

# Combinatorial Optimization in Telecommunication CO@W Berlin

# Martin Grötschel 5. 10. 2009 9:00 – 10:30

Martin Grötschel

Institut f
ür Mathematik, Technische Universit
ät Berlin (TUB)

DFG-Forschungszentrum "Mathematik für Schlüsseltechnologien" (MATHEON)

Konrad-Zuse-Zentrum f
ür Informationstechnik Berlin (ZIB)

groetschel@zib.de http:

http://www.zib.de/groetschel

# Today's program

Mo 05.10.	
09:00-10:30	MG
11:00-12:30	AB,MM,CR
14:00-15:30	AB,MM,CR
16:00-17:30	AE
17:45-18:15	TUGS

### Telecommunication

Combinatorial optimization in telecommunications Planning and optimizing large scale networks Exercises

Radio network planning an optimization Starting a Company II





Martin Grötschel

CO@W

# Contents

- 1. How it began: My Telecom Involvement
- 2. Telecommunication: The General Problem
- 3. The Problem Hierarchy: Cell Phones and Mathematics
- 4. The Problem Hierarchy: Network Components and Math
- 5. Network Design: Tasks to be solved

Addressing Special Issues:

- 6. Frequency Assignment in GSM
- 7. The UMTS Radio Interface
- 8. Locating the Nodes of a Network
- 9. Balancing the Load of Signaling Transfer Points
- 10. Integrated Topology, Capacity, and Routing Optimization as well as Survivability Planning
- 11. Planning IP Networks
- 12. Optical Networks
- 13. Summary and Future

# Contents

- 1. How it began: My Telecom Involvement
- 2. Telecommunication: The General Problem
- 3. The Problem Hierarchy: Cell Phones and Mathematics
- 4. The Problem Hierarchy: Network Components and Math
- 5. Network Design: Tasks to be solved

Addressing Special Issues:

- 6. Frequency Assignment in GSM
- 7. The UMTS Radio Interface
- 8. Locating the Nodes of a Network
- 9. Balancing the Load of Signaling Transfer Points
- 10. Integrated Topology, Capacity, and Routing Optimization as well as Survivability Planning
- 11. Planning IP Networks
- 12. Optical Networks
- 13. Summary and Future

## The beginning: Clyde Monma (Bell Labs/Bell Communications Research)

Cornell University, 1987

- Survivable telecommunications networks
- What was the problem?



### The BellCore study

M.O. Ball et al., Eds., Handbooks in OR & MS, Vol. 7 © 1995 Elsevier Science B.V. All rights reserved

Chapter 10

### Design of Survivable Networks

M. Grötschel

Konrad-Zuse-Zentrum für Informationstechnik Berlin, Heilbronner Str. 10, D-10711 Berlin, Germany

C.L. Monma Bell Communications Research, 445 South Street, Morristown, NJ 07960, U.S.A

M. Stoer Telenor Research, P.O. Box 83, N-2007 Kjeller, Norway

### 1. Overview

This chapter focuses on the important practical and theoretical problem of designing survivable communication networks, i.e., communication networks that are still functional after the failure of certain network components. We motivate this topic in Section 2 by using the example of fiber optic communication network design for telephone companies. A very general model (for undirected networks) is presented in Section 3 which includes practical, as well as theoretical, problems, including the well-studied minimum spanning tree, Steiner tree, and minimum cost k-connected network design problems.



6

CO@W



### Special cases:

minimum cost spanning tree

minimum cost Steiner tree

# The IP Model

7

Grötschel

min-cost k-edge or k-node-connected subgraph

Let us now introduce a variable  $x_e$  for each edge  $e \in E$ , and consider the vector space  $\mathbf{R}^E$ . Every subset  $F \subseteq E$  induces an *incidence vector*  $\chi^F = (\chi_e^F)_{e \in E} \in \mathbf{R}^E$ by setting  $\chi_e^F := 1$  if  $e \in F$ ,  $\chi_e^F := 0$  otherwise; and vice versa, each 0/1-vector  $x \in$  $\mathbf{R}^E$  induces a subset  $F^x := \{e \in E \mid x_e = 1\}$  of the edge set E of G. If we speak of the incidence vector of a path in the sequel we mean the incidence vector of the edges of the path. We can now formulate the network design problem introduced above as an integer linear program with the following constraints.

(i) 
$$\sum_{i \in W} \sum_{j \in V \setminus W} x_{ij} \ge \operatorname{con}(W) \text{ for all } W \subseteq V, \emptyset \neq W \neq V,$$
  
(ii) 
$$\sum_{i \in W} \sum_{j \in V \setminus (Z \cup W)} x_{ij} \ge d(Z, W) \text{ for all eligible } (Z, W) \text{ of subsets of } V,$$
  
(iii) 
$$0 \le x_{ij} \le 1 \qquad \text{for all } ij \in E,$$
  
(iv)  $x_{ij} \text{ integral} \qquad \text{for all } ij \in E.$ 

Note that if N - Z contains at least  $d_{st}$  edge-disjoint [s, t]-paths for each pair s, t of distinct nodes in V and for each set  $Z \subseteq V \setminus \{s, t\}$  with  $|Z| = k_{st}$ , and if  $r_{st} = k_{st} + d_{st}$ , then all node survivability requirements are satisfied, i.e., inequalities of type (3ii) need not be considered for node sets  $Z \subseteq V \setminus \{s, t\}$  with  $|Z| < k_{st}$ . It follows from Menger's theorem (see [Frank, 1995]) that, for every feasible solution x of (3), the subgraph  $N = (V, F^x)$  of G defines a network that satisfies the given edge and node survivability requirements.

To obtain a better LP-relaxation of (3) than the one arising from dropping the integrality constraints (3iv), we define the following polytope. Let G = (V, E) be a graph, let  $E_V := \{st \mid s, t \in V, s \neq t\}$ , and let  $r, k, d \in Z_+^{E_V}$  be given. Then

$$CON(G; r, k, d) := conv\{x \in \mathbf{R}^E \mid x \text{ satisfies (3i)}-(3iv)\}$$
(4)

is the polytope associated with the network design problem given by the graph G and the edge and node survivability requirements r, k, and d. (Above 'conv' denotes the convex hull operator.) In the sequel, we will study CON(G; r, k, d) for various special choices of r, k and d. Let us mention here a few general properties of CON(G; r, k, d) that are easy to derive.

Let G = (V, E) be a graph and  $r, k, d \in \mathbb{Z}_{+}^{E_{V}}$  be given as above. We say that  $e \in E$  is essential with respect to (G; r, k, d) (short: (G; r, k, d)-essential) if  $CON(G - e; r, k, d) = \emptyset$ . In other words, e is essential with respect to (G; r, k, d)if its deletion from G results in a graph such that at least one of the survivability requirements cannot be satisfied. We denote the set of edges in E that are essential with respect to (G; r, k, d) by ES(G; r, k, d). Clearly, for all subsets  $F \subseteq E \setminus ES(G; r, k, d)$ ,  $ES(G; r, k, d) \subseteq ES(G - F; r, k, d)$  holds. Let dim(S) denote the dimension of a set  $S \subseteq \mathbb{R}^{n}$ , i.e., the maximum number of affinely independent elements in S minus 1. Then one can easily prove the following two results [see Grötschel & Monma, 1990].

**Theorem 1.** Let G = (V, E) be a graph and  $r, k, d \in \mathbb{Z}_+^{E_V}$  such that  $CON(G; r, k, d) \neq \emptyset$ . Then

$$CON(G; r, k, d) \subseteq \{x \in \mathbf{R}^E \mid x_e = 1 \text{ for all } e \in ES(G; r, k, d)\}, \text{ and} \\ \dim(CON(G; r, k, d)) = |E| - |ES(G; r, k, d)|.$$

8



**Theorem 2.** Let G = (V, E) be a graph and  $r, k, d \in \mathbb{Z}_+^{E_V}$  such that  $CON(G; r, k, d) \neq \emptyset$ . Then

(a)  $x_e \leq 1$  defines a facet of CON(G; r, k, d) if and only if  $e \in E \setminus ES(G; r, k, d)$ ; (b)  $x_e \geq 0$  defines a facet of CON(G; r, k, d) if and only if  $e \in E \setminus ES(G; r, k, d)$ and ES(G; r, k, d) = ES(G - e; r, k, d).

Theorems 1 and 2 solve the dimension problem and characterize the trivial facets. But these characterizations are (in a certain sense) algorithmically intractable as the next observation shows, which follows from results of Ling & Kameda [1987].





Martin Grötschel **Remark 1.** The following three problems are NP-hard. Instance: A graph G = (V, E) and vectors  $r, k, d \in \mathbb{Z}_{+}^{E}$ . Question 1: Is CON(G; r, k, d) nonempty? Question 2: Is  $e \in E(G; r, k, d)$ -essential? Question 3: What is the dimension of CON(G; r, k, d)?

However, for most cases of practical interest in the design of survivable networks, the sets ES(G; r, k, d) of essential edges can be determined easily, and thus the trivial LP-relaxation of (3) can be set up without difficulties by removing the redundant inequalities identified by Theorem 2.

**Theorem 2.** Let G = (V, E) be a graph and  $r \in \mathbb{Z}_+^{\nu}$  such that  $k \in CON(G; r)$  (respectively,  $k \in NCON(G; r)$ ) is full-dimensional. Then

- a.  $x_e \leq 1$  defines a facet of k ECON(G; r) (respectively, k NCON(G; r)) for all e;
- b.  $x_e \ge 0$  defines a facet of k ECON(G; r) (respectively, k NCON(G; r)) if and only if for every edge  $f \ne e$  the polytope  $k \text{ECON}(G - \{e, f\}; r)$  (respectively,  $k \text{NCON}(G - \{e, f\}; r)$ ) is nonempty.





