

Verkehrsoptimierung: Umlaufplanung & Dienstplanung

TU Berlin
Summer Semester 2012
Lecture on June 11, 2012

Ralf Borndörfer & Martin Grötschel
ZIB, TU, and MATHEON, Berlin



Ralf Borndörfer

- DFG Research Center MATHEON "Mathematics for key technologies"
- Konrad-Zuse-Zentrum für Informationstechnik Berlin (ZIB)
- Löbel, Borndörfer & Weider GbR (LBW)

borndoerfer@zib.de

<http://www.zib.de/borndoerfer>

Gliederung

- Verkehrsoptimierung: ein kurzer Überblick
- Umlaufplanung
- Dienstplanung
- Integrierte Umlauf- und Dienstplanung
- Einige Ergebnisse



Gliederung

- **Verkehrsoptimierung: ein kurzer Überblick**
- Umlaufplanung
- Dienstplanung
- Integrierte Umlauf- und Dienstplanung
- Einige Ergebnisse



Planungsprozess im ÖPNV

Angebotsplanung

Line network map of Potsdam (Linienetz Stadtverkehr Potsdam).
 Detailed map of a city center area with street names like Westliche Str., Komplatz, Ruhstr., Mauerf. Str., Höherwall, and Klobitz.
 Bus route information for BUS 690: S Babelsberg -> Am Stern, Johannes-Kepler-Platz.
 Tariff information for Potsdam and Umland (ohne Stadt Berlin) as of 1.4.2004.
 Tariff information for Potsdam and Umland (mit Stadt Potsdam) as of 1.4.2004.

Operative Planung

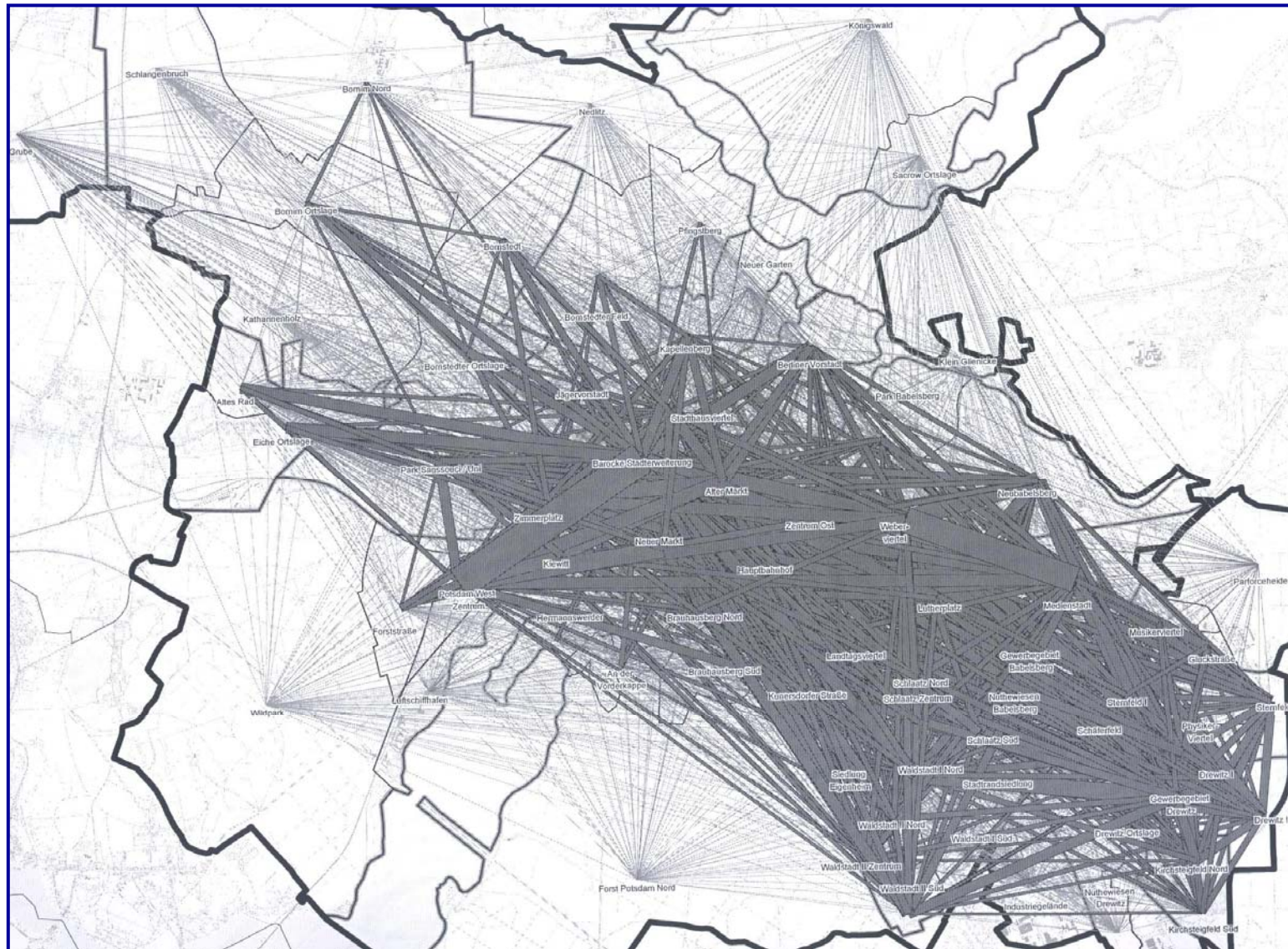
Operative planning software interface showing various views: route maps, timetables, and data tables.
 A detailed data table showing operational data for various routes and times. The table includes columns for Zug (Train), Li. (Line), Uml. (Turn), Soll. (Planned), Soll-Fzg (Planned Vehicles), Soll-Z... (Planned Stops), Ist-Fzg (Actual Vehicles), R... (Reserve), and Ist-Zusi (Actual Status).
 The table contains multiple rows of data, with some cells highlighted in yellow and red.

| Zug | Li. | Uml. | Soll. | Soll-Fzg | Soll-Z... | Ist-Fzg | R... | Ist-Zusi |
|------|-----|------|-------|----------|-----------|---------|------|----------|
| 7255 | S2 | 217 | 18 | 423 221 | 11:48 | 423 221 | 0 | 1B |
| 7255 | S2 | 227 | 28 | 423 058 | 11:48 | 423 058 | 0 | 2B |
| 7555 | S5 | 507 | 18 | 423 365 | 11:51 | 423 365 | 0 | 1B |
| 7555 | S5 | 508 | 28 | 423 219 | 11:51 | 423 219 | 0 | 2B |
| 7155 | S1 | 127 | 28 | 423 159 | 11:53 | 423 159 | 0 | 2B |
| 7855 | S8 | 822 | 18 | 423 288 | 11:55 | 423 288 | 0 | 1B |
| 7855 | S8 | 823 | 28 | 423 148 | 11:55 | 423 148 | 0 | 2B |
| 7455 | S4 | 408 | 18 | 423 318 | 11:58 | 423 318 | 0 | 1B |
| 7455 | S4 | 409 | 28 | 423 282 | 11:58 | 423 282 | 0 | 2B |
| 7755 | S7 | 714 | 18 | 423 269 | 12:02 | 423 269 | 0 | 1B |
| 7755 | S7 | 713 | 28 | 423 169 | 12:02 | 423 169 | 0 | 2B |
| 7655 | S6 | 602 | 18 | 423 225 | 12:04 | 423 225 | 0 | 1B |
| 7655 | S6 | 601 | 28 | 423 155 | 12:04 | 423 155 | 0 | 1A |
| 7257 | S2 | 226 | 18 | 423 115 | 12:08 | | | |
| 7257 | S2 | 205 | 28 | 423 183 | 12:08 | | | |
| 7557 | S5 | 518 | 18 | 423 235 | 12:11 | | | |
| 7557 | S5 | 519 | 28 | 423 106 | 12:11 | | | |
| 7157 | S1 | 115 | 18 | 423 079 | 12:13 | | | |
| 7157 | S1 | 114 | 28 | 423 267 | 12:13 | | | |
| 7857 | S8 | 820 | 18 | 423 174 | 12:15 | | | |
| 7857 | S8 | 821 | 28 | 423 285 | 12:15 | | | |
| 7457 | S4 | 412 | 18 | 423 281 | 12:18 | | | |
| 7457 | S4 | 413 | 28 | 423 264 | 12:18 | | | |
| 7757 | S7 | 708 | 18 | 423 167 | 12:22 | | | |
| 7757 | S7 | 707 | 28 | 423 075 | 12:22 | | | |
| 757 | S5 | 515 | 18 | 423 168 | 12:24 | | | |

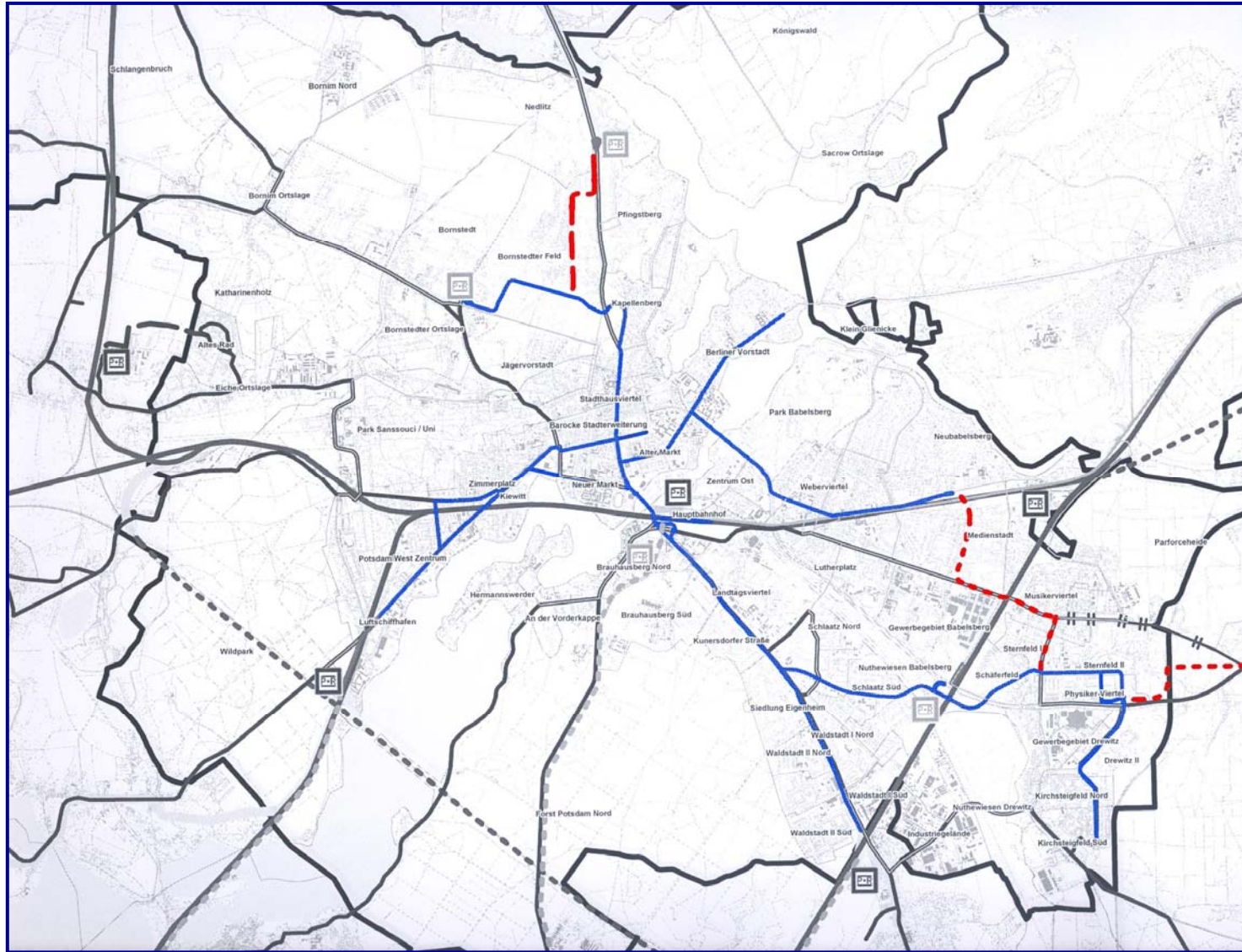
Betriebsleitung



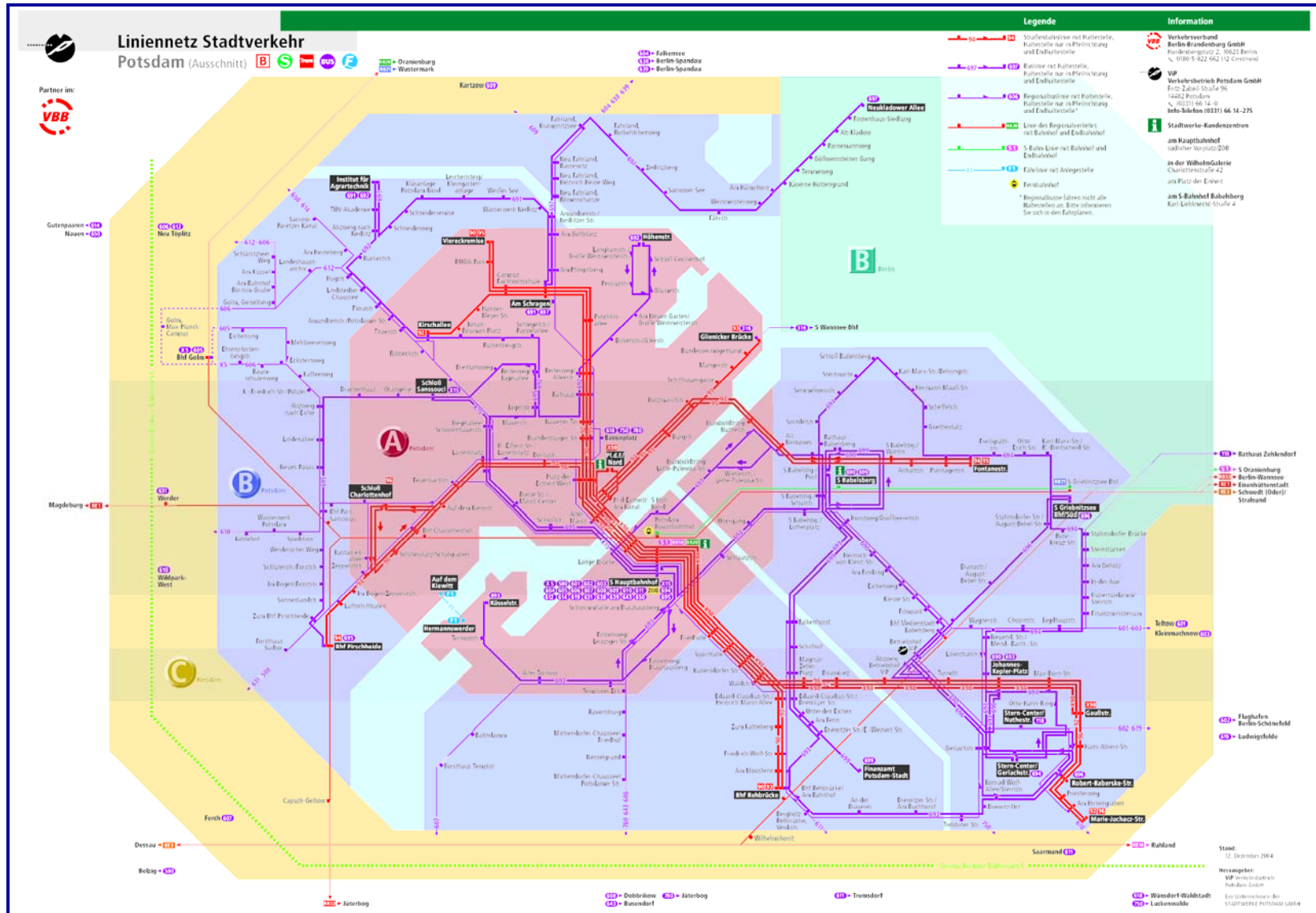
Nachfrage



Netzentwurf



Linien



Fahrplan

BUS 690 S Babelsberg \leftrightarrow Am Stern, Johannes-Kepler-Platz

ViP

BUS 690



| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| S1 | 94 | 95 | 96 | 97 | 98 | 99 | 100 | 101 | 102 | 103 | 104 | 105 | 106 | 107 | 108 | 109 | 110 | 111 | 112 | 113 | 114 | 115 | 116 | 117 | 118 | 119 | 120 |
| 94 | 95 | 96 | 97 | 98 | 99 | 100 | 101 | 102 | 103 | 104 | 105 | 106 | 107 | 108 | 109 | 110 | 111 | 112 | 113 | 114 | 115 | 116 | 117 | 118 | 119 | 120 | |
| 95 | 96 | 97 | 98 | 99 | 100 | 101 | 102 | 103 | 104 | 105 | 106 | 107 | 108 | 109 | 110 | 111 | 112 | 113 | 114 | 115 | 116 | 117 | 118 | 119 | 120 | | |
| 96 | 97 | 98 | 99 | 100 | 101 | 102 | 103 | 104 | 105 | 106 | 107 | 108 | 109 | 110 | 111 | 112 | 113 | 114 | 115 | 116 | 117 | 118 | 119 | 120 | | | |
| 97 | 98 | 99 | 100 | 101 | 102 | 103 | 104 | 105 | 106 | 107 | 108 | 109 | 110 | 111 | 112 | 113 | 114 | 115 | 116 | 117 | 118 | 119 | 120 | | | | |

BUS 690 täglich

| Verkehrshinweise | 8 | 20 | 8 | 20 | | | | | |
|----------------------------|----|------|------|-------|----------------------------|----|------|------|-------|
| S Babelsberg/Post | ab | 5.27 | 5.47 | 21.27 | Johannes-Kepler-Platz | ab | 5.02 | 5.22 | 20.42 |
| Horstweg/Großbeerenstr. | | 5.29 | 5.49 | 21.29 | Betriebshof ViP | | 5.05 | 5.25 | 20.45 |
| Heinrich-von-Kleist-Str. | | 5.31 | 5.51 | 21.31 | Bhf Medienstadt Babelsberg | | 5.08 | 5.28 | 20.48 |
| Am Findling | | 5.32 | 5.52 | 21.32 | Bhf Medienstadt Babelsberg | | 5.09 | 5.29 | 20.49 |
| Eichenweg | | 5.32 | 5.52 | 21.32 | Filmpark | | 5.10 | 5.30 | 20.50 |
| Kleine Str. | | 5.33 | 5.53 | 21.33 | Kleine Str. | | 5.11 | 5.31 | 20.51 |
| Filmpark | | 5.35 | 5.55 | 21.35 | Eichenweg | | 5.12 | 5.32 | 20.52 |
| Bhf Medienstadt Babelsberg | | 5.36 | 5.56 | 21.36 | Am Findling | | 5.13 | 5.33 | 20.53 |
| Bhf Medienstadt Babelsberg | | 5.36 | 5.56 | 21.36 | Heinrich-von-Kleist-Str. | | 5.14 | 5.34 | 20.54 |
| Betriebshof ViP | | 5.38 | 5.58 | 21.38 | Horstweg/Großbeerenstr. | | 5.15 | 5.35 | 20.55 |
| Abzweig Betriebshof ViP | | 5.38 | 5.58 | 21.38 | S Babelsberg/Schulstr. | | 5.17 | 5.37 | 20.57 |
| Johannes-Kepler-Platz | an | 5.42 | 6.02 | 21.42 | Rathaus Babelsberg | | 5.19 | 5.39 | 20.59 |
| | | | | | S Babelsberg/Post | an | 5.20 | 5.40 | 21.00 |

8 Montag - Freitag



Preise

Weitere Fahrausweise erhalten Sie in unseren Bussen und Straßenbahnen
an den Automaten im ersten Wagenzug.

Tarif ab 1.4.2004 für Potsdam und Umland (ohne Stadt Berlin)

| Tarfbereich | A B B C EUR | EUR | A B C EUR |
|--|---|------|--------------|
| Bartarif | | | |
| Einzelfahrausweis | | | |
| Kurzstrecke Potsdam | Regeltarif | 1,00 | |
| (6 Haltestellen, Fährte) | Ermäßigungstarif* | 0,80 | |
| Einzelfahrt (60 Minuten) | Regeltarif | 1,40 | 2,20 |
| | Ermäßigungstarif* | 1,10 | 1,70 |
| Tageskarte | | | |
| Karte für 1 Person | Regeltarif | 3,20 | 5,00 |
| | Ermäßigungstarif* | 2,40 | 3,80 |
| Kleingruppenkarte | (bis max. 5 Personen) | 8,10 | 13,00 |
| Schülergruppenkarte | (ab 10 Pers./Preis p. P/bis Klassenst. 8) | 1,60 | 2,50 |
| Anschlussfahrausweis (60 Minuten) | | 1,10 | |
| (Ergänzung für fehlenden Tarfbereich) | | | |

Tarif ab 1.4.2004 für Berlin und Umland (mit Stadt Potsdam)

| Tarfbereich | A R EUR | R C EUR | A B C EUR |
|---|---|------------|--------------|
| Bartarif | | | |
| Einzelfahrausweis | | | |
| Kurzstrecke Berlin | Regeltarif | 1,20 | |
| | Ermäßigungstarif* | 1,00 | |
| Einzelfahrt (120 Minuten) | Regeltarif | 2,00 | 2,25 2,60 |
| | Ermäßigungstarif* | 1,40 | 1,55 1,90 |
| Tageskarte | | | |
| Karte für 1 Person | Regeltarif | 5,60 | 5,70 6,00 |
| | Ermäßigungstarif* | 4,20 | 4,30 4,50 |
| Kleingruppenkarte | (bis max. 5 Personen) | 14,00 | 14,30 15,00 |
| Schülergruppenkarte | (ab 10 Pers./Preis p. P/bis Klassenst. 8) | 2,20 | 3,30 |
| Anschlussfahrausweis (120 Minuten) | | 1,30 | |

Für Potsdam und die anderen kreisfreien Städte sowie Berlin sind spezifische Tarfbereiche definiert, die sich in unterschiedliche Teilbereiche A, B und C gliedern.

Für Potsdam: **A** engeres Stadtgebiet

B übriges Stadtgebiet¹⁾

C Umland-Gebiet

Für Berlin: **A** City-Bereich Berlin
einschl. innerer S-Bahnring

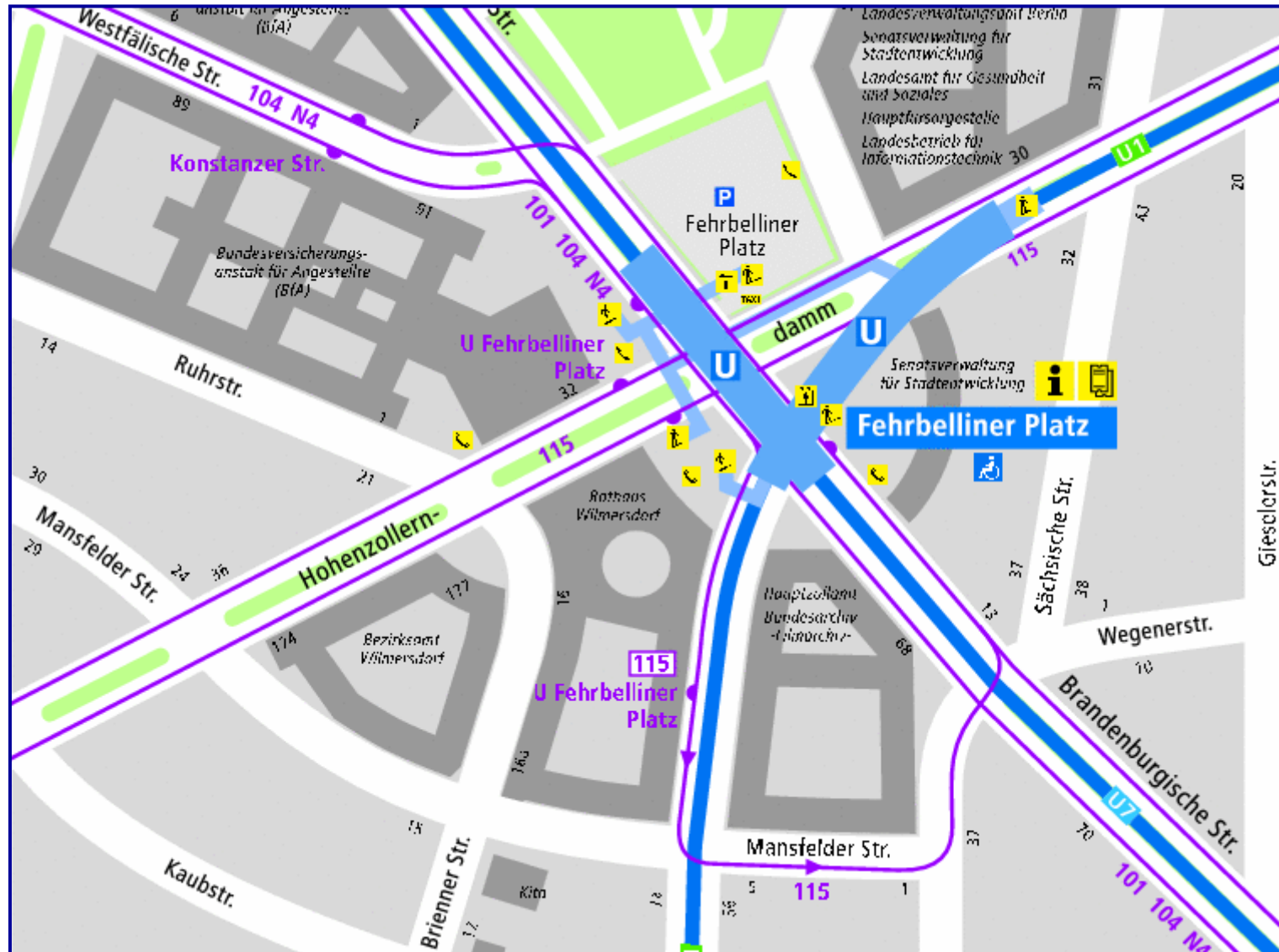
R übriges Stadtgebiet

C Berlin Umland-Gebiet Berlin
einschl. Stadt Potsdam bis ca. 15 km ab Stadtgrenze

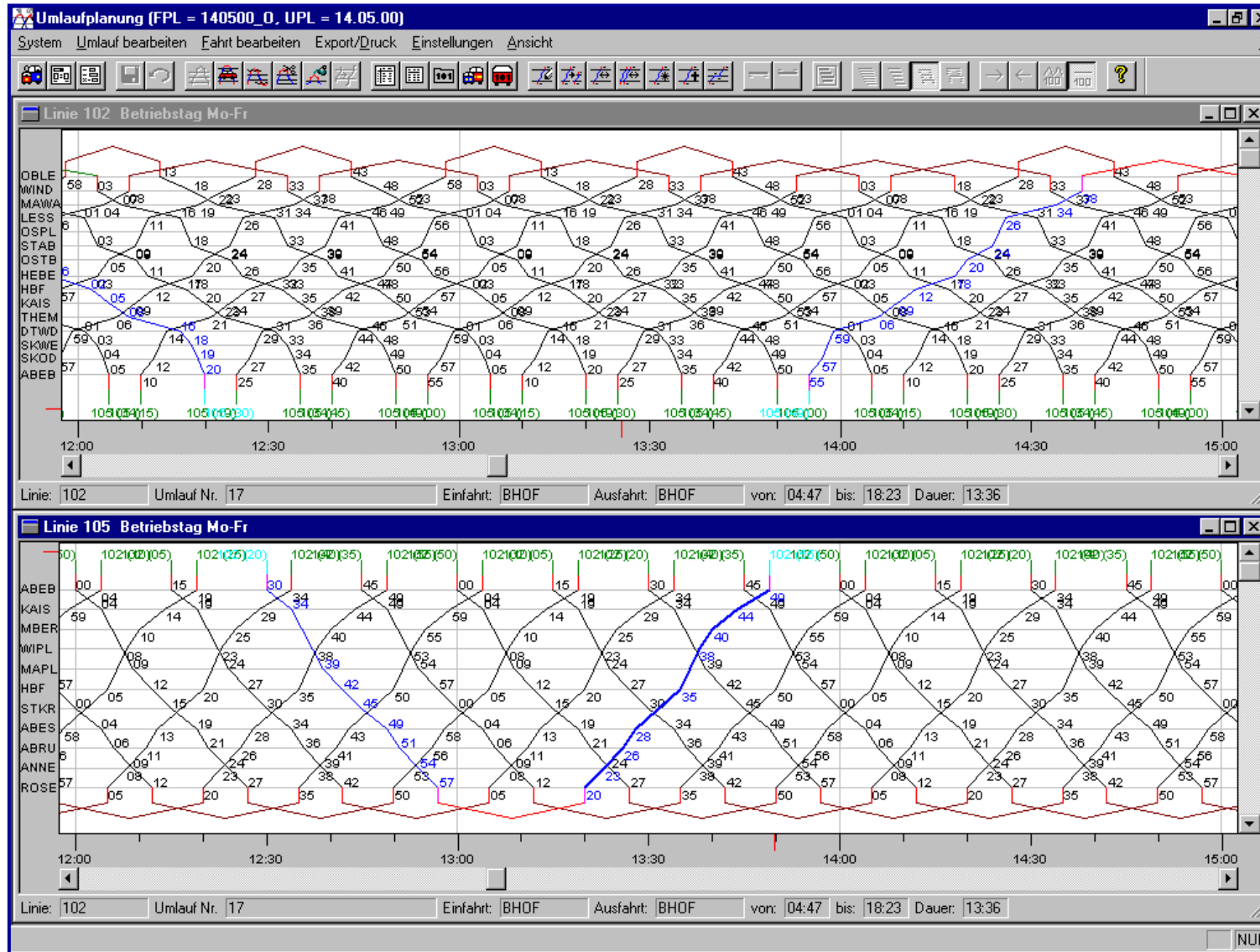
¹⁾ außer Ortsteile Groß Glienicke, Marquardt, Satz Korn, Fahlrand, Neu Fahlrand, Paaren, Uetz und Golm



