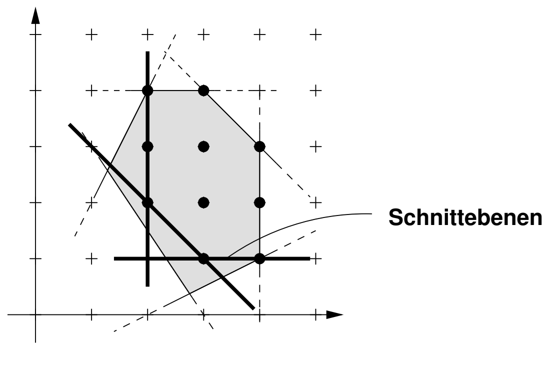

Abbildung 8: Drei Schnittebenen.

Neben den kurz umrissenen Verfahren gibt es noch viele weitere methodische Ansätze, die hier nicht alle im Einzelnen dargestellt werden können. Sie sind für verschiedene Problemtypen unterschiedlich gut geeignet, so dass der Auswahl des anzuwendenden (und entsprechend auszuarbeitenden bzw. anzupassenden) Ansatzes sowie der Entwicklung effizienter Lösungsverfahren eine ebenso große Bedeutung beizumessen ist wie dem zugrundeliegenden Modell. Für beide Bereiche sind Erfahrungen mit ähnlichen Problemstellungen und ihrer Lösung außerordentlich hilfreich. In diesem Zusammenhang gehen wir abschließend auf die kostenorientierte Planung einer adäquaten Informations- und Kommunikations-Infrastruktur für ein Energienetz ein. Die vielen Parallelen zur eingangs dargestellten Netzstruktur- und Konfigurationsplanung lassen vermuten, dass sich viele Erkenntnisse auf das neue Anwendungsgebiet übertragen lassen und die mathematische Optimierung auch dort sinnvoll eingesetzt werden kann.

4 Anwendung

Die Koordination eines großen, dezentralen Energieversorgungsnetzwerkes ist ohne eine geeignete Informations- und Kommunikations-Infrastruktur undenkbar. Sie ist nicht nur für die betriebliche Steuerung und Regelung verantwortlich, sondern übernimmt auch wesentliche Teilaufgaben in anderen Bereichen. Weder ein stabiles PQ- und Netzmanagement noch ein effizientes Erzeugungs- und Lastmanagement wären ohne sie möglich. Nur durch standardisierte Daten- und Übertragungsprotokolle sowie leistungsfähige und robuste Kommunikationsnetze lassen sich automatisierte Betriebsdatenerfassung und -aufbereitung, Anlagensteuerung oder Leistungsflussregelung realisieren. Um einen dauerhaften und reibungslosen Betrieb des Energienetzes gewährleisten zu können, muss das Informations- und Kommunikationssystem gegen mögliche Störsituationen abgesichert werden. Zumindest die wichtigsten Funktionalitäten müssen auch dann noch realisiert werden können, wenn einzelne Komponenten oder ganze Teile der Infrastruktur ausfallen.

Der Entwurf einer „geeigneten“ Informations- und Kommunikationsstruktur für ein dezentrales Energienetz ist ein sehr komplexes Planungsproblem. Es weist markante Gemeinsamkeiten mit der zuvor beschriebenen Netzstruktur- und Konfigurationsplanung in Telekommunikationsnetzen auf. Die zu entwerfenden Netze sind voraussichtlich sehr groß, sollten verschiedene Dienste realisieren können, und es sind zahlreiche technische und organisatorische Randbedingungen zu berücksichtigen. Es scheint daher auch hier angeraten, eine entsprechende Hierarchisierung oder Aufspaltung in Teilnetze vorzunehmen. Dabei ist allerdings ein ganzes Spektrum struktureller Alternativen umsetzbar. Zur Verdeutlichung skizzieren wir im Folgenden zwei extreme Formen möglicher Infrastrukturen.

Die erste Variante stellt ein zentral ausgerichtetes Kommunikationsnetzwerk dar, bei dem alle wichtigen Funktionalitäten an einem einzigen Standort gebündelt werden. In dieser Zentrale laufen alle relevanten Informationen zusammen, und die Zentrale selbst trifft auch alle Steuerungs- und Regelungsentscheidungen. Das Netzwerk dient nur zur Datenübertragung von den einzelnen Energieversorgungseinheiten zur Zentrale und zurück. Um die Informationsflut zu reduzieren, kann eventuell noch eine Hierarchisierung der einzelnen Standorte vorgenommen werden, bei der an den Knoten der Zwischenstufen bestimmte Betriebsdaten auf dem Weg zur Zentrale zusammengefasst und Steuerungsdaten auf dem Weg zu den Versorgungseinheiten wieder verfeinert und präzisiert werden. Eine ausfallsichere Anbindung sollte dabei zumindest bis zu den Knoten der Zwischenebene sichergestellt werden.

Eine solche Infrastruktur erlaubt es prinzipiell, das gesamte Netz aufgrund der umfassenden Information von der Zentrale aus optimal zu steuern. Sie erfordert dazu allerdings sehr leistungsfähige Datenübertragungs- und Verarbeitungssysteme und insbesondere auch einheitliche Protokolle für die Datenerfassung und die Steuerung aller Erzeugungseinheiten.