### 11

# Facets: another example





Martin Grötschel **Theorem 3.** Let G = (V, E) be a (k + 1)-edge connected graph, let  $r_v = k$  for all nodes  $v \in V$ , and let  $W \neq V$  be a nonempty node set. Define for each  $W_i \subseteq W$  with  $\emptyset \neq W_i \neq W$  the deficit of  $W_i$  as

 $\operatorname{def}_{G}(W_{i}) := \max \{0, k - |\delta_{G[W]}(W_{i})|\}.$ 

Define similarly for  $U_i \subseteq V \setminus W$  with  $\emptyset \neq U_i \neq V \setminus W$ 

 $\operatorname{def}_{G}(U_{i}) := \max \{0, k - |\delta_{G[\nu \setminus |\nu]}(U_{i})|\}.$ 

The cut inequality

 $x(\delta(W)) \geq k$ 

defines a facet of the polytope kECON(G; r) of k-edge connected graphs if and only if

- a. G[W] and  $G[V \setminus W]$  are connected, and
- b. for all edges e ∈ E(W) ∪ E(V\W), for all pairwise disjoint node sets W<sub>1</sub>, ..., W<sub>p</sub>(p ≥ 0) of W with W<sub>i</sub> ≠ W for all i, and for all pairwise disjoint node sets U<sub>1</sub>, ..., U<sub>q</sub>(q ≥ 0) of V\W with U<sub>i</sub> ≠ V\W for all i, the following inequality holds:

$$\begin{split} \sum_{i=1}^{p} \operatorname{def}_{G-e}(W_{i}) + \sum_{i=1}^{q} \operatorname{def}_{G-e}(U_{i}) \\ &- \left| \left[ \bigcup_{i=1}^{p} W_{i} \colon \bigcup_{i=1}^{q} U_{i} \right] \right| \leq k. \end{split}$$

# **Recall: The Importance of Facets**

CO@W

12





# **Recall: The Importance of Facets**

CO@W





# **Real data**

### Table 1 Data for LATA problems

Original graphs			Re	Reduced graphs						
Problem	0	1	2	Nodes	Edges	0	1	2	Nodes	Edges
LATADMA	0	12	24	36	65/0	0	6	15	21	46/4
LATA1	8	65	14	77	112/0	0	10	14	24	48/2
LATA5S	0	31	8	39	71/0	0	15	8	23	50/0
LATA5L	0	36	10	46	98/0	0	20	9	29	77/1
LATADSF	0	108	8	116	173/40	0	28	11	39	86/26
LATADS	0	108	8	116	173/0	0	28	11	39	86/3
LATADL	0	84	32	116	173/0	0	11	28	39	86/6





Martin Grötschel

CO@W

# **Problem reductions**

Fig. 4. Original graph of LATADL-problem.



Fig. 5. Reduced graph of LATADL-problem.

CO@W

## **Computational results with real data**

Table 2

### Performance of branch & cut on LATA problems

Problem	IT	Р	NP	RC	с	COPT	GAP	Т	BN	BD	BT
LATADMA	12	65	3	7	1489	1489	0	1		•	
LATA1	4	73	0	1	4296	4296	0	Î			
LATA5S	4	76	0	0	4739	4739	0	1			
LATA5LE	7	120	0	0	4574	4574	0	1			
LATA5L	19	155	12	0	4679	4726	0.99	2	4	2	4
LATADSF	7	43	0	0	7647	7647	0	1			
LATADS	17	250	0	4	7303.60	7320	0.22	4	28	9	17
LATADL	14	182	0	28	7385.25	7400	0.20	3	32	10	21

Grötschel

IT = number of iterations (= calls to the LP-solver) used in the cutting plane phase; NP = number of n cutting plane phase; RC = number of lifted r-cover phase; C = value of the optimum solution after termi optimum value; GAP =  $100 \times (COPT - C)/COPT$  ( cutting plane phase); T = total running time includi cutting plane phase (not including branch & cut), in r cut nodes generated; BD = maximum depth of the br the branch & cut algorithm including the cutting plane

Table 4			ć	şm	
Comparison	of heuristic	values	with	optimal	values

Problem	COPT	CHEUR	GAP
LATADMA	1489	1494	0.34
LATA1	4296	4296	0
LATA5S	4739	4739	0
LATA5LE	4574	4574	0
LATA5L	4726	4794	1.44
LATADSF	7647	7727	1.05
LATADS	7320	7361	0.56
LATADL	7400	7460	0.81

# LATA DL: optimal solutions





Fig. 6. Solution of LATADL-problem.

CO@W

# Problem

18

- Nobody at Bell was interested (except for the scientists).
- We were too much ahead of time!
- But then!





## But then: USA 1987-1988 (collected by Clyde Monma)

June 15, 1988

# THE NIGHTMARE ON LINCOLN ST.

Illinois Bell experiences its worst service disaster in history as an extra-alarm fire silences phones for nearly two weeks.

### Severed line snags calls long-distance

The loss of a major fiber optic telecommunications cable caused significant problems on Wednesday, August 12th, with long-distance calls out of the 201 calling area The Star Ledger

Date: September 22, 1987

# Damage to fiber cable hinders phone service

#### By TED SECENAN

Telephone service was disrupted throughout the Northeast yesterday, after a major fiber optics table was sovared serie of Trusten.

The problem briefly knocked out all voice and data circuits on American Telephone & Teleproph Ca.'s main East Coast fiber cable, which runs from Combridge, Man., to Arlington, Va.

CO@W

Martin

# USA 1987-1988

MILE: February 26, 1988 Cable snaps,

# snags area phone calls

American Telephone & Telegraph Co. (AT&T) service along the East Coast was disrupted yesterday when a telephone cable mapped about 15 miles sectivest of Newark.

# Phone snafu isolates New Jersey Long-distance cable severed

By J.D. SOLOMON, MARY ROMANO and ROBIN SIDEL Courier-News Staff Writer

American Telophone & Triegraph Ca.'s longd'Annes telephone service throughout the East Coast was disrupted for about 10 hours yesterdry when a major transmission cable was nevered by a construction crew working in a Sayreville train yard, AT&T officials said.

Problems were especially severe in perticus of Cantral Jersey, and customers closest to Sayreville were expected to be among the last to have their service fully restored, as AT&T mpchasman mid.

The break in the 3-inch fiber optic cable occurred at 12:15 p.m. Service was restored gradually as competers revorted calls through other points. Almost all service was restored by about 7 p.m., ATMT said.

Warmen and a la Control land at III man

"It's almost like a highway in that you have to go along it to get from, say, New York to Florida. This is a major blockage affecting the whole East Coast."

Jim Noteen, AT&T desvict manager

In addition to affecting phone service, private customers whose computer setworks we AlAT phone line transmittions service problems, Nelson said.

Harry Baumgartaer, a spokesmaa for ATAT in the Basking Ridge section of Bernards, said calls between area codes on the East Coast

CO@W

Martin

# **Special Report by IEEE Spectrum**

### 0018-9235/89/0600 0032\$1.00@1989 !FFE

IEEE SPECTRUM JUNE 1989





Grötschel

The telephone network's moment-bymoment reconfigurations to meet emergencies real and simulated add up to de facto risk management

necessary, Joe as the repeater to get the for done for purel tiple repeaters mine a multir Sometime after 4:00 p.m. on Sunday, May 8, 1988, on the first floor of a telephone switching center in the Chicago suburb of Hinsdale, a metal cable sheath came into contact with a damaged, energized power cable and touched off an electrical fire. Thus began one of the worst disasters in the history of U.S. telephony.

By the time the smoke had cleared, 35 000 residential and business customers had no service at all, and others served by some 120 000 trunk lines lacked long-distance service. A facility that Spectrum had relayed 3.5 million telephone calls a day was a messy mix of destroyed and damaged equipment, much of it fast corroding from the caustic combination of water and vapors released by burning paneling.

The community soon found out just how much it depended on telephony. Chicago's busy O'Hare Airport came to a standstill while technicians jury-rigged some telephone lines for the Federal Aviation Administration to use for air-traffic control. Emergency 911 service was no more. Cellular telephones were also out because Hinsdale had housed a key installation in the local system. Automatic teller machines in the Chicago area, which transmit transaction details over telephone lines, were down. Pizza makers, florists, real estate agents, stockbrokers, "mom-and-pop" proprietors, boyfriends and girlfriends-all lost a vital link. Some areas had no service for a month, and dollar estimates of lost business ranged from the hundreds of millions to the tens of billions.

**Special** Report

IEEE June 1988

CO@W

8

# Not unfrequent in industry:



Don't bother me with new ideas I have a battle to fight.



CO@W

# Berlin 1994 & Köln 1994

### Graue Mattscheiben und stille Telefone

Totalausfall in Charlottenburg und Spandau bringt Tausende in Rage / Panne bei Bauarbeiten 24, 12, <u>94</u> | erheblich eingeschränkt. Die Telekom | ten exakte Pläne über unsere Versorgun

VON BERNHARD KOCH

BERLIN. Unverantwortliche Schlamperei einer Baufirma, so Telekom-Sprecher Bernhard Krüger, führte am Donnerstag zum Totalausfall von Kabelfernsehen und -rundfunk in rund 160 000 Haushalten in Charlottenburg und den Spandauer Ortsteilen Siemensstadt, Gatow und Kladow. Infolge eines bei Tiefbauarbeiten nahe dem S-Bahnhof Heerstraße in Charlottenburg zerstörten Kabelpakets wurden zudem 3000 Telefonkunden vom Netz vollständig abgeschnitten. Weiter war die Zahl der Leitungen auf der Strecke zwischen den betroffenen Bezirken erheblich eingeschränkt. Die Telekom sprach von der größten Panne, die es bislang in Berlin gegeben habe. Die Kabelstränge für Fernsehen und Radio konnten bis Freitag abend schrittweise repariert werden, der Schaden an den Telefonleitungen werde jedoch frühestens im Laufe des heutigen Heiligen Abends behoben sein. 25 Männer seien ohne Pause im Einsatz: "Am ersten Weihnachtstag ist die Lage im Griff."