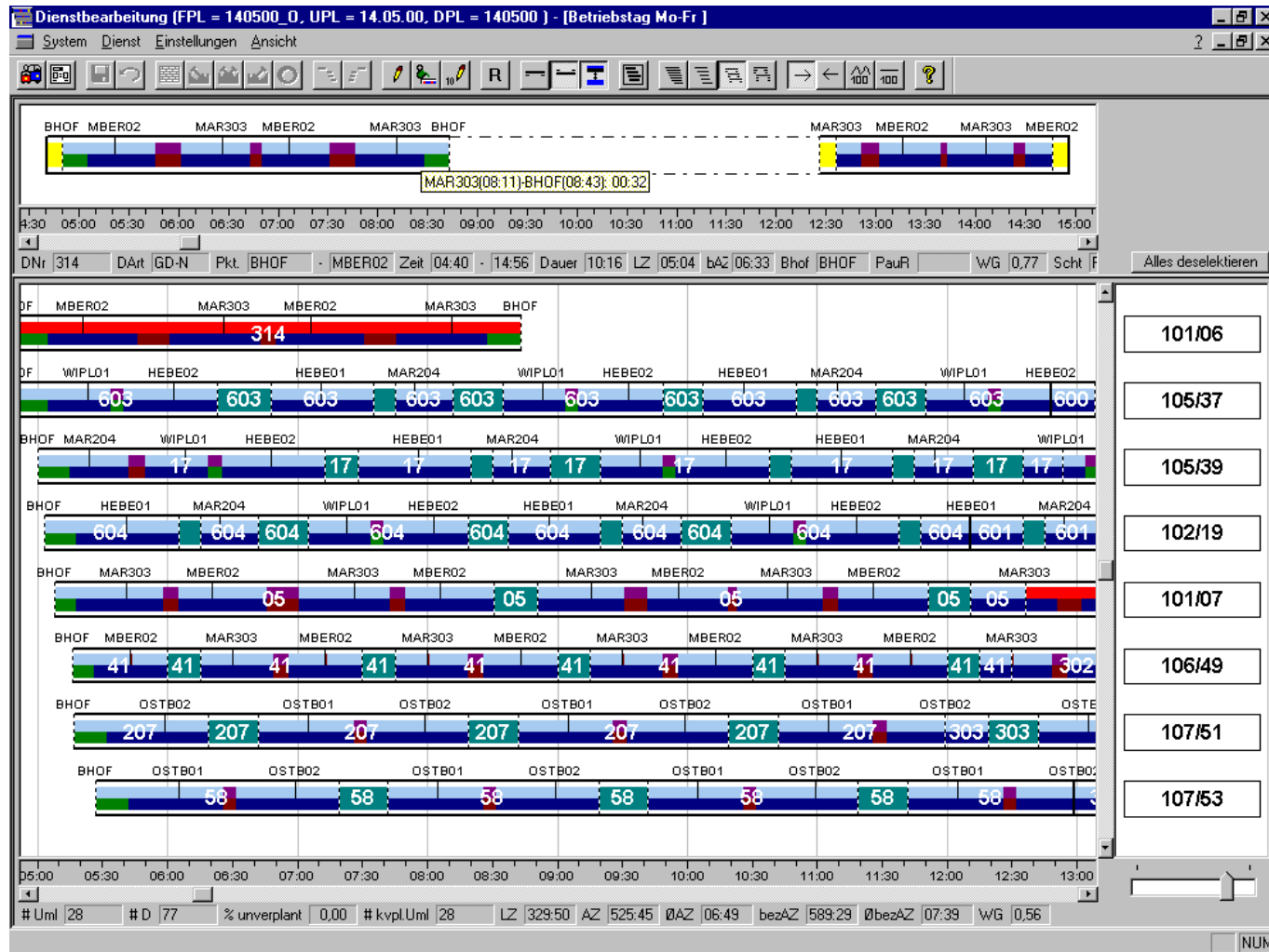
Anschlüsse



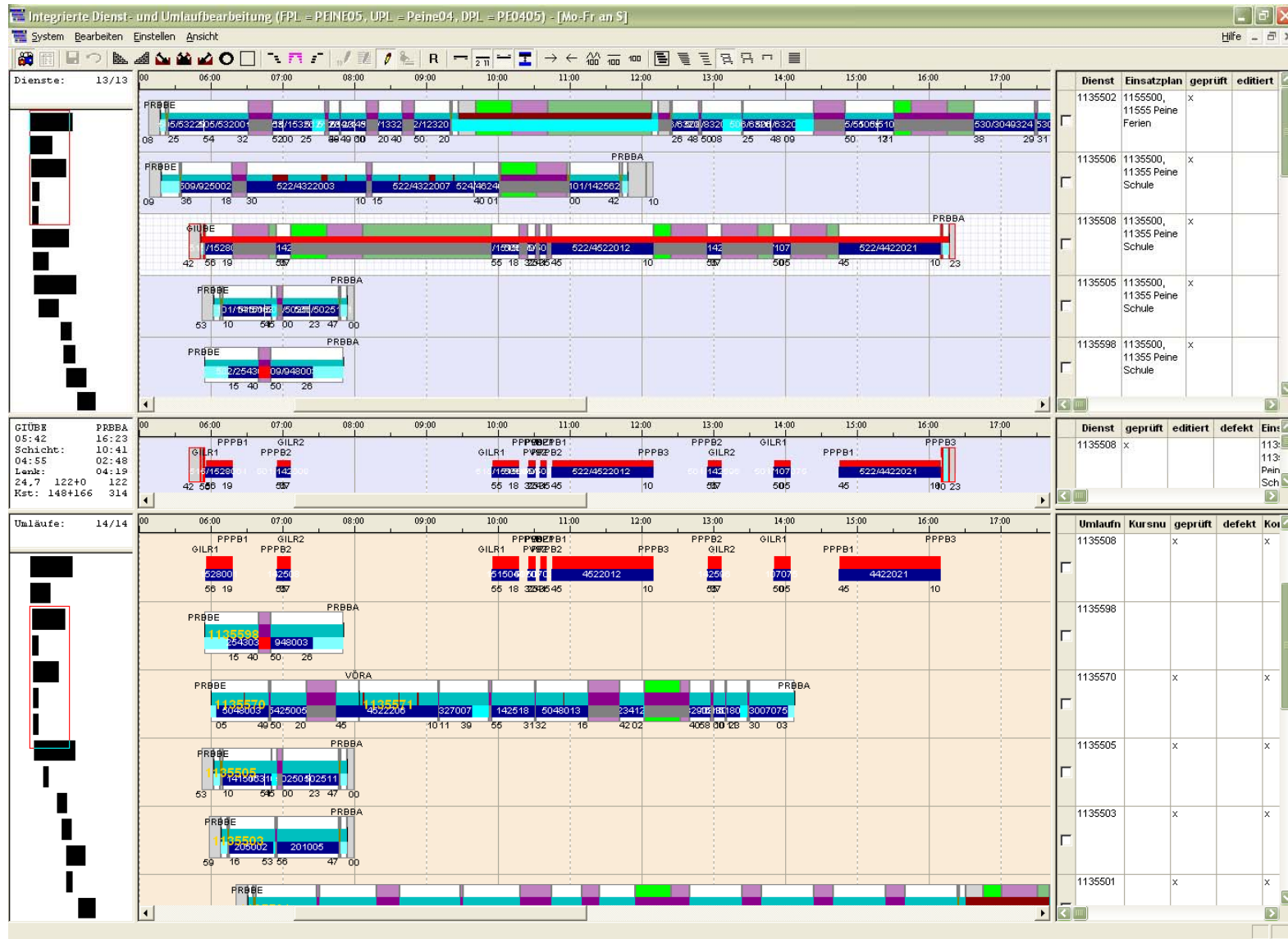
Umläufe



Dienste



Integrierte Umlauf- und Dienstplanung



Dienstreihenfolge

Einsatzplanmatrix

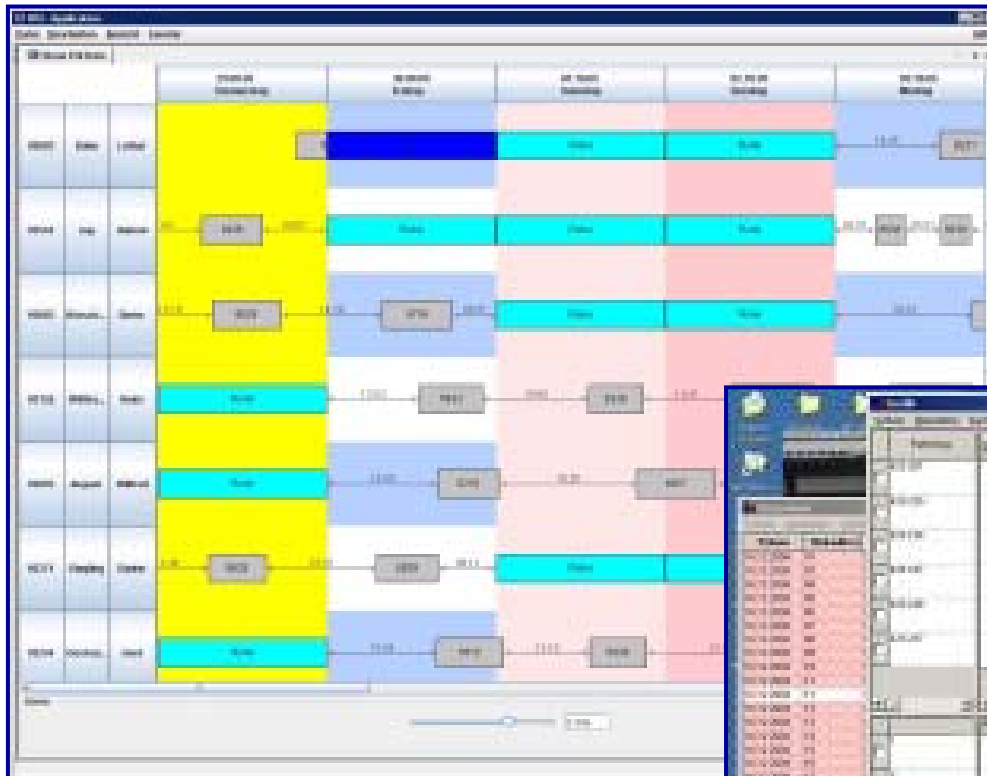
System Auswahl Bearbeiten Schema Ansicht Einstellungen Auswertungen Hilfe

Plan 1

| | Do 01.06.00 So 140500 | Fr 02.06.00 Mo-Fr 140500 | Sa 03.06.00 Sa 140500 | So 04.06.00 So 140500 | Mo 05.06.00 Mo-Fr 140500 | Di 06.06.00 Mo-Fr 140500 | Mi 07.06.00 Mo-Fr 140500 | Do 08.06.00 Mo-Fr 140500 | Fr 09.06.00 Mo-Fr 140500 | Sa 10.06.00 Sa 140500 | So 11.06.00 So 140500 | Mo 12.06.00 So 140500 | Di 13.06.00 Mo-Fr 140500 | Mi 14.06.00 Mo-Fr 140500 |
|----|--------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| 1 | 704 | R | | Free | Free | 86 | 704 | 307 | 86 | E Free | | Free | Free | 705 |
| 2 | 307 | 86 | E Free | | Free | Free | 705 | 303 | 705 | E Free | 52 | 704 | Free | Free |
| 3 | 303 | 705 | E Free | 52 | 704 | Free | Free | R | 704 | 35 | 64 | 309 | 701 | Free |
| 4 | R | 704 | 35 | 64 | 309 | 701 | Free | Free | 309 | 04 | 35 | 311 | 705 | 306 |
| 5 | Free | 309 | 04 | 35 | 311 | 705 | 306 | Free | Free | 42 | 16 | 304 | 704 | 303 |
| 6 | Free | Free | 42 | 16 | 304 | 704 | 303 | | Free | Free | | 307 | 309 | 701 |
| 7 | | Free | Free | | 307 | 309 | 701 | 705 | R | Free | Free | 306 | 311 | 309 |
| 8 | 705 | R | Free | Free | 306 | 311 | 309 | 701 | 311 | | Free | Free | 304 | 311 |
| 9 | 701 | 311 | | Free | Free | 304 | 311 | 309 | 306 | R | 65 | Free | Free | 304 |
| 10 | 309 | 306 | R | 65 | Free | Free | 304 | 311 | 304 | 24 | 700 | 303 | Free | Free |
| 11 | 311 | 304 | 24 | 700 | 303 | Free | Free | 314 | 314 | 06 | 703 | 701 | 307 | Free |
| 12 | 314 | 314 | 06 | 703 | 701 | 307 | Free | Free | 303 | 23 | 702 | 314 | 306 | 307 |
| 13 | Free | 303 | 23 | 702 | 314 | 306 | 307 | Free | Free | 05 | 701 | 18 | 59 | 59 |
| 14 | Free | Free | 05 | 701 | 18 | 59 | 59 | 59 | Free | Free | 05 | 59 | 314 | 314 |
| 15 | 59 | Free | Free | 05 | 59 | 314 | 314 | 304 | 72 | Free | Free | 72 | 18 | 18 |
| 16 | 304 | 72 | Free | Free | 72 | 18 | 18 | 18 | 59 | | Free | Free | 72 | 72 |
| 17 | 18 | 59 | | Free | Free | 72 | 72 | 72 | 18 | 17 | | 705 | 303 | 86 |

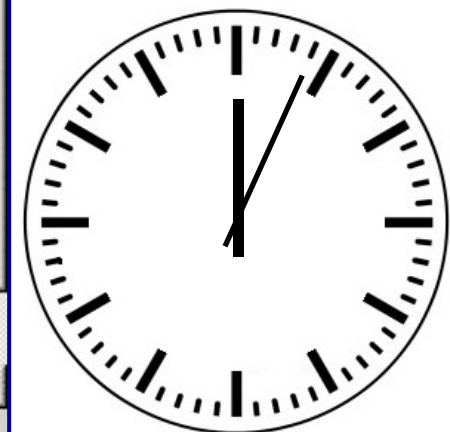


Fahrzeug- und Personaldisposition



Betriebsleitung

| Zugf... | Li... | Uml... | Soll... | Soll-Fzg | Soll-Z... | Ist-Fzg | R... | Ist-Zusi | t ▲ |
|---------|-------|--------|---------|----------|-----------|---------|------|----------|-----|
| 7255 | S2 | 217 | 1B | 423 221 | 11:48 | 423 221 | 0 | 1B | |
| 7255 | S2 | 227 | 2B | 423 058 | 11:48 | 423 058 | 0 | 2B | |
| 7555 | S5 | 507 | 1B | 423 365 | 11:51 | 423 365 | 0 | 1B | |
| 7555 | S5 | 508 | 2B | 423 219 | 11:51 | 423 219 | 0 | 2B | |
| 7155 | S1 | 128 | 1B | 423 182 | 11:53 | 423 182 | 0 | 1B | |
| 7155 | S1 | 127 | 2B | 423 159 | 11:53 | 423 159 | 0 | 2B | |
| 7855 | S8 | 822 | 1B | 423 288 | 11:55 | 423 288 | 0 | 1B | |
| 7855 | S8 | 823 | 2B | 423 148 | 11:55 | 423 148 | 0 | 2B | |
| 7455 | S4 | 408 | 1B | 423 318 | 11:58 | 423 318 | 0 | 1B | |
| 7455 | S4 | 409 | 2B | 423 282 | 11:58 | 423 282 | 0 | 2B | |
| 7755 | S7 | 714 | 1B | 423 269 | 12:02 | 423 269 | +4 | 1B | |
| 7755 | S7 | 713 | 2B | 423 169 | 12:02 | 423 169 | +4 | 2B | |
| 7655 | S6 | 602 | 1B | 423 225 | 12:04 | | 0 | | |
| 7655 | S6 | 601 | 2B | 423 155 | 12:04 | 423 155 | 0 | 1A | |
| 7257 | S2 | 226 | 1B | 423 115 | 12:08 | | | | |
| 7257 | S2 | 205 | 2B | 423 183 | 12:08 | | | | |
| 7557 | S5 | 518 | 1B | 423 235 | 12:11 | | | | |
| 7557 | S5 | 519 | 2B | 423 106 | 12:11 | | | | |
| 7157 | S1 | 115 | 1B | 423 079 | 12:13 | | | | |
| 7157 | S1 | 114 | 2B | 423 267 | 12:13 | | | | |
| 7857 | S8 | 820 | 1B | 423 174 | 12:15 | | | | |
| 7857 | S8 | 821 | 2B | 423 285 | 12:15 | | | | |
| 7457 | S4 | 412 | 1B | 423 281 | 12:18 | | | | |
| 7457 | S4 | 413 | 2B | 423 264 | 12:18 | | | | |
| 7757 | S7 | 708 | 1B | 423 167 | 12:22 | | | | |
| 7757 | S7 | 707 | 2B | 423 075 | 12:22 | | | | |
| 7657 | S6 | 615 | 1B | 423 066 | 12:24 | | | | |

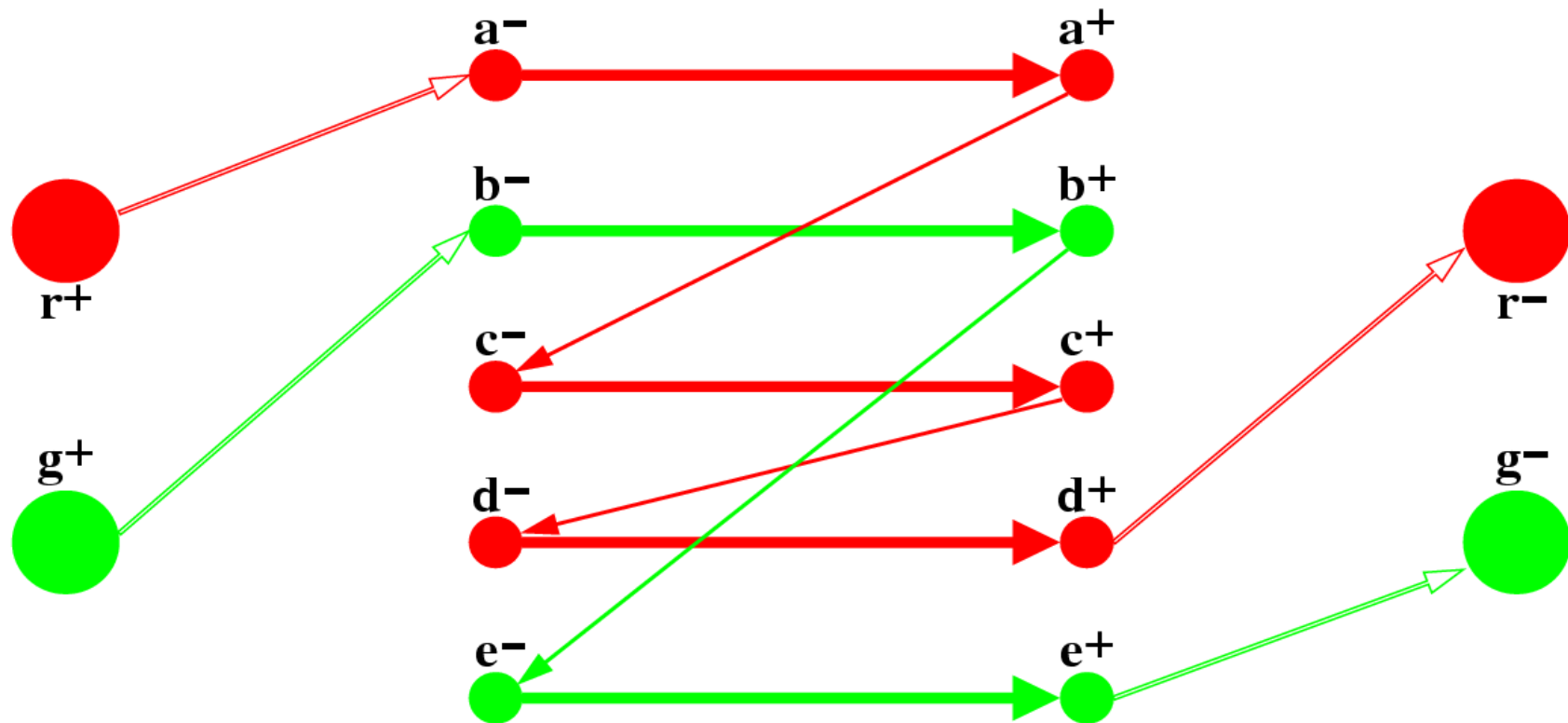


Gliederung

- Verkehrsoptimierung: ein kurzer Überblick
- **Umlaufplanung**
- Dienstplanung
- Integrierte Umlauf- und Dienstplanung
- Einige Ergebnisse



Umlaufplanung im ÖPNV



Ganzzahliges Programm

(Mehrgüterflussproblem)

$$\min \sum_d \sum_{ij} c_{ij}^d x_{ij}^d$$

$$\sum_i x_{ij}^d - \sum_k x_{jk}^d = 0 \quad \forall j, d \quad \text{Vehicle flow}$$

$$\sum_d \sum_i x_{ij}^d = 1 \quad \forall j \quad \text{Timetabled trips}$$

$$\sum_j x_{0j}^d \leq \kappa_d \quad \forall d \quad \text{Depot capacities}$$

$$x_{ij}^d \in \{0,1\} \quad \forall ij, d \quad \text{Deadhead trips}$$


- Lösungsansatz Lagrange-Relaxierung
 - Subproblem: unabhängige Minimalkostenflussprobleme
 - Subproblem: ein grosses Minimalkostenflussproblem



SPEC CINT2006 Benchmarks - Mozilla Firefox

http://www.spec.org/cpu2006/CINT2006/

SPEC CINT2006 Benchmarks



Standard Performance Evaluation Corporation

home benchmarks results contact site map site search help

Results

- Published Results
- Results Search
- OSG Fair Use Policy

Information

- CPU2006
- Documentation
 - Documentation Overview
 - Run & Reporting Rules
 - Readme1st
- FAQ

Press and Publications

- V1.0 Release
- V1.1 Release
- Related Publications

Order Benchmarks

- Order CPU2006

Resources

- Site Map
- Site Search
- Site Index
- Glossary
- Performance Links

CINT2006 (Integer Component of SPEC CPU2006):

| Benchmark | Language | Application Area | Brief Description |
|----------------|----------|--------------------------------|---|
| 400.perbench | C | Programming Language | Derived from Perl V5.8.7. The workload includes SpamAssassin, MHonArc (an email indexer), and specdiff (SPEC's tool that checks benchmark outputs). |
| 401.bzip2 | C | Compression | Julian Seward's bzip2 version 1.0.3, modified to do most work in memory, rather than doing I/O. |
| 403.gcc | C | C Compiler | Based on gcc Version 3.2, generates code for Opteron. |
| 429.mcf | C | Combinatorial Optimization | Vehicle scheduling. Uses a network simplex algorithm (which is also used in commercial products) to schedule public transport. |
| 445.gobmk | C | Artificial Intelligence: Go | Plays the game of Go, a simply described but deeply complex game. |
| 456.hmmer | C | Search Gene Sequence | Protein sequence analysis using profile hidden Markov models (profile HMMs) |
| 458.sjeng | C | Artificial Intelligence: chess | A highly-ranked chess program that also plays several chess variants. |
| 462.libquantum | C | Physics / Quantum Computing | Simulates a quantum computer, running Shor's polynomial-time factorization algorithm. |
| 464.h264ref | C | Video Compression | A reference implementation of H.264/AVC, encodes a videostream using 2 parameter sets. The H.264/AVC standard is expected to replace MPEG2 |
| 471.omnetpp | C++ | Discrete Event Simulation | Uses the OMNet++ discrete event simulator to model a large Ethernet campus network. |
| 473.astar | C++ | Path-finding Algorithms | Pathfinding library for 2D maps, including the well known A* algorithm. |
| 483.xalancbmk | C++ | XML Processing | A modified version of Xalan-C++, which transforms XML documents to other document types. |

Home - Contact - Site Map - Privacy - About SPEC

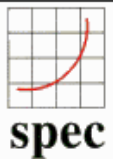
webmaster@spec.org
 Last updated: Thu Aug 24 00:44:00 EDT 2006
 Copyright 1995 - 2008 Standard Performance Evaluation Corporation
 URL: http://www.spec.org/cpu2006/CINT2006/index.html

Suchen: bench

http://www.spec.org/cpu2006/Docs/429.mcf.html

Now: Stark bewölkt, 5° C Mi: 7° C Do: 8° C

Entwicklung von Qualitätssoftware, die sogar zu Hardwaretests verwendet wird.



Standard Performance Evaluation Corporation

- home
- benchmarks
- results
- contact
- site map
- site search
- help

Results

- Published Results
- Flag Descriptions
- Results Search
- OSG Fair Use Policy

Information

- 181.mcf
- Documentation Overview
- Run & Reporting Rules
- FAQ
- Config File FAQ
- Technical Support
- Integer Benchmarks
- Floating Point Benchmarks
- Known Issues

Press and Publications

- Press Release
- Related Publications
- Simulating CPU2000

Order Benchmarks

- Order CPU2000

CINT2000 (Integer Component of SPEC CPU2000):

| Benchmark | Language | Category | Full Descriptions |
|----------------|----------|------------------------------------|-------------------|
| 164.gzip | C | Compression | HTML Text |
| 175.vpr | C | FPGA Circuit Placement and Routing | HTML Text |
| 176.gcc | C | C Programming Language Compiler | HTML Text |
| 181.mcf | C | Combinatorial Optimization | HTML Text |
| 186.craiy | C | Game Playing, Chess | HTML Text |
| 197.parser | C | Word Processing | HTML Text |
| 252.eon | C++ | Computer Visualization | HTML Text |
| 253.perlbnk | C | PERL Programming Language | HTML Text |
| 254.gap | C | Group Theory, Interpreter | HTML Text |
| 255.vortex | C | Object-oriented Database | HTML Text |
| 256.bzip2 | C | Compression | HTML Text |
| 300.twolf | C | Place and Route Simulator | HTML Text |

[Home](#) - [Contact](#) - [Site Map](#) - [Privacy](#) - [About SPEC](#)

webmaster@spec.org

Last updated: Fri Sep 26 11:10:06 EDT 2003

Copyright 1995 - 2008 Standard Performance Evaluation Corporation

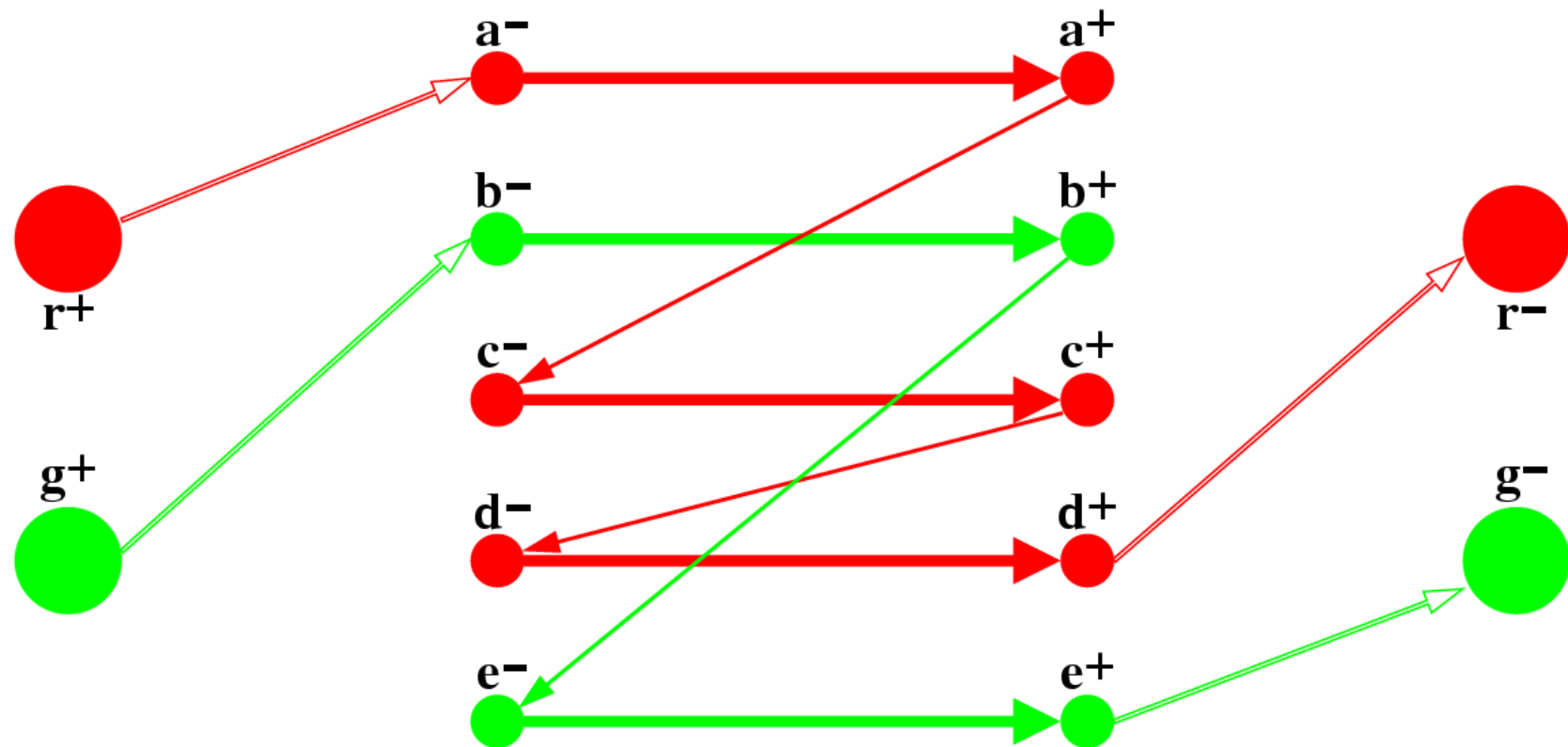
URL: <http://www.spec.org/cpu2000/CINT2000/index.html>

MCF Literatur

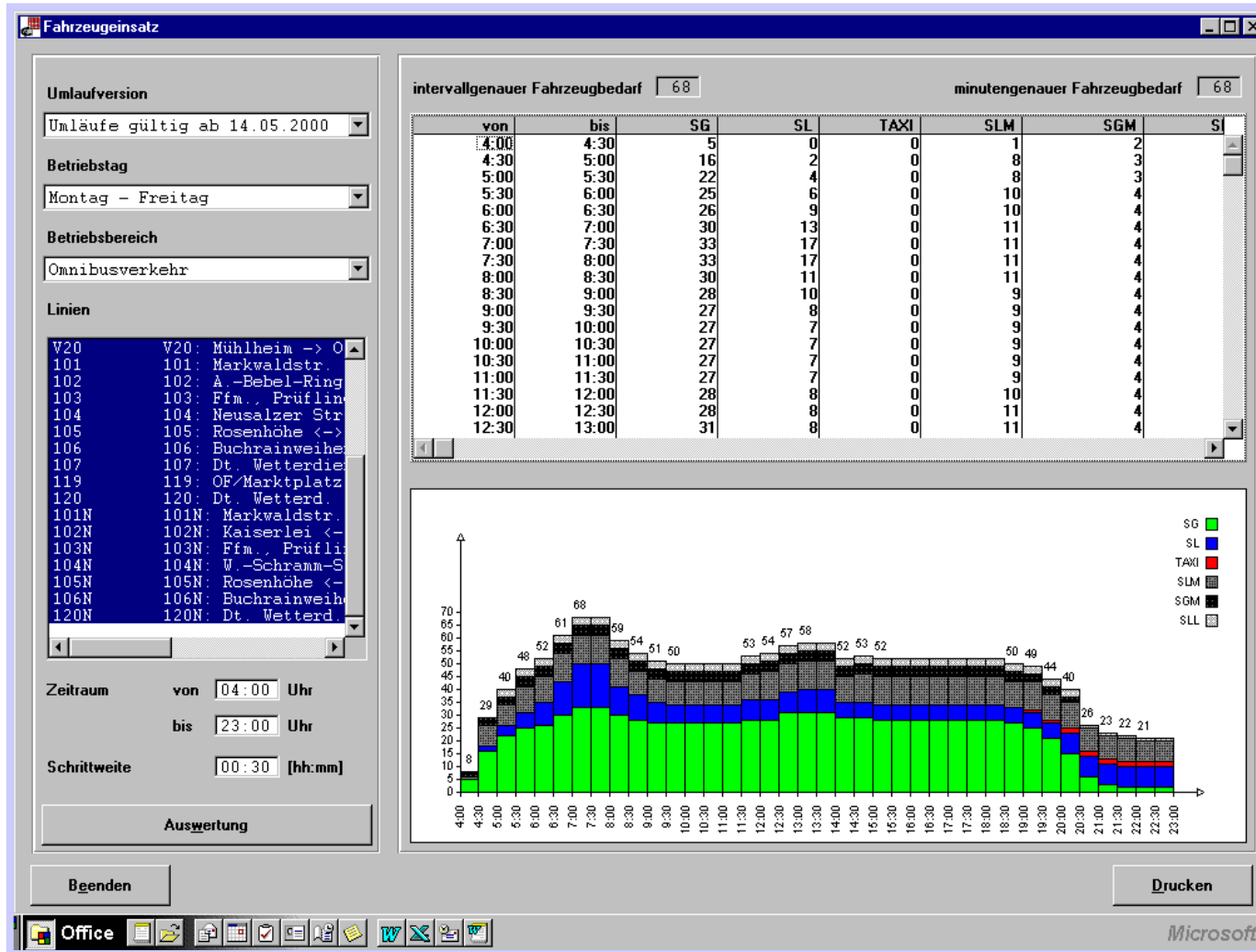
- Marty Itzkowitz, Brian J. N. Wylie, Christopher Aoki, and Nicolai Kosche: [Memory Profiling using Hardware Counters](#)
- ARCTiC Labs: [181.mcf - Datasets profile vs. Reference Dataset](#)
- Joshua J. Yi, Resit Sendag, and David J. Lilja: [Increasing Instruction-Level Parallelism with Instruction Precomputation](#)
- Jinwoo Kim, Weng-Fai Wong, and Drishna V. Palem: [Data Prefetching using Off-line Learning](#)
- Resit Sendag, Peng-fei Chuang, and David J. Lilja: [Address Correlation: Exceeding the Limits of Locality](#)
- Kim M. Hazelwood, Mark C. Toburen, and Thomas M. Conte: [A Case for Exploiting Memory-Access Persistence](#)
- Ian R. Bratt, Alex Settle, and Daniel A. Connors: [Predicate-Based Transformations to Eliminate Control and Data-Irrelevant Cache Misses](#)
- Andreas Stiller: Hammer, Nägel und Köpfe: Das Microprocessor Forum 2001, c't 23/2001, S. 28