Eine gegensätzliche Alternative stellt eine dezentral organisierte und hierarchisierte Kommunikationsstruktur dar. Die einzelnen Energieversorgungseinheiten bilden hierbei die unterste Ebene des Netzes. Ihnen übergeordnete Knoten fassen z.B. nach geografischen oder technischen Gesichtspunkten mehrere Einheiten zusammen und verwalten diese autonom. Jede nächste Netzebene fasst dann solche Teilnetze zusammen und verwaltet sie als Gruppe. Die Knoten der höheren Netzebenen übernehmen dabei jeweils auch höher aggregierte Steuerungs- und Regelungsaufgaben. Zusätzlich dazu können bestimmte Knoten spezielle, netzweit verfügbare Servicefunktionen übernehmen, etwa Datensicherungsaufgaben oder die Pflege gemeinsamer Datenbanken. Wie im ersten Szenario sollte auch hier eine redundante Verbindungsstruktur, zumindest auf den höheren Ebenen, sichergestellt werden. Bei dieser Alternative müssen alle Knoten nur mit jeweils benachbarten Hierarchieebenen kommunizieren. Dadurch werden die Informationsflüsse vereinfacht und eine zeitnahe und flexible Steuerung des Netzes möglich. Hierzu muss allerdings auch jeder Knoten die entsprechenden Funktionalitäten bereitstellen.

Selbstverständlich sind neben diesen beiden extremen Formen zahlreiche weitere Alternativen denkbar, bei denen zum Beispiel autonome Teilnetze mit eigenen Zentralen untereinander gekoppelt werden oder in Zwischenstufen der Hierarchie die Betriebssteuerung und auf den höheren Ebenen Energie- und Lastmanagementfunktionen realisiert werden.

Die Zuordnung der Versorgungseinheiten und Zwischenknoten zu einzelnen Teilnetzen und den Hierarchieebenen ist in allen Alternativen ein wesentlicher Bestandteil der Planungsaufgabe. Sie wird durch die Konfiguration der einzelnen Elemente der Infrastruktur, wie etwa die Zuordnung von Diensten und Funktionalitäten zu den Netzknoten, sowie die Festlegung der Kommunikationswege und -arten ergänzt. Die Parallelen zur Netzstruktur- und Konfigurationsplanung für mehrschichtige Telekommunikationsnetze sind deutlich erkennbar. Die mathematische Optimierung kann daher auch hier zur Unterstützung bei der Planung eingesetzt werden.

Die vorgestellten Methoden der mathematischen Optimierung erlauben es, auch große und komplexe Probleme ganzheitlich zu behandeln und unter den gegebenen Rahmenbedingungen optimale oder zumindest beweisbar gute Lösungen zu bestimmen. Insbesondere durch die zusätzliche Berechnung einer unteren Kostenschranke können fundierte Aussagen zu unvermeidbaren Kosten gemacht und verschiedene, vom Planer entworfene Szenarien bewertet und miteinander vergleichen werden.

Durch flexible Modelle können darüber hinaus auch unterschiedliche technische und organisatorische Konzepte erfasst und abgebildet werden, so dass mit den mathematischen Hilfsmitteln auch vergleichende Konzeptstudien auf Basis fundierter Kostenbewertungen vorgenommen werden können. Eine höhere Flexibilität der Modelle erhöht zwar auch deren Komplexität und erschwert die Entwicklung guter Lösungsverfahren, erlaubt es aber dafür, viele unterschiedliche Netztypen abzubilden und mit demselben Verfahrensansatz zu lösen, so dass einmal entwickelte Optimierungssoftware wiederverwertbar ist.

Als Fazit kann zusammengefasst werden, dass die mathematische Optimierung vermutlich auch beim Entwurf einer kostenoptimalen Informations- und Kommunikations-Infrastruktur für verteilte Energieversorgungsnetzwerke in ähnlicher Weise wie beim verwandten Problem für Telekommunikationsnetze gewinnbringend eingesetzt werden kann. Dazu sind zunächst die verschiedenen konzeptionellen und technischen Alternativen und die relevanten Randbedingungen der Planungsaufgabe zusammenzustellen. Auf deren Basis können dann geeignete, flexible Modelle und effiziente Lösungsverfahren (weiter-) entwickelt werden, wobei auf den Erfahrungen und Ergebnissen aus der Telekommunikationsnetzplanung aufgebaut werden kann.

Literatur

[1] Bley, A. und T. Koch: *Optimierung des G-WiN.* DFN-Mitteilungen, (54), 2000. Berlin.

[2] Bley, A. und T. Koch: *Integer Programming Approaches to Access and Backbone IP-Network Planning.* ZIB-Report 02–41, Konrad-Zuse-Zentrum für Informationstechnik Berlin (ZIB), 2002. Berlin.

[3] Bley, A., A. M. C. A. Koster, A. Kröller, R. Wessäly und A. Zymolka: *Kosten- und Qualitätsoptimierung in Telekommunikationsnetzen.* Telekommunikation Aktuell, 57(07/08 (Juli/August 2003)), 2003. Erlangen.

[4] Chvatal, V.: *Linear Programming.* W.H. Freeman and Company, New York, 1983.

[5] Graham, R. L., M. Grötschel und L. Lovasz (Herausgeber): *Handbook of Combinatorics.* Elsevier, Amsterdam, 1999.

[6] ILOG: *CPLEX.* http://www.ilog.com, 2003.

[7] Optimization, Dash: *XPRESS-MP.* http://www.dashoptimization.com, 2003.

[8] Sanso, B. und P. Soriano (Herausgeber): *Telecommunications network planning.* Kluwer Academic Publishers, Boston, 1999.

[9] Vanderbei, R. J. (Herausgeber): *Linear Programming: Foundations and Extensions.* Kluwer Academic Publishers, Boston, 2001.