Ein sogenannter Fundamentbohrer hatte am Donnerstag gegen 15 Uhr ein Loch von 60 Zentimeter Durchmesser in die Telekom-Kabelstränge an der Heerstraße gerissen. Die Baufirmen, die dort mit Straßen- und Brückenbauarbeiten beschäftigt sind, "hat-



Martin Grötschel



FEHLBOHRUNG MIT ERHEBLICHEN FOLGEN. Ein Fundamentbohrer riß auf dieser Baustelle an der Charlottenburger Heerstraße ein Loch in die Telekom-Kabeltrasse. Foto: Mike Minehan

ten exakte Pläne über unsere Versorgungsleitungen", betonte Bernhard Krüger. Welche Firma die Schuld treffe – die Bauunternehmen Kemmer und Holzmann sind dort tätig – sei noch nicht ermittelt. Die Reparatur dauere deshalb so lange, weil mehrere jeweils 250 Meter lange Kabel komplett ausgetauscht und Rohre als Schutzmantel neu verlegt werden müßten.

Unterdessen war bei der Störungsannahme und den Servicestellen der Telekom nach der Panne "die Hölle los". Tausende erboste Kunden hätten ihrem Unmut über schwarze Mattscheiben und schweigende Telefone Luft gemacht. "Wir werden den ganzen Tag beschimpft, einige drohen-uns sogar", sagte eine spürbar genervte Frau beim Telekom-Störungsdienst. Pausenlos klingelten auch die Telefone beim SFB und bei anderen Fernsehanstalten, hieß es auf Nachfrage. Weil sie keine Auskünfte über die Störung bekamen; fragten einige Bürger gar bei der Polizei nach. Auch beim Tagesspiegel gingen zahlreiche Beschwerden über die Telekom ein, eine Spandauerin forderte zum Beispiel, sämtliche ausgefallene Sendungen sollten wiederholt werden.

Telekom-Sprecher Krüger bat hingegen um Verständnis, schließlich sei man nicht Verursacher des Schadens: "Ich habe so etwas noch nicht erlebt. Die Droge Fernsehen macht offenbar derart süchtig, daß die Leute so in Rage geraten." Über die Ausfälle und Störungen beim Telefon hätten vergleichsweise wenige Kunden geklagt.

Die Höhe der Reparaturkösten, mögliche Regreßforderungen von Geschädigten sowie die Summe der Gebührenausfälle aufgrund des gestörten Telefonverkehrs seien noch nicht abzusehen, sagte Krüger. Privatkunden, so der Telekomsprecher, bekämen grundsätzlich nur dann Vergütungen, wenn das Telefon länger als fünf Tage ausfalle.



CO@W

# High-Tech Terrorism 1995

CO@W





Martin Grötsch<u>el</u> kommt, dann tut sich endlich was in diesem Nest", hofft der Elektromeister Jürgen Moritz. Mehr als 30 Jahre lebt er schon in dem tristen Ort; nun, im Jahre sechs nach der Wende, "muß doch mal was passieren".

"Der hat Ideen und viele Kontakte", sagt Moritz bewundernd, "von Marktwirtschaft versteht er was."

Mangels Schloß und Pachtzins verdingt sich der Adelsmann zur Zeit in einem bürgerlichen Beruf: als Inneneinrichter ostdeutscher Friseurgeschäfte. Von Wiesenburg bei Potsdam aus beaufsichtigt von Ribbeck acht Angestellte, die Barbieren Spezialstühle, Spiegel und Trockenhauben anbieten.

Ratsmitglied Böttcher ist davon nicht beeindruckt: "So schlau wie der von Ribbeck sind wir auch." Vor der Wende war Böttcher Vorsitzender der LPG, heute ist er der Chef der örtlichen Agrar GmbH. Die Pacht für Wiesen, Weiden und Stallungsgrund kassiert bislang noch die Treuhand.

Ein "Investitionshemmnis" nennt Böttcher den Junker: Längst hätten neue Traktoren angeschaft werden müssen, "aber wovon denn?" Wegen der Ribbeck-Ansprüche auf Rückgabe "gibt uns keine Bank Kredit".

Solche Klagelieder kann der emsige Protestant Moritz, der mit Freunden in der Freizeit die Dorfkirche renoviert, nicht mehr hören. Die Leninstraße hätten die Gemeindeväter nach der Wende in Theodor-Fontane-Straße umbenannt, "viel mehr ist nicht passiert".

Moritz träumt davon, daß die Rückkehr derer von Ribbeck Touristen in den Ort bringt, der außer dem berühmten Namen nichts weiter zu bieten hat.

Allerhand hat der Erbe schon vorgeschlagen, um das brandenburgische Nest auf Trab zu bringen, und auch, um den Dörflern zu gefallen. Eine "Managementschule für Ökologie" möchte von Ribbeck in Ribbeck errichten, eine Käserei, einen Reiterhof. Oder eine Pizzeria, ein Sägewerk, eine Rinderzuchtfarm. Neueste Idee aus der Ribbeckschen Denkfabrik: eine Brennerei, für Birnenschnaps natürlich.

"Eine Schnapsidee", kontert Böttcher, "wir bekommen doch gar keine Brennrechte."

Geld, räumt von Ribbeck ein, habe er nicht, "aber es gibt doch Banken". Und solange er in Deutschland keine Brennrechte bekommt, will er den hofedlen Birnenschnaps derer von und zu Ribbeck eben in Italien destillieren lassen, "mit ein paar Anstandsbirnen aus dem Havelland drin".

Auf einem Acker an der Schnellstraße hat von Ribbeck bereits 1000 Birnbäume pflanzen lassen. Doch auch das hat Bauer Böttcher nicht besänftigt. "Die jungen Bäume", spottet er, "stehen doch viel zu eng beieinander."

#### DEUTSCHLAND

#### Anschläge

### Stummer Rebell

Erstmals in Deutschland schlugen in Frankfurt High-Tech-Terroristen gegen die Kommunikationsgesellschaft zu.

Die Tater kamen in der Nacht, irgendwann nach drei Uhr früh. An drei Orten nördlich und östlich des Frankfurter Flughafens, Kikometer voneinander entfernt, wuchteten sie zentnerschwere Betondeckel hoch und kletterten in den Orkus der verkabelten Gesellschaft. hansa-Buchungscomputer in Kelsterbach mit dem benachbarten Airport verbinden.

"Ein einmaliger Anschlag", stöhnte Telekom-Sprecher Michael Hartmann; die Tat verrate Systemkenntnis und "massive kriminelle Energie".

In einem Schreiben an die Frankfurter Rundschau bekannte sich eine bislang unbekannte Gruppe namens "Keine Verbindung e.V." zu der Untat. Mit der "Aktion", so die vermutlich linksterroristischen Bekenner, hätten sie den Flughafen lahmlegen wollen. Denn der habe eine Funktion "im Rahmen der imperialistischen Weltwirtschaftsordnung".

Mit dem Blackout im Airport trafen die Terroristen die High-Tech-Gesellschaft, wo sie am verwundbarsten ist: Sie demolierten drei von insgesamt mehreren tausend Kabel-Knotenpunkten der Republik, deren exakte Lage und Bedeutung nur wenigen Experten bekannt ist.



Buchungsschalter im Frankfurter Flughafen: Chaos durch Kabel-GAU

In den Gruben kreuzen sich Telekom-Kabel für Computer- und Datenleitungen mit Kabeln für Telefon- und Fax-Verkehr wie Nervenstränge.

"Vermutlich mit Sägen", so die Polizei, durchtrennten die kundigen Kabel-Killer Kupferstränge und Bündel armdicker Glasfaserleitungen. Insgesamt schnitten sie 4,5 Meter Kabel heraus.

Um fünf Uhr dann am vergangenen Mittwoch, als im Flughafen die Computer angeschaltet wurden, zeigte sich, was die Säger angerichtet hatten: Bildschirme fimmerten nur noch, 13 000 Telefone im Süden Frankfurts, darunter alle Leitungen der Universitätsklinik, waren tot; stumm waren auch viele Außenleitungen der Frankfurter Flughafen AG und jene Glasfaseradern, die den LuftFachkundige Attentäter, warnt der Darmstädter Staatsrechtler Alexander Roßnagel, könnten zentrale Informations- und Kommunikationssysteme lähmen sowie ganze Wirtschaftszweige ins Chaos stürzen – und damit "Katastrophen nationalen Ausmaßes" auslösen.

Kraftwerke und Chemiefabriken, Militär, Polizei und Nachrichtendienste, Banken und Versicherungen, Krankenhäuser und Verwaltungen hängen am Computer. Tausende von Milliarden Mark werden täglich via Datenelektronik umgeschlagen, lebenswichtige Informationen per Kabel lichtschnell durch die Republik und um die Welt geschickt.

Die gigantischen Datenmengen der Wirtschaft lassen sich nach Angaben der

# Berlin 1997 & Wien

CO@W

26

SEITE 10 / DER TAGESSPIEGEL Nr. 15 945 / DIENSTAG, 8. APRIL 1997

### Glasfaserkabel beschädigt Tausende ohne Anschluß

BERLIN (ADN). Durch die Beschädigung eines Glasfaserkabels kam es gestern in Charlottenburg zu erheblichen Störungen im Telefon-Verkehr. Tausende Kunden mit Rufnummern der Anfangsziffern 321 und 301 konnten bis 18 Uhr 30 in Richtung Spandau, Kreuzberg und Reinickendorf nur eingeschränkt telefonieren. Ein Bagger hatte das Kabel nach Auskunft der Telekom gegen 9 Uhr vormittags bei Tiefbauarbeiten in der Schlüterstraße gekappt.

Tin. Torlg. 5.3 (15)

#### Telefon lahmgelegt

Die Telefonleitung von Wien nach Tirol war gestern fast gänzlich lahmgelegt. Der Grund: Ein Bagger hatte ein wichtiges Kabel beschädigt. Seite 22

## Zwei Drittel der Kapazität stand still Telefon nach Tirol war unterbrochen

Keine Telefouverbindung nach Westösterreich gab's sestern für Kunden, die von Wien aus über St. Pölten nach Tirol, Salzburg. Voraribers telefenieren wollten, Ein Kabelschaden verhinderte des Kantakt.