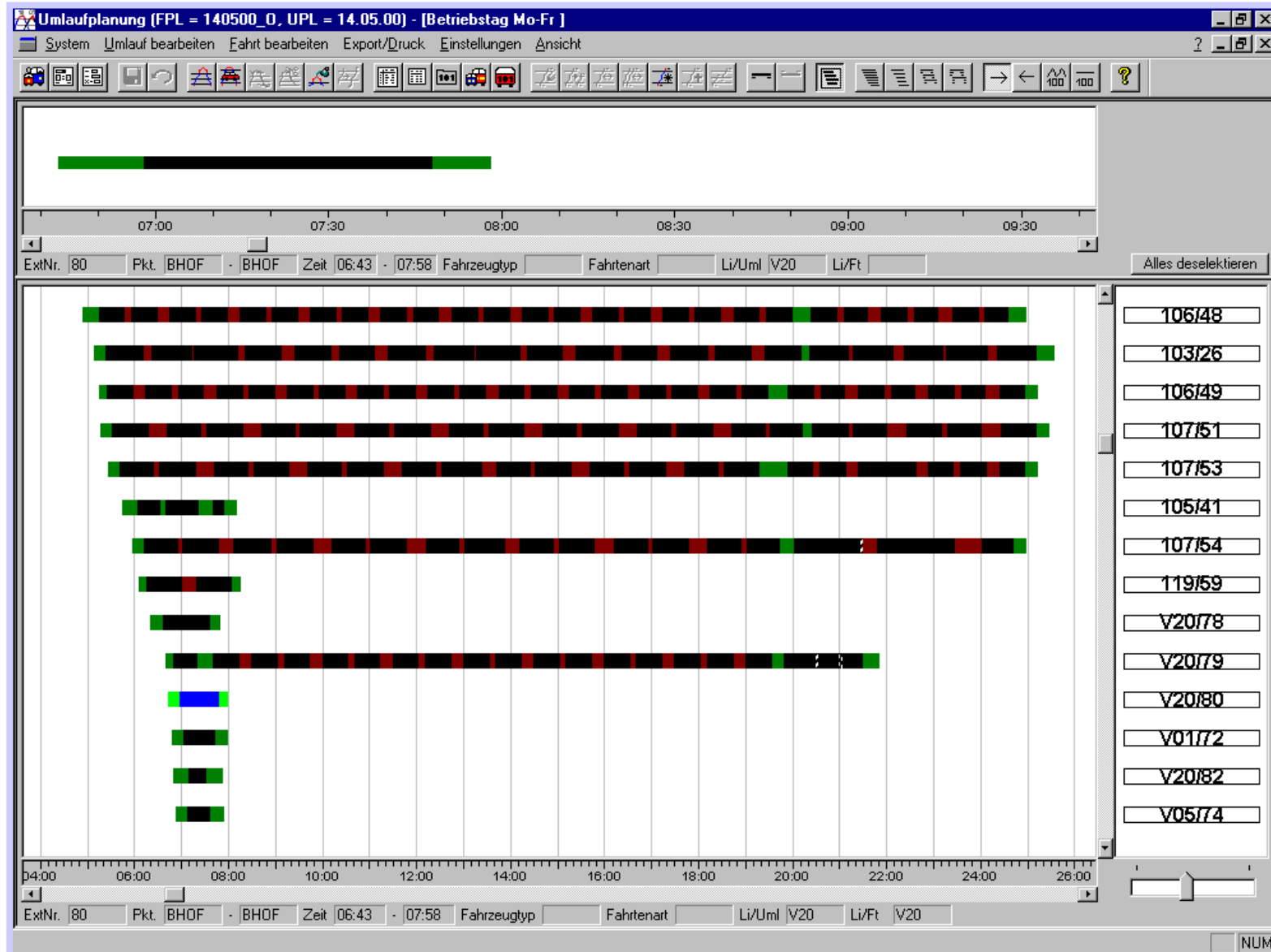
Lösung mit Lagrange-Relaxierung



Fahrzeugeinsatz



several vehicle schedules

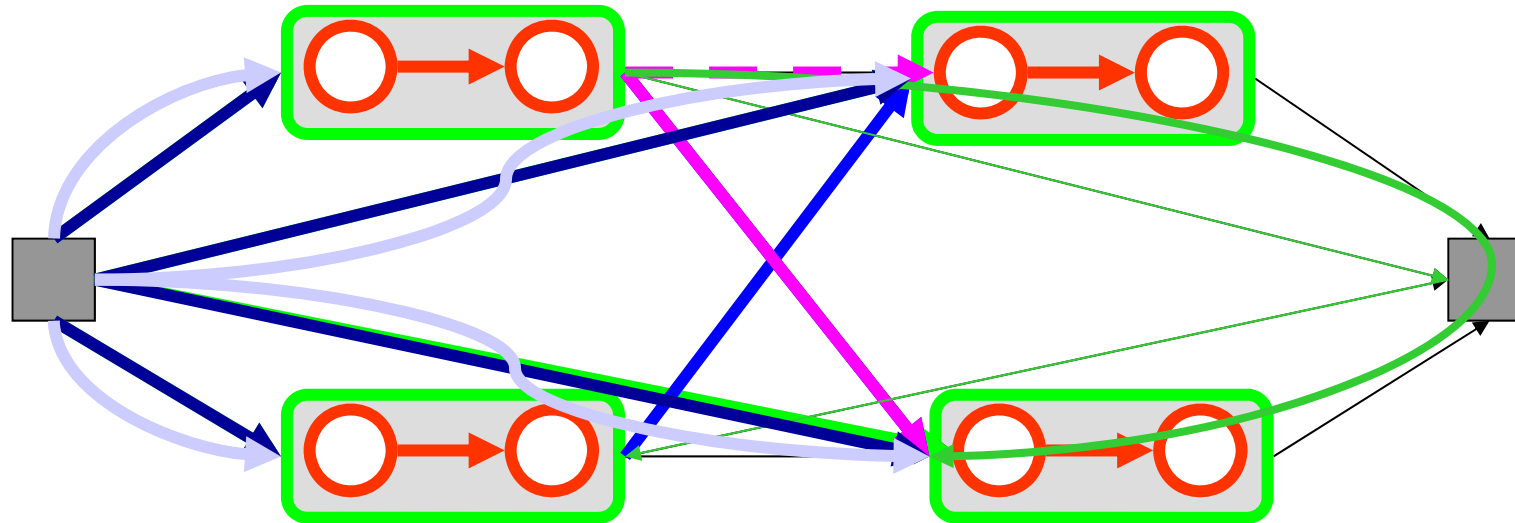


Szenarien

| | <i>BVG</i> | <i>HHA</i> | <i>VHH</i> |
|-----------------|------------|------------|------------|
| Betriebshöfe | 10 | 14 | 10 |
| Fahrzeugtypen | 44 | 40 | 19 |
| Fahrgastfahrten | 25.000 | 16.000 | 5.500 |
| Leerfahrten | 70.000.000 | 15.100.000 | 10.000.000 |



Behandlung zusätzlicher Restriktionen durch Strafkosten

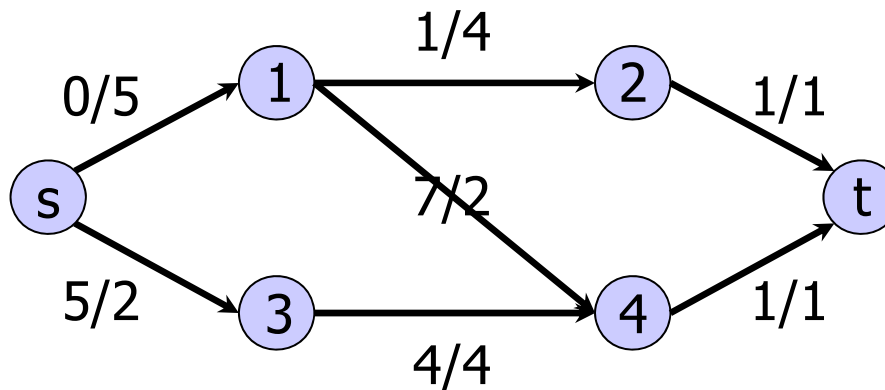


Die Kosten sind in der Regel: **Wichtige Übergänge**

- Definition und Kosten von Fahrtenverknüpfungen
 - Punkt-, zeit- oder fahrtgenaue Steuerung
 - Fahrzeuge, Linien-, Fahrtartwechsel, Wenden, etc.
 - Ein-Aussetzfahrten-, Leerfahrtenerzeugung
- Depotkapazitäten

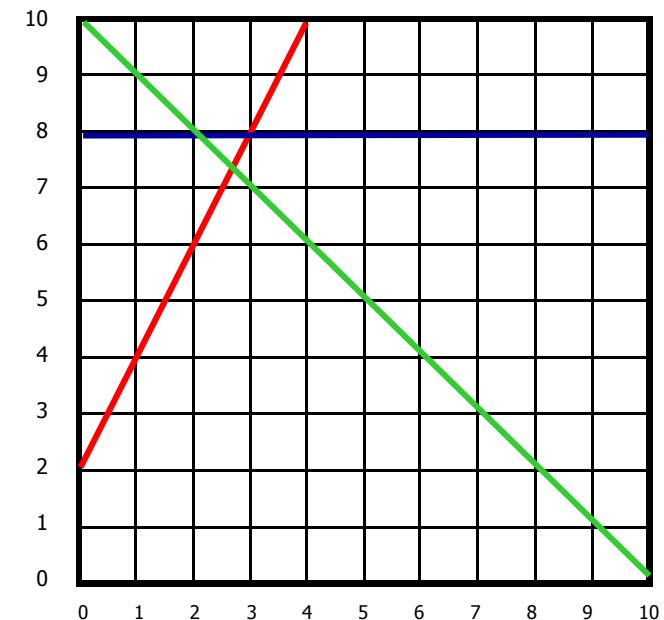


Problem: Längenbedingungen



- $c/l = \text{Kosten/Länge}$
- Gesucht:
Kürzester st-Weg
der Länge ≤ 8

| Weg | Kosten | Länge | $c+\lambda(l-8)$ |
|------|--------|-------|------------------|
| s12t | 2 | 10 | $2+2\lambda$ |
| s14t | 8 | 8 | 8 |
| s34t | 10 | 7 | $10-\lambda$ |



Gliederung

- Verkehrsoptimierung: ein kurzer Überblick
- Umlaufplanung
- **Dienstplanung**
- Integrierte Umlauf- und Dienstplanung
- Einige Ergebnisse



Längenbedingungen: Pausenregeln in der Dienstplanung

Verordnung (EWG) Nr. 3820/85 des Rates vom 20. Dezember 1985 über die Harmonisierung bestimmter Sozialvorschriften im Straßenverkehr

ABSCHNITT V

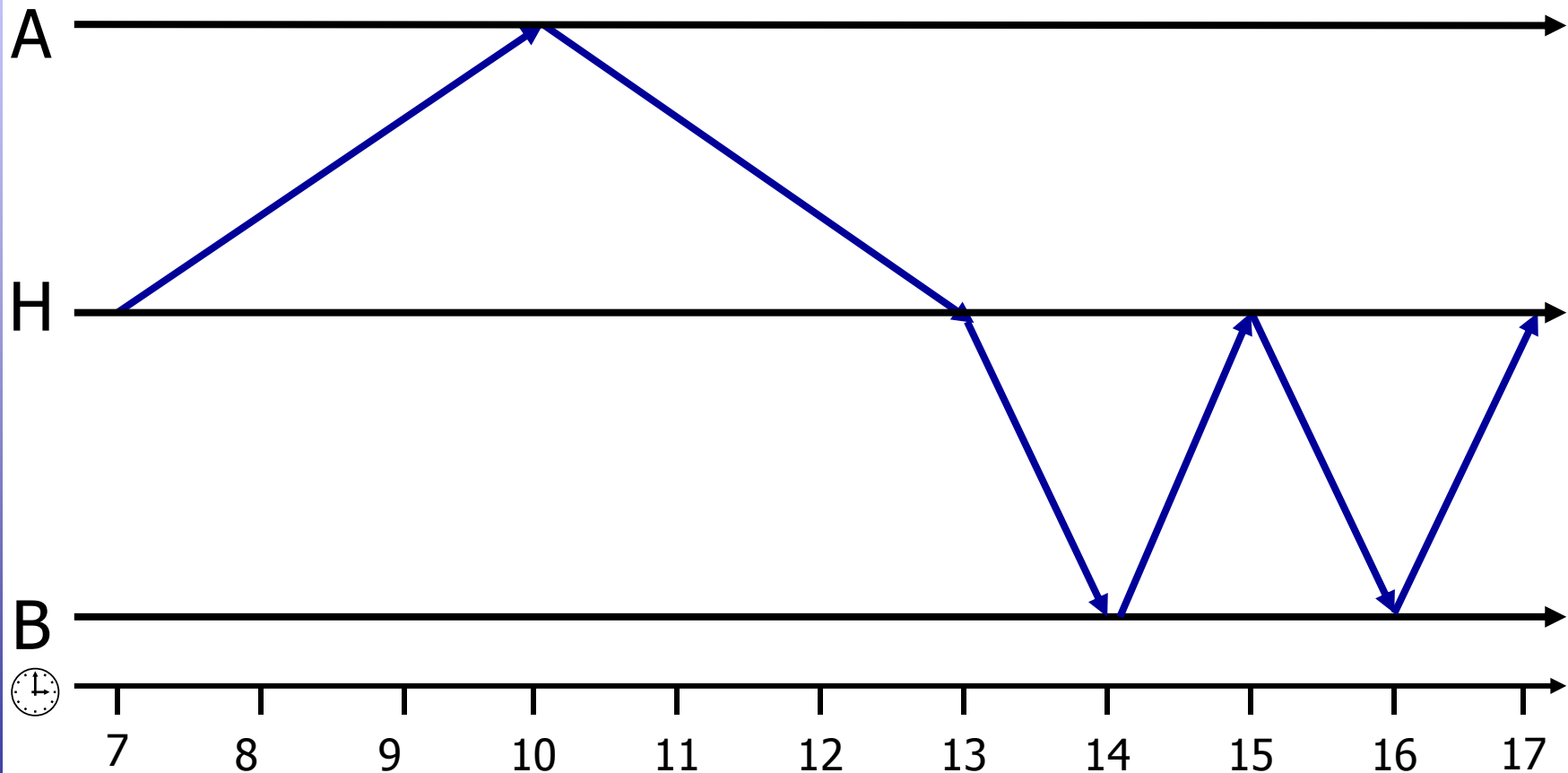
Unterbrechungen und Ruhezeit

Artikel 7

- (1) Nach einer Lenkzeit von 4 1/2 Stunden ist eine Unterbrechung von mindestens 45 Minuten einzulegen, sofern der Fahrer keine Ruhezeit nimmt.
- (2) Diese Unterbrechung kann durch Unterbrechungen von jeweils mindestens 15 Minuten ersetzt werden, die in die Lenkzeit oder unmittelbar nach dieser so einzufügen sind, dass Absatz 1 eingehalten wird.
- (3) Im Falle des nationalen Personenlinienverkehrs können die Mitgliedstaaten abweichend von Absatz 1 die Mindestdauer für die Unterbrechung auf nicht weniger als 30 Minuten nach einer Lenkzeit von höchstens 4 Stunden festsetzen. Diese Ausnahmeregelung darf nur in Fällen gewährt werden, in denen durch Unterbrechungen der Lenkzeit von mehr als 30 Minuten der Stadtverkehr behindert würde und in denen es den Fahrern nicht möglich ist, in der Lenkzeit von 4 1/2 Stunden, die der Unterbrechung von 30 Minuten vorausgeht, eine Unterbrechung von 15 Minuten einzulegen.
- (4) Der Fahrer darf während dieser Unterbrechungen keine anderen Arbeiten ausführen. Für die Anwendung dieses Artikels gelten die Wartezeit und die Nicht-Lenkzeit, die in einem fahrenden Fahrzeug, auf einer Fähre oder in einem Zug verbracht werden, nicht als andere Arbeiten.
- (5) Nach diesem Artikel eingelegte Unterbrechungen dürfen nicht als tägliche Ruhezeit betrachtet werden.



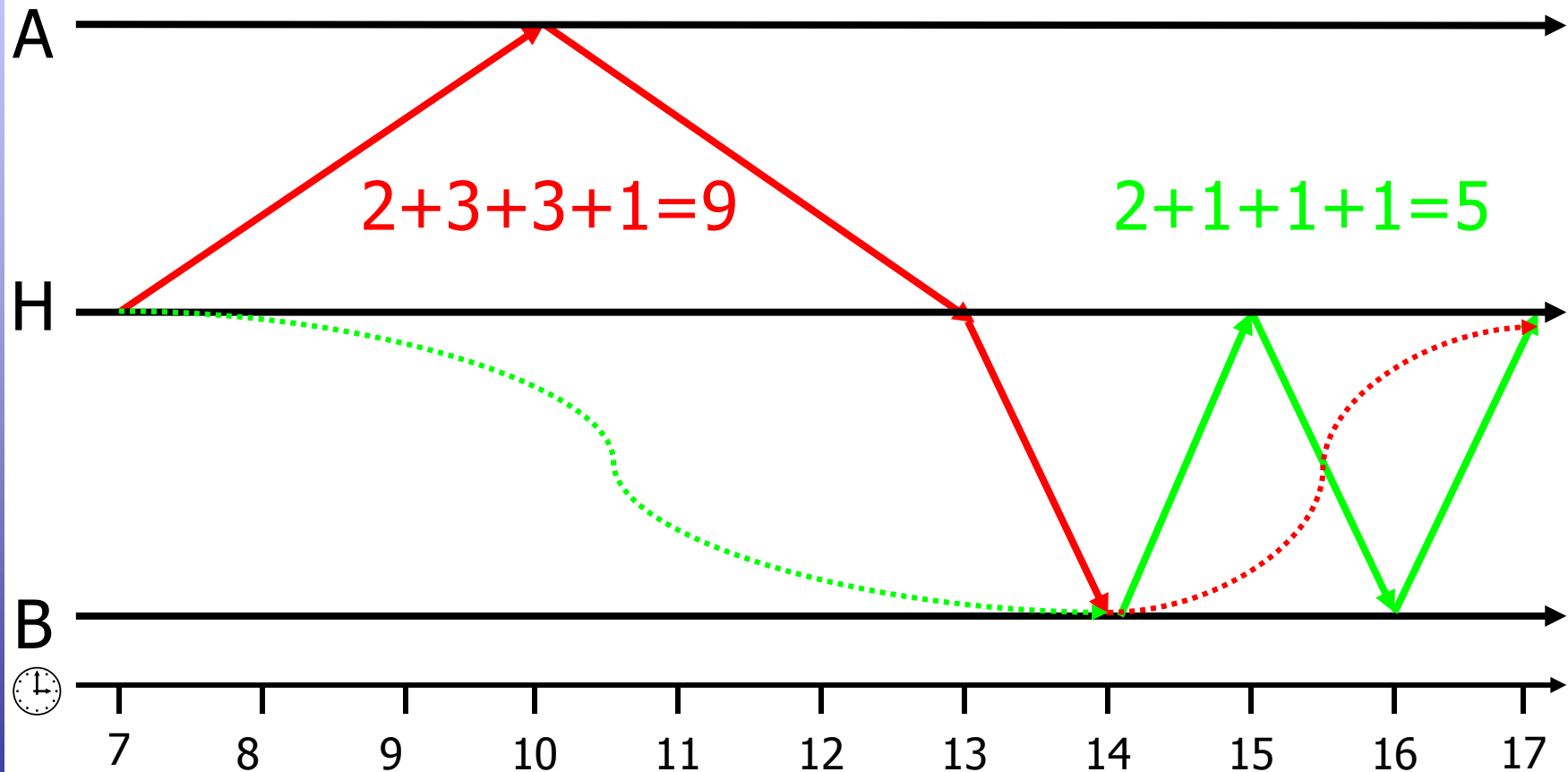
Dienstplanungsproblem



- Regeln: Lenkzeit ≤ 7 h, Verknüpfungen ≤ 3 h
- Kosten: 2+ Dienstzeit



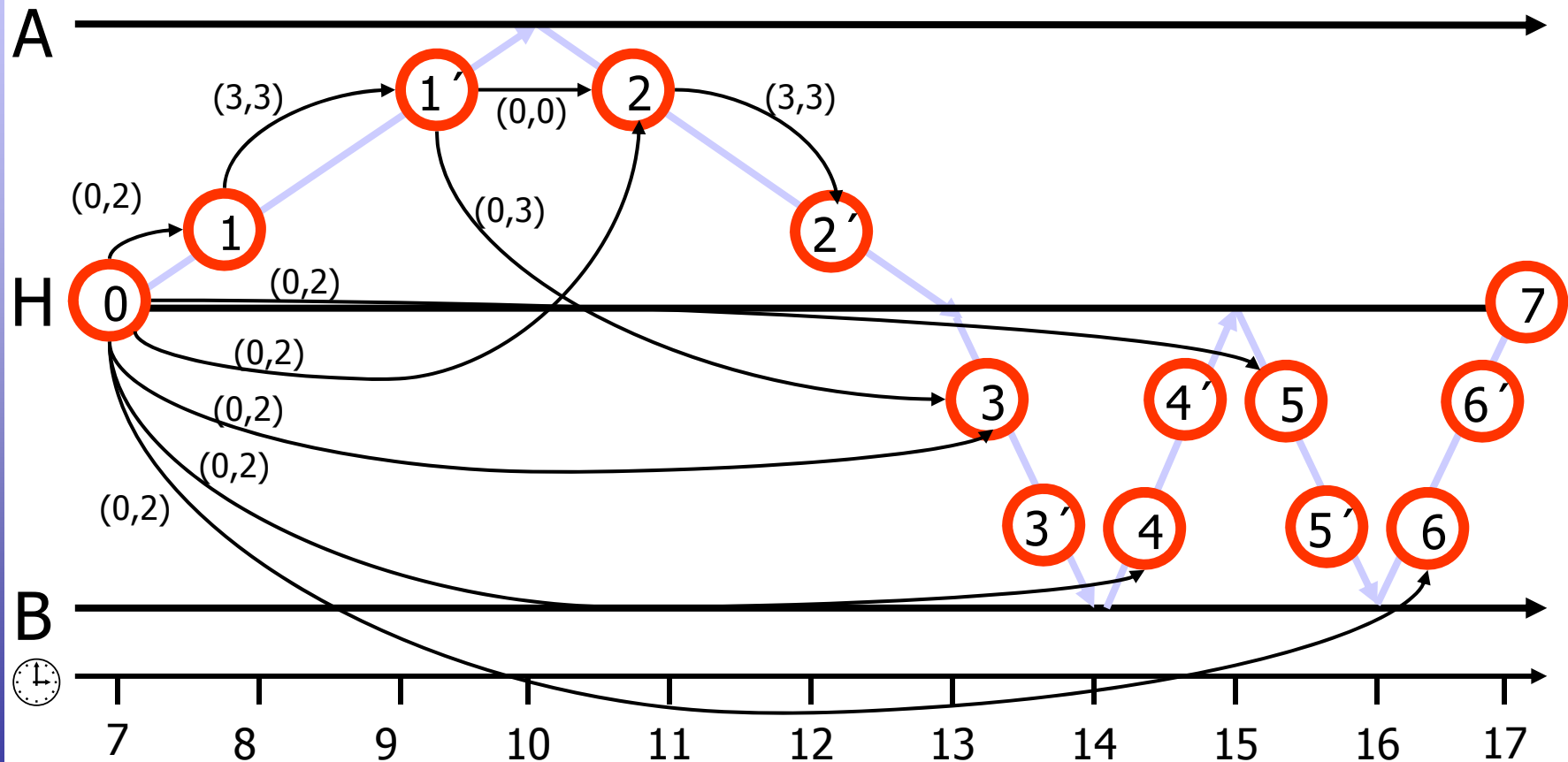
Dienstplanungsproblem



- Regeln: Lenkzeit ≤ 7 h, Verknüpfungen ≤ 3 h
- Kosten: $2 +$ Dienstzeit



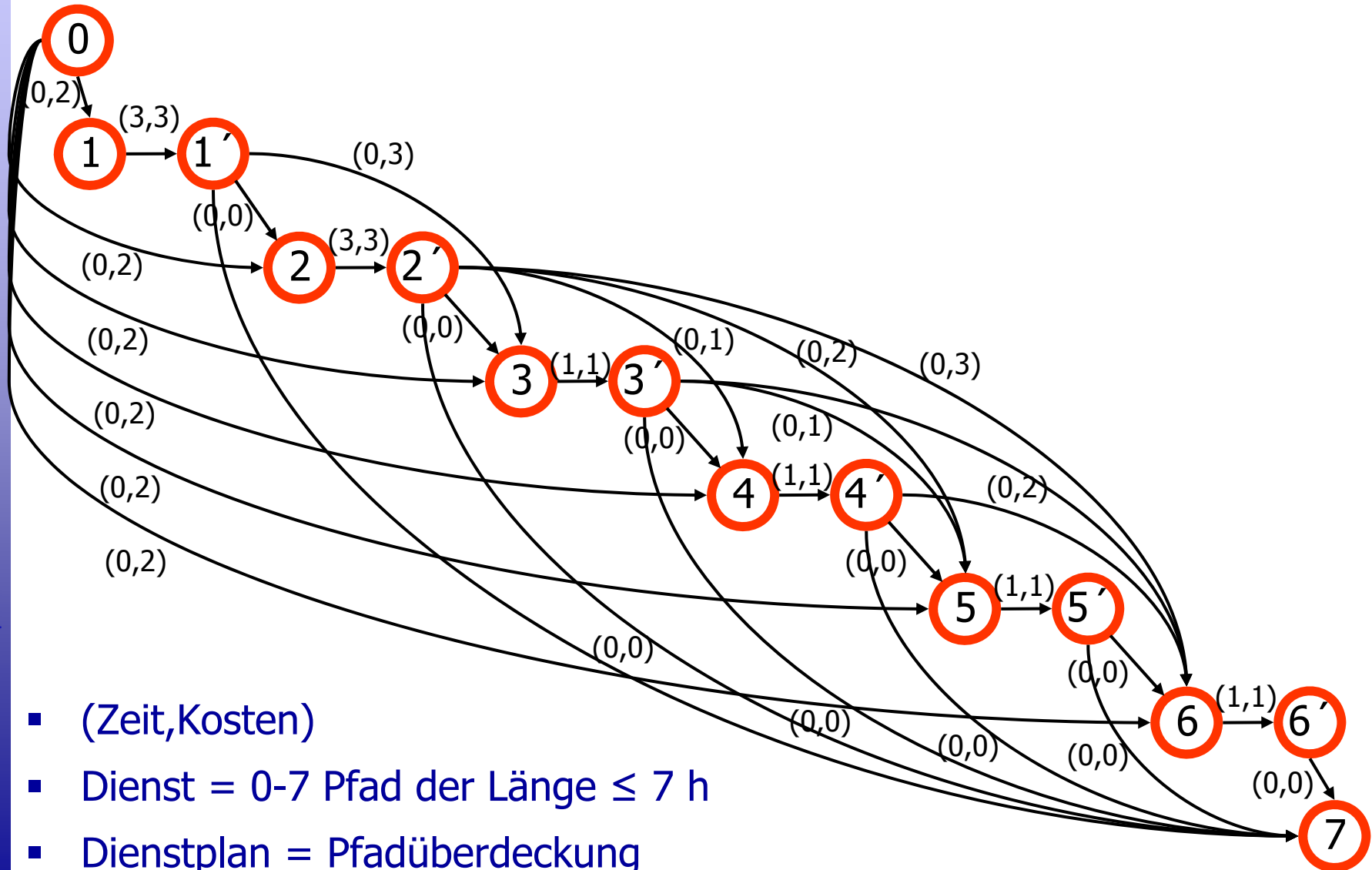
Planungsgraph



- Regeln: Lenkzeit ≤ 7 h, Verknüpfungen ≤ 3 h
- Kosten: 2+ Dienstzeit



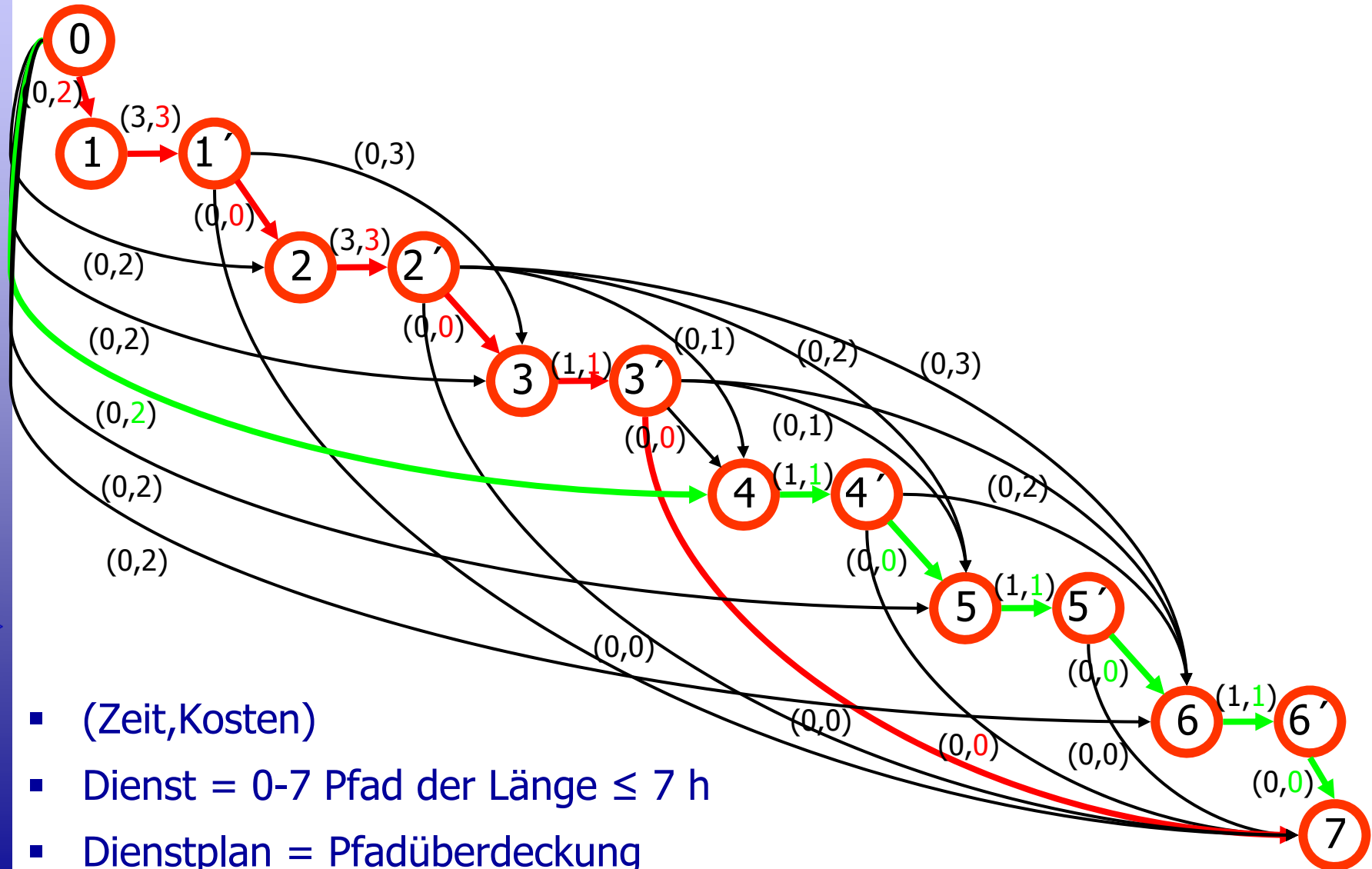
Planungsgraph



- (Zeit,Kosten)
- Dienst = 0-7 Pfad der Länge ≤ 7 h
- Dienstplan = Pfadüberdeckung



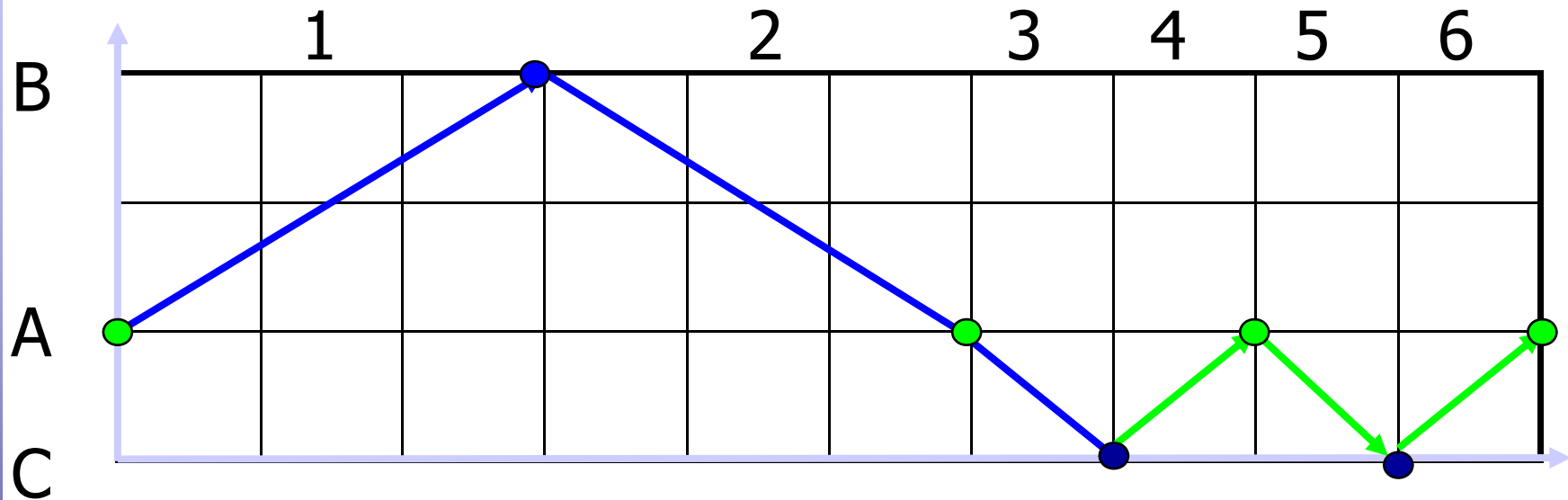
Planungsgraph



- (Zeit, Kosten)
- Dienst = 0-7 Pfad der Länge ≤ 7 h
- Dienstplan = Pfadüberdeckung



Alle Dienste



| no | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 | 37 | | |
|----|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|---|---|
| c | 5 | 5 | 3 | 3 | 3 | 3 | 8 | 9 | 6 | 7 | 8 | 9 | 4 | 5 | 6 | 4 | 5 | 4 | 9 | 10 | 11 | 12 | 7 | 8 | 9 | 5 | 6 | 5 | 11 | 12 | 12 | 8 | 9 | 9 | 6 | 12 | 9 | | |
| 1 | 1 | | | | | | 1 | 1 | | | | | | | | | | | 1 | 1 | 1 | 1 | | | | | | 1 | 1 | 1 | | | | | | | 1 | | |
| 2 | | 1 | | | | | 1 | | 1 | 1 | 1 | 1 | | | | | | | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | | | | | | | 1 | 1 | 1 | | | | 1 | |
| 3 | | | 1 | | | | 1 | 1 | | | | | 1 | 1 | 1 | | | | 1 | | | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | | 1 | 1 | | 1 | 1 | | | | 1 | 1 | 1 | |
| 4 | | | | 1 | | | | | | 1 | | | 1 | | | 1 | 1 | | | 1 | | | 1 | | | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 5 | | | | | 1 | | | | | | 1 | | | 1 | | 1 | 1 | | | | 1 | | | 1 | | 1 | | 1 | 1 | | 1 | 1 | | | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 6 | | | | | | 1 | | | | | | 1 | | | 1 | 1 | 1 | | | | 1 | | | 1 | | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |



Set-Partitioning-Modell

| no | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 | 37 | | | |
|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|---|---|---|
| | 5 | 5 | 3 | 3 | 3 | 3 | 8 | 9 | 6 | 7 | 8 | 9 | 4 | 5 | 6 | 4 | 5 | 4 | 9 | 10 | 11 | 12 | 7 | 8 | 9 | 5 | 6 | 5 | 11 | 12 | 12 | 8 | 9 | 9 | 6 | 12 | 9 | | | |
| 1 | 1 | | | | | | 1 | 1 | | | | | | | | | | | 1 | 1 | 1 | 1 | | | | | | 1 | 1 | 1 | | | | | | 1 | | 1 | | |
| 2 | | 1 | | | | | 1 | | 1 | 1 | 1 | 1 | | | | | | | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | | | | | | 1 | 1 | 1 | | | | 1 | 1 | | |
| 3 | | | 1 | | | | | 1 | 1 | | | | 1 | 1 | 1 | | | | 1 | | | | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | | 1 | 1 | | | 1 | 1 | | | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 4 | | | | 1 | | | | | | 1 | | | 1 | | | 1 | 1 | | | 1 | | | 1 | | | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 5 | | | | | 1 | | | | | | 1 | | | 1 | | 1 | | 1 | | | 1 | | | 1 | | 1 | | 1 | 1 | | 1 | 1 | | | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | |
| 6 | | | | | | 1 | | | | | | 1 | | | 1 | | 1 | 1 | | | | 1 | | | 1 | | 1 | 1 | | 1 | 1 | | | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | x1 | x2 | x3 | x4 | x5 | x6 | x7 | x8 | x9 | x10 | x11 | x12 | x13 | x14 | x15 | x16 | x17 | x18 | x19 | x20 | x21 | x22 | x23 | x24 | x25 | x26 | x27 | x28 | x29 | x30 | x31 | x32 | x33 | x34 | x35 | x36 | x37 | | | |

$$\min 5x_1 + 5x_2 + \dots + 12x_{36} + 9x_{37}$$

$$\text{s.t. } x_1 + x_7 + x_8 + x_{19} + x_{20} + x_{21} + x_{22} + x_{29} + x_{30} + x_{31} + x_{36} = 1$$

$$x_2 + x_7 + x_9 + x_{10} + x_{11} + x_{12} + x_{19} + x_{20} + x_{21} + x_{22} + x_{23} + x_{24} + x_{25} + x_{32} + x_{33} + x_{34} + x_{37} = 1$$

$$x_3 + x_8 + x_9 + x_{13} + x_{14} + x_{15} + x_{19} + x_{23} + x_{24} + x_{25} + x_{26} + x_{27} + x_{29} + x_{30} + x_{32} + x_{33} + x_{35} + x_{36} + x_{37} = 1$$

$$x_4 + x_{10} + x_{13} + x_{16} + x_{17} + x_{20} + x_{23} + x_{26} + x_{27} + x_{28} + x_{29} + x_{30} + x_{31} + x_{32} + x_{33} + x_{34} + x_{35} + x_{36} + x_{37} = 1$$

$$x_5 + x_{11} + x_{14} + x_{16} + x_{18} + x_{21} + x_{24} + x_{26} + x_{28} + x_{29} + x_{31} + x_{32} + x_{34} + x_{35} + x_{36} + x_{37} = 1$$

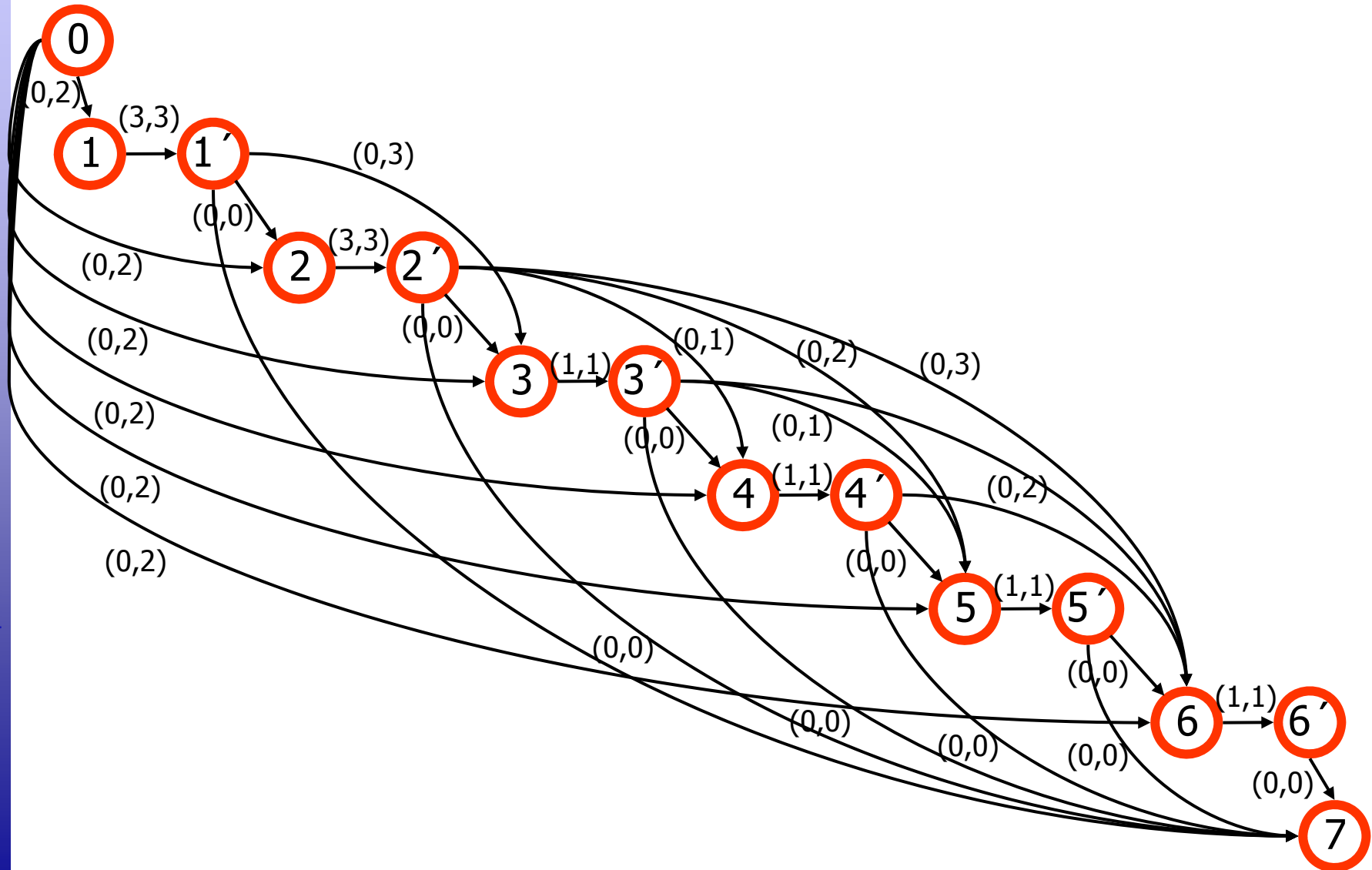
$$x_6 + x_{12} + x_{15} + x_{17} + x_{18} + x_{22} + x_{25} + x_{27} + x_{28} + x_{30} + x_{31} + x_{33} + x_{34} + x_{35} + x_{36} + x_{37} = 1$$

$$x_1, \dots, x_{37} \geq 0$$

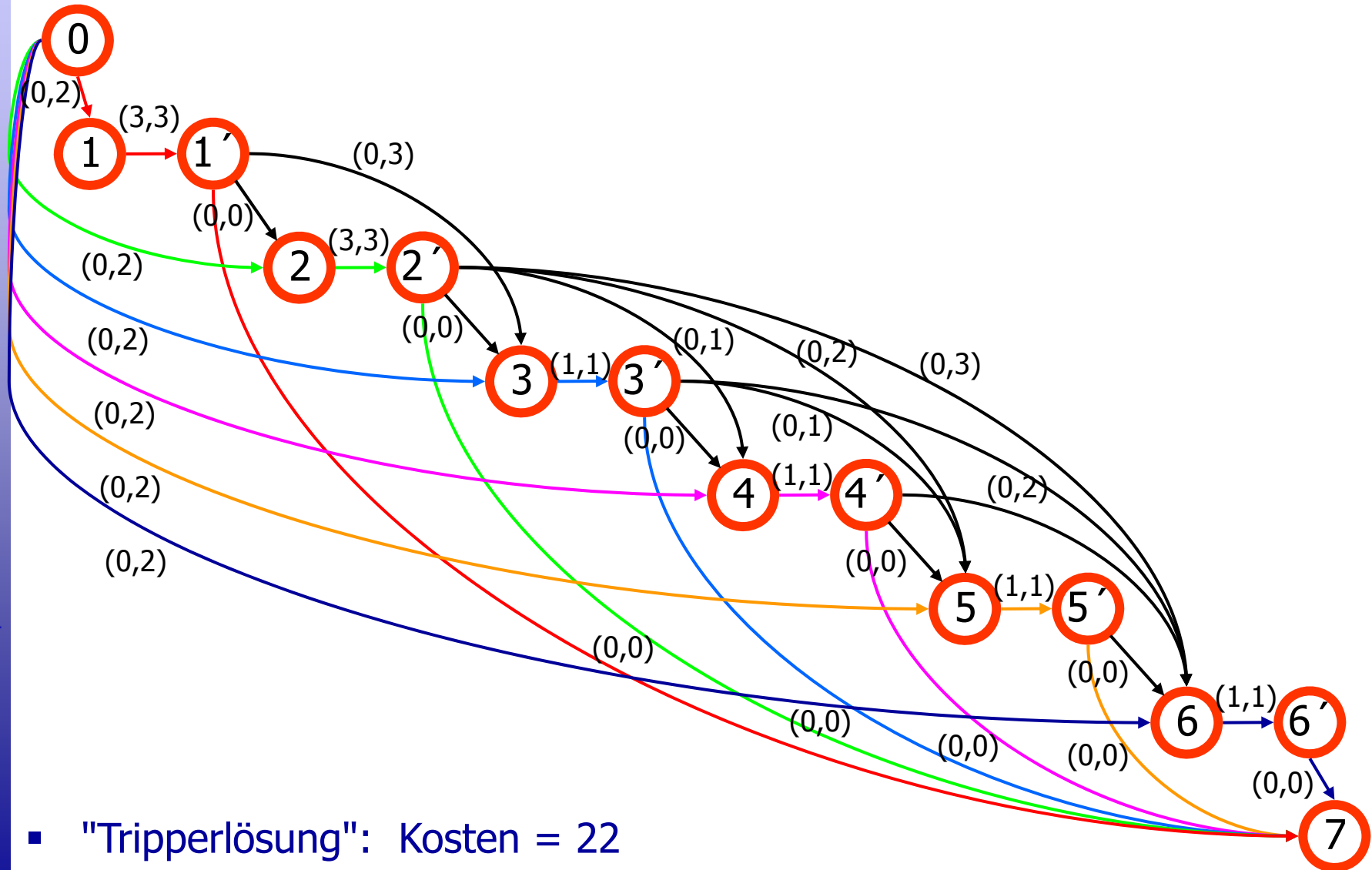
$$x_1, \dots, x_{37} \text{ ganz}$$



Spaltenerzeugungsmethode



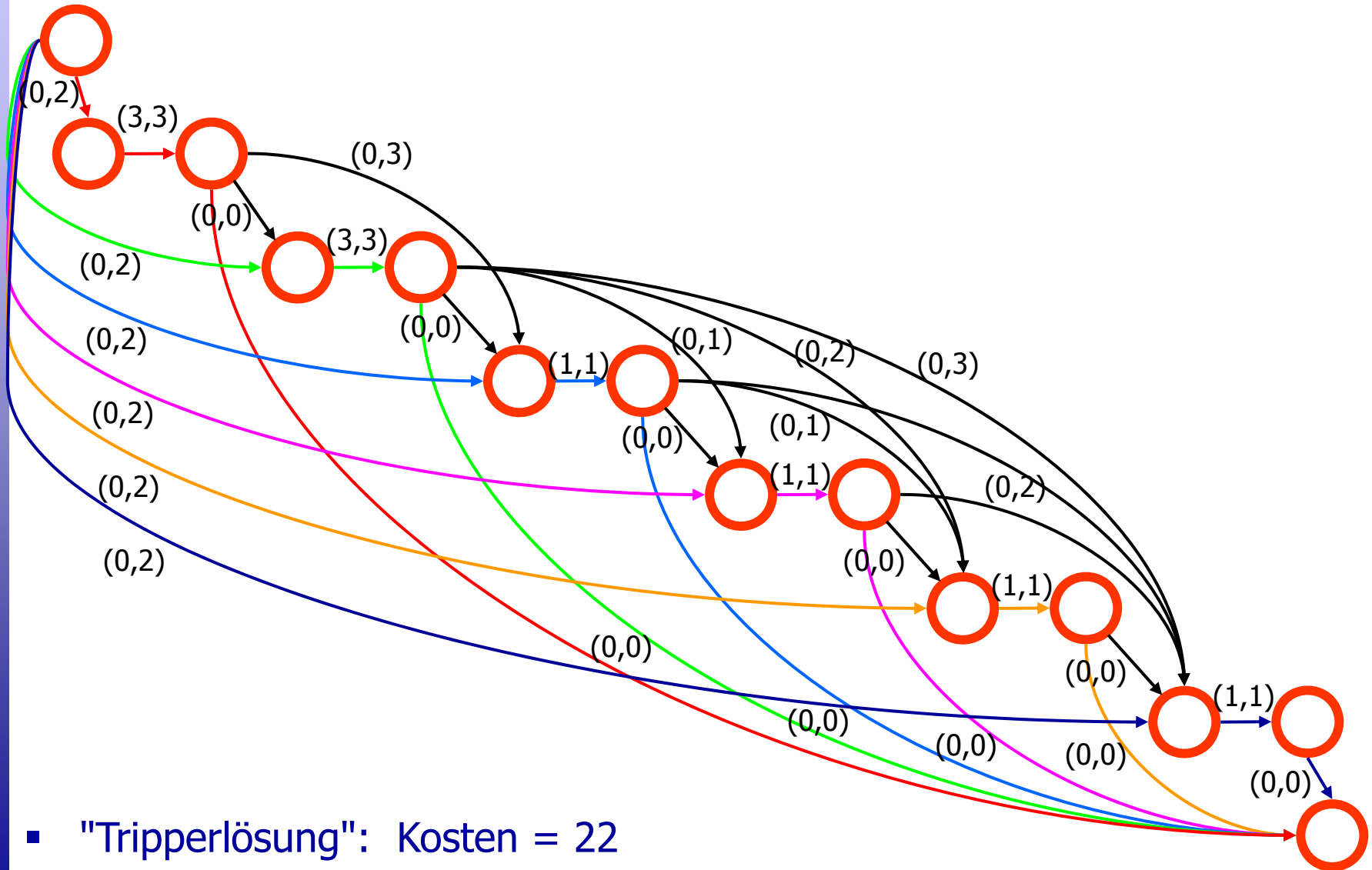
Spaltenerzeugungsmethode



- "Tripperlösung": Kosten = 22



Spaltenerzeugungsmethode



- "Tripperlösung": Kosten = 22



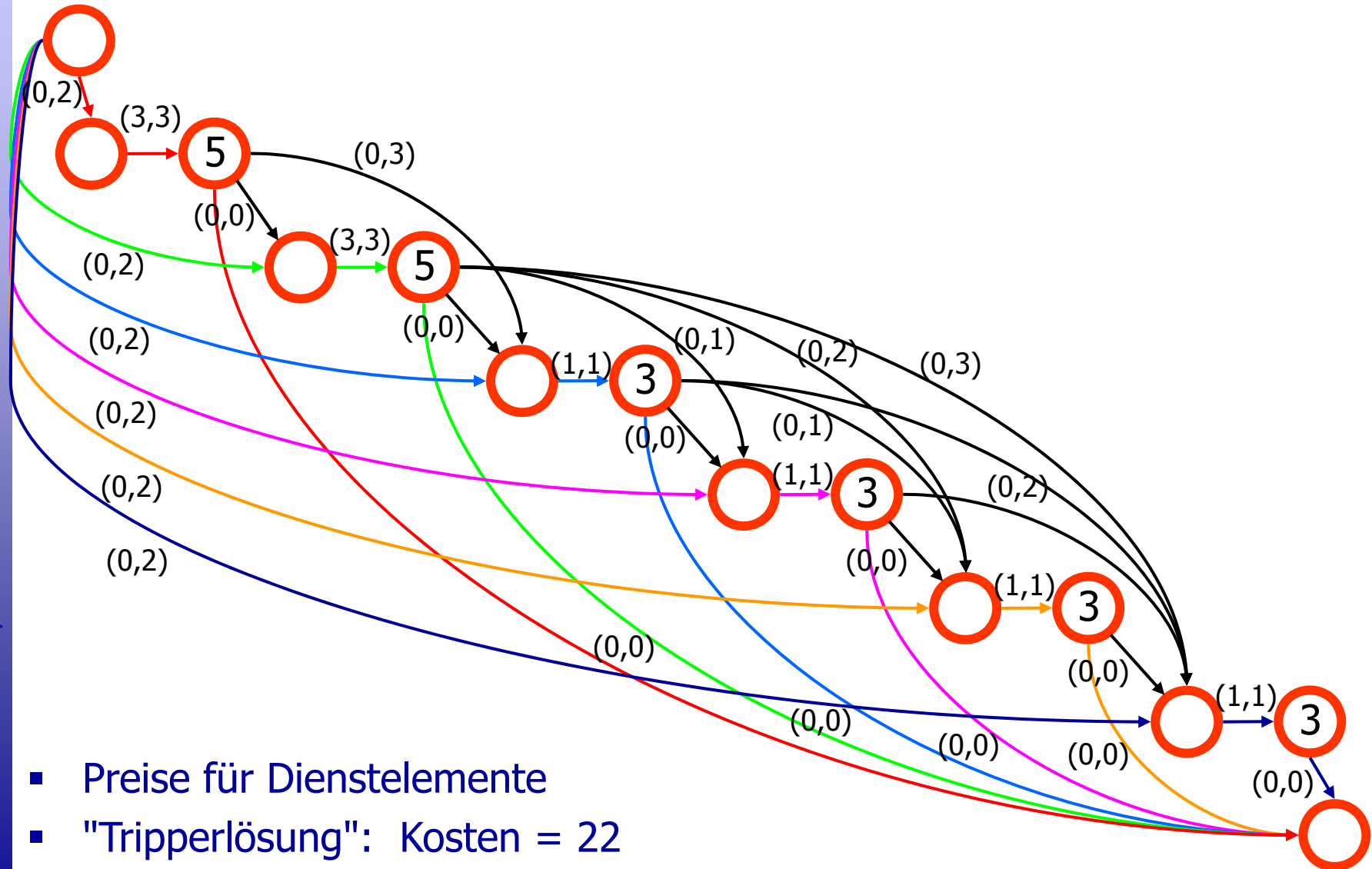
Spaltenerzeugungsmethode

| no | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 | 37 | | |
|----|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|---|---|
| c | 5 | 5 | 3 | 3 | 3 | 3 | 8 | 9 | 6 | 7 | 8 | 9 | 4 | 5 | 6 | 4 | 5 | 4 | 9 | 10 | 11 | 12 | 7 | 8 | 9 | 5 | 6 | 5 | 11 | 12 | 12 | 8 | 9 | 9 | 6 | 12 | 9 | y | |
| 1 | 1 | | | | | | 1 | 1 | | | | | | | | | | | 1 | 1 | 1 | 1 | | | | | | 1 | 1 | 1 | | | | | | 1 | | 5 | |
| 2 | | 1 | | | | | 1 | | 1 | 1 | 1 | 1 | | | | | | | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | | | | | | 1 | 1 | 1 | | | | 1 | | 5 |
| 3 | | | 1 | | | | | 1 | 1 | | | | 1 | 1 | 1 | | | | 1 | | | | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | | 1 | 1 | | 1 | 1 | | 1 | 1 | 1 | 3 | |
| 4 | | | | 1 | | | | | | 1 | | | 1 | | | 1 | 1 | | | 1 | | | 1 | | | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 3 |
| 5 | | | | | 1 | | | | | | 1 | | | 1 | | 1 | | 1 | | | 1 | | | 1 | | 1 | | 1 | 1 | | 1 | 1 | | 1 | 1 | 1 | 1 | 3 | |
| 6 | | | | | | 1 | | | | | | 1 | | | 1 | 1 | 1 | | | | | 1 | | | 1 | | 1 | 1 | 1 | 1 | | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 3 | |
| x | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

- $x_1=x_2=x_3=x_4=x_5=x_6=1$, Kosten $2*5+4*3=22$
- $y_1=5$
- $y_2=5$
- $y_3=3$
- $y_4=3$
- $y_5=3$
- $y_6=3$



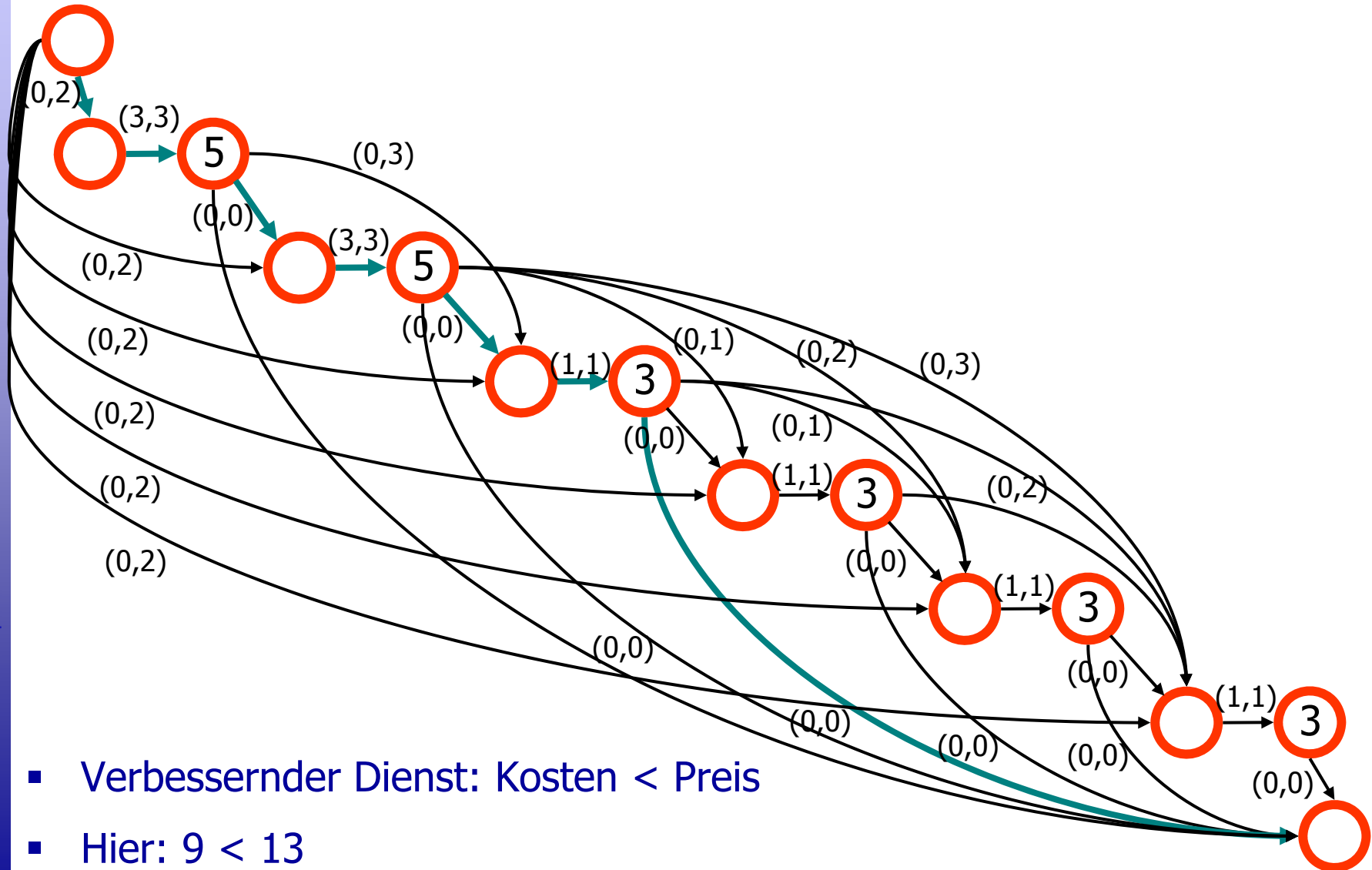
Spaltenerzeugungsmethode



- Preise für Dienstelemente
- "Tripperlösung": Kosten = 22



Spaltenerzeugungsmethode

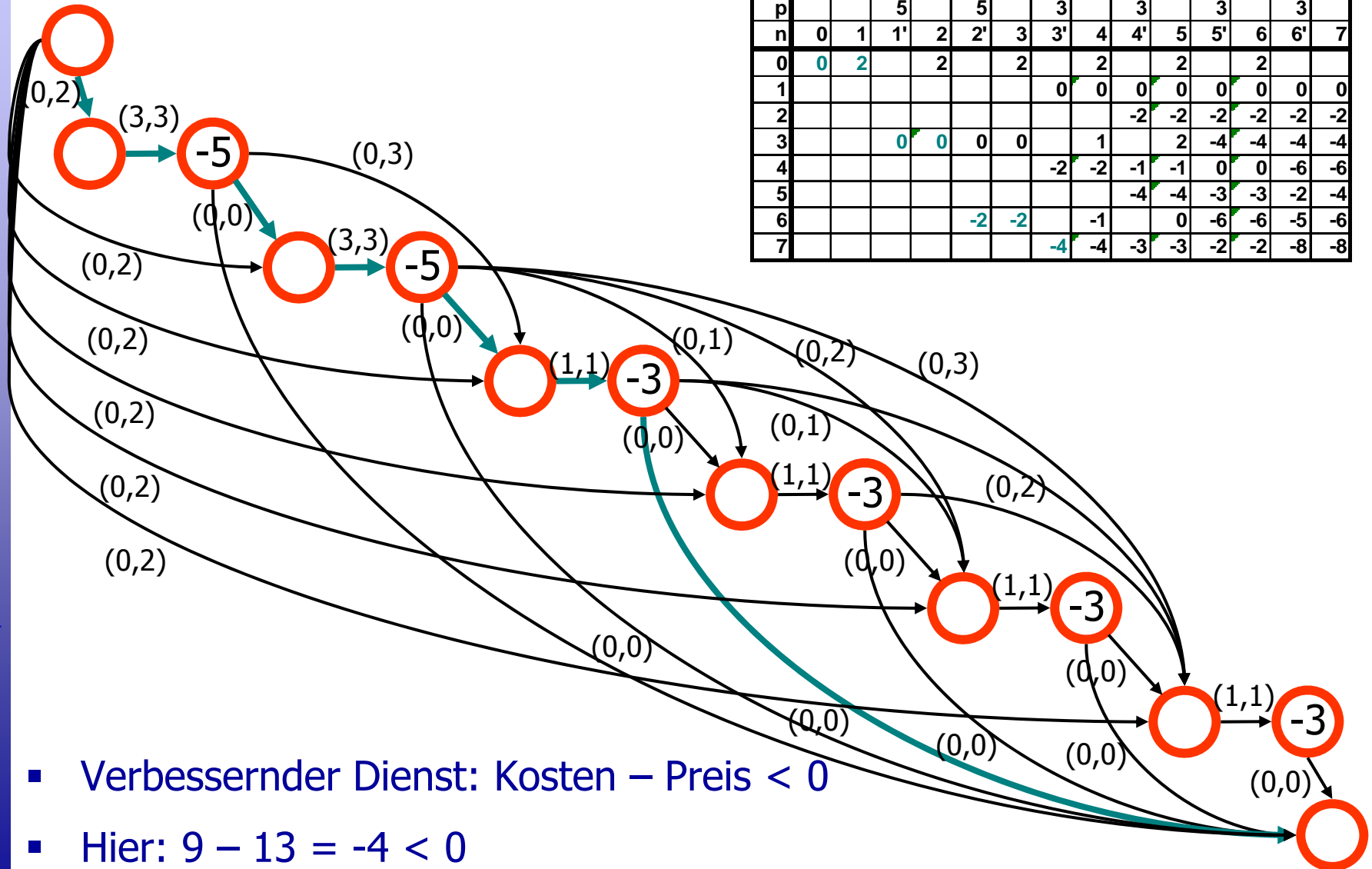


- Verbessernder Dienst: $\text{Kosten} < \text{Preis}$
- Hier: $9 < 13$



Spaltenerzeugungsmethode

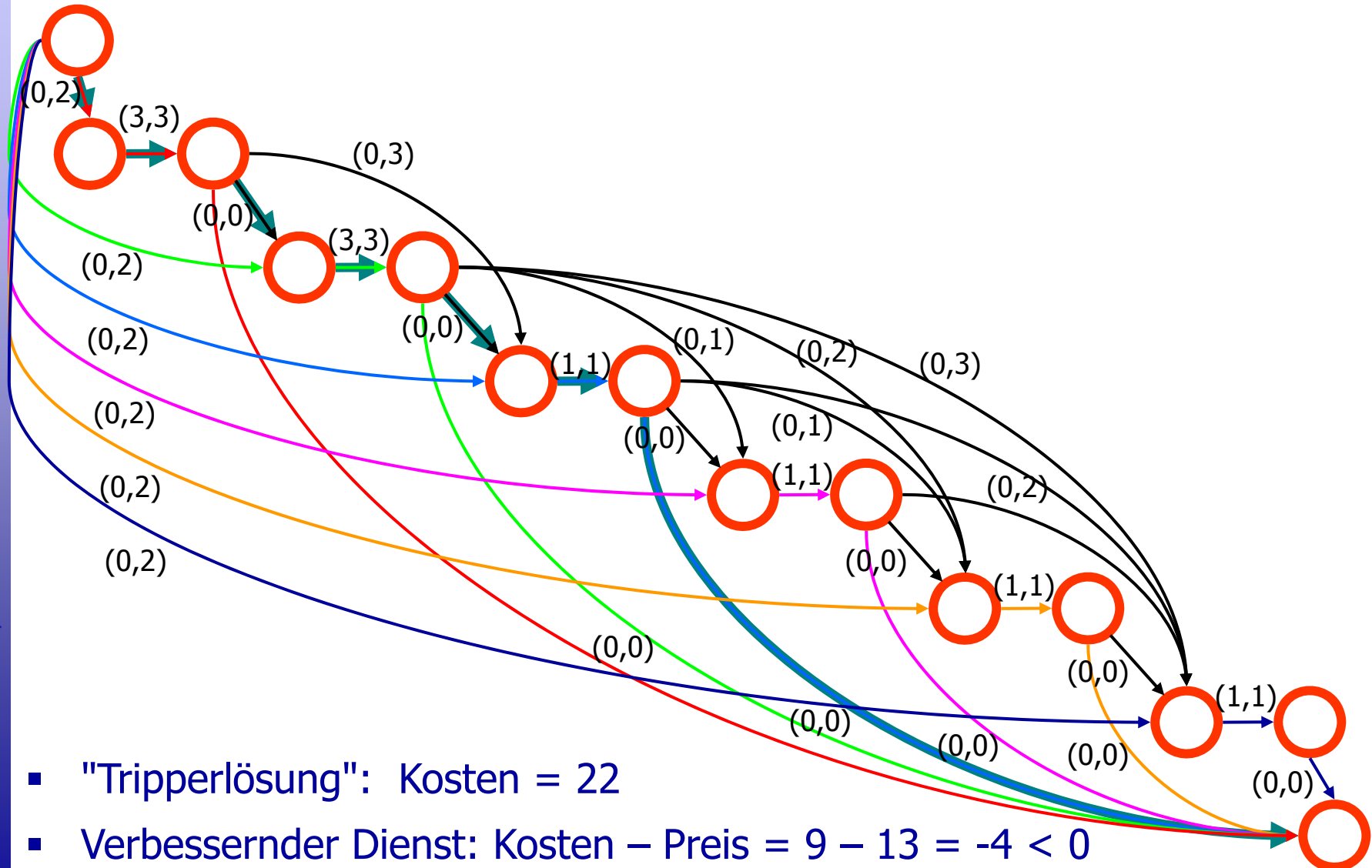
| p | | | 5 | 5 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | | | | |
|---|---|---|----|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| n | 0 | 1 | 1' | 2 | 2' | 3 | 3' | 4 | 4' | 5 | 5' | 6 | 6' | 7 |
| 0 | 0 | 2 | | 2 | | 2 | | 2 | | 2 | | 2 | | |
| 1 | | | | | | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | | | | | | | | -2 | -2 | -2 | -2 | -2 | -2 | -2 |
| 3 | | | 0 | 0 | 0 | 0 | | 1 | | 2 | -4 | -4 | -4 | -4 |
| 4 | | | | | | | -2 | -2 | -1 | -1 | 0 | 0 | -6 | -6 |
| 5 | | | | | | | | -4 | -4 | -3 | -3 | -2 | -4 | |
| 6 | | | | | -2 | -2 | | -1 | | 0 | -6 | -6 | -5 | -6 |
| 7 | | | | | | | -4 | -4 | -3 | -3 | -2 | -2 | -8 | -8 |



- Verbessernder Dienst: $\text{Kosten} - \text{Preis} < 0$
- Hier: $9 - 13 = -4 < 0$