ST. PÖLTEN (APA). "Es ist ein schwerer Kabelschaden im Bereich Prinzersdorf zwischen St. Pölten und Melk Der ziemlich fatale Telefonkabel-Schaden bei Prinzersdorf wurde bei den Bauarbeisen für den viergleisigen Ausbau der Westbahnstrecke verursacht. "Der Bagger einer von uns beauftragten Firma has nicht nur ein Lichtquellen-, sondern auch ein Koaxialkabel durchtrennt. Das erfolgte bei Erdarbeiten bei einer Böschung", erklärte Ing. Günter Novak, Projektmana-

(16 Presse 6.3.

Türkei: Ericsson baut GSM-Netz WIEN (red.). Der närkische



# **Osterreich Austria**

Kurier 5.3. 26

#### **Telefonleitung durch Bagger lahmgelegt**

Ein Bagger hat am Donnerstag eine Haupttelefonleitung zerstört: Zwischen Wien, den westlichen Bundesländern und dem Ausland gab's "Funkstille". Soite 13

### "Funkstille" zwischen Wien und Salzburg

Bagger kappte Telefonleitung, stundenlang herrschte Chaos im Äther, Kabel wurde wieder geflickt

Die Nachricht über die Senkung der Telefontarife war für viele Fernsprechteilnehmer am Donnerstag nur ein schwacher Trost. Zwischen Wien und den westlichen Bundesländern herrschte "Funkstille".

Im Festnetz strapazierte das permanente Besetztzeichen die Nerven von Anrufern. Und auch die Mobiltele-

funktionierten nur zeitweise. Grund für die Störung war ein Kabelschaden in der Gegend von Sankt Pölten.

"Der Bagger einer Baufirma hat die Leitung durch-trennt, jetzt ist leider eine größere Reparatur notwen-dig", sagte Emil Burka von der Telekom. Das Kommunikations-Unternahmen habe

fone im Netzbereich von A1 zur Entschärfung der Situati- .fer wunderten sich, daß auch on mehrere Ersatzleitungen freigeschaltet "Leider reicht die Kapezität nicht für einen störungsfreien Fernsprech-verkehr", bedauert Burka. **Obwohl sie keine Schuld** an dem Zwischenfall traf, bekam die Telekom den Zorn von Kunden zu spüren. Die Leitungen zu den Störstellen waren überlastet. Viele Anru-

শ্ট

Handys von dem Kabelschaden betroffen waren. Ein Teil des Mobilfunks läuft über das Festnetz", meint Burka Unsere Techniker arbeiten mit Hochdruck an der Behebung des Schadens

Am Nachmittag war das Kabel zu 90 Prozent wieder seflicht.

Rene 5.3. 27)

### Bagger kappte Telephon-Hauptkabel

#### Bei Basarbeiten an der Westbahnstrecke wurde am

Donnerstag ein Hauptverkehrskabel der Telekom beschädigt. Die Verbindungen nach Westösterreich waren bis am Nachmittag zu zwei Drittel gestört.

WIEN (apa/red.). Durch einen schweren Kabelschaden der Telekom Austria im Bereich von Prinzersdorf in Niederösterreich waren am Donnerstag die leistungsstrang besteht aus einer Telephonleitungen nach West- riesigen Anzahl von Strängen,

Westbahnstrecke durchtrennte Donnerstag früh ein Bagger die Hauptleitung der Telekom in Richtung Westen. Ein Lichtquellen- und ein Coarialkabel wurden dabei schwer in Mitleidenschaft gezogen.

Die Reparaturarbeiten an dem Kabel erwiesen sich als kompliziert. "Ein solcher Hoch-

österreich weitgehend unterbro-chen. Auch Auslandsgespräche Verfahren repariert werden kös-konnten nur eingeschränkt durchgeführt werden. Sprecher. Die Post stand mit Bei Bauarbeiten an der mehreren Reparsur-Trupps im Westbahnstrecke durchtrennte

Die Unghücksstelle liegt zwischen St. Pölten und Melk. Dort wird derzeit von der Hochleistungs-AG (HL-AG) die Westbahnstrecke viergleisig susgebaut. Der Bagger "knab-berte" das Kabel während Erdarbeiten an einer Böschung an, erklärte ein Projektmanager der

VI24, 5.3. 8

Storing, Kein Telefonieren in Richtung Westen

gab es gestern für die Be-

wohner des Großraums

Wien über die Hauptver-

bindung über St. Pölten.

Bei Bauarbeiten im Be-

reich Prinzersdorf (NO)

war verschentlich ein

Glasfaserkabel gekappt

worden, eine riesige An-

zahl von Strängen mußte

in einem aufwendigen Ver-

fahren (mikro-elektro-op-

tisch) erst wieder repariert

werden.



#### **Bagger trennte** Verbindung nach Westen

Westösterreich war Donnerstag für den Rest Österreichs telefonisch nicht zu sprechen. Bei Bauarbeiten für den viergleisigen Ausbau der Westbahnstrecke im Bereich Prinzersdorf zwischen St. Pölten und Melk durchtrennte ein Bagger die Glasfaserkabel für das Telefon. Walter Zeiner von der Abteilung "Customer Care" der Telekom Austria: "Der Schaden betrifft leider unsere Hauptverkehrsstrecke' in Richtung Westen. Die Kapazität ist um zwei Drittel eingeschränkt." Der ab 8.19 Uhr gestörte Betrieb konnte um 15 Uhr wieder aufgenommen werden. Die Verbindungen nach Salzburg. Tirol und Vorariberg sowie Auslandsgespräche waren erheblich gestört.

Slep. Nadu. 5.3.28) Glasfaserkabel gekappt

Bagger legte Telefonverbindung in den Westen lahm

WIEN, ST. PÖLTEN (SN, APA). Die ner riesigen Anzahl von Strängen, die Zeiner von der Abteilung "Customer Schaden geführt haben. Care" der Telekom Austria.

landsgespräche.

Telefonverbindung zwischen Ost- erst wieder mit einem aufwendigen und Westösterreich war am Donners- Verfahren (mikro-elektro-optisch) tag großteils lahmgelegt. "Es ist ein repariert werden mußten. Erst im schwerer Kabelschaden im Bereich Verlauf des Tages bestätigte sich die Prinzersdorf zwischen St. Pölten und Vermutung, daß die Bauarbeiten bei Melk aufgetreten. Ein Glasfaserkabel der Westbahn-Hochleistungsstrecke wurde durchtrennt", erklärte Walter der HL-AG bei Prinzersdorf zu dem

Dort wird am viergleisigen Ausbau Zeiner: "Der Schaden betrifft lei- der Westbahnstrecke gearbeitet. der unsere Hauptverkehrsstrecke in "Der Bagger einer von uns beauftrag-Richtung Westen. Die Kapazität ist ten Firma hat bei Erdarbeiten nicht um zwei Drittel eingeschränkt." Die nur ein Lichtquellen- sondern auch Verbindungen nach Salzburg, Tirol ein Coaxialkabel (herkömmliches Teund Vorariberg waren erheblich ge- lefonkabel, Anm.) durchtrennt", erstört, weiters natürlich auch Aus- klärte Günter Novak, Projektmanager der HL-AG in diesem Bereich, Das Problem: Der durchtrennte Donnerstag. Am späten Nachmittag Hochleistungsstrang bestand aus ei- konnte der Schaden behoben werden.

27

CO@W



Martin Grötschel der Schaden behoben.

HL-AG.



# Mediterranean Iceland

CO@W

# Middle East, India suffer internet disruption after cable failure

Last Updated: Wednesday, January 30, 2008 | 1:09 PM ET CBC News

Damage to an undersea cable in the Mediterranean affected internet service in India and the Middle East on Wednesday, government and internet service providers said.

The disruption slowed services in India, Egypt and Saudi Arabia and shut down at least one internet service provider in the United Arab Emirates, according to reports.

Egypt's Minister of Communications and Information Technology said emergency teams were trying to find alternative routes, including satellite connections, to end the disruptions. Service, however, was still slow or completely stalled by late afternoon Wednesday.

The Internet Service Providers' Association of India told Reuters that there had been a 50 to 60 per cent cut in bandwidth as a result of the disruption, which had affected many businesses.

Rajesh Chharia, president of the association in India, told the Headline Today news channel that full restoration of services might take 10 to 15 days.

An official with one internet service provider told the Associated Press the problem was traced to an undersea cable located between Alexandria, Egypt, and Palermo, Italy.

It's not clear what caused the damage to the cable.

Monday, November 28, 2005

### Iceland Left in The Cold After Cable Cut

Jan Libbenga writes in The Register.

Many companies on Iceland were again without broadband internet last week when the **Farice Line**, a 1400 km long fibre optic line connecting Iceland to Europe through the Faroe Islands and Scotland, was cut near Inverness. Apparently, a digger accidentally severed it.

According to Iceland Online it is the 17th time in less than two years that the main communications link to and from Iceland has been cut. On two earlier occasions rats had chewed through the line. Most interruptions lasted between three and nine hours.

Gudmundur Gunnarsson, manager of Farice, admits that the frequent disruptions are intolerable. He says that the route of the cable from the north of Scotland down to Edinburgh is not marked well enough and that about two thirds of the land route will be strengthened.

osted by Fergie @ 11/28/2005 08:19:00 AM

# Most recent event in Germany (I know of)

21.04.2009 19:17

### D. Telekom's German mobile phone network down -paper

FRANKFURT, April 21 (Reuters) - The mobile phone network of <u>Deutsche Telekom</u> collapsed all over Germany on Tuesday, German newspaper Badische Zeitung reported.

The newspaper said the network, which has about 40 million users, would be down until 1700 GMT on Tuesday, and the cause was still unclear.

Deutsche Telekom was not immediately available for comment.

(Editing by Will Waterman) Keywords: TELEKOM/

(eva.kuehnen@thomsonreuters.com; +49 69 7565 1244; Reuters Messaging: eva.kuehnen.reuters.com@reuters.net)

CO@W

# **Industry Partners**

Bell Communications Research (now Telcordia) & AT&T Telenor (Norwegian Telecom) **E-Plus DFN-Verein** Detecon International GmbH Bosch Telekom Siemens Austria Telekom T-Systems Nova (T-Systems, Deutsche Telekom) **KPN** Telecel-Vodafone

Grötschel

atesio (ZIB spin-off company)

# The **ZIB/MATHEON** Telecom-Team

The Telecom-Group Manfred Brandt Andreas Eisenblätter Martin Grötschel Thorsten Koch Maren Martens Christian Raack Axel Werner Roland Wessäly

### **Former Team Members**

Dimitris Alevras (ZIB, IBM) Norbert Ascheuer (ZIB, atesio) Andreas Bley (ZIB, TU Berlin) Hans Florian Geerdes (ZIB, Booz Allen) Tobias Harks (ZIB, TU Berlin) Christoph Helmberg (ZIB, U Chemnitz) Arie Koster (ZIB, RWTH Aachen) Sven Krumke (ZIB, TU Kaiserslautern) Alexander Martin (ZIB, TU Darmstadt) Mechthild Opperud (ZIB, Telenor) Sebastian Orlowski (ZIB, atesio) Diana Poensgen (ZIB, McKinsey) Jörg Rambau (ZIB, U Bayreuth) Adrian Zymolka (ZIB, Axioma)

# Contents

- 1. How it began: My Telecom Involvement
- 2. Telecommunication: The General Problem
- 3. The Problem Hierarchy: Cell Phones and Mathematics
- 4. The Problem Hierarchy: Network Components and Math
- 5. Network Design: Tasks to be solved

Addressing Special Issues:

- 6. Frequency Assignment in GSM
- 7. The UMTS Radio Interface
- 8. Locating the Nodes of a Network
- 9. Balancing the Load of Signaling Transfer Points
- 10. Integrated Topology, Capacity, and Routing Optimization as well as Survivability Planning
- 11. Planning IP Networks
- 12. Optical Networks
- 13. Summary and Future

# **Advertisement**

- Modern telecommunication is impossible without mathematics. Cryptography, digital signal encoding, queue management come to your mind immediately.
- But modern mathematics also supports the innovative design and the cost-efficient production of devices and equipment. Mathematics plans low-cost, high-capacity, survivable networks and optimizes their operation.



- Briefly: no efficient use of scarce resources without mathematics not only in telecommunication.
- Many of these achievements are results of newest research. Their employment in practice is fostered by significant improvements in computing technology.

# What is the Telecom Problem?

Speech

Video

Etc.

Data

**Design** excellent technical devices

all kinds of failures and organize

the traffic such that high quality

telecommunication between

very many individual units at

many locations is feasible

and a robust network that survives







Grötschel



at low cost!



# What is the Telecom Problem?

:0@W

Design excellent technical devices and a robust network that survives all kinds of failures and organize the traffic such that high quality telecommunication between very many individual units at many locations is feasible at low cost!

This problem is too general to be solved in one step.





Grötsch

### Approach in Practice:

- Decompose whenever possible.
- Look at a hierarchy of problems.
- Address the individual problems one by one.
- Recompose to find a good global solution.

# Contents

- 1. How it began: My Telecom Involvement
- 2. Telecommunication: The General Problem
- 3. The Problem Hierarchy: Cell Phones and Mathematics
- 4. The Problem Hierarchy: Network Components and Math
- 5. Network Design: Tasks to be solved

Addressing Special Issues:

- 6. Frequency Assignment in GSM
- 7. The UMTS Radio Interface
- 8. Locating the Nodes of a Network
- 9. Balancing the Load of Signaling Transfer Points
- 10. Integrated Topology, Capacity, and Routing Optimization as well as Survivability Planning
- 11. Planning IP Networks
- 12. Optical Networks
- 13. Summary and Future
## Cell Phones and Mathematics



Designing mobile phones •Computational logic Combinatorial Task partitioning optimization Chip design (VLSI)

Component design

- Differential algebraic
  - equations



Grötschel

Producing Mobile Phones Operations research Linear and integer programming Production facility layout Control of CNC machines Combinatorial optimization Control of robots Ordinary differential equations Lot sizing Marketing and Distributing Mobiles Scheduling Financial mathematics Logistics Transportation optimization

### Production and Mathematics: Examples



CNC Machine for 2D and 3D cutting and welding (IXION ULM 804) Sequencing of Tasks and Optimization of Moves





Grötschel

PIC10F844 P-041150 @993558P

**SMD** 

Mounting Devices Minimizing Production Time via TSP or IP



Printed Circuit Boards Optimization of Manufacturing



CO@W

#### **Mobile Phone Production Line**



Martin Grötschel







# Contents

- 1. How it began: My Telecom Involvement
- 2. Telecommunication: The General Problem
- 3. The Problem Hierarchy: Cell Phones and Mathematics
- 4. The Problem Hierarchy: Network Components and Math
- 5. Network Design: Tasks to be solved

Addressing Special Issues:

- 6. Frequency Assignment in GSM
- 7. The UMTS Radio Interface
- 8. Locating the Nodes of a Network
- 9. Balancing the Load of Signaling Transfer Points
- 10. Integrated Topology, Capacity, and Routing Optimization as well as Survivability Planning
- 11. Planning IP Networks
- 12. Optical Networks
- 13. Summary and Future

#### **Network Components**

Design, Production, Marketing, Distribution: Similar math problems as for mobile phones





Martin Grötschel Fiber (and other) cables
Antennas and Transceivers
Base stations (BTSs)
Base Station Controllers (BSCs)
Mobile Switching Centers (MSCs)
and more...



### **Component** "Cables"

CO@W









Uploaded by: Unknown (2009-05-26)





Martin Grötschel







#### **Component** "Antennas"

CO@W

43



Martin Grötschel

#### **Component** "Base Station"

CO@W









Martin Grötschel Nokia MetroSite









Martin Grötschel



Component "Mobile Switching Center":

#### Example of an MSC Plan

# Contents

- 1. How it began: My Telecom Involvement
- 2. Telecommunication: The General Problem
- 3. The Problem Hierarchy: Cell Phones and Mathematics
- 4. The Problem Hierarchy: Network Components and Math
- 5. Network Design: Tasks to be solved Addressing Special Issues:
- 6. Frequency Assignment in GSM
- 7. The UMTS Radio Interface
- 8. Locating the Nodes of a Network
- 9. Balancing the Load of Signaling Transfer Points
- 10. Integrated Topology, Capacity, and Routing Optimization as well as Survivability Planning
- 11. Planning IP Networks
- 12. Optical Networks
- 13. Summary and Future

### Network Design: Tasks to be solved Some Examples

- Locating the sites for antennas (TRXs) and base transceiver stations (BTSs)
- Assignment of frequencies/channels to antennas
- Cryptography and error correcting encoding for wireless communication
- Clustering BTSs
- Locating base station controllers (BSCs)
- Connecting BTSs to BSCs



Martin Grötsche

### Network Design: Tasks to be solved Some Examples (continued)

- Locating Mobile Switching Centers (MSCs)
- Clustering BSCs and Connecting BSCs to MSCs
- Designing the BSC network (BSS) and the MSC network (NSS or core network)
  - Topology of the network
  - Capacity of the links and components
  - Routing of the demand
  - Survivability in failure situations

Most of these problems turn out to be Combinatorial Optimization or Mixed Integer Programming Problems

Grötsche

48

#### **Connecting Mobiles: What 's up?**



# Contents

- 1. How it began: My Telecom Involvement
- 2. Telecommunication: The General Problem
- 3. The Problem Hierarchy: Cell Phones and Mathematics
- 4. The Problem Hierarchy: Network Components and Math
- 5. Network Design: Tasks to be solved

Addressing Special Issues:

- 6. Frequency Assignment in GSM
- 7. The UMTS Radio Interface
- 8. Locating the Nodes of a Network
- 9. Balancing the Load of Signaling Transfer Points
- 10. Integrated Topology, Capacity, and Routing Optimization as well as Survivability Planning
- 11. Planning IP Networks
- 12. Optical Networks
- 13. Summary and Future

# Frequency or Channel Assignment Radio Interface

Andreas Eisenblätter will lecture on this aspect in detail, e.g., about:

- GSM technology (GSM = Global System for Mobile Communications)
- UMTS

(UMTS = Universal Mobile Telecommunications System), a system that is based on CDMA technology (CDMA = Code Division Multiple Access) which is currently being deployed





Martin Grötschel

#### and more.

Eisenblätter, Andreas: *Frequency Assignment in GSM Networks: Models, Heuristics, and Lower Bounds*, 2001 (awarded with the INFORMS Telecommunications Dissertation Award and the Dissertation Prize of the Gesellschaft für Operations Research 2002)

Geerdes, Hans-Florian: *UMTS Radio Network Planning: Mastering Cell Coupling for Capacity Optimization*, PhD Thesis, TU Berlin, 2008 (Dissertationspreis 2008 der von der Gesellschaft für Informatik (GI) und der Informationstechnischen Gesellschaft (ITG) gemeinsam getragenen Fachgruppe "Kommunikation und Verteilte Systeme")

#### **GSM Minimum Interference Frequency Assignment Problem (FAP)**

FAP is an Integer Linear Program:

 $\begin{array}{ll} \min & \sum_{vw \in E^{co}} \\ s.t. & \sum_{f \in F_v} \\ & x_{vf} + \end{array} \end{array}$ 

$$\sum_{vw \in E^{co}} C_{vw}^{co} z_{vw}^{co} + \sum_{vw \in E^{ad}} C_{vw}^{ad} z_{vw}^{ad}$$

$$\sum_{f \in F_{v}} x_{vf} = 1$$

$$x_{vf} + x_{wg} \leq 1$$

$$x_{vf} + x_{wf} \leq 1 + z_{vw}^{co}$$

$$x_{vf} + x_{wg} \leq 1 + z_{vw}^{ad}$$

$$x_{vf} + x_{wg} \leq 1 + z_{vw}^{ad}$$

$$x_{vf} + z_{vw}^{co}, z_{vw}^{ad} \in \{0, 1\}$$

 $\forall v \in V$ 

 $\forall vw \in E^{d}, |f - g| < d(vw)$  $\forall vw \in E^{co}, f \in F_{v} \cap F_{w}$  $\forall vw \in E^{ad}, |f - g| = 1$ 

that is very difficult to solve.