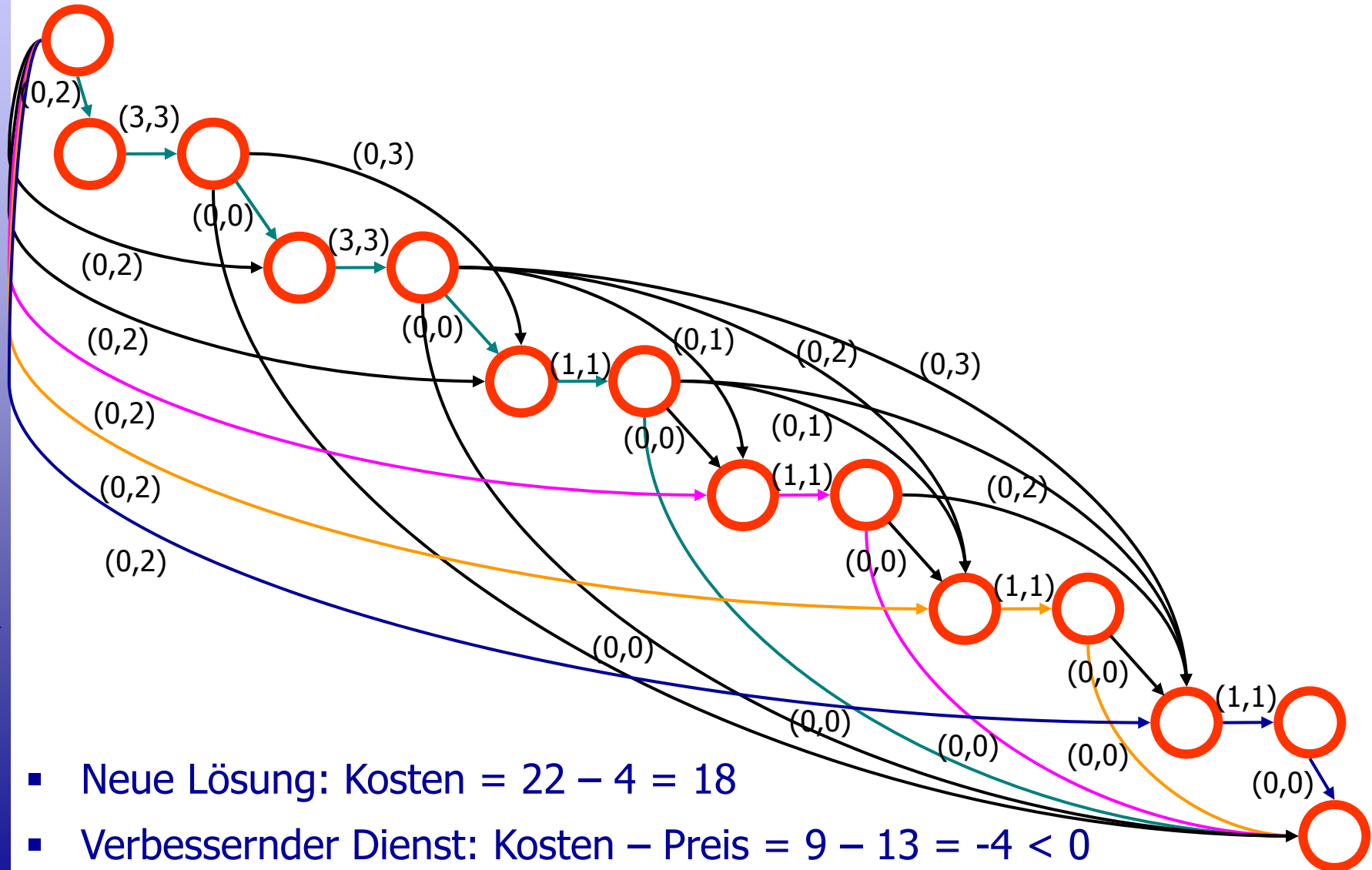
Spaltenerzeugungsmethode



- "Tripperlösung": $\text{Kosten} = 22$
- Verbesserender Dienst: $\text{Kosten} - \text{Preis} = 9 - 13 = -4 < 0$



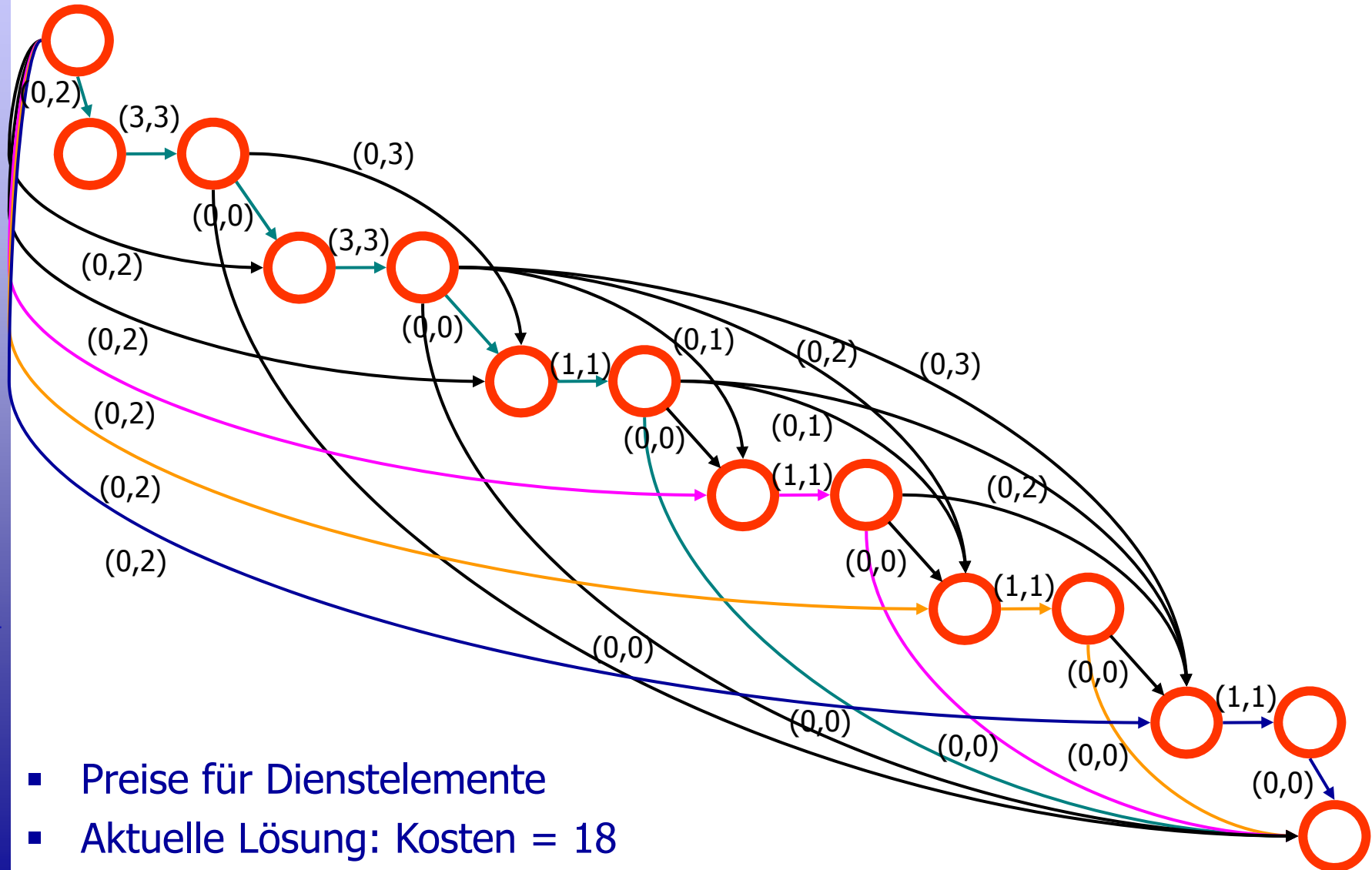
Spaltenerzeugungsmethode



- Neue Lösung: Kosten = $22 - 4 = 18$
- Verbessernder Dienst: Kosten – Preis = $9 - 13 = -4 < 0$



Spaltenerzeugungsmethode



- Preise für Dienstelemente
- Aktuelle Lösung: Kosten = 18



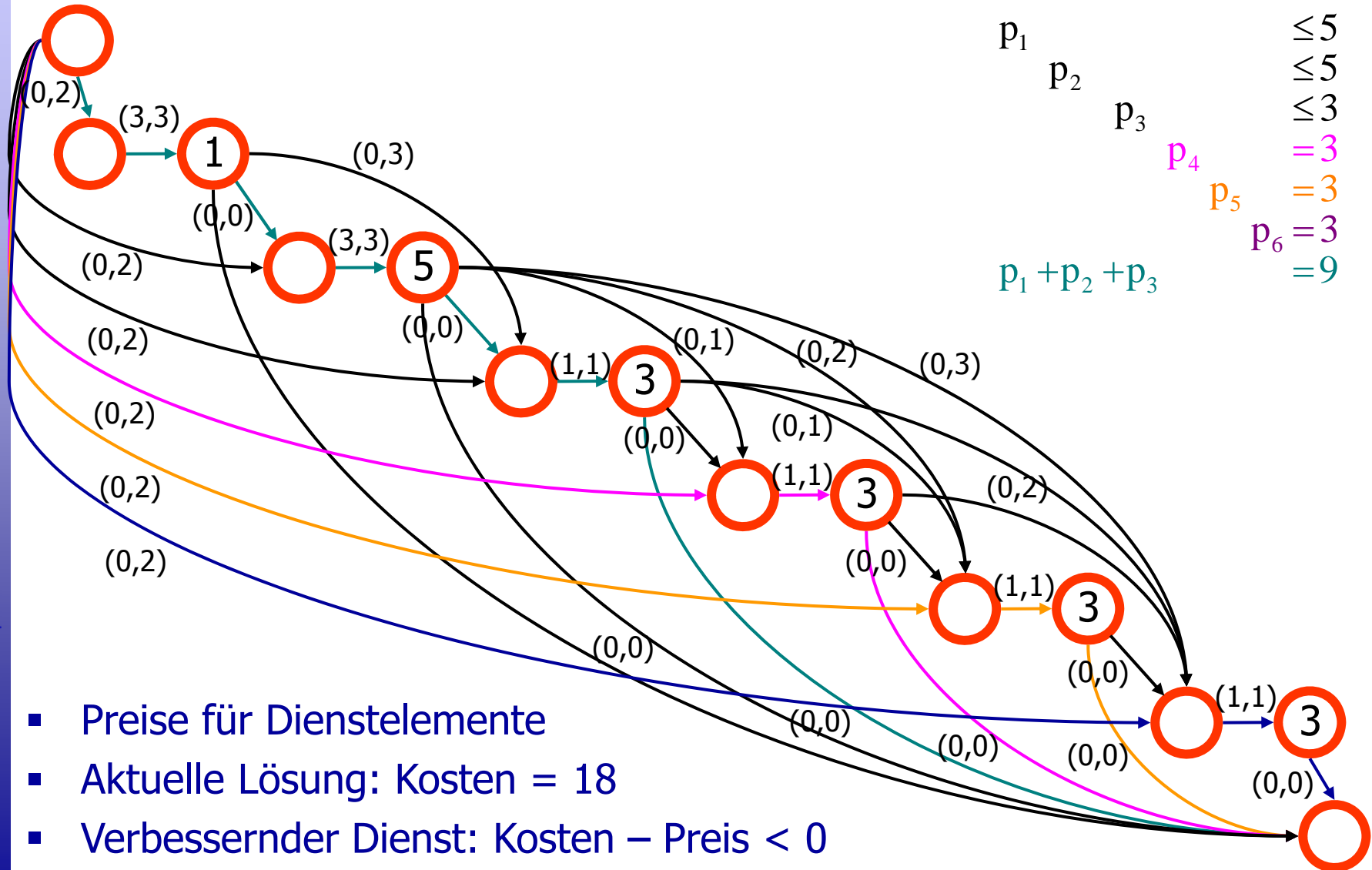
Spaltenerzeugung

| no | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 | 37 | |
|----|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|---|
| c | 5 | 5 | 3 | 3 | 3 | 3 | 8 | 9 | 6 | 7 | 8 | 9 | 4 | 5 | 6 | 4 | 5 | 4 | 9 | 10 | 11 | 12 | 7 | 8 | 9 | 5 | 6 | 5 | 11 | 12 | 12 | 8 | 9 | 9 | 6 | 12 | 9 | y |
| 1 | 1 | | | | | | 1 | 1 | | | | | | | | | | | 1 | 1 | 1 | 1 | | | | | | 1 | 1 | 1 | | | | | | 1 | | 1 |
| 2 | | 1 | | | | | 1 | | 1 | 1 | 1 | 1 | | | | | | | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | | | | | 1 | 1 | 1 | | | | | 1 | 5 |
| 3 | | | 1 | | | | | 1 | 1 | | | | 1 | 1 | 1 | | | | 1 | | | | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | | 1 | 1 | | 1 | 1 | | | 1 | 1 | 3 |
| 4 | | | | 1 | | | | | | 1 | | | 1 | | | 1 | 1 | | | 1 | | | 1 | | | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 3 |
| 5 | | | | | 1 | | | | | | 1 | | | 1 | | 1 | | 1 | | | 1 | | | 1 | | 1 | | 1 | 1 | | 1 | 1 | | 1 | 1 | 1 | 1 | 3 |
| 6 | | | | | | 1 | | | | | | 1 | | | 1 | | 1 | 1 | | | | 1 | | | 1 | | 1 | 1 | 1 | | 1 | 1 | | 1 | 1 | 1 | 1 | 3 |
| x | 1 | 1 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

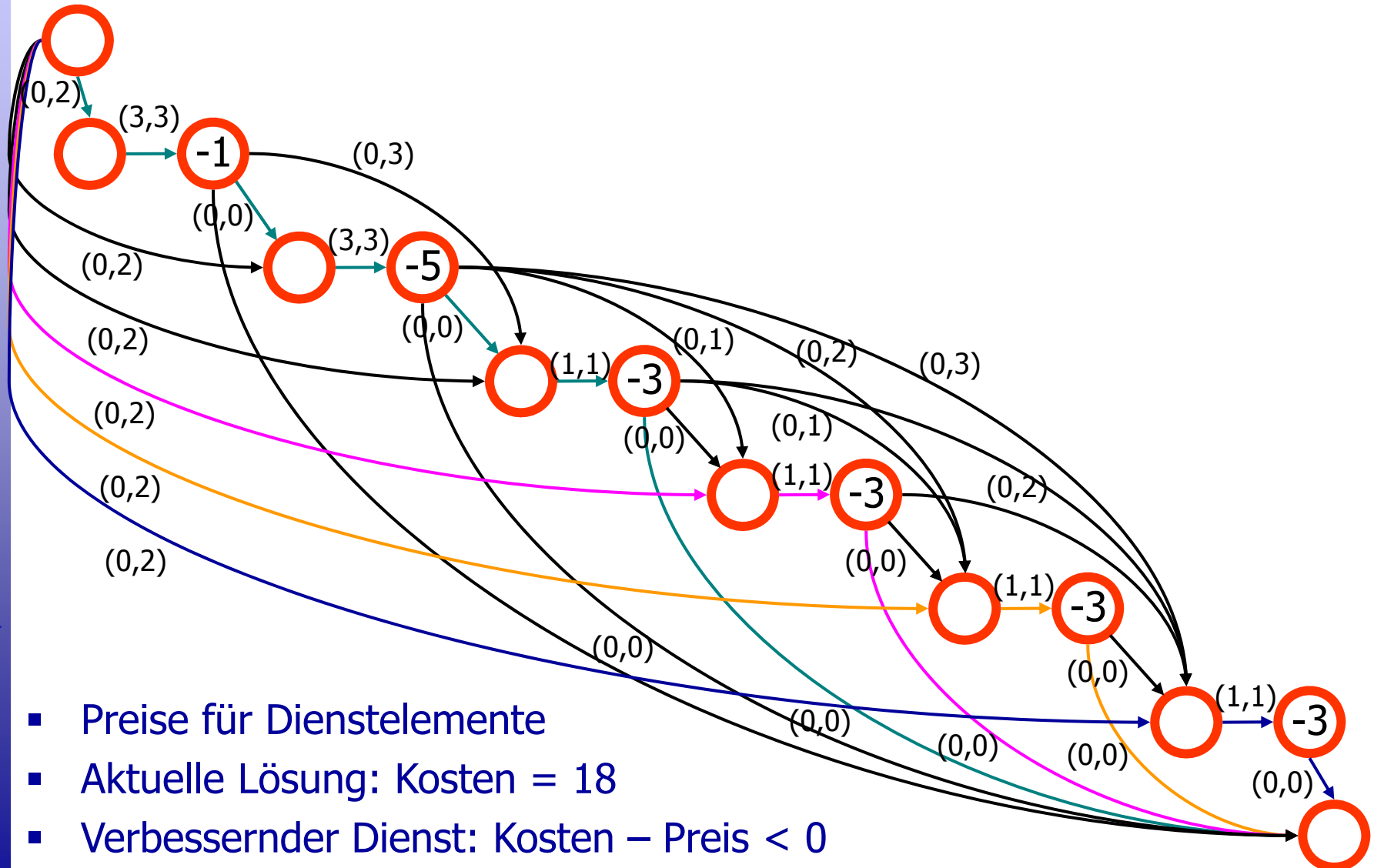
- $x_1=x_2=x_3=0, x_4=x_5=x_6= x_{19}=1, \text{Kosten } 9+3*3=18 \text{ [22]}$
- $y_1+y_2+y_3=11$
- $y_1=1$
 $y_2=5$
 $y_3=3$
 $y_4=3$
 $y_5=3$
 $y_6=3$
 (andere Lösungen möglich)



Spaltenerzeugungsmethode



Spaltenerzeugungsmethode

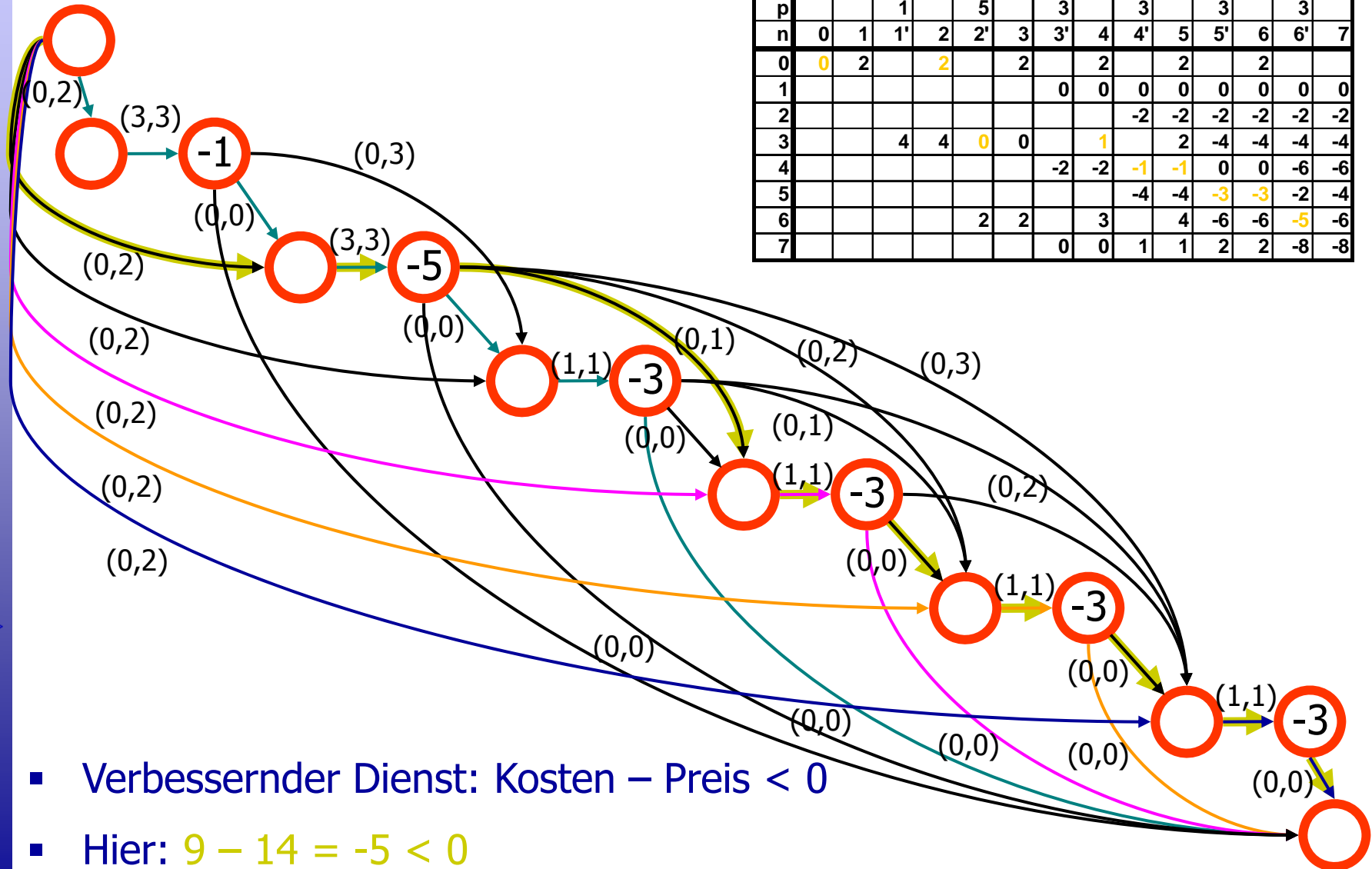


- Preise für Dienstelemente
- Aktuelle Lösung: Kosten = 18
- Verbessernder Dienst: $\text{Kosten} - \text{Preis} < 0$



Spaltenerzeugungsmethode

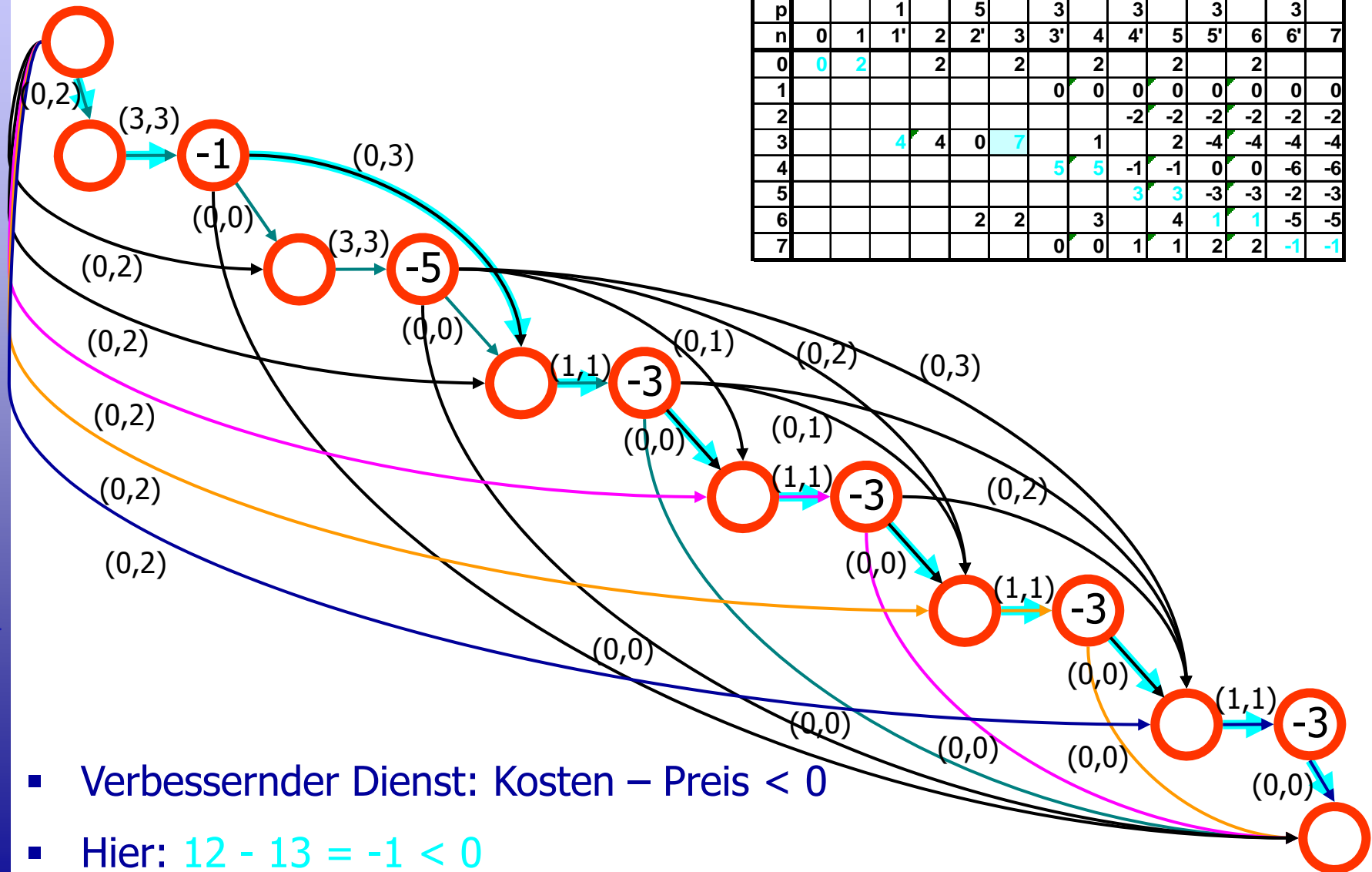
| p | | 1 | 5 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | | | | | | |
|---|---|---|----|---|----|---|----|----|----|----|----|----|----|----|
| n | 0 | 1 | 1' | 2 | 2' | 3 | 3' | 4 | 4' | 5 | 5' | 6 | 6' | 7 |
| 0 | 0 | 2 | | 2 | | 2 | | 2 | | 2 | | 2 | | |
| 1 | | | | | | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | | | | | | | | -2 | -2 | -2 | -2 | -2 | -2 | -2 |
| 3 | | | 4 | 4 | 0 | 0 | | 1 | | 2 | -4 | -4 | -4 | -4 |
| 4 | | | | | | | -2 | -2 | -1 | -1 | 0 | 0 | -6 | -6 |
| 5 | | | | | | | | -4 | -4 | -3 | -3 | -2 | -4 | |
| 6 | | | | | 2 | 2 | | 3 | | 4 | -6 | -6 | -5 | -6 |
| 7 | | | | | | | 0 | 0 | 1 | 1 | 2 | 2 | -8 | -8 |



- Verbessernder Dienst: $\text{Kosten} - \text{Preis} < 0$
- Hier: $9 - 14 = -5 < 0$



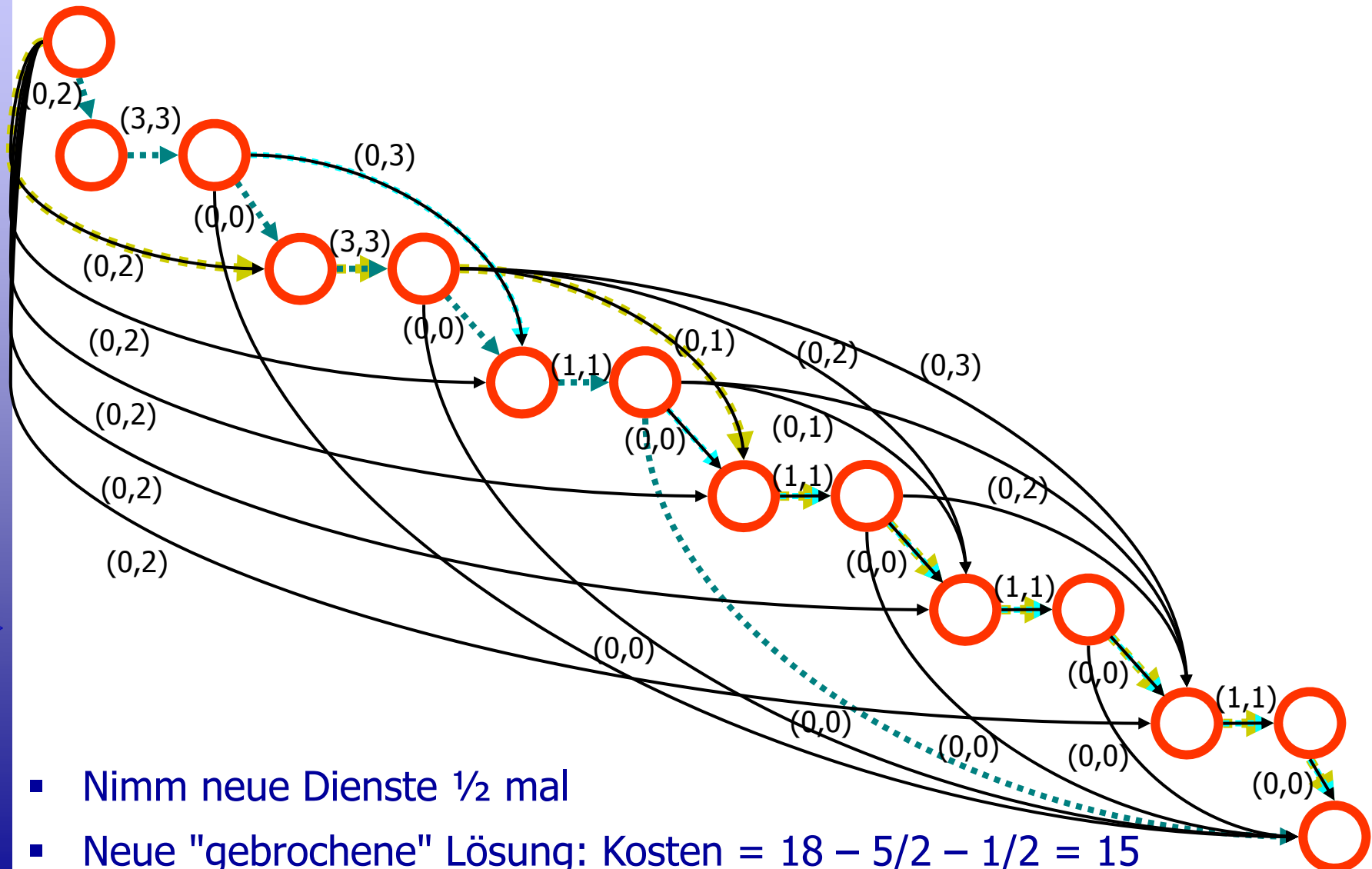
Spaltenerzeugungsmethode



- Verbessernder Dienst: $\text{Kosten} - \text{Preis} < 0$
- Hier: $12 - 13 = -1 < 0$



Spaltenerzeugungsmethode



- Nimm neue Dienste $\frac{1}{2}$ mal
- Neue "gebrochene" Lösung: Kosten = $18 - 5/2 - 1/2 = 15$



Spaltenerzeugung

| no | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 | 37 | |
|----|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|-----|----|----|---|
| c | 5 | 5 | 3 | 3 | 3 | 3 | 8 | 9 | 6 | 7 | 8 | 9 | 4 | 5 | 6 | 4 | 5 | 4 | 9 | 10 | 11 | 12 | 7 | 8 | 9 | 5 | 6 | 5 | 11 | 12 | 12 | 8 | 9 | 9 | 6 | 12 | 9 | y |
| 1 | 1 | | | | | | 1 | 1 | | | | | | | | | | | 1 | 1 | 1 | 1 | | | | | | 1 | 1 | 1 | | | | | 1 | | 1 | 5 |
| 2 | | 1 | | | | | 1 | | 1 | 1 | 1 | 1 | | | | | | | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | | | | | 1 | 1 | | 1 | | | 1 | 3 | |
| 3 | | | 1 | | | | | 1 | 1 | | | | 1 | 1 | 1 | | | | 1 | | | | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | | 1 | 1 | 1 | 1 | |
| 4 | | | | 1 | | | | | | 1 | | | 1 | | | 1 | 1 | | | 1 | | | 1 | | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 3 | |
| 5 | | | | | 1 | | | | | | 1 | | | 1 | | 1 | | 1 | | 1 | | | 1 | | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 3 | |
| 6 | | | | | | 1 | | | | | | 1 | | | 1 | 1 | 1 | | | | | 1 | | | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | |
| x | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 1/2 | | | | | | | | | | | | | | | 1/2 | 1/2 | | | |

- $x_{34} = x_{34} = x_{19} = 1/2$, Kosten $(9+9+12)/2=15$ [18]