#### **GSM Region Berlin - Dresden**



# **UMTS Configuration of Antennas**

Isotropic Prediction

 Available for each potential antenna location

#### Antenna Configuration

- Azimuth
- Tilt
- Height



Martin Grötschel

#### Antenna Diagram

 Signal propagation in different directions



Digital Building Model Berlin (2002) E-Plus Mobilfunk GmbH & Co. KG

#### **Antenna Prediction**



© Digital Building Model Berlin (2002), E-Plus Mobilfunk GmbH & Co. KG, Germany height: 41m, electrical tilt: 0-8°, azimuth 0-120°

CO@W

### Optimization: Reduction of UMTS Network Load





CO@W

# Contents

- 1. How it began: My Telecom Involvement
- 2. Telecommunication: The General Problem
- 3. The Problem Hierarchy: Cell Phones and Mathematics
- 4. The Problem Hierarchy: Network Components and Math
- 5. Network Design: Tasks to be solved

Addressing Special Issues:

- 6. Frequency Assignment in GSM
- 7. The UMTS Radio Interface
- 8. Locating the Nodes of a Network
- 9. Balancing the Load of Signaling Transfer Points
- 10. Integrated Topology, Capacity, and Routing Optimization as well as Survivability Planning
- 11. Planning IP Networks
- 12. Optical Networks
- 13. Summary and Future

#### **G-WiN Data**

G-WiN = Gigabit-Wissenschafts-Netz of the DFN-Verein Internet access of all German universities and research institutions

- Locations to be connected: 750
- Data volume in summer 2000: 220 Terabytes/month
- Expected data volume in 2004: 10.000 Terabytes/month

#### Clustering (to design a hierarchical network):

- 10 nodes in Level 1a261 nodes e
- 20 nodes in Level 1b
- All other nodes in Level 2

261 nodes eligible for Level 1



Grötschel

Bley, Andreas ; Koch, Thorsten: *Optimierung in der Planung und beim Aufbau des G-WiN*, DFN-Mitteilungen H. 54, 2000, 13-15

### **G-WiN Problem**

- Select the 10 nodes of Level 1a.
- Select the 20 nodes of Level 1b.
- Each Level 1a node has to be linked to two Level 1b nodes.
- Link every Level 2 node to one Level 1 node.





- Design a Level 1a Network such that
  - Topology is survivable (2-node connected)
  - Edge capacities are sufficient (also in failure situations)
  - Shortest path routing (OSPF) leads to balanced capacity use (objective in network update)
- The whole network should be "stable for the future".
- The overall cost should be as low as possible.

# Potential node locations for the 3-Level Network of the G-WIN

Grötschel



Red nodes are potential level 1 nodes

Blue nodes are all remaining nodes

#### Cost:

Connection between nodes Capacity of the nodes

#### **Demand distribution**





Martin Grötschel



The demand scales with the height of each red line

#### Aim

Select backbone nodes and connect all non-backbone nodes to a backbone node such that the overall network cost is minimal (access+backbone cost)

#### **G-WiN Location Problem: Data**

V=set of locations

- Z = set of potential Level 1a locations (subset of V)
- $K_p$  = set of possible configurations at location p in Level 1a

For 
$$i \in V$$
,  $p \in Z$  and  $k \in K_p$ :  
 $w_{ip}$  = connection costs from *i* to *p*  
 $d_i$  = traffic demand at location *i*  
 $c_p^k$  = capacity of location *p* in configuration *k*  
 $w_p^k$  = costs at location *p* in configuration *k*  
 $x_{ip}$  = 1 if location *i* is connected to *p* (else 0)  
 $z_p^k$  = 1 if configuration *k* is used at location *p* (else 0)

CO@W

#### **G-WiN Location/Clustering Problem**

$$\min \sum_{p \in \mathbb{Z}} \sum_{i \in V} w_{ip} x_{ip} + \sum_{p \in \mathbb{Z}} \sum_{k \in K_p} w_p^k z_p^k$$

 $\sum x_{ip} = 1$  Each location i must be connected to a Level 1 node  $\sum_{i} d_{i} x_{ip} \leq \sum_{k} c_{p}^{k} z_{p}^{k}$  Capacity at p must be large enough  $\sum_{k} z_{p}^{k} = 1$  Only one configuration at each Location 1 node  $\sum z_p^k = const$ # of Level 1a nodes

All variables are 0/1.

#### **Solution: Hierarchy & Backbone**

CO@W



Martin Grötschel

### **G-WiN Location Problem: Solution Statistics**

The DFN problem leads to ~100.000 0/1-variables. Typical computational experience: Optimal solution via CPLEX in a few seconds!

A very related problem at Telekom Austria has ~300.000 0/1-variables plus some continuous variables and capacity constraints.

Computational experience (before problem specific fine tuning):

10% gap after 6 h of CPLEX computation,60% gap after "simplification"(dropping certain capacities).

### Contents

**CO**@M

65

- 1. How it began: My Telecom Involvement Telecommunication: The General Problem
- 2. The Problem Hierarchy: Cell Phones and Mathematics
- 3. The Problem Hierarchy: Network Components and Math
- 4. Network Design: Tasks to be solved

Addressing Special Issues:

- 5. Frequency Assignment in GSM
- 6. The UMTS Radio Interface
- 7. Locating the Nodes of a Network
- 8. Balancing the Load of Signaling Transfer Points
- 9. Integrated Topology, Capacity, and Routing Optimization as well as Survivability Planning
- 10. Planning IP Networks
- 11. Optical Networks
- 12. Summary and Future





# **Re-Optimization of Signaling Transfer Points**

- Telecommunication companies maintain a signaling network (in adition to their communication transport network). This is used for management tasks such as:
- Basic call setup or tear down
- Wireless roaming
- Mobile subscriber authentication
- Call forwarding
- Number display
- SMS messages
- etc.



Martin Grötschel A. Eisenblätter, A. M. C. A. Koster, R. Wallbaum, R. Wessäly *Load Balancing in Signaling Transfer Points*ZIB-Report 02-50,

# Signaling Transfer Point (STP)

CCD=routing unit, CCLK=interface card





Grötschel

CCD=Common Channel Distributors,

CCLK=Common Channel Link Controllers

CO@W

### **STP – Problem description**

#### Target

Assign each link to a CCD/CCLK

#### Constraints

At most 50% of the links in a linkset can be assigned to a single cluster

Number of CCLKs in a cluster is restricted

Objective

Balance load of CCDs

CO@W

# **STP – Mathematical model**

#### Data

- C set of CCDs j
- L set of links i
- D<sub>i</sub> demand of link i
- P set of link-sets
- Q set of clusters
- -p subset of links in link-set p
- $C_{\mathsf{q}}~$  subset of CCDs in cluster  $\mathsf{q}$
- $c_q$  #CCLKs in cluster q

#### Variables

$$x_{ij} \in \{0,1\}, i \in L, j \in C$$

 $x_{ij} = 1$  if and only if link i is assigned to CCD j

#### **STP – Mathematical model**

#### **Min load difference**

$\min y - z$		
$\sum_{j \in C} x_{ij} = 1$	$i \in L$	Assign each link
$\sum_{i \in L} D_i x_{ij} \le y$	$j \in C$	Upper bound of CCD-load
$\sum_{i \in L} D_i x_{ij} \ge z$	$j \in C$	Lower bound of CCD-load
$\sum_{i \in L_p} \sum_{j \in C_q} x_{ij} \leq \left\lceil \frac{ L_p }{2} \right\rceil$	$p \in P, q \in Q$	Diversification
$\sum_{i \in L} \sum_{j \in C_q} x_{ij} \le C_q$	$q \in Q$	CCLK-bound
$x_{ij} \in \left\{0,1\right\}$		Integrality

CO@W

#### STP – former (unacceptable) solution

Minimum: 186 Maximum: 404 Load difference: 218



Martin Grötschel

CO@W

### **STP – "Optimal solution"**

Minimum: 280 Maximum: 283 Load difference: 3





Martin Grötschel

CO@W
# **STP – Practical difficulty**

# Problem: **311 rearrangements** are necessary to migrate to the optimal solution





Martin Grötsche

# Reformulation with new objective

Find a best solution with a restricted number of changes

# **STP – Reformulated Model**



### **Min load difference**

- $i \in L$  Assign each link
- $j \in C$  Upper bound of CCD-load

 $j \in C$  Lower bound of CCD-load

- $p \in P, q \in Q$  Diversification
- $q \in Q$  CCLK-bound

**Restricted number of changes!** 

Integrality

Grötschel

# **STP – Alternative Model**

$\min \sum_{i \in L} \sum_{j \in C, \ j \neq j^*(i)} x_{ij}$	Min # changes			
$\sum_{j \in C} x_{ij} = 1$	$i \in L$	Assign each link		
$\sum_{i\in L} D_i x_{ij} \le y$	$j \in C$	Upper bound of CCD-load		
$\sum_{i \in L} D_i x_{ij} \ge z$	$j \in C$	Lower bound of CCD-load		
$\sum_{i \in L_p} \sum_{j \in C_q} x_{ij} \leq \left\lceil \frac{ L_p }{2} \right\rceil$	$p \in P, q \in Q$	Diversification		
$\sum_{i \in L} \sum_{j \in C_q} x_{ij} \leq C_q$	$q \in Q$	CCLK-bound		
$y - z \le D$ $x_{ij} \in \{0, 1\}$	Re	estricted load difference Integrality		

Martin Grötschel

CO@W

# **STP – New Solutions**







Martin Grötschel

CO@W

# **STP – Experimental results**

Max changes	0	5	10	15	20
Load differences	218	129	71	33	14





Martin Grötschel

### **1 hour application of CPLEX MIP-Solver for each case**

# **STP - Conclusions**

# It is possible to achieve 85%

# of the optimal improvement with less than 5%

of the changes necessary to obtain a load balance optimal solution !



Martin Grötsche

# Contents

- 1. How it began: My Telecom Involvement
- 2. Telecommunication: The General Problem
- 3. The Problem Hierarchy: Cell Phones and Mathematics
- 4. The Problem Hierarchy: Network Components and Math
- 5. Network Design: Tasks to be solved

Addressing Special Issues:

- 6. Frequency Assignment in GSM
- 7. The UMTS Radio Interface
- 8. Locating the Nodes of a Network
- 9. Balancing the Load of Signaling Transfer Points
- 10. Integrated Topology, Capacity, and Routing Optimization as well as Survivability Planning
- 11. Planning IP Networks
- 12. Optical Networks
- 13. Summary and Future

Grötschel

# **Network Optimization**





Grötschel

Wessäly, Roland: *DImensioning Survivable Capacitated NETworks*, PhD Thesis, TU Berlin, 2000 (awarded with the Mannesmann-Innovationspreis)

# What needs to be planned?

- Topology
- Capacities
- Routing
- Failure Handling (Survivability)
- IP Routing
- Node Equipment Planning
- Optimizing Optical Links and Switches

DISCNET: A Network Planning Tool (Dimensioning Survivable Capacitated NETworks)

atesio ZIB Spin-Off, founded by A. Eisenblätter and R. Wessäly

special

lecture

Grötsche

# **Survivability-Models:** today still a hot topic

mathematical models and software for:

**Diversification** ",route node-disjoint"

### Reservation

"reroute all demands" (or p% of all demands)

Path restoration ", reroute affected demands" (or p% of all affected demands)

plus: simultaneous capacity planning and routing

120

 $(\mathbf{F})$ 





Grötschel

# Survivable Network Design: Mathematical Model (example)

$$\min \sum_{e \in E} \sum_{t=1}^{T_e} k_e^t x_e^t$$

$$x_e^t \in \{0,1\}, e \in E, t = 1, \dots, T_e \quad \checkmark \text{ topology decision}$$

$$x_e^{t-1} \ge x_e^t, e \in E, t = 1, \dots, T_e$$

$$y_e = \sum_{t=0}^{T_e} C_e^t x_e^t, e \in E \quad \checkmark \text{ capacity decisions}$$

$$y_e \ge \sum_{uv \in D} \sum_{P \in P_{uv}^0, e \in P} f_{uv}^0(P), e \in E \quad \checkmark \text{ normal operation routing}$$

$$d_{uv} = \sum_{P \in P_{uv}^0} f_{uv}^0(P), uv \in D \quad \checkmark \text{ component failure routing}$$

$$f_{uv}^s(P) \ge 0, s \in S, uv \in D_s, P \in P_{uv}^s$$

$$\sum_{P \in P_{uv}^0} f_{uv}^0(P) + \sum_{P \in P_{uv}^0; e \in P} f_{uv}^s(P) \ge \sigma_{uv} d_{uv}, s \in S, uv \in D_s$$

$$\sum_{uv \in D_s} (\sum_{P \in P_{uv}^0, \cap P_{uv}^0; e \in P} f_{uv}^0(P) + \sum_{P \in P_{uv}^0; e \in P} f_{uv}^s(P)) \le y_e, s \in S, e \in S$$

 $E_{s}$ 

CO@W

# Network Planning: details later today

84

CO@W

Martin

Grötschel

Introduction Access Networks Core Networks Survivability Demands and Capacities

### Planning and Optimizing Large Scale Telecommunication Networks

**CO@Work** October 5, 2009



Maren Martens Andreas Bley, Christian Raack

ヘロア ヘアマ ヘビア ヘビア

୬**୯**୯ 1/28

# Contents

- 1. How it began: My Telecom Involvement
- 2. Telecommunication: The General Problem
- 3. The Problem Hierarchy: Cell Phones and Mathematics
- 4. The Problem Hierarchy: Network Components and Math
- 5. Network Design: Tasks to be solved

Addressing Special Issues:

- 6. Frequency Assignment in GSM
- 7. The UMTS Radio Interface
- 8. Locating the Nodes of a Network
- 9. Balancing the Load of Signaling Transfer Points
- 10. Integrated Topology, Capacity, and Routing Optimization as well as Survivability Planning
- 11. Planning IP Networks
- 12. Optical Networks
- 13. Summary and Future

Grötschel

# **DFN: German Research Network**

Internet for German universities, scientific institutions, museums, libraries, etc.

B-WiN: Breitband WissenschaftsNetz, 1996 – 2000

- virtual private network from DeTeSystems
- ~ 400 users

86

Grötschel

- Backbone links 35 155 Mbit/s
- G-WiN: Gigabit WissenschaftsNetz, 2000 2006
  - virtual private SDH/WDM network from DeTeSystems
  - IP over SDH/WDM
  - Backbone links 155 Mbit/s 10 Gbit/s

#### X-Win: since 2006

Bley, Andreas: Routing and Capacity Optimization for IP Networks,
 PhD Thesis, TU Berlin, 2007
 (awarded with the Dissertation Prize 2007 of the Gesellschaft f
ür Operations
 Research and the INFORMS Doctoral Dissertation Award for Operations
 Research in Telecommunications 2008)

# X-Win, http://www.dfn.de/xwin/

- Das Wissenschaftsnetz X-WiN
- Maßgeschneidert f
  ür Wissenschaft und Forschung
- Das Wissenschaftsnetz X-WiN ist die technische Plattform des Deutschen Forschungsnetzes. Über das X-WiN sind Hochschulen, Forschungseinrichtungen und forschungsnahe Unternehmen in Deutschland untereinander, mit den Wissenschaftsnetzen in Europa und auf anderen Kontinenten verbunden. Darüber hinaus verfügt das X-WiN über leistungsstarke Austauschpunkte mit dem allgemeinen Internet.
- Mit Anschlusskapazitäten bis zu 10 Gigabit/s und einem Terabit-Kernnetz, das sich zwischen ca. 60 Kernnetz-Standorten aufspannt, zählt das X-WiN zu den leistungsfähigsten Kommunikationsnetzen weltweit.
  - Andreas Bley (ZIB, now TU Berlin) has significantly contributed to the planning of the X-Win
    - Locations
    - Network
    - Hub and Line Capacities

CO@W

Grötschel

# X-WIN

88

- G-WIN served the ~750 scientific institutions from 2000 to 2006.
- G-WIN was reconfigured about every two months to meet changes in demand. Three modifications were allowed at each update at most.





Grötsche

With new transport, hub, and switching technologies new design possibilities arise. We have designed the new
German science network, called X-WIN which started
operating at the end of 2006 (terabit backbone,
10 gigabit/second connections,...)

# X-WIN Andreas Bley und Marcus Pattloch



Martin Grötschel

Node Bandwidths

Level 1a and some 1b Nodes

# Data and a glimpse at the model

#### Gegebene Parameter

- V Menge der V-Standorte.
- A Menge der möglichen A-Standorte. Sie werden entweder A-Standort oder Anwenderstandort.
- N Menge der Anwenderstandorte
- L Menge aller möglichen Verbindungen zwischen Anwenderstandort und V- oder A-Standort. Für jede Anbindung wird jeweils nur die billigste Verbindung berücksichtigt, deren Kapazität mindestens so groß ist wie die Anschlussbandbreite des Anwenders.
- P Menge aller möglichen Ketten zur Anbindung von A-Standorten an die V-Standorte. Jede Kette hat die Form  $(v_1, a_1, \ldots, a_m, v_2)$ , d.h. sie bindet die A-Standorte  $a_1, \ldots, a_m$  ausfallsicher an die beiden V-Standorte  $v_1$  und  $v_2$  an. Für jede Kombination von Kapazitäten auf den einzelnen Verbindungen gibt es eine eigene Kette p.
- $k_a^A$  Kosten für das Einrichten des A-Standortes  $a \in A$ .
- $k_{ij}^L$  Kosten der (billigsten) Zugangsleitung  $ij \in L$  von Anwenderstandort i zu A- oder V-Standort j.
- $k_p^P$  Kosten der Kette  $p = (v_1, a_1, \dots, a_m, v_2) \in P$  zur Anbindung der A-Standorte  $a_1, \dots, a_m$  an die V-Standorte  $v_1, v_2$ . Die Kosten einer Kette sind die Summe aller Einzelverbindungskosten.
- $c_p \quad {\rm Kapazität} \; {\rm der} \; {\rm Kette} \; p.$  Sie ist die kleinste Kapazität aller Einzelverbindungen.

#### Entscheidungsvariablen

- y<sub>a</sub> 1 genau dann, wenn a zum A-Standort wird, 0 sonst.
- $x_{ij} = 1$ genau dann, wenn i ein Anwenderstandort ist oder wird und ian den A- oder V-Standort jangebunden wird, 0 sonst.
- $z_p$  1 genau dann, wenn  $a_1, \ldots, a_m$  zu A-Standorten werden und diese über die Kette  $p = (v_1, a_1, \ldots, a_m, v_2)$  an die V-Standorte  $v_1, v_2$  angebunden werden, 0 sonst.

#### Zielfunktion

Ziel ist die Minimierung der Gesamtkosten für das Einrichten der gewählten A-Standorte, für die Ketten zur Anbindung dieser A-Standorte an das V-Netz, sowie für die Zugangsleitungen zu den übrigen Anwenderstandorten:

 $\min \quad \sum_{a \in A} k_a^A y_a + \sum_{p \in P} k_p^P z_p + \sum_{ij \in L} k_{ij}^L x_{ij}$ 

#### Nebenbedingungen

Martin Grötschel Jeder Anwenderstandort wird an genau einen A- oder V-Standort angebunden:

$$\sum_{ij \in L} x_{ij} = 1 \quad \text{für alle } i \in N$$

Wird ein möglicher A-Standort nicht eingerichtet, so wird dieser Standort als Anwenderstandort an einen anderen A- oder V-Standort angebunden:

$$\sum_{aj\in L} x_{aj} = 1 - y_a \quad \text{für alle } a \in A.$$

Ein Anwenderstandort kann nur dann an einen möglichen A-Standort angebunden werden, wenn dieser auch tatsächlich eingerichtet wird:

 $x_{ia} \leq y_a$  für alle  $a \in A$  und  $ia \in L$ .