- $y_1 + y_2 + y_3 = 9$

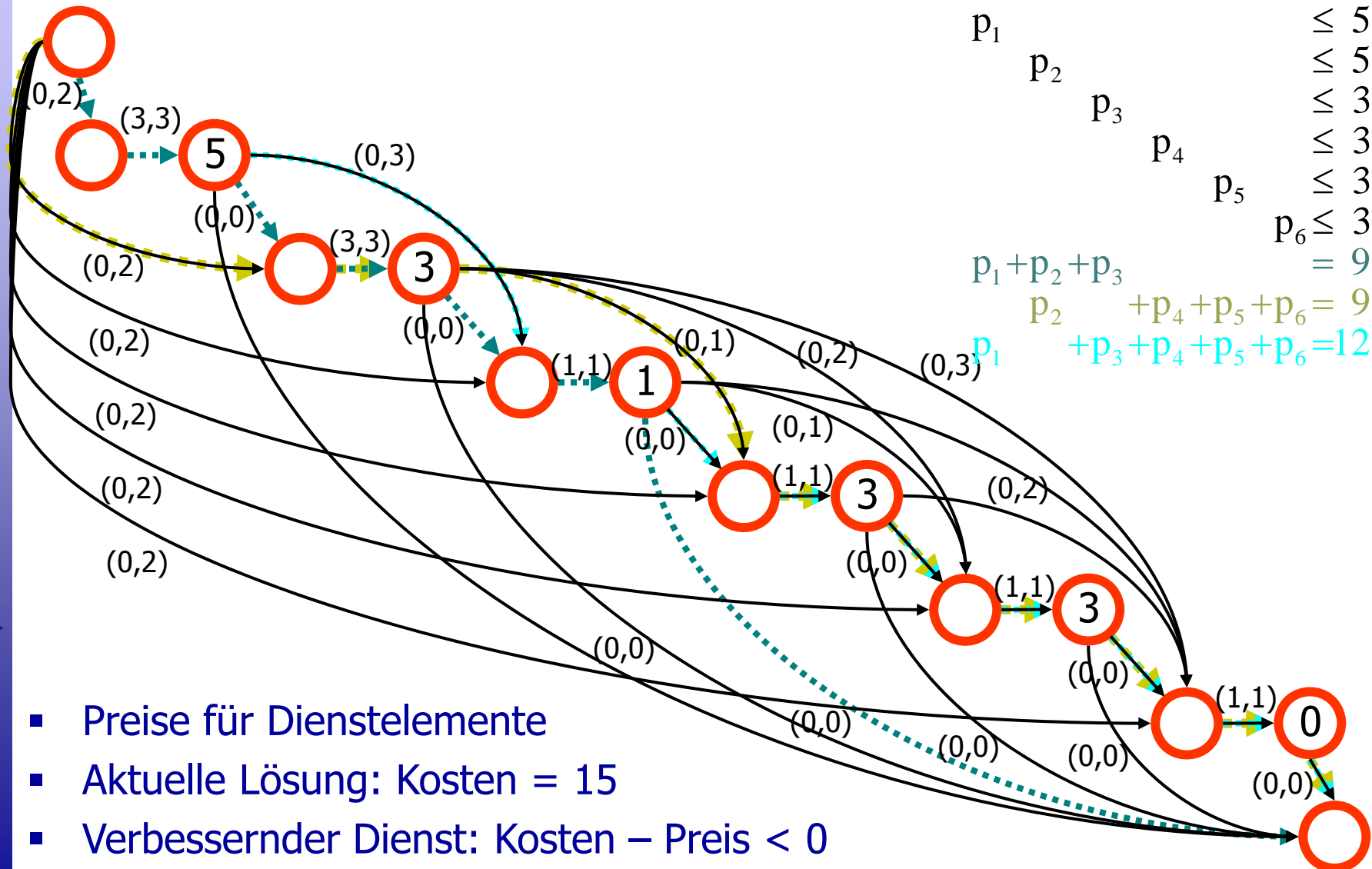
$$y_2 + y_4 + y_5 + y_6 = 9$$

$$y_1 + y_3 + y_4 + y_5 + y_5 = 12$$

$$\Rightarrow y_1 = 5, y_2 = y_4 = y_5 = 3, y_3 = 1, y_6 = 0$$



Spaltenerzeugungsmethode

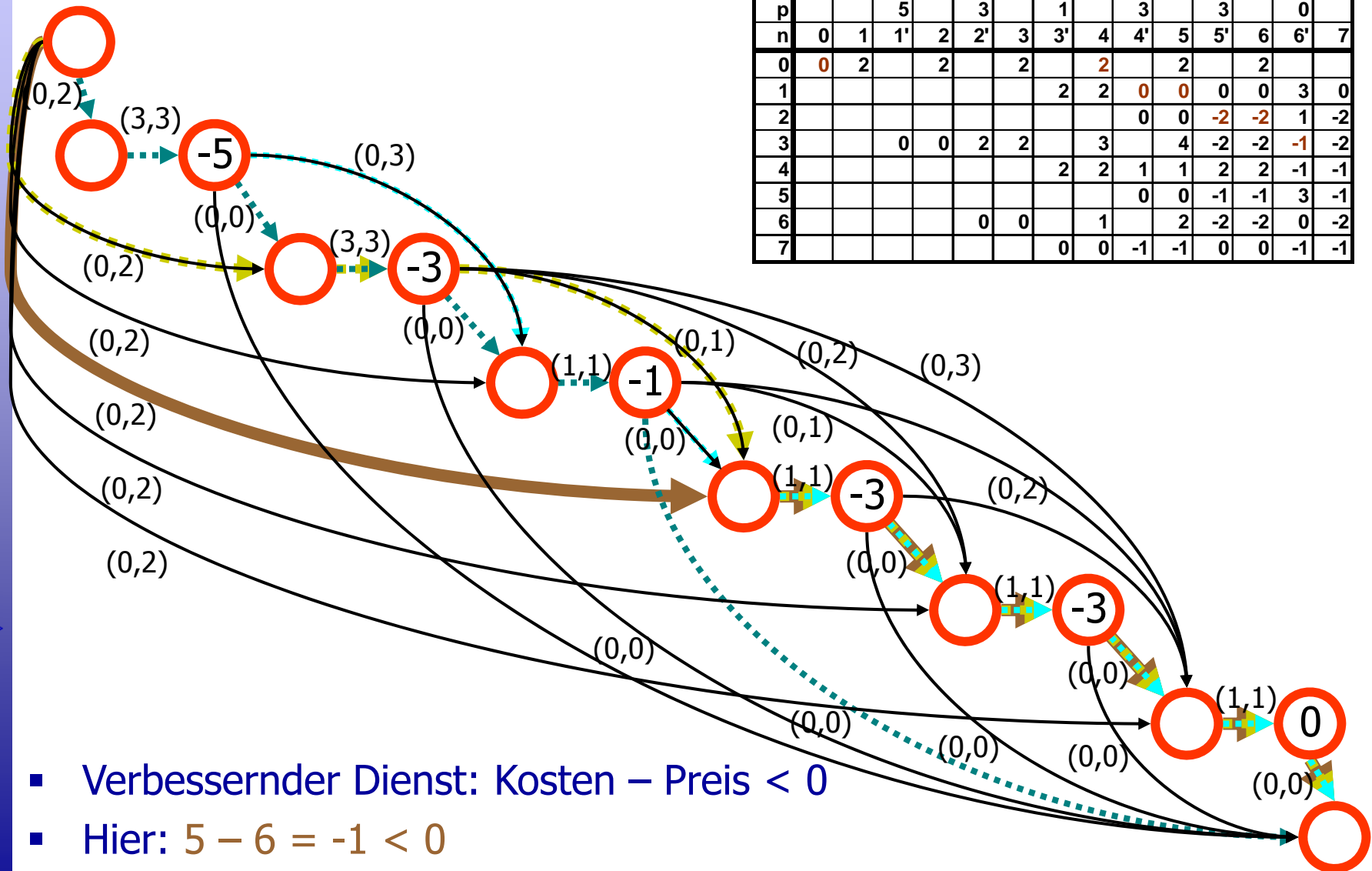


- Preise für Dienstelemente
- Aktuelle Lösung: Kosten = 15
- Verbessernder Dienst: Kosten – Preis < 0



Spaltenerzeugungsmethode

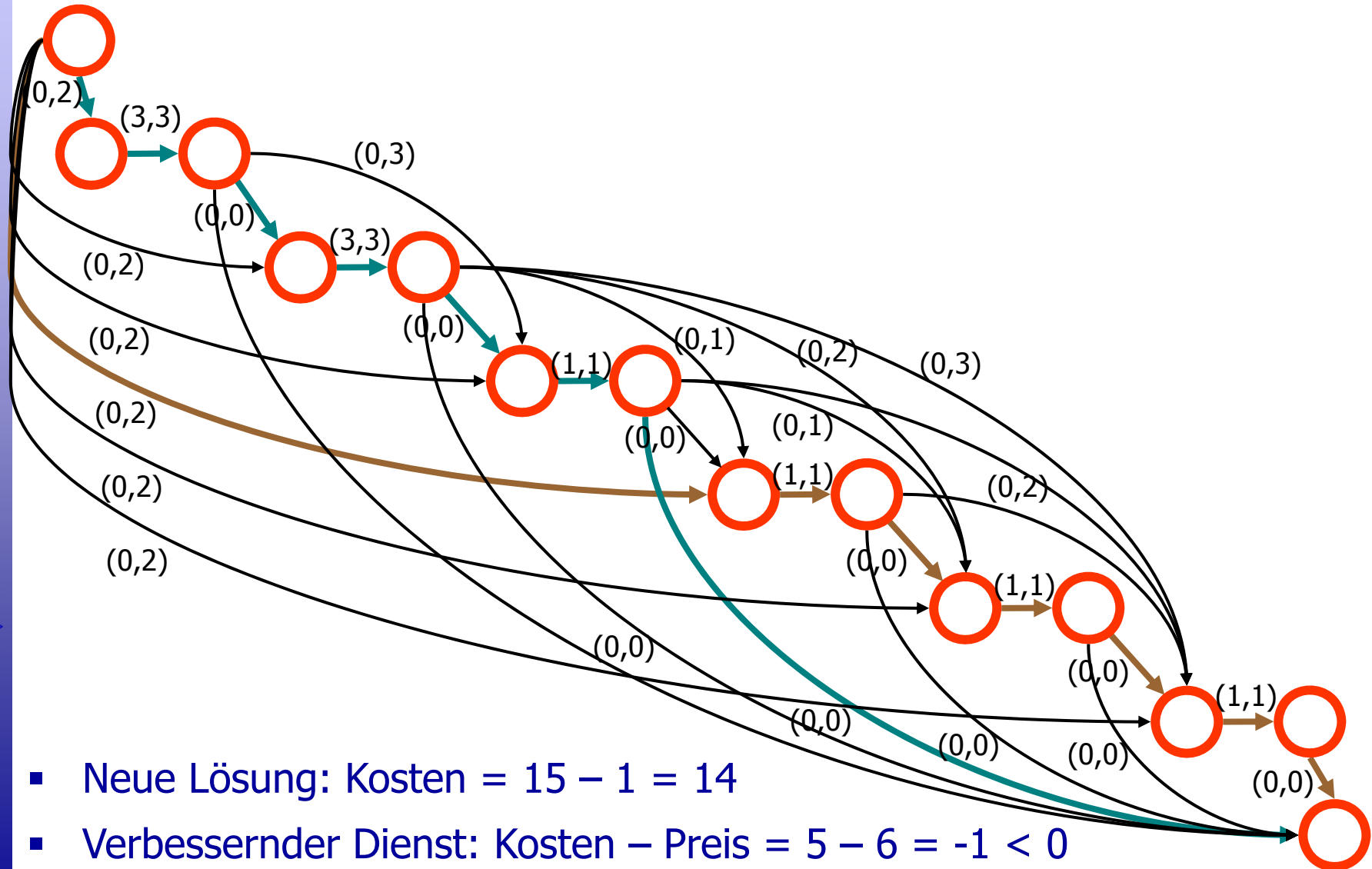
| p | | | 5 | 3 | 1 | 3 | 3 | 0 | | | | | | |
|---|---|---|----|---|----|---|----|---|----|----|----|----|----|----|
| n | 0 | 1 | 1' | 2 | 2' | 3 | 3' | 4 | 4' | 5 | 5' | 6 | 6' | 7 |
| 0 | 0 | 2 | | 2 | | 2 | | 2 | | 2 | | 2 | | |
| 1 | | | | | | | 2 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 | 0 |
| 2 | | | | | | | | 0 | 0 | -2 | -2 | 1 | -2 | |
| 3 | | | 0 | 0 | 2 | 2 | | 3 | | 4 | -2 | -2 | -1 | -2 |
| 4 | | | | | | | 2 | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 | -1 | -1 |
| 5 | | | | | | | | | 0 | 0 | -1 | -1 | 3 | -1 |
| 6 | | | | | 0 | 0 | 1 | | 2 | -2 | -2 | 0 | -2 | |
| 7 | | | | | | | 0 | 0 | -1 | -1 | 0 | 0 | -1 | -1 |



- Verbessernder Dienst: $\text{Kosten} - \text{Preis} < 0$
- Hier: $5 - 6 = -1 < 0$



Spaltenerzeugungsmethode



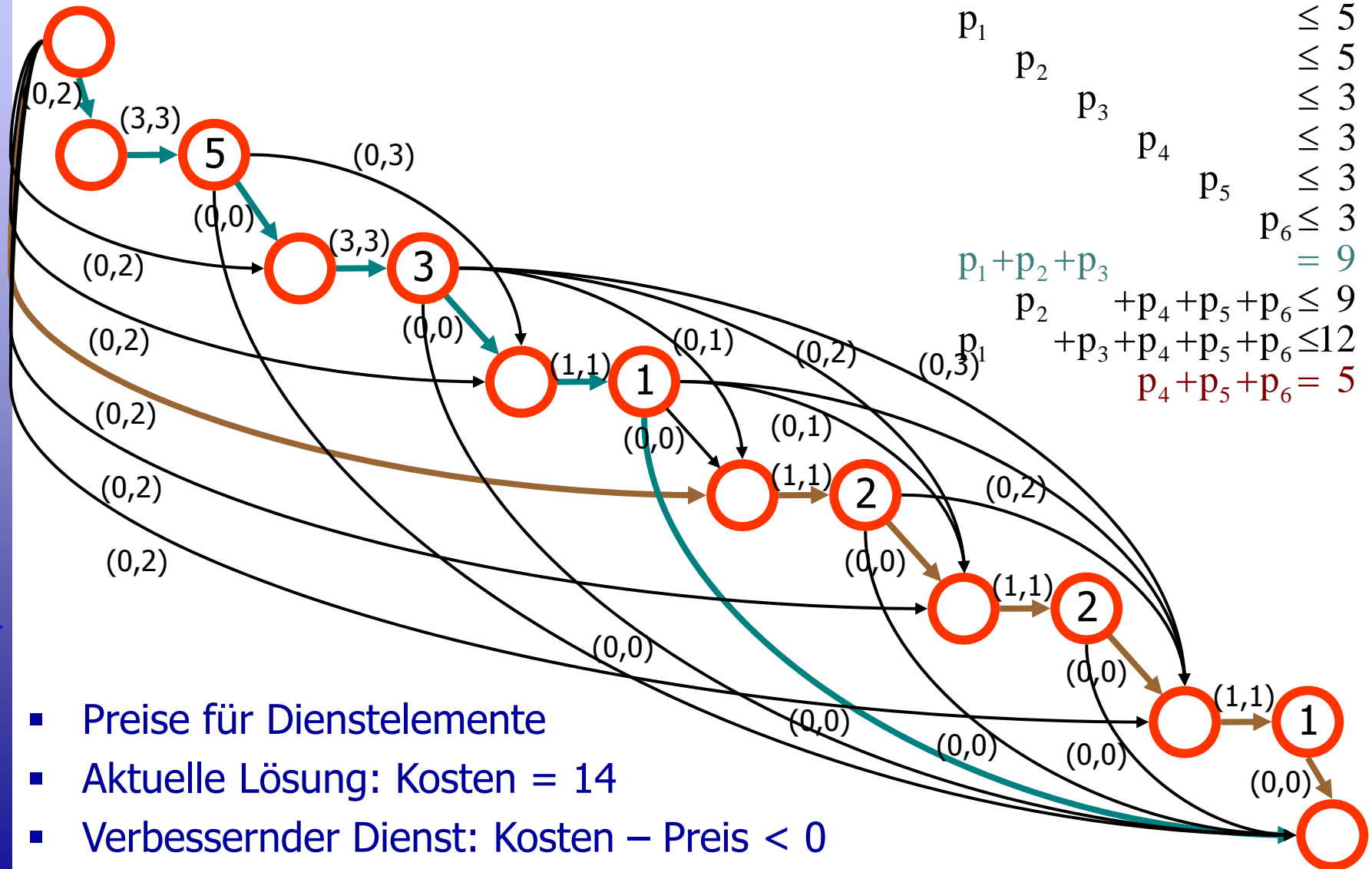
Spaltenerzeugung

| no | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 | 37 | |
|----|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|---|
| c | 5 | 5 | 3 | 3 | 3 | 3 | 8 | 9 | 6 | 7 | 8 | 9 | 4 | 5 | 6 | 4 | 5 | 4 | 9 | 10 | 11 | 12 | 7 | 8 | 9 | 5 | 6 | 5 | 11 | 12 | 12 | 8 | 9 | 9 | 6 | 12 | 9 | y |
| 1 | 1 | | | | | | 1 | 1 | | | | | | | | | | | 1 | 1 | 1 | 1 | | | | | | | 1 | 1 | 1 | | | | 1 | | 1 | 5 |
| 2 | | 1 | | | | | 1 | | 1 | 1 | 1 | 1 | | | | | | | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | | | | | | 1 | 1 | | 1 | | 1 | 3 | |
| 3 | | | 1 | | | | | 1 | 1 | | | | 1 | 1 | 1 | | | | 1 | | | | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | | 1 | 1 | | 1 | 1 | | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 4 | | | | 1 | | | | | | 1 | | | 1 | | | 1 | 1 | | | 1 | | | 1 | | | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 |
| 5 | | | | | 1 | | | | | | 1 | | | 1 | | 1 | | 1 | | 1 | | | 1 | | 1 | | 1 | 1 | | 1 | 1 | | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 |
| 6 | | | | | | 1 | | | | | | 1 | | | 1 | 1 | 1 | | | | | 1 | | | 1 | | 1 | 1 | | 1 | 1 | | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| x | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 1 | | | | | | | | 1 | | | | | | | | | | | |

- $x_{19} = x_{28} = 1$, Kosten $9+5=14$ [15]
- $y_1 + y_2 + y_3 = 9$
 $y_4 + y_5 + y_6 = 5 \Rightarrow y_1 = 5, y_2 = 3, y_3 = y_6 = 1, y_4 = y_5 = 2$
- Kein Dienst unterbietet die Preise
- Dualitätssatz (oder Simplexkriterium) $\Rightarrow x^*$ und y^* sind optimal



Spaltenerzeugungsmethode

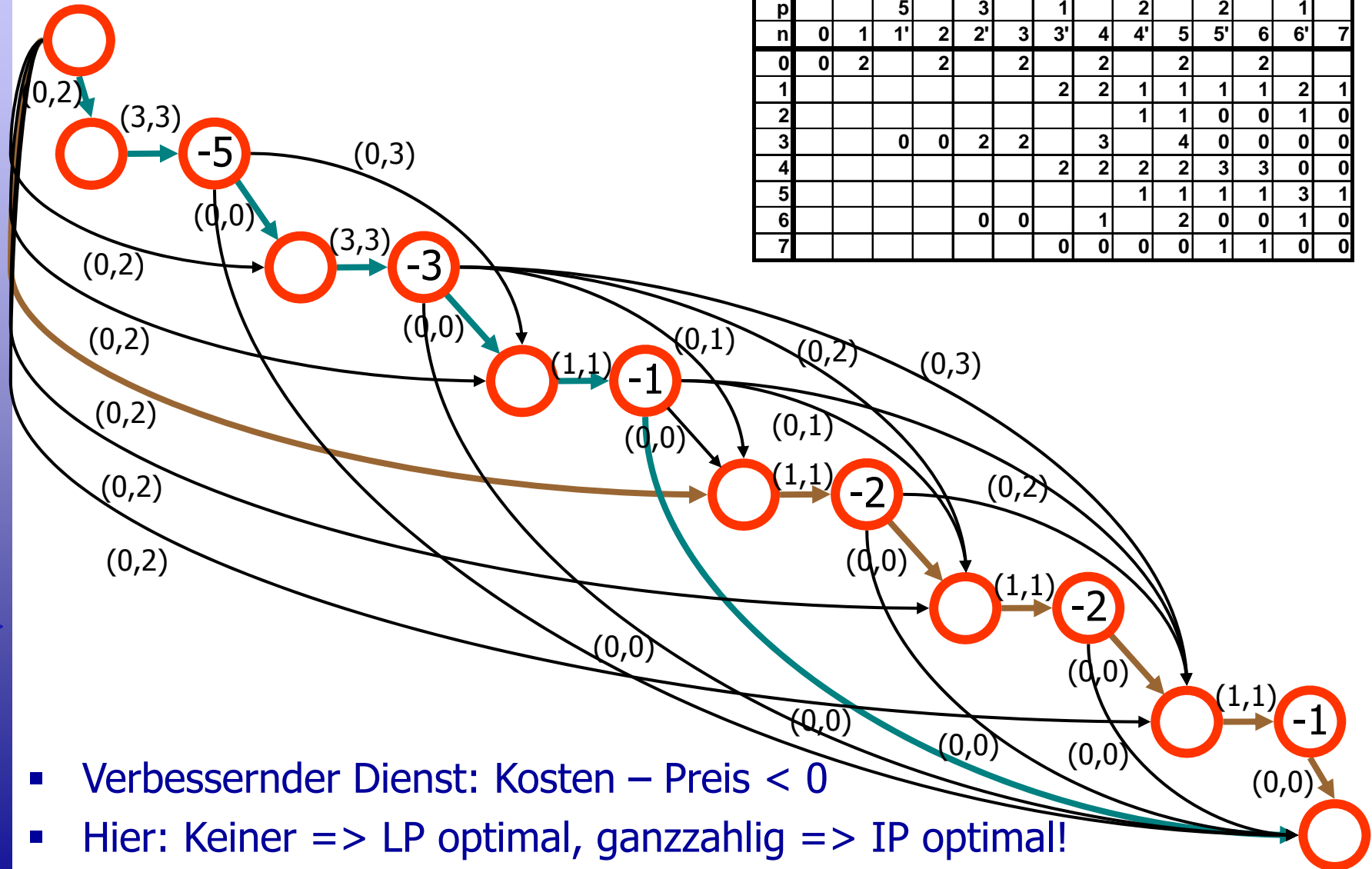


- Preise für Dienstelemente
- Aktuelle Lösung: Kosten = 14
- Verbessernder Dienst: Kosten – Preis < 0



Spaltenerzeugungsmethode

| p | | | 5 | 3 | 1 | 2 | 2 | 1 | | | | | | |
|---|---|---|----|---|----|---|----|---|----|---|----|---|----|---|
| n | 0 | 1 | 1' | 2 | 2' | 3 | 3' | 4 | 4' | 5 | 5' | 6 | 6' | 7 |
| 0 | 0 | 2 | | 2 | | 2 | | 2 | | 2 | | 2 | | |
| 1 | | | | | | | 2 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 1 |
| 2 | | | | | | | | | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| 3 | | | 0 | 0 | 2 | 2 | | 3 | | 4 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 4 | | | | | | | 2 | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 | 0 | 0 |
| 5 | | | | | | | | | 1 | 1 | 1 | 1 | 3 | 1 |
| 6 | | | | | 0 | 0 | | 1 | | 2 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| 7 | | | | | | | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 |



- Verbessernder Dienst: $\text{Kosten} - \text{Preis} < 0$
- Hier: Keiner \Rightarrow LP optimal, ganzzahlig \Rightarrow IP optimal!



Ganzzahliges Programm

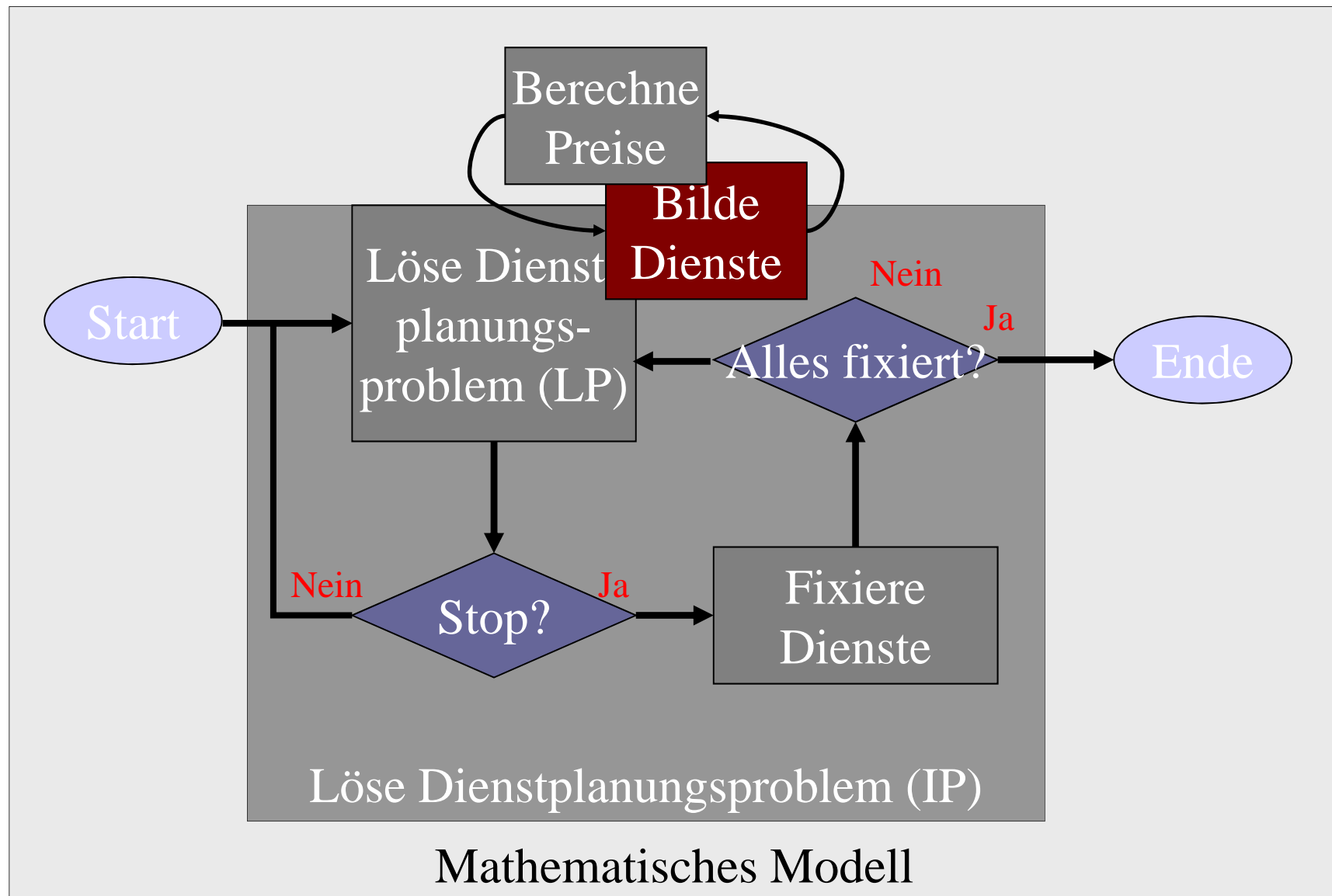
(Set-Partitioning-Problem mit Base-Constraints)

$$\begin{aligned} \min \quad & \sum_d c_d x_d \\ & \sum_{t \in d} x_d = 1 \quad \forall t \quad \text{Legs} \\ & \sum_{d \in m} x_d \leq K_m \quad \forall m \quad \text{Mix} \\ & x_d \in \{0,1\} \quad \forall d \quad \text{Integrality} \end{aligned}$$

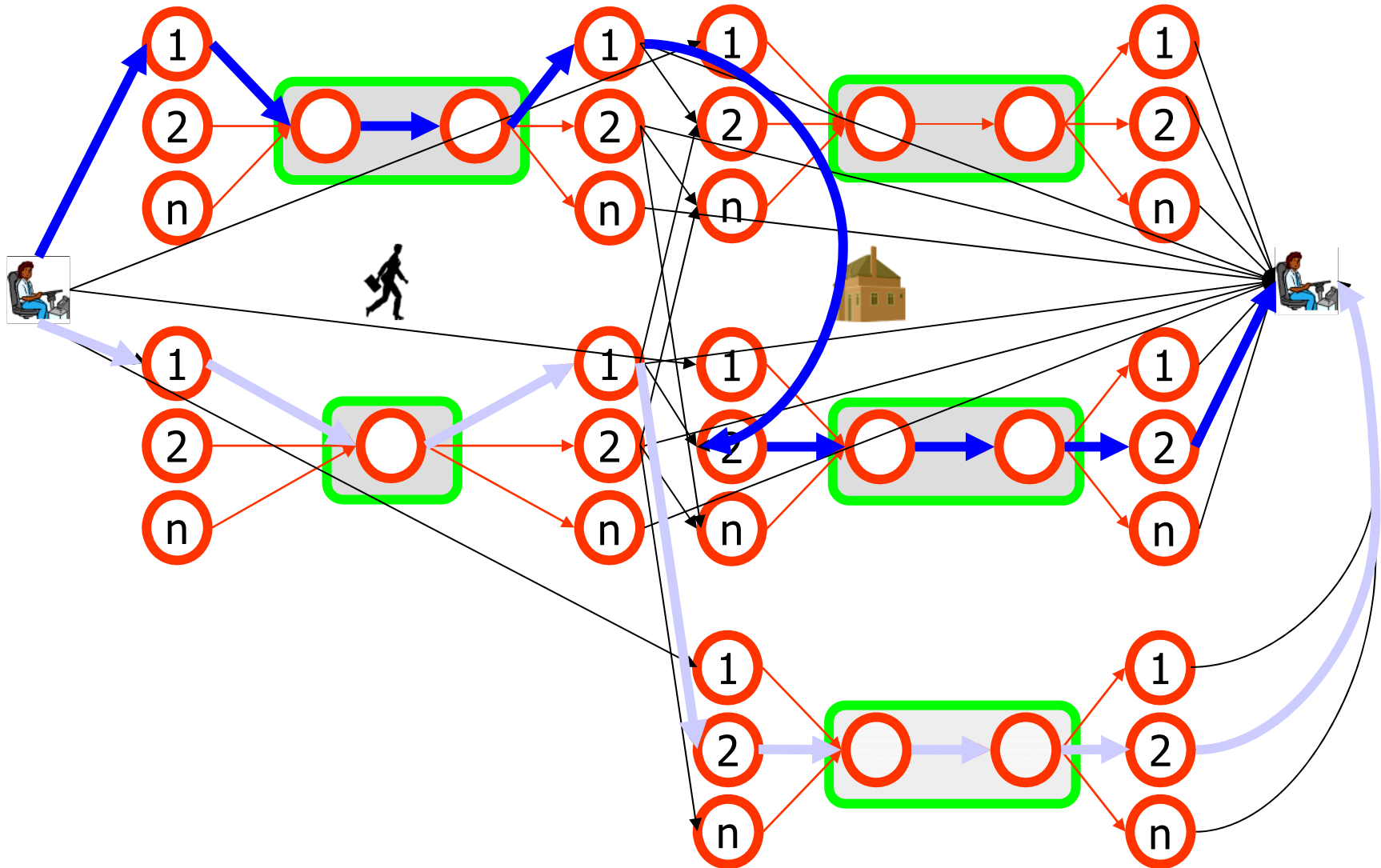


Spaltenerzeugungsmethode

(Branch-and-Generate, Marsten 1994)



Ergänzungselemente



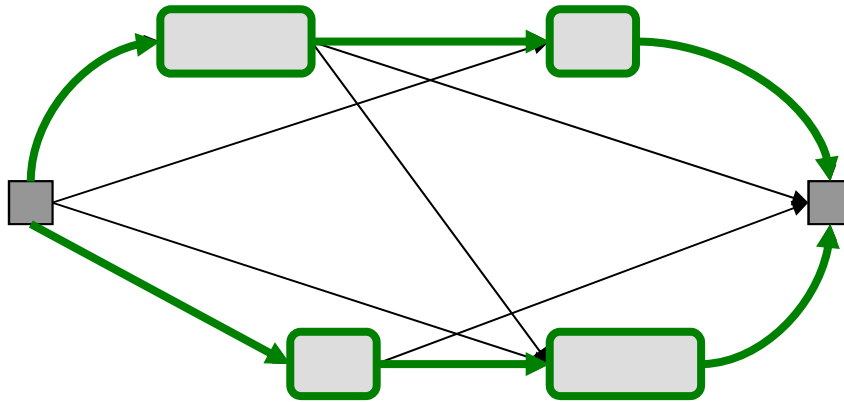
Gliederung

- Verkehrsoptimierung: ein kurzer Überblick
- Umlaufplanung
- Dienstplanung
- **Integrierte Umlauf- und Dienstplanung**
- Einige Ergebnisse

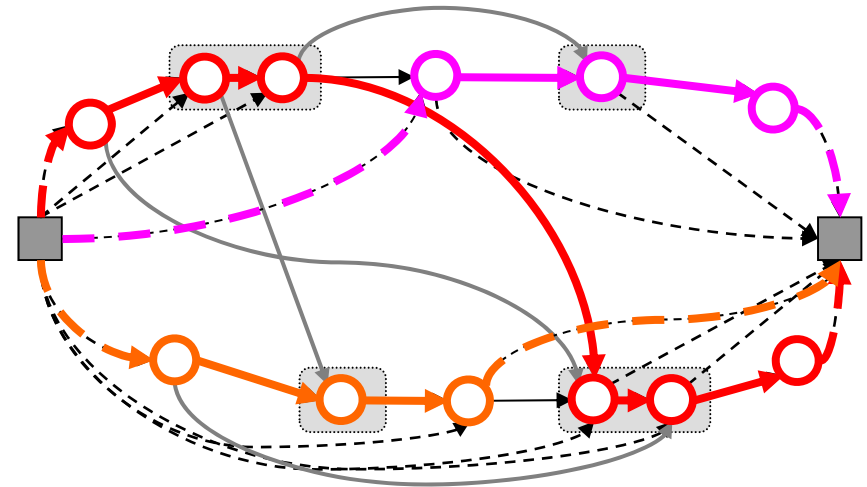


Graphentheoretisches Modell

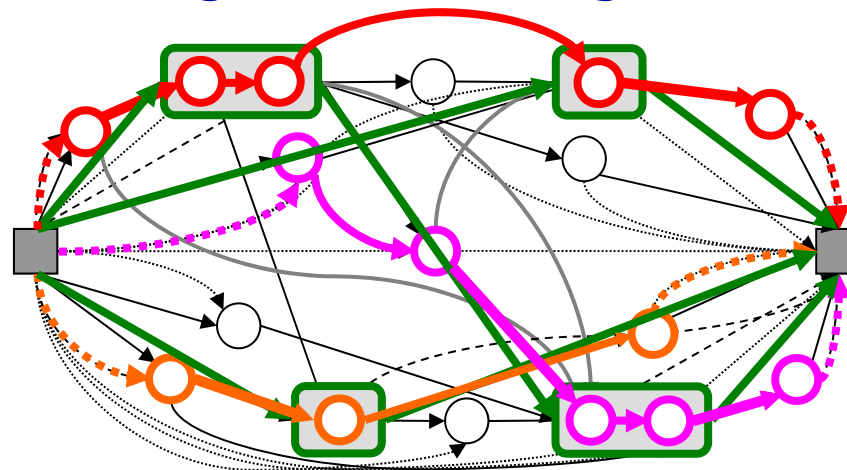
- Umlaufplanung



- Dienstplanung (Service Planning)



- Integrierte Planung (Integrated Planning)