Jeder eingerichtete A-Standort wird über genau eine Kette doppelt an das V-Netz angebunden:

$$\sum_{p \text{ mit } a \in p} z_p = y_a \quad \text{für alle } a \in A$$

Die Kapazität einer Kette muss mindestens so groß sein wie die Anschlussbandbreiten aller über sie angebundenen Standorte zusammen:

$$\sum_{a \in p} \left( b_a + \sum_{ia \in L} b_i x_{ia} \right) \le c_p + \left( \sum_{i \in A \cup N} b_i \right) (1 - z_p) \quad \text{für alle } p \in P.$$

initial model:

1 billion variables

after reduction

- ~100.000 variables
- ~100.000 constraints
   solved by ZIMPL/CPLEX
   in a few minutes.
- 81 scenarios have been considered and solved – after lots of trials – for each choice of reasonable number of core nodes.

CO@W

# Number of Nodes in the Core Network

CO@W







Martin Grötschel

# Location- and Network Topology Planing: solvable to optimality in practice



# X-Win Backbone January 2009



Martin

Grötschel



Abbildung 1: Glasfaserverbindungen im X-WiN (Stand Januar 2009)

# The network design problem



94

CO@W

Grötschel

Supply Graph Demands Discrete Capacities & Costs OSPF-Routing Survivability Further technical constraints

#### 95

# **OSPF-Routing: Weights**



Non-bifurcated routing on shortest paths w.r.t. non-negative link weights

Sink-tree for each destination

Unique shortest paths necessary to guarantee feasible routing in practice!

Martin Grötschel

# **OSPF-Routing: Survivability**



Survivability: Capacities must accommodate a feasible OSPF-routing in

- the normal operating state
- single edge and single node failure states



Martin Grötschel

96

CO@W

# **Model & Solution approach**

Mixed-integer programming model

Solution approach (Decomposition) Network design Cutting plane algorithm

Heuristics

Weight computation

Linear programming



97

CO@W



Martin Grötschel

# **Results: Original network**



98

CO@W

Demands: Nov 1997 Routing with perturbed unit-weights Original topology

#### <del>99</del>

Grötschel

## **Results: New Network**



Demands: Nov 1997 Routing with perturbed unit-weights Maximal 3 topology changes

## Cost: 10.71

10% improvement on the network that has already been optimized with our algorithm



# Conclusion

CO@W

OSPF-routing (weights) and topology & capacities must be simultaneously optimized !





Martin Grötschel

# **X-WiN Traffic Engineering: Results**

# Reduction of the maximal load to below 50% of the initial max load



CO@W



# Contents

- 1. How it began: My Telecom Involvement
- 2. Telecommunication: The General Problem
- 3. The Problem Hierarchy: Cell Phones and Mathematics
- 4. The Problem Hierarchy: Network Components and Math
- 5. Network Design: Tasks to be solved

Addressing Special Issues:

- 6. Frequency Assignment in GSM
- 7. The UMTS Radio Interface
- 8. Locating the Nodes of a Network
- 9. Balancing the Load of Signaling Transfer Points
- 10. Integrated Topology, Capacity, and Routing Optimization as well as Survivability Planning
- 11. Planning IP Networks
- 12. Optical Networks
- 13. Summary and Future

Grötschel

# **Telecommunication networks**



- Focus: Backbone layer
- Planning-objective: Cost-minimal network
- Reason: New technology, new services

CO@W

Grötsche

# From copper to fiber...

Grötschel

#### **Electronic Networks**





- high transmission-capacity, but restricted mileage
- various types (uni- and bi-directional)
- various qualities

# ...to WDM ...



## Wavelength Division Multiplexing (WDM)









Martin Grötschel

#### (Point-to-Point-) WDM-Networks



- Capacity is multiplied
- growing multiplex factors
- different systems

(#channels and spectra)

# ... to all optical networks

Martin Grötschel



#### **Optical Networks**



Edges: optic (WDM) Nodes: optic

- Switching optical channels w/o o-e-o-conversion
- Switching of arbitrary wavelengths

# Lightpaths

Lightpath = pure optical connection between two nodes via one or multiple fibers with optical switching in traversed nodes



- length restriction
   (dispersion and attenuation)
- wavelength assignment

CO@W

Grötschel

# **Optical Network Configuration**



108





Martin Grötschel
## **Planning Optical Networks**

Input: Network topology and demand-matrix Output: Cost-minimal network configuration with:







Martin Grötschel

#### Planning present networks

#### Dimensioning

Edges: Transmission-capacity Nodes: Switching-capacity

#### Routing

Determination of routing (with survivability)

#### Coloring

Conflict-free wavelength assignment (with converters)



#### Planning optical networks

## **Modeling Optical Networks**

- Overall problem is too complex
  - extreme large mathematical model (intractable)
- Decomposition into two subproblems:
  - Dimensioning and Routing
    - connection to previous network planning
    - integer routing requirement
  - Wavelength Assignment
    - conflict-free wavelength assignment to lightpaths





Martin Grötschel

## **Dimensioning and Routing**

#### Present

# Network Dimensioning and Routing:

- Capacity planning
  - mainly edge capacities
  - $\Rightarrow$  integer capacity variables
- Routing either bifurcated (splittable)
  - $\Rightarrow$  continuous flow or path variables
- or non-bifurcated (unsplittable)
  - $\Rightarrow$  0-1 flow or path variables

#### **Optical**

# Network Dimensioning and Routing:

- Capacity planning
  - both edge and node related
  - $\Rightarrow$  integer capacity variables
- Routing in lightpaths (integervalued)
  - $\Rightarrow$  general integer routing variables
- Lightpath length restriction
   ⇒ only via path variables

Grötschel

## **Integer Programming Formulation**

G = (V, E)	Physical topology
Q	Demand set, (s <sup>q</sup> , t <sup>q</sup> , d <sup>q</sup> ) source, target and lightpath demand
Pq	Set of paths from $s^q$ to $t^q$ that are allowed to route lightpaths for commodity $q$
T <sub>mn</sub>	Index set of available edge capacity levels (fibers + WDM systems) for edge mn
$\kappa^0_{\ mn}$ , $\kappa^t_{\ mn}$	Installed edge capacity (channels), available capacity levels
c <sup>T</sup> mn	Cost of installing edge capacity level t at edge mn
$\varTheta_m$	Index set of available node capacity levels (OXCs) for node m
$\kappa^0_{\ m}, \ \kappa^\theta_{\ m}$	Installed node capacity (ports), available capacity levels
$C^{\theta}_{m}$	Cost of installing node capacity level $\theta$ at node <i>m</i>



Grötschel

## **Integer Programming Formulation**



 $\ell_{mn}^{t}$ 

 $x_m^{\theta}$ 

# of lightpaths of commodity q routed via path p
0-1 variable indicating whether edge
capacity level t is used at edge mn
0-1 variable indicating whether node

capacity level  $\theta$  is used at node m





Martin Grötsche

#### **Integer Programming Formulation**



CO@W

Grötschel

#### **Formulation Alternatives**

- Depending on concrete capacity structure other variables can be used
- Every lightpath can be considered as a single commodity:
  - non-bifurcated routing of commodities, all with unit demand
  - number of variables is blown up
  - available inequalities for non-bifurcated routing are less/not effective for unit demands (with integer capacity)



Martin Grötsche

## **Computational Experiments**

 Deleting integrality requirements yields surprisingly few non-integer routings



Grötschel



Remaining free capacity 1 at every edge c d

а

b

Lightpaths to be routed





Continuous routing Lightpath routing

#### **Concluding Remarks on Optical Networks**

- Lightpath routing implies (general) integer routing variables
- Formulation alternative with d<sup>q</sup> non-bifurcated commodities unattractive
- IP traffic results in assymmetric demand matrix:
  - symmetric routing not possible
  - asymmetric routing formulation
  - Multi-hop networks require 2-layer formulation
  - Wavelength assignment introduces a new aspect of optical network design
    - Survivability concepts have to be added



Martin Grötsche

## Contents

- 1. How it began: My Telecom Involvement
- 2. Telecommunication: The General Problem
- 3. The Problem Hierarchy: Cell Phones and Mathematics
- 4. The Problem Hierarchy: Network Components and Math
- 5. Network Design: Tasks to be solved

Addressing Special Issues:

- 6. Frequency Assignment in GSM
- 7. The UMTS Radio Interface
- 8. Locating the Nodes of a Network
- 9. Balancing the Load of Signaling Transfer Points
- 10. Integrated Topology, Capacity, and Routing Optimization as well as Survivability Planning
- 11. Planning IP Networks
- 12. Optical Networks
- 13. Summary and Future

Grötschel

## Summary

Telecommunication Problems such as

- Frequency Assignment
- Locating the Nodes of a Network Optimally
- Balancing the Load of Signaling Transfer Points
- Integrated Topology, Capacity, and Routing Optimization as well as Survivability Planning
- Planning IP Networks
- Optical Network Design
- and many others



Grötsche

can be succesfully attacked with optimization techniques.

## Summary

The mathematical programming approach

- Helps understanding the problems arising
- Makes much faster and more reliable planning possible
- Allows considering variations and scenario analysis
- Allows the comparison of different technologies
- Yields feasible solutions
- Produces much cheaper solutions than traditional planning techniques
  - Helps evaluating the quality of a network.

There is still a lot to be done, e.g., for the really important problems, optimal solutions are way out of reach!

Grötsche

#### **Integrating Variable Multimedia Services**



## **The Mathematical Challenges**

- Finding the right ballance between flexibility and controlability of future networks
- Controlling such a flexible network
- Handling the huge complexity
- Integrating new services easily
- Guaranteeing quality



Martin Grötschel

- Finding appropriate Mathematical Models
  - Finding appropriate solution techniques (exact, approximate, interactive, quality guaranteed)

#### The AT&T to at&t story







Martin Grötschel



#### Combinatorial Optimization in Telecommunication CO@W Berlin





Martin Grötschel

- Institut f
  ür Mathematik, Technische Universit
  ät Berlin (TUB)
- DFG-Forschungszentrum "Mathematik für Schlüsseltechnologien" (MATHEON)
- Konrad-Zuse-Zentrum f
  ür Informationstechnik Berlin (ZIB)

groetschel@zib.de h

http://www.zib.de/groetschel