IP Modell

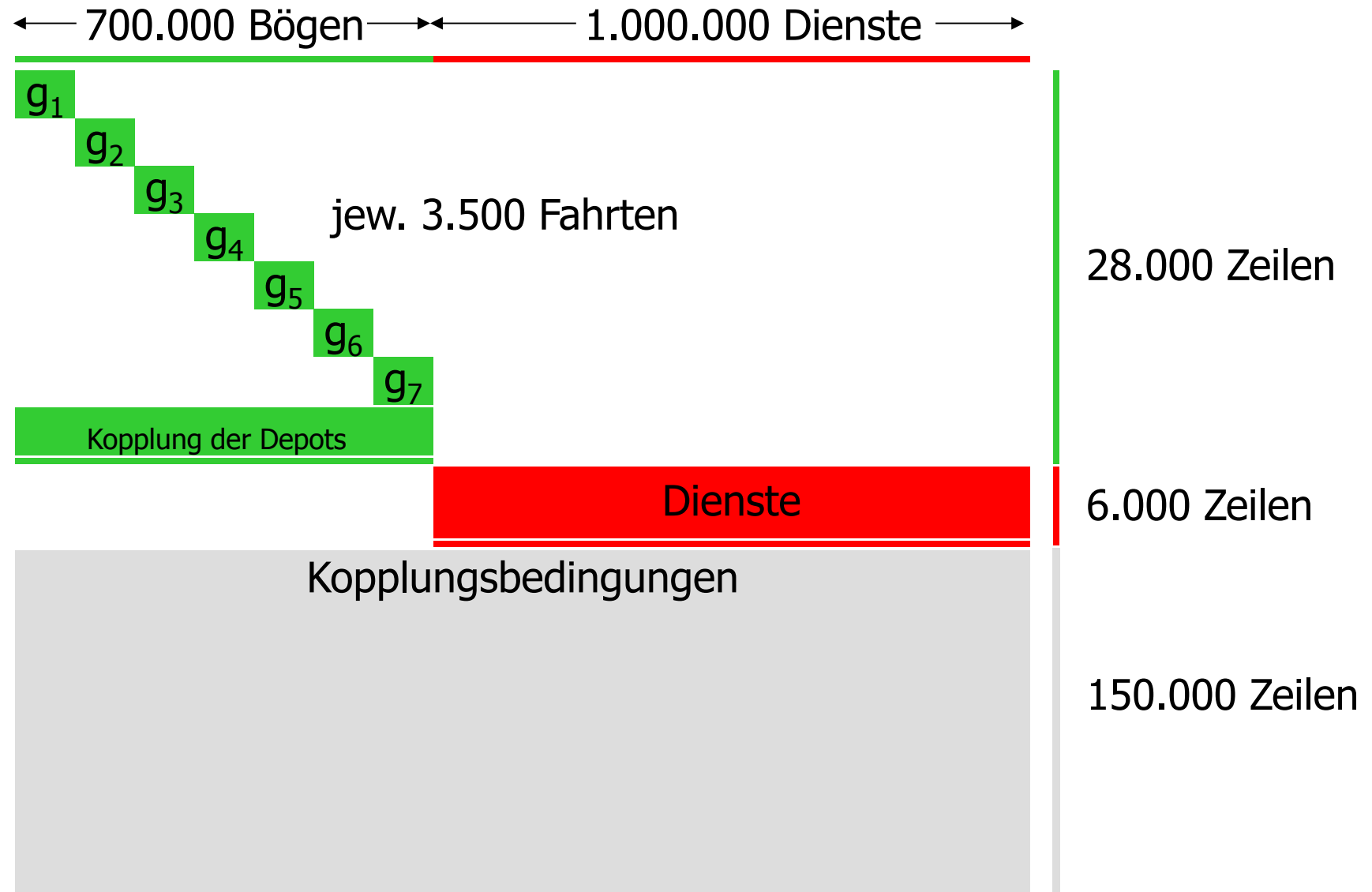
$$\begin{array}{ll}
 \text{(ISP) min} & \mathbf{c}^T \mathbf{x} \quad + \quad \mathbf{d}^T \mathbf{y} \\
 (1a) & \mathbf{x}(\delta_g^{\text{out}}(v)) = \mathbf{x}(\delta_g^{\text{in}}(v)) = 0, \quad \forall \text{ depots } g, \text{ trips } v \\
 (1b) & \mathbf{x}(\delta^{\text{out}}(v)) = 1, \quad \forall v \in V \setminus \{s, t\} \\
 (1c) & \sum_{a \in A_k} f_{ak} x_a \leq \kappa_k, \quad \forall K \in \mathcal{K} \\
 (2a) & \mathbf{A} \mathbf{y} = \mathbf{1} \\
 (2b) & \mathbf{B} \mathbf{y} \leq \mathbf{b} \\
 (3) & \mathbf{C} \mathbf{x} - \mathbf{D} \mathbf{y} = \mathbf{0} \\
 & \mathbf{x} \in \{0, 1\}^m, \quad \mathbf{y} \in \{0, 1\}^n
 \end{array}$$

$$C_{dt} := \begin{cases} 1, & \text{falls Leerfahrt } d \text{ Dienstelement } t \text{ enth\u00e4lt} \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$$

$$D_{dt} := \begin{cases} 1, & \text{falls Dienstelement } t \text{ von Dienst } d \text{ \u00fcberdeckt wird} \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$$



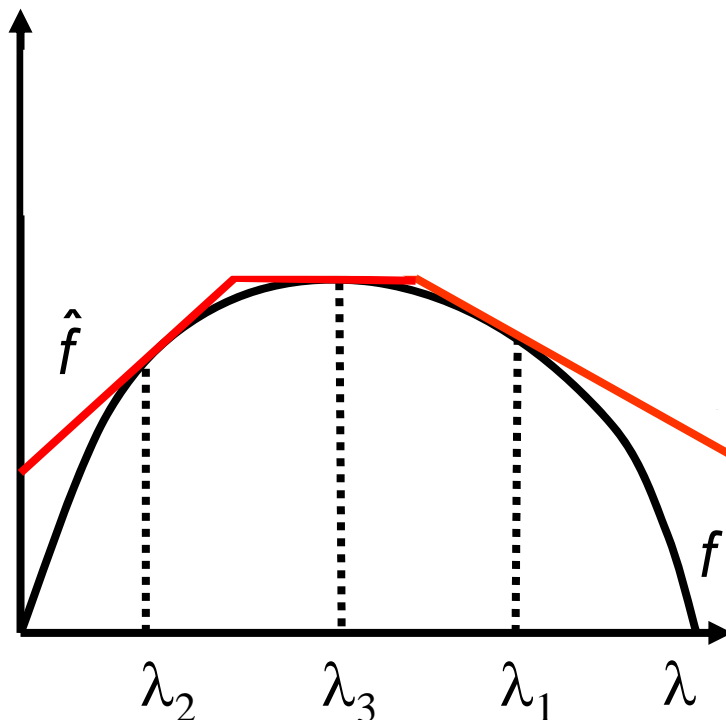
Struktur des Problems



Bündel-Methode zur Behandlung der Kopplungsbedingungen

(Kiwiel [1990], Helmberg [2000])

- Max $f(\lambda) := \min_{x \in X} c^T x + \lambda^T (b - Ax)$, X konvex
- f polyedrisch (stückweise linear)



$$\bar{f}_\mu(\lambda) = c^T x_\mu + \lambda^T (b - Ax_\mu)$$

$$\hat{f}_k(\lambda) := \min_{\mu \in J_k} \bar{f}_\mu(\lambda)$$

$$\lambda_{k+1} = \operatorname{argmax}_\lambda \hat{f}_k(\lambda) - \frac{u_k}{2} \|\lambda - \hat{\lambda}_k\|^2$$



Vergleich Bündel- u.a. Verfahren auf einem Dienstplanungsproblem

Dienstplanungsproblem Ivu41:

- 870.500 Spalten,
- 3.570 Zeilen
- 10,5 Non-zeroes pro Spalte

Coordinate Ascent: Schnell

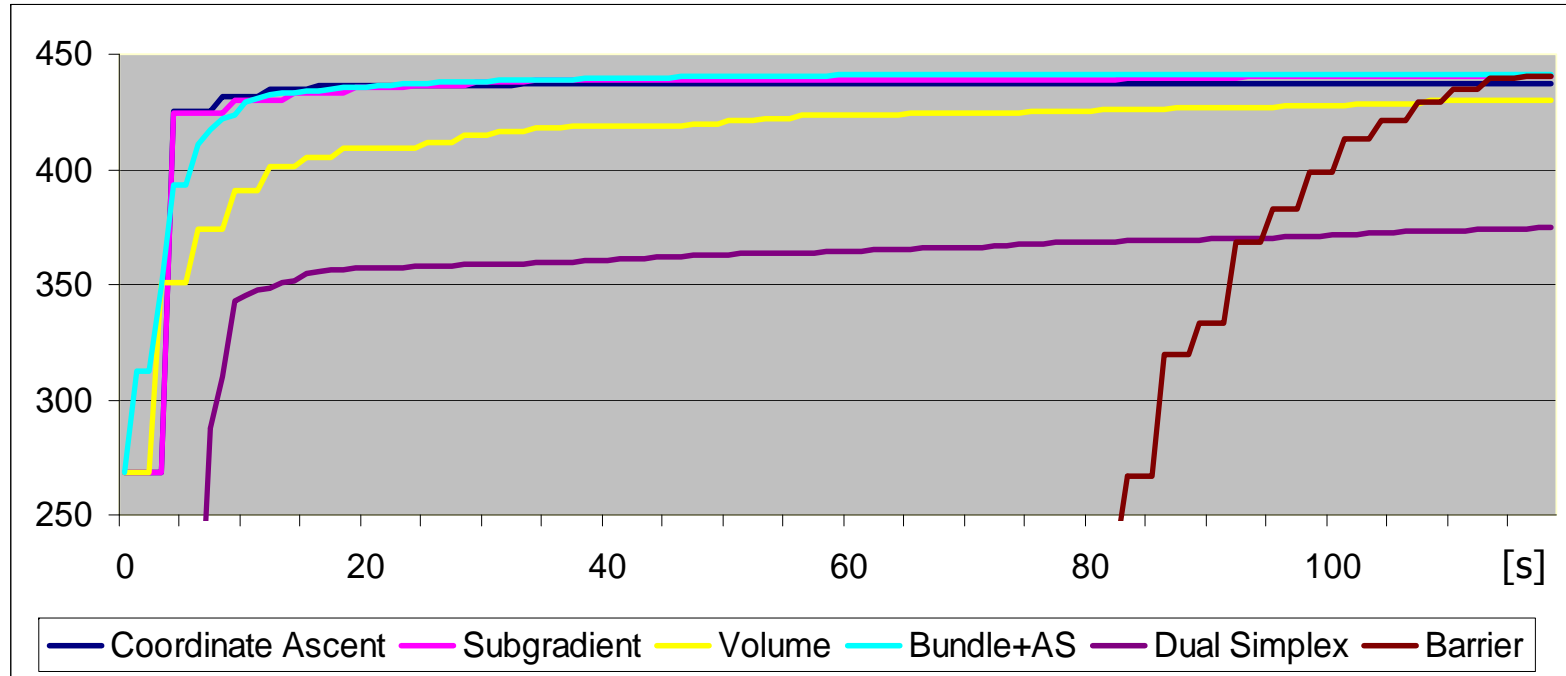
Subgradient: Konvergiert theoretisch

Volume: Primalapproximation

Bundle+AS: Kovergenz + Primalapprox.

Dual Simplex: Primal+dual optimal

Barrier: Primal+dual optimal

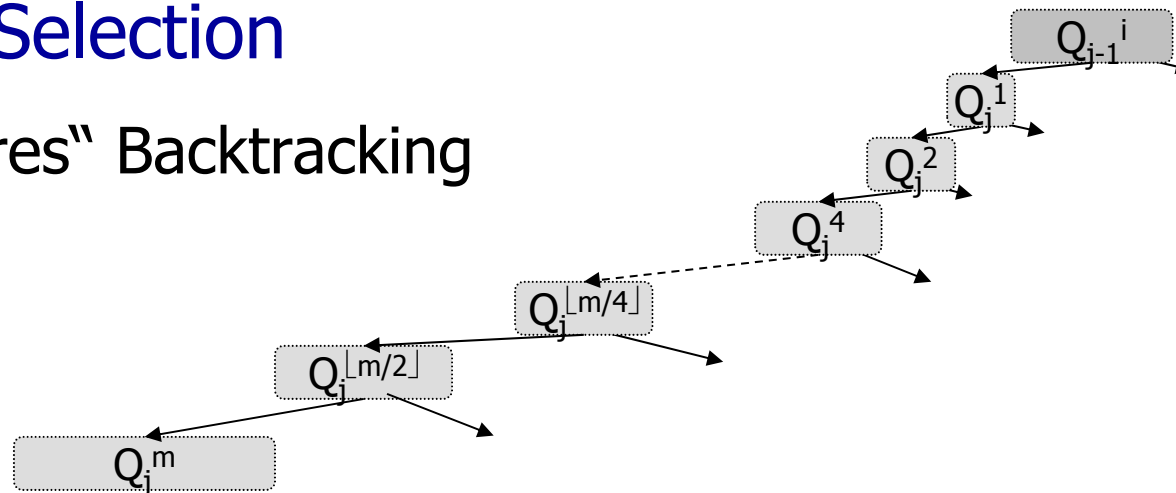


Primalheuristik

- Perturbation Branching
 - Iteratives Perturbieren der Zielfunktion und Lösen des LPs bis viele Variablen 1 sind.

- Node Selection

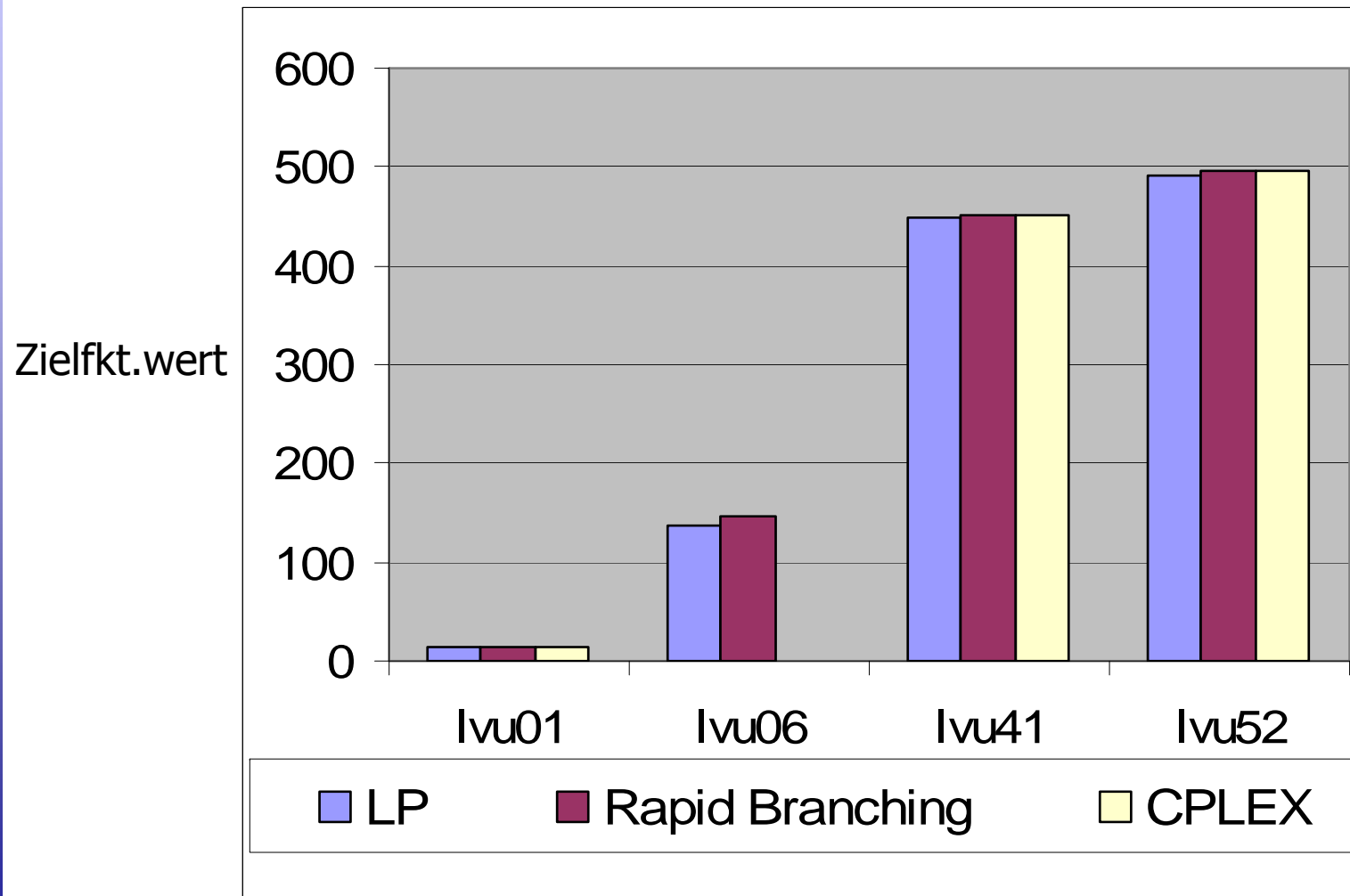
- „binäres“ Backtracking



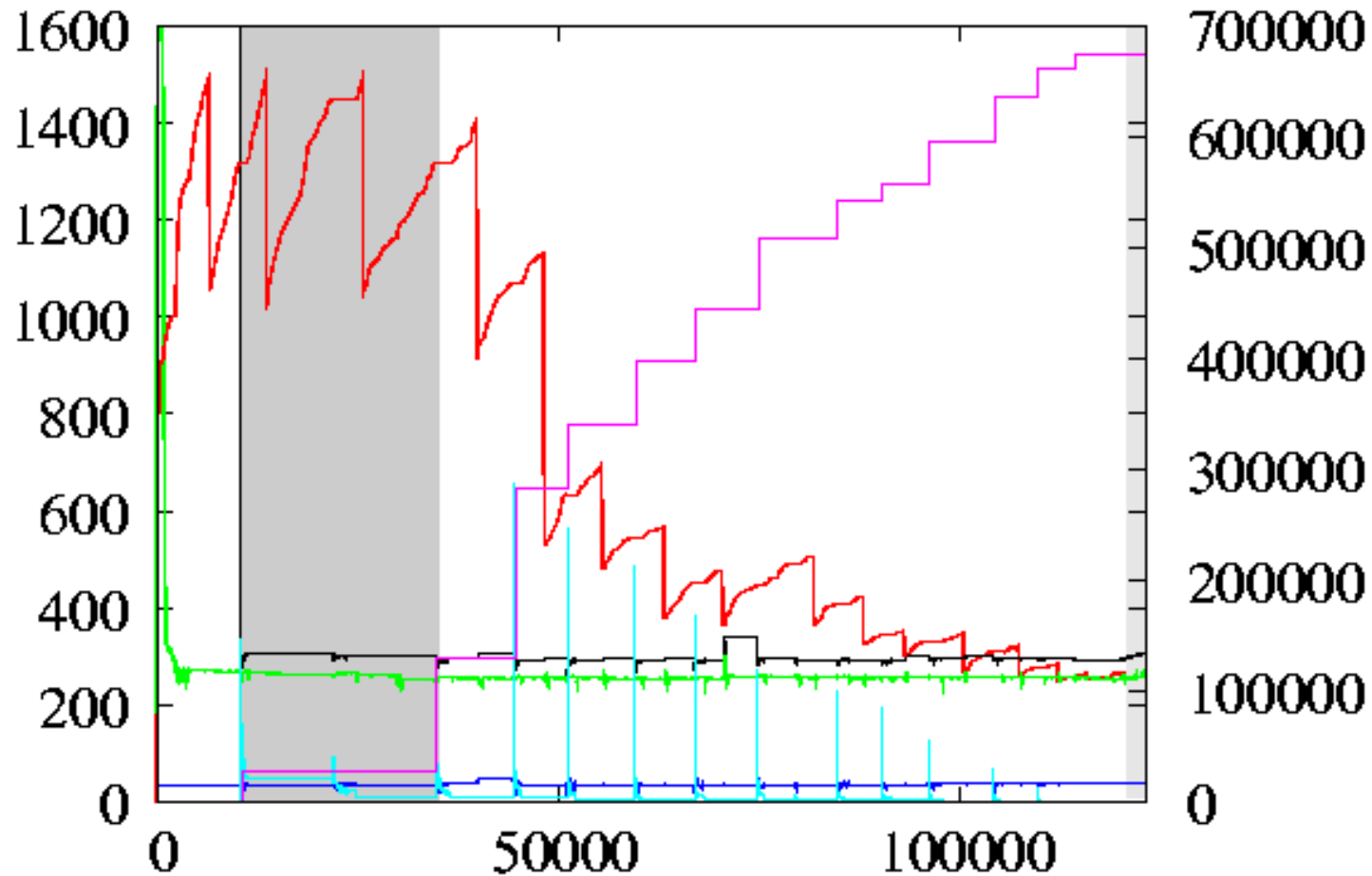
- Untere Schranke mit approx. Bündelmethode



Vergleich: Zielfunktionswerte Rapid Branching und CPLEX 10.0



Rechengang



objective value —
 VS value —
 DS value —

norm —
 #columns —
 #fixed deadheads —



Integrierte Planung 1983-2007

| <i>Artikel</i> | <i>F</i> typen | <i>FF</i> | <i>v</i> | <i>d</i> | <i>Problem</i> |
|----------------------------|----------------|-----------|----------|----------|------------------------------|
| Ball et al. [1983] | 1 | 1 000 | -- | 133 | sequentielle Planung |
| Scott [1985] | 1 | 456 | 54 | -- | VSP + Schätzung Dienstkosten |
| Tosini & Vercellis [1988] | 17 | 300 | -- | -- | VSP + zus. Bedingungen |
| Falkner & Ryan [1992] | 1 | 182 | -- | 41 | DSP + zus. Bedingungen |
| Patrikalakis et al. [1992] | -- | 111 | 20 | 45 | DSP + Min-Cost-Flow |
| Gaffi & Nonato [1997] | 28 | 257 | 44 | 65 | ISP ohne Ablösen |
| Freling [1997] | 1 | 296 | 38 | 90 | ISP |
| Friberg & Haase [1997] | 1 | 30 | -- | -- | DSP + SPP zur Optimalität |
| Freling et al. [2000] | 1 | 476 | 9 | 23 | ISP |
| Huisman [2004] | -- | 653 | 67 | 117 | ISP |
| Weider [2007] | 7 | 3 698 | 209 | 260 | ISP + Kap. + Ressourcenbed. |

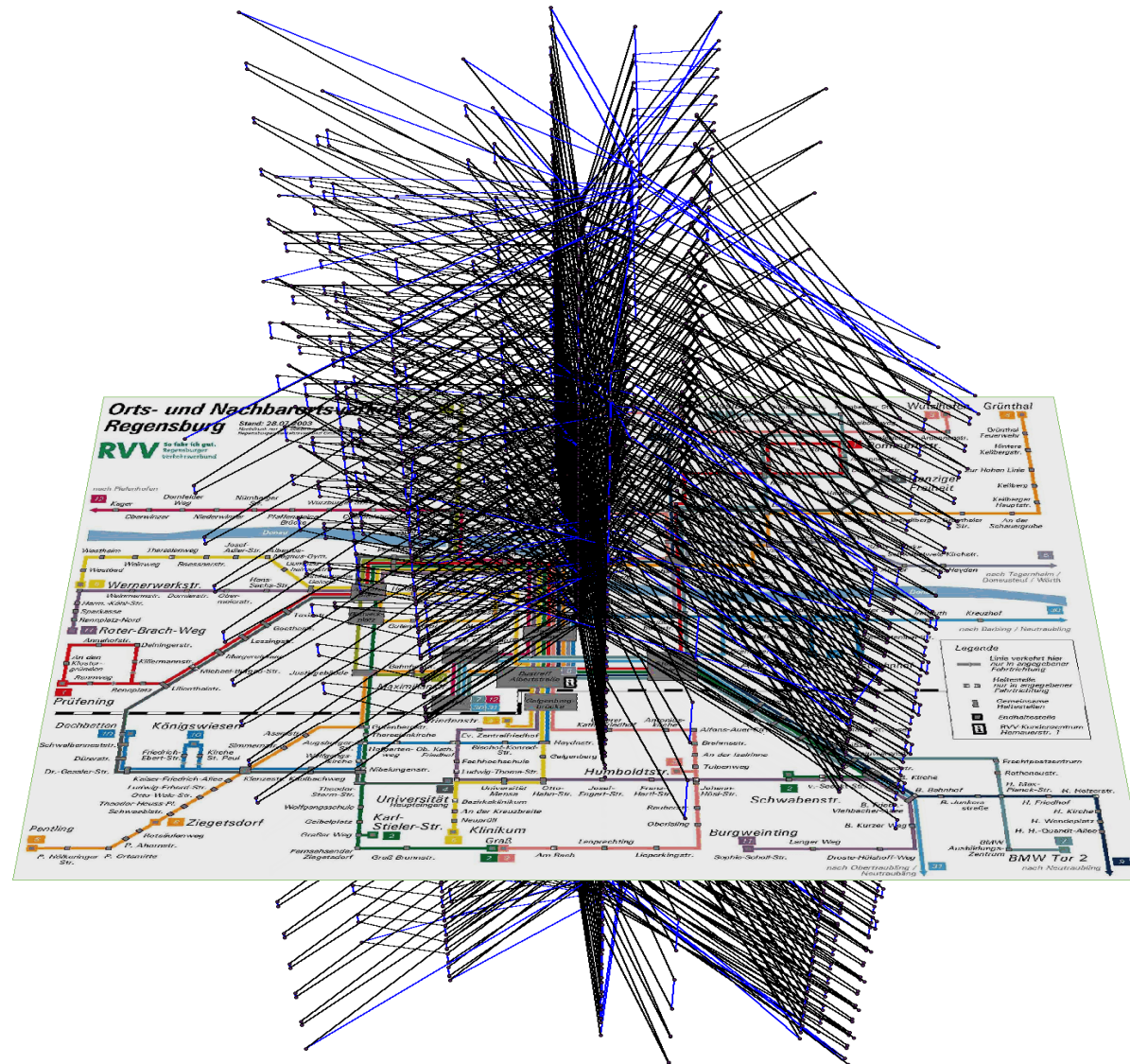


Gliederung

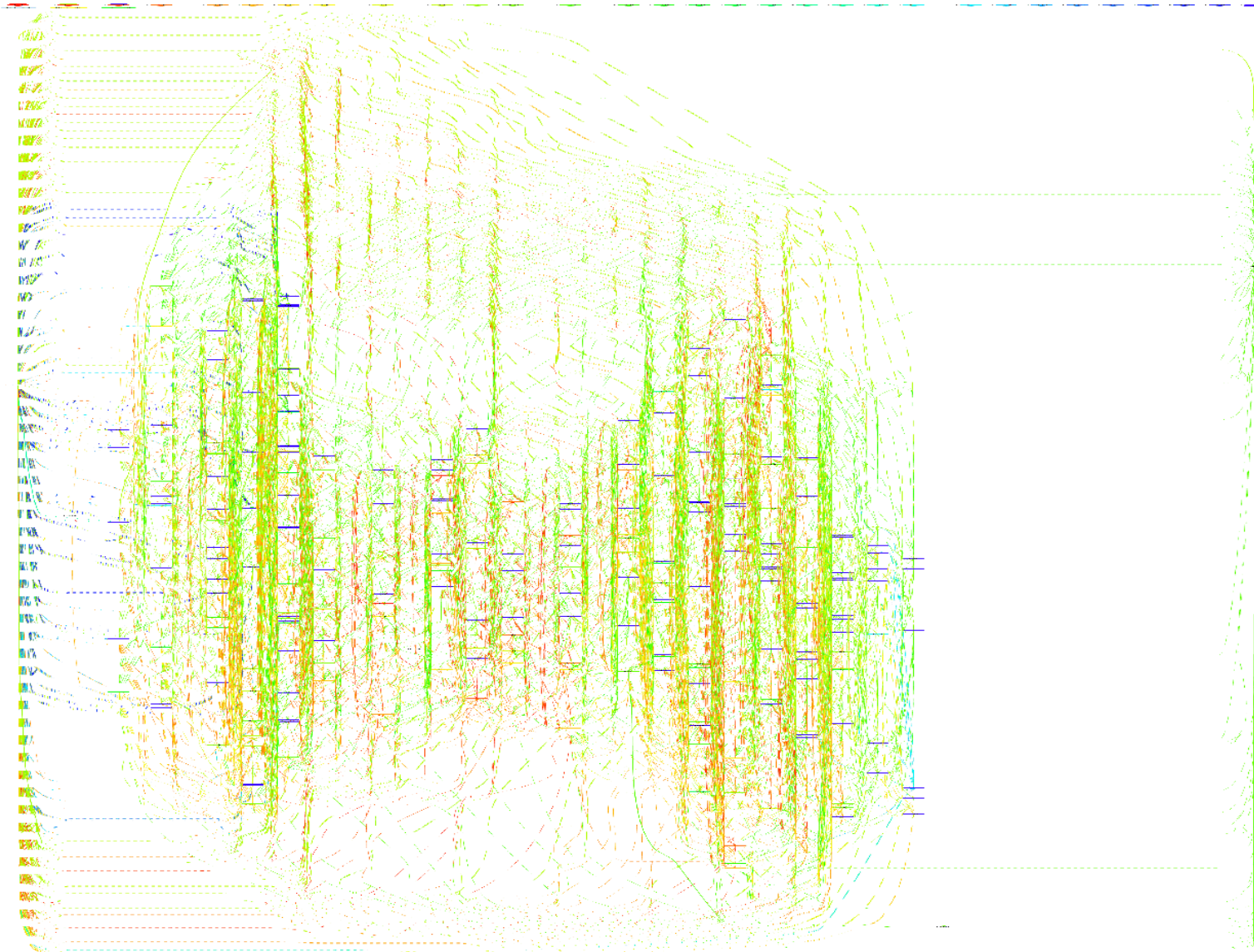
- Verkehrsoptimierung: ein kurzer Überblick
- Umlaufplanung
- Dienstplanung
- Integrierte Umlauf- und Dienstplanung
- Einige Ergebnisse






Umlaufplanung im ÖPNV



Dienstplanung im ÖPNV



Fazit:

-  Einsparziele durch die Optimierungen wurden voll erfüllt.
-  Durch die vollständige Verplanung aller Dienststücke ist der manuelle Bearbeitungsaufwand - nach anfänglichem Mehraufwand durch Eingabe der Grunddaten - drastisch gesunken, so dass zu einem Fahrplanwechsel z.B. dem BR mehrere kostengünstige Varianten zur Auswahl vorgelegt werden können.
-  Der Betrieb wird in die Lage versetzt, mehrere Varianten z.B. zur Kalkulation von zukünftigen Aufträgen zu erstellen.

In Bonn wird z.Z. über die Verlagerung eines Busbetriebshofes nachgedacht. Mit der Umlauf- und Dienstplanoptimierung wurden wir in die Lage versetzt, die Kosten durch mehr Ein- und Aussetzkilometer bzw. -zeiten schnell und relativ genau zu ermitteln.

Folie der SWB

Optimierungsprojekt ESWE Wiesbaden Ergebnisse



| | Dienst- art | Dienst- anzahl | bezahlte Zeit | | Dienstdauer | |
|---|----------------|-------------------|----------------|-------------|----------------|-------------|
| | | | Summe | Mittel | Summe | Mittel |
| Analyse | ZUS | 218 | 1684:00 | 7:43 | 1684:00 | 7:43 |
| | GET | 59 | 460:29 | 7:48 | 460:29 | 7:48 |
| | KURZ | 6 | 7:59 | 1:19 | 7:59 | 1:19 |
| | Summe | 283 | 2152:28 | 7:36 | 2152:28 | 7:36 |
| Szenario 1 wie Analyse, aber Abzug 1x30 | ZUS | 222 | 1660:21 | 7:28 | 1689:21 | 7:36 |
| | GET | 57 | 461:44 | 8:06 | 463:14 | 8:07 |
| | KURZ | 4 | 3:36 | 0:54 | 3:36 | 0:54 |
| | Summe | 283 | 2125:41 | 7:30 | 2156:11 | 7:37 |
| Szenario 2 wie Analyse, aber GET bis 19:00 | ZUS | 173 | 1470:47 | 8:30 | 1470:47 | 8:30 |
| | GET | 76 (40)* | 659:06 | 8:40 | 659:06 | 8:40 |
| | KURZ | 4 | 4:32 | 1:08 | 4:32 | 1:08 |
| | Summe | 253 | 2134:25 | 8:26 | 2134:25 | 8:26 |
| Szenario 3 Abzug 1x30 GET bis 19:00 | ZUS | 193 | 1610:46 | 8:20 | 1634:16 | 8:28 |
| | GET | 58 (38)* | 503:36 | 8:40 | 504:36 | 8:42 |
| | KURZ | 0 | | | | |
| | Summe | 251 | 2114:22 | 8:25 | 2138:52 | 8:31 |
| Szenario 4 Abzug 1x30 GET bis 20:00 | ZUS | 175 | 1510:34 | 8:37 | 1534:34 | 8:46 |
| | GET | 67 (36)* | 602:36 | 8:59 | 605:06 | 9:01 |
| | KURZ | 0 | | | | |
| | Summe | 242 | 2113:10 | 8:43 | 2139:40 | 8:50 |

* Anteil der geteilten Dienste mit Dienstende nach 18:00 Uhr

BVG (Berlin)

Systematisierter Einsatz

Die neuen Optimierungsmethoden, die die BVG jetzt nach und nach nutzen will, stammen vom Konrad-Zuse-Zentrum für Informationstechnik und garantieren nach Roß' Angaben Einsparungen von maximal 100 Millionen Mark im Jahr. „Sie sind nötig, um unser Angebot in dieser schweren Lage stabilisieren und dem Einsparungsdruck überhaupt standhalten zu können.“

Bereits 1991 beauftragte die BVG die Berliner Software-Firma IVU, ein EDV-System zur Betriebsplanung zu entwickeln. IVU steht für „Gesellschaft für Information, Verkehrs- und Umweltplanung GmbH“, ein Unternehmen mit 120 Mitarbeitern, das auf Verkehrsplanung und Logistik spezialisiert ist. Der BVG ging es bei dem Auftrag vor allem darum, die Einsatzplanung ihrer Fahrzeuge zu systematisieren.

INFORMATIK / Ein Lehrbeispiel, wie sich Mathematik und Wirtschaft ergänzen

Auf Sparkurs zum Ziel

Das Berliner Busnetz kostet jährlich Millionen. Mit Hilfe moderner Software könnte man auf gewaltige Zuschüsse verzichten.

■ YASCO ALEXANDER SCHMIDT

Die Mathematik ist die Wissenschaft abstrakter Probleme. Deshalb erscheint sie so oft als weltabgewandte Spielerei. Doch das ist nur die halbe Wahrheit. Längst mischt sich die Mathematik in die Praxis ein. Überall, wo in der Wirtschaft gespart und verbessert werden muß, kann sie helfen. Professor Martin Grötschel, Vizepräsident des Konrad-Zuse-Zentrums für Informationstechnik in Berlin, steht für das neue Selbstbewußtsein der angewandten Mathematik. Er ist Experte für die kombinatorische Optimierung. Seine Botschaft: „Wer heute die großen Verkehrsnetze und komplizierten Fabriken optimieren will, muß sich mit Mathematik beschäftigen, um unnötige Kosten zu vermeiden.“

Nun gibt es in Berlin ein Lehrbeispiel, wie Mathematik und Wirtschaft zueinanderkommen können. Die Berliner Verkehrsbetriebe (BVG) haben vor wenigen Wochen begonnen, die Einsatzplanung ihrer Fahrzeuge zu verbessern. Bisher wurden die Pläne, wenn auch mit Computerhilfe, per Hand erstellt. Von einer kostenintensiven Planung war man weit entfernt.

Um ihre Kosten zu decken, hat die BVG für ihr Jahr große Zuschüsse vom Berliner Senat bekommen. Doch damit ist nun Schluss: dem Land Berlin geht das Geld aus, so daß auch die BVG unter einem enormen Sparzwang steht. „Wir müssen jährlich dreistellige Millionenbeträge einsparen“, erklärt Jürgen Roß, Planungingenieur bei der BVG. „Bis zum Jahr 2000 können wir von den heute rund 21 000 Mitarbeitern nur noch 15 000 beschäftigen.“

Systematisierter Einsatz

Die neuen Optimierungsmethoden, die die BVG jetzt nach und nach nutzen will, stammen vom Konrad-Zuse-Zentrum für Informationstechnik und garantieren nach Roß' Angaben Einsparungen von maximal 100 Millionen Mark im Jahr. „Sie sind nötig, um unser Angebot in dieser schweren Lage stabilisieren und dem Einsparungsdruck überhaupt standhalten zu können.“

Bereits 1991 beauftragte die BVG die Berliner Software-Firma IVU, ein EDV-System zur Betriebsplanung zu entwickeln. IVU steht für „Gesellschaft für Information, Verkehrs- und Umweltplanung GmbH“, ein Unternehmen mit 120 Mitarbeitern, das auf Verkehrsplanung und Logistik spezialisiert ist. Der BVG ging es bei dem Auftrag vor allem darum, die Einsatzplanung ihrer Fahrzeuge zu systematisieren.

Stadt anhängen, auf Knopfdruck und ohne Umwege über eine Druckerlei im eigenen Haus produzieren. Nach und nach wurden diese Werkzeuge eingeführt. Das jetzt installierte Optimierungsmodell für die Umlaufplanung von Straßenbahnen und Bussen ist der bisher bedeutendste Schritt der Zusammenarbeit.

Komfortable Hilfe

Zwar werden in Deutschland für die Verkehrsplanung meist schon Computer eingesetzt; diese aber unterstützen die Planer oft nur als ein einfaches, wenn auch komfortables Hilfsmittel. Andere Verkehrsunternehmen, etwa die Hamburger Hochbahn AG, setzen Computer schon seit Ende der sechziger Jahre ein, um Näherungslösungen für optimale Pläne zu berechnen. Die Forscher am Konrad-Zuse-Zentrum konnten noch einen Schritt weiter gehen: Ihre Computer berechnen das Optimum der Kosteneinsparung nicht nur annähernd, sondern ganz exakt. Ein wissenschaftlicher Durchbruch.

Die mathematische Grundlage ihrer Rechner bildet eine komplexe Gleichungssystem, eine sogenannte Matrix, mit mehr als 100 000 Zeilen und 70 Millionen Spalten. Die Zahlen in der gigantischen Tabelle geben an, wie die Buse eingesetzt werden sollen. Die Größe der Matrix weist auf ungezählte Details hin, die beachtet werden müssen: Der Computer muß garantieren, daß jeder der

rund 1800 BVG-Busse morgens sein Depot verläßt und nach Dienstschluss dort wieder landet.

Es gibt Eindecker, Doppeldecker, Gelenk- und Minibusse, aber nicht jeder Busstyp kann jede Route bedienen. Außerdem sind kompliziertere betriebliche und rechtliche Bedingungen zu beachten, etwa Pausenregelungen. Ziel ist es, die einzelnen Busfahrten so zu verteilen, daß die Arbeitszeit der Fahrer gut ausgenutzt wird und die Leerfahrten von einem Einsatzort zum nächsten möglichst kurz sind. Alle diese Zielvorgaben stecken in der riesigen Matrix, die die Mathematiker „ganzaltes lineares Programm“ nennen. Ein lineares Programm ist für Mathematiker eine alltägliche Struktur. Sie taucht bei fast allen Fragen nach optimalen Mischverhältnissen bei Güterflüssen in einer Fabrik und auch bei Stundenplänen auf.

Häufig gesprochen besteht das Problem – in seiner einfachen Form – aus einem Viereck in der Ebene und einer Gerade, die durch das Viereck verläuft. Nun verschiebt man die Gerade nach rechts. Ziel ist es, den letzten Punkt des Vierecks zu bestimmen, den die Gerade bei diesem Verschiebe-Prozess gerade noch berührt. Hier liegt die kostengünstigste Lösung des Optimierungsproblems. Das Viereck bei den Bus-Umlaufplänen ist sehr viel komplexer, man sollte es sich eher als einen verwickelten Kristall mit mehreren Billionen Ecken und Kanten vorstellen.

„Fähigkeit ist die Matrix für die Umlaufplanung bei der BVG so groß, daß

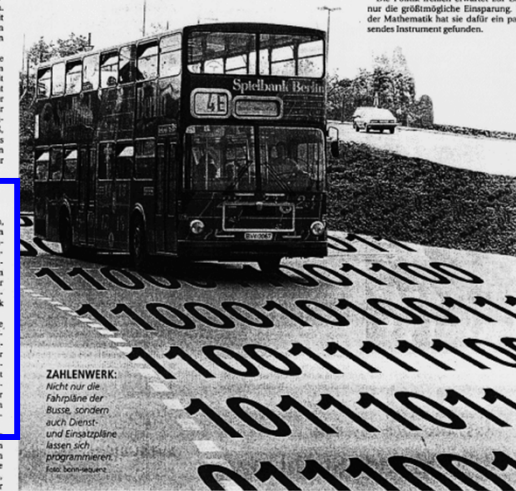
man sie noch nicht einmal vollständig im Computer speichern könnte“, verrät Andreas Löbel, wissenschaftlicher Mitarbeiter von Martin Grötschel. „Pro Spalte gibt es aber nur drei Einträge, die von Null verschieden sind.“ Das bedeutet, daß sich die Matrix stark vereinfachen läßt. Und genau diese Eigenschaft machen sich die Mathematiker zunutze: So versucht ihr Algorithmus zuerst mit einem Teil der Matrix zu operieren. Findet er für diesen kleinen Teil eine Lösung, so vergrößert er nach und nach das Problem, bis er eine Lösung für die gesamte Matrix gefunden hat.

Pfiffige Programme

Von der Mathematik spüren die Planer bei der BVG wenig. Nicht einmal Großrechner werden gebraucht – so pfiffig wurde das System programmiert. Je nach Teilproblem dauert die Bearbeitung wenige Stunden oder sogar nur Minuten. „Das System wurde gut angenommen, da die Planer in kurzer Zeit verschiedene Szenarien testen und vergleichen können“, berichtet Uwe Strube, der als Projektleiter bei der IVU für die Entwicklung des fertigen Softwareprodukts zuständig ist.

Auch Martin Grötschel betont den Nutzen für den Planer mehr als das Einsparungspotential. „Wir geben den Leuten Hilfsmittel in die Hand, die Kosten zu sparen. Ob dabei am Ende etwas eingespart oder der Service kostenneutral verbessert wird, ist nicht unsere, sondern eine politische Frage.“

Die Politik freilich erwartet zur Zeit nur die größtmögliche Einsparung. In der Mathematik hat sie dafür ein passendes Instrument gefunden. □



ZAHLENWERK: Nicht nur die Fahrpläne der Busse, sondern auch Dienst- und Einsatzpläne lassen sich programmieren. Foto: Bonn-Sequence

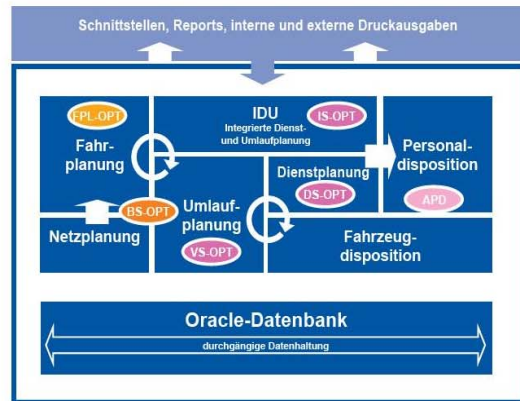


Sequentielle oder integrierte Die Optimierungstools der IVU

Viele Verkehrsplaner sind skeptisch, wenn sie den Begriff Optimierung hören. „Das habe ich schon oft gehört, funktioniert hat es nie“, ist, was so mancher sich noch immer denkt. Doch diese Auffassung ist nicht mehr richtig. Denn in den letzten Jahren hat sich viel getan.

VS-Opt, DS-Opt, IS-Opt – wenn er über die Möglichkeiten zur Optimierung der Umlauf- und Dienstplanung spricht, unterscheidet Dr. Ralf Borndörfer heute drei verschiedene Formen. Borndörfer ist stellvertretender Leiter der Abteilung „Optimierung“ am Konrad-Zuse-Zentrum für Informationstechnik Berlin (ZIB) und Gesellschafter eines Spin-offs, der Löbel, Borndörfer und Weider GbR (LBW), die sich seit vielen Jahren mit der Verbesserung von Prozessen in Logistik und Verkehr beschäftigt. Gemeinsam mit der IVU wurden die verschiedenen Optimierungstools entwickelt: VS-Opt (Vehicle Scheduling Optimizer) für die Umlaufoptimierung, DS-Opt (Duty Scheduling Optimizer) für die Dienstplanoptimierung und schließlich IS-Opt (Integrated Vehicle and Duty Scheduling Optimizer), die integrierte Dienst- und Umlaufoptimierung, mit der Umläufe und Dienste gleichzeitig in einem Schritt auch bei komplexen Vorgaben optimiert werden.

Begonnen hat die Entwicklung dieser Optimierungstools immer mit dem Erstellen eines mathematischen Modells, danach kam die Suche nach geeigneten Algorithmen: „Zunächst haben wir uns einzeln mit der Umlauf- und mit der Dienstplanung beschäftigt“, sagt Borndörfer. „Heute können wir Umläufe und Dienste auch für große Betriebe mit komplexen Regelwerken auf ganz normalen



PCs berechnen. Wichtig ist dabei insbesondere die Kontrolle von Dienstmix und Fahrzeugmix, also der Anzahl der Fahrer und Fahrzeuge, die sich in ihren Dienstregeln und Verknüpfungsvorgaben stark unterscheiden können.“ Klassischerweise wird dabei zuerst die Umlaufplanung und in einem weiteren Schritt die Dienstplanung gerechnet, eine Vorgehensweise, mit der man im städtischen Bereich im Allgemeinen zu ausgezeichneten Ergebnissen kommt.

Anders im Regionalverkehr: Dort ist das Vorgehen der „sequentiellen Planung“ wenig erfolgreich. Der Grund sind vor allem die weiten Strecken und die geringe Fahrtenfolge im ländlichen Bereich: Um zu Ablösepunkten zu kommen, wären lange Leerfahrten oder Anreisewege für die Fahrer nötig. Wenn man die Umläufe ohne Blick auf die Dienstplanung optimiert, kön-

nen bei diesem Verfahren Umläufe entstehen, die einfache Möglichkeiten für den Verkehrsfahrer nicht berücksichtigen.

len, ist die „kombinierte“ Planung. Mit ihr können „Dienste“ geplant werden, die die Möglichkeiten der Fahrer und der Fahrzeuge vorseherlich berücksichtigen. Die Fahrzeugkapazität kann besser genutzt werden. Eine bessere aber noch komplexere Planung (IS-Opt) sieht die

Gerade im Regionalverkehr ist die integrierte Optimierung überlegen. Die Planung überlegen, die Restriktionen der Dienstbildung gleich Schritt betrachten kann. Die zu verarbeitenden Datenmengen sind riesig und realistische Szenarien müssen neu entwickelt werden.

Erfolgreich mit integrierter Optimierung

Die DB Stadtverkehr GmbH ist die deutschlandweit größte Anwenderin der integrierten Optimierung: Die Umläufe und Dienste der 22 regionalen Busgesellschaften werden in einem Schritt geplant – dies geschieht für die eigenen Leistungen und Auftragnehmerleistungen gemeinsam. Zudem lassen sich mit dem System Ausschreibungsszenarien rechnen und vergleichend analysieren. So können fundierte Entscheidungen für oder gegen die Beteiligung an einer Ausschreibung getroffen werden und der Ressourceneinsatz rechtzeitig geplant.

Auch die VWS Verkehrsbetriebe Westfalen-Süd GmbH in Siegen nutzt die integrierte Optimierung. Unter anderem hat sich das Tool bei der Einführung eines neuen Nahverkehrsplanes bewährt. Es zeigte sich, dass auch die an sich aufwändige Bearbeitung großer Projekte relativ zügig und durch die Erzeugung und Bewertung mehrerer Varianten wirtschaftlich sinnvoll realisiert werden kann. Nun sollen die Dienste und Umläufe auch in Zukunft mit der integrierten Optimierung geplant und dann gefahren werden – sowohl die Subunternehmen und die

VWS aber auch die Fahrgäste profitieren davon.

In Chemnitz hilft die integrierte Optimierung, Umläufe und Dienste immer wieder an schnell wechselnde Bedingungen anzupassen. Denn in Chemnitz wird zur Zeit an vielen Stellen gebaut. Damit die Busse und Straßenbahnen der Chemnitzer Verkehrs-AG (CVAG) trotzdem pünktlich und wirtschaftlich fahren können, wird immer wieder mit der integrierten Optimierung nachjustiert.

In Gera wurde vor Kurzem eine neue Straßenbahnlinie in Betrieb genommen. Das hat den Anteil der Straßenbahn am öffentlichen Nahverkehr erheblich erhöht. Mit Hilfe der Dienstplanoptimierung wurde die neue Linie schnell in die Gesamtplanung der Geraer Verkehrsbetriebe GmbH (GVB) integriert.

Die Meininger Busbetriebs GmbH (MBB) erwartet ebenfalls Einsparpotenzial beim Zuschnitt und der Zahl der Dienste. Die ersten Szenarien werden zur Zeit gerechnet. In Zukunft soll die integrierte Optimierung Bestandteil aller Planungen sein.



Neue Kunden im arabischen Raum

Saudi-Arabien und Sharjah setzen auf die IVU.suite

Nach Dubai werden nun auch Saudi-Arabien und Sharjah ihre Busverkehre mit Produkten der IVU.suite planen und disponieren. Die Verkehrsgesellschaften von Saudi-Arabien und Sharjah haben alle dafür wesentlichen Systeme bei der IVU Traffic Technologies AG bestellt. Damit hat die IVU nun drei wichtige Kunden im arabischen Raum.

Mit ihren vielen traditionellen Gebäuden sich erfolgreich als kulturelles Zentrum vermarktet, der Strom von Touristen nimmt immer weiter zu. Das Ergebnis sind verstopfte Straßen. Deswegen will die Stadtverwaltung von Sharjah ein völlig neues Nahverkehrs-system einühren. Mit der Planung sowie der späteren Durchführung der Verkehr wurde der private Betreiber „Kuwait and Gulf Link Transport (KGL) – Passenger Transport Services (Sharjah Branch)“ beauftragt. Rund 200 Busse sollen in Zukunft in eng getakteten Linienverkehren fahren. Die Vorbereitungen dafür laufen nun. Die für das neue Verkehrsangebot notwendigen Fahr-, Umlauf- und Dienstpläne werden mit IVU plan verwaltet und entwickelt – die bewährten Optimierungsalgorithmen sorgen einmal mehr für einen effizienten Einsatz von Fahrzeugen und Personal. Und auch bei der Disposition von Fahrzeugen und Fahrern setzt die KGL mit IVU.vehicle und IVU.crew von Anfang an auf die bewährte Software der IVU.

Bislang plante die RHENUS VENIRO in den Betrieben nur die Verkehrsleistung mit IVU.plan. Nun soll das bereits bei der Tochtergesellschaft, Niederheinische Verkehrsbetriebe AG (NAG) sowie bei der Stadtverkehr Zweickau (SVZ) zur Personaldisposition eingesetzte System auch bei den anderen Unternehmen übertragen werden. Die RHENUS VENIRO hat daher nun für alle übrigen ihrer neun Busunternehmen IVU.crew bestellt.

„Das IVU.crew überzeugen konnte, liegt an der komfortablen Bedienung. Sie erlaubt besonders effiziente Arbeitsabläufe und schnelle Reaktionen auf sich verändernde Rahmenbedingungen und Fahrgastströme im Sinne unserer Kunden und Auftraggeber“, sagt Rolf Toldmann, Mitglied der Geschäftsleitung von RHENUS VENIRO und zuständig für die bundesweite Einführung von IVU.crew. „Außerdem versprechen wir uns erhebliche positive Effekte, wenn alle Disponenten unserer Gruppe mit derselben Software arbeiten.“ Vertretungsleistungen und Schulungen werden so vereinfacht – ebenso die Wartung und Weiterentwicklung der externen und internen Systeme. Denn in Zukunft gibt es nur noch einen Ansprechpartner: die IVU.

ABELLO bestellt weitere Ticketing-Software und -Geräte

Die Bus-Sparte der ABELLIO GmbH, des Essener Systemhauses für Mobilität (www.abellio.de), hat 80 weitere Bordcomputer mit Ticketing-Funktion vom Typ IVU.ticket_box sowie die dazugehörige Software der IVU (IVU.ticket) bestellt. Damit stattet ABELLIO weitere Busse seiner Tochterunternehmen mit dem System der IVU zur Kommunikation zwischen Busfahrern und Leit-zentralen und zum Verkauf von Fahrscheinen aus. Mit den neuen Geräten werden die Verkaufsfunktion direkt per GPS an das zentrale Abrechnungssystem übertragen. Das erlaubt es den Fahrern ihre Verkäufe direkt nach der Fahrt abzurechnen und spart Arbeitszeit. Bis zum Fahrplanwechsel im Dezember 2008 sollen die Geräte und Software installiert und fertig für den Einsatz sein.

Die zusätzlichen Geräte sind notwendig geworden, da ABELLIO mit den hessischen Busstochern in den letzten Monaten eine Reihe von Ausschreibungen gewonnen hat: Die WERNER GmbH hat den Zuschlag für ein regio-

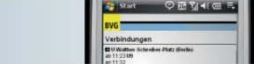
2 Die Optimierungstools der IVU



3 Neue Namen für die Systeme der IVU



4 Fahrgastinformation per Mobiltelefon



Aus den Projekten

RHENUS VENIRO nun bundesweit mit IVU.crew

Mit nur einem Software-System Personal disponieren – das werden in Zukunft die Nahverkehrsunternehmen, die zur RHENUS VENIRO GmbH & Co. KG gehören. Dabei setzt die Unternehmensgruppe auf IVU.crew, das bewährte Dispositionssystem der IVU Traffic Technologies AG.

Bislang plante die RHENUS VENIRO in den Betrieben nur die Verkehrsleistung mit IVU.plan. Nun soll das bereits bei der Tochtergesellschaft, Niederheinische Verkehrsbetriebe AG (NAG) sowie bei der Stadtverkehr Zweickau (SVZ) zur Personaldisposition eingesetzte System auch bei den anderen Unternehmen übertragen werden. Die RHENUS VENIRO hat daher nun für alle übrigen ihrer neun Busunternehmen IVU.crew bestellt.

„Das IVU.crew überzeugen konnte, liegt an der komfortablen Bedienung. Sie erlaubt besonders effiziente Arbeitsabläufe und schnelle Reaktionen auf sich verändernde Rahmenbedingungen und Fahrgastströme im Sinne unserer Kunden und Auftraggeber“, sagt Rolf Toldmann, Mitglied der Geschäftsleitung von RHENUS VENIRO und zuständig für die bundesweite Einführung von IVU.crew. „Außerdem versprechen wir uns erhebliche positive Effekte, wenn alle Disponenten unserer Gruppe mit derselben Software arbeiten.“ Vertretungsleistungen und Schulungen werden so vereinfacht – ebenso die Wartung und Weiterentwicklung der externen und internen Systeme. Denn in Zukunft gibt es nur noch einen Ansprechpartner: die IVU.

Sequentielle oder integrierte Optimierung? Die Optimierungstools der IVU

Viele Verkehrsplaner sind skeptisch, wenn sie den Begriff Optimierung hören. „Das habe ich schon oft gehört, funktioniert hat es nie“, ist was mancher sich noch immer denkt. Doch diese Auffassung ist nicht mehr richtig. Denn in den letzten Jahren hat sich viel getan.



VS-Opt, DS-Opt, IS-Opt – wenn er über die Möglichkeiten zur Optimierung der Umlauf- und Dienstplanung spricht, unterscheidet Dr. Ralf Bendorfer heute drei verschiedene Formen. Bendorfer ist stellvertretender Leiter der Abteilung „Optimierung“ am Konrad-Zuse-Zentrum für Informationstechnik Berlin (ZIB) und Gesellschafter eines Spin-offs, der Lobel, Bendorfer und Weider GbR (LBW), die sich seit vielen Jahren mit der Verbesserung von Prozessen in Logistik und Verkehr beschäftigt. Gemeinsam mit der IVU wurden die verschiedenen Optimierungstools entwickelt: VS-Opt (Vehicle Scheduling Optimizer) für die Umlaufplanung, DS-Opt (Duty Scheduling Optimizer) für die Dienstplanung und schließlich IS-Opt (Integrated Vehicle and Duty Scheduling Optimizer), die integrierte Dienst- und Umlaufplanung, mit der Umläufe und Dienste gleichzeitig in einem Schritt auch bei komplexen Vorgaben optimiert werden.

Beginnen hat die Entwicklung dieser Optimierungstools immer mit dem Erstellen eines mathematischen Modells, danach kam die Suche nach geeigneten Algorithmen: „Zunächst haben wir uns einzeln mit der Umlauf- und mit der Dienstplanung beschäftigt“, sagt Bendorfer. „Hier können wir Umläufe und Dienste auch für große Betriebe mit komplexen Regelwerken auf ganz normalen PCs berechnen. Wichtig ist dabei insbesondere die Kontrolle von Dienstplan- und Fahrzeugnummern, also der Anzahl der Fahrer und Fahrerlegs, die sich in ihren Dienstregeln und Verknüpfungen vorgaben stark unterscheiden können.“ Klassischerweise wird dabei zuerst die Umlaufplanung und in einem weiteren Schritt die Dienstplanung gerechnet, eine Vorgehensweise, mit der man im städtischen Bereich im Allgemeinen zu ausgezeichneten Ergebnissen kommt.

Mehr Mobilität durch mehr Information IVU beteiligt sich am Forschungsvorhaben BAIM plus

Ende April 2008 wurde das Projekt BAIM (Barrierefreie OV-Informationen für mobilitätseingeschränkte Personen) erfolgreich abgeschlossen. Nun folgt BAIM plus, Ziel von BAIM war es, mobilitätseingeschränkten Menschen den Zugang zum öffentlichen Personennahverkehrssystem zu erleichtern. Bei BAIM plus wird es nun um Verbesserungen für alle Fahrgäste gehen.

nun bei diesem Verfahren nicht fahrbar Umläufe entstehen. Eine relativ einfache Möglichkeit, auch für diese Verkehrs-fahrere Ergebnisse zu erzielen.



Anders im Regionalverkehr: Dort ist das Vorgehen der sequentiellen Planung wenig erfolgreich. Der Grund sind vor allem die weiten Strecken und die geringe Fahrerfolge im ländlichen Bereich: Um zu Ablösungen zu kommen, wären lange Fahrzeiten oder Anreisen für die Fahrer nötig. Wenn man die Umläufe ohne Blick auf die Dienstplanung optimiert, kön-

nen, ist die „kombinierte Planung“. Mit ihr können „umlauftaugliche Dienste“ geplant werden. Das sind allerdings Dienste, die keine Ablösungsmöglichkeiten außerhalb der Betriebs-höfe vorsehen und bei denen die Fahrzeugkapazität nicht kontrolliert werden kann. Es entstehen zwar bessere aber noch keine so guten Planungen, wie die integrierte Optimierung (IS-Opt) sie hervorbringen kann. Gerade im Regionalverkehr ist die integrierte Optimierung jeder anderen Planung überlegen, weil sie alle Daten und Restriktionen der Umlauf- und Dienstplanung gleichzeitig in einem Schritt betrachtet und verarbeitet kann. Die zu verarbeitenden Datenmengen sind riesig, um die komplexen Zusammenhänge der Umläufe und realistischen Szenarien zu rechnen, mussten neue mathematische Methoden entwickelt werden. Die

rasantem Fortschritte in der Computer- und der Softwareentwicklung kann für alle diese und viele weitere Fragen Szenarien gemacht werden, die eine fundierte Entscheidung für die eine oder andere Variante erlauben. Das hilft auch, wenn über die Teilnahme an Ausschreibungen entschieden werden soll. Denn mit Hilfe der integrierten Optimierung können Ausschreibungsszenarien gerechnet werden, die Auskunft darüber geben, mit welchen Ressourcen und unter welchen Bedingungen ein Verkehr gefahren werden kann.

„Das erklärt, warum wir die integrierte Optimierung auf den Markt bringen können. Trotz der enormen Rechenleistung, die das System benötigt, ist es heute mit jedem herkömmlichen Rechner möglich, relativ schnell fahrbare und personalfeste Ergebnisse zu erzielen“, erläutert Oliver Grzegorski, Leiter des Geschäftsbereichs Public Transport der IVU. „Das unterstützt die Planer in den Verkehrs-betrieben: Aufwändige Anpassungen in der Umlauf- und Dienstplanung, die aus vielen Fahrpländeränderungen resultieren, müssen nun nicht mehr manuell eingearbeitet werden. Der Planer kann sich auf die Priorisierung von Regeln und Bedingungen konzentrieren, auf die Basis von System-erachteten Lösungsalternativen bewerten und die für sein Unternehmen richtige auswählen.“

„Die integrierte Optimierung ist ein echter Durchbruch“, sagt Grzegorski. „Mit ihr ist selbst die Substanz der Dienste steuerbar.“ Auf der Weiterentwicklungsliste steht aktuell die Sensitivitätsanalyse. Mit ihr lassen sich durch geringfügige Abweichungen vom Regelplan die täglichen Spitzen im Berufsverkehr drücken und mit weniger Fahrzeugen und Fahrern fahren. Die IVU bietet die Sensitivitätsanalyse bereits als Bestandteil der Umlaufoptimierung an. Und in Zukunft soll sie das Teil der integrierten Optimierung sein.

So können schon vor einer Veränderung die verschiedensten Varianten

Erfolgreich mit integrierter Optimierung

Die DB Stadtverkehr GmbH ist die deutschlandweit größte Anbieterin der integrierten Optimierung. Die Umläufe und Dienste der 22 regionalen Busgesellschaften werden in einem Schritt geplant – dies geschieht für die eigenen Leistungen und Auftragnehmerleistungen gemeinsam. Zudem lassen sich mit dem System Ausschreibungsszenarien rechnen und vergleichend analysieren. So können fundierte Entscheidungen für oder gegen die Beteiligung an einer Ausschreibung getroffen werden und der Ressourceneinsatz rechtzeitig geplant.

In Chemnitz hilft die integrierte Optimierung, Umläufe und Dienste immer wieder an schnell wechselnde Bedingungen anzupassen. Den in Chemnitz wird zur Zeit ein Stellenplan gebaut, damit die Busse und Straßenbahn der Chemnitzer Verkehrs-AG (CVAG) trotzdem pünktlich und wirtschaftlich fahren können, wird immer wieder mit der integrierten Optimierung nachjustiert.

In Gera wurde vor Kurzem eine neue Straßenbahnlinie in Betrieb genommen. Das hat den Anteil der Straßenbahn am öffentlichen Nahverkehr erheblich erhöht. Mit Hilfe der Dienstplanoptimierung wurde die neue Linie schnell in die Gesamtplanung der Geraer Verkehrs-betriebe GmbH (GV) integriert.

Die Meininger Busbetriebe GmbH (MBB) erwartet ebenfalls Einsparpotenzial beim Zuschuss und der Zahl der Dienste. Die ersten Szenarien werden zur Zeit gerechnet. In Zukunft soll die integrierte Optimierung Bestandteil aller Planungen sein.

„Wir sind sicher, mit BAIM plus werden der RMV und VBB weitere Buspunkte bei ihren Fahrgästen sammeln“, sagt Jörg Franzen, stellvertretender Leiter des Projekts bei der IVU.



Ein moderner öffentlicher Nah- und Regionalverkehr mit Bussen wird für die Golfregion immer wichtiger. Denn heute versuchen private Busdienste, Taxen und Privatfahrzeuge vor allem in den Städten zu fließenden Verkehr zu Status. Denn will nach Dubai nun auch das Emirat Sharjah begegnen. Und auch die Verkehrsgesellschaft von Saudi-Arabien, SAPTCO (Saudi Arabian Public Transport Company), hat alle wesentlichen Module der Planungssysteme der IVU bestellt.

In Sharjah leben über 800.000 Einwohner. Viele arbeiten im unmittelbar angrenzenden Dubai. Das hohe Aufkommen von Berufspendlern in den Spitzenzeiten morgens und abends wird zunehmend zum Problem. Dazu kommt, dass die Stadt Sharjah

Besuchen Sie uns auf der InnoTrans 23. bis 26. September 2008

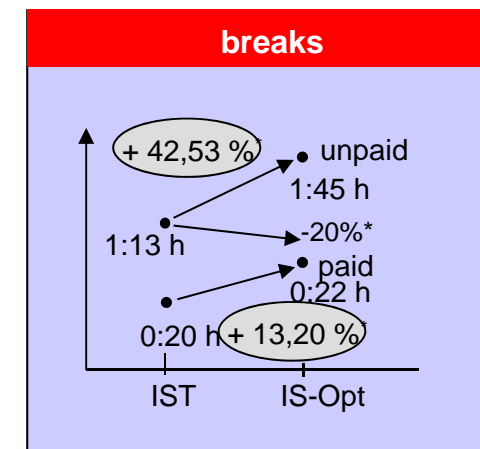
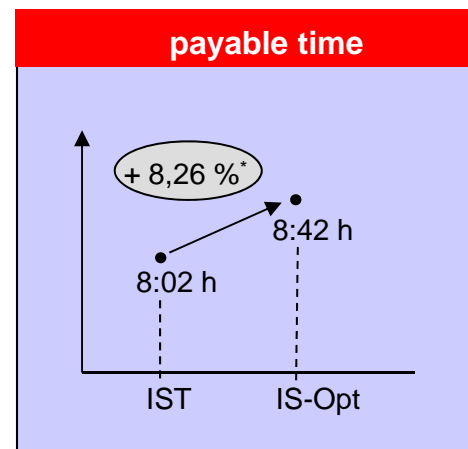
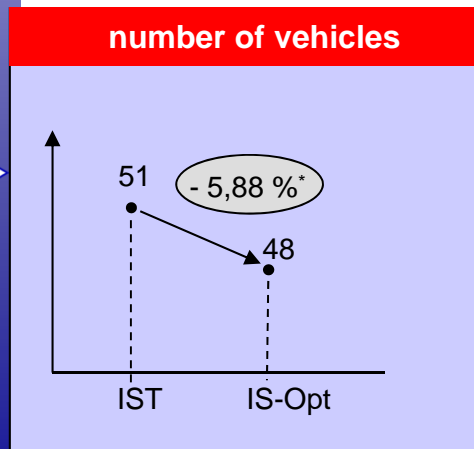
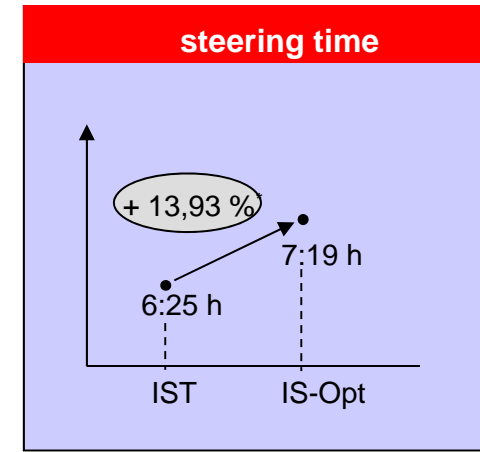
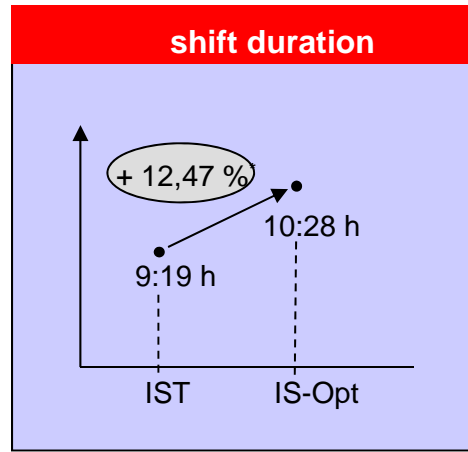
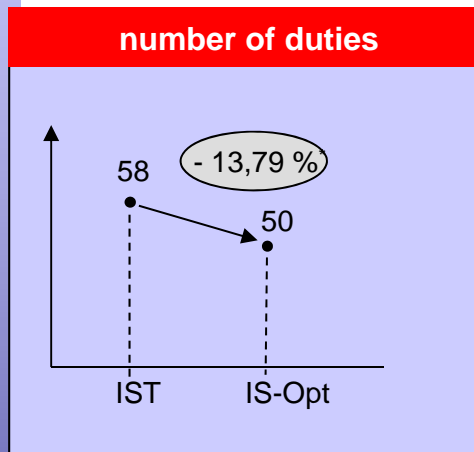


„Für die IVU ist das der dritte Auftrag im arabischen Raum“, sagt Martin Müller-Elschner, Mitglied des Vorstands der IVU Traffic Technologies AG. „Damit sind wir in der Golfregion nun gut vertreten und gehen von weiterem Wachstum aus. In dieser Region fehlen moderne öffentliche Nahverkehrssysteme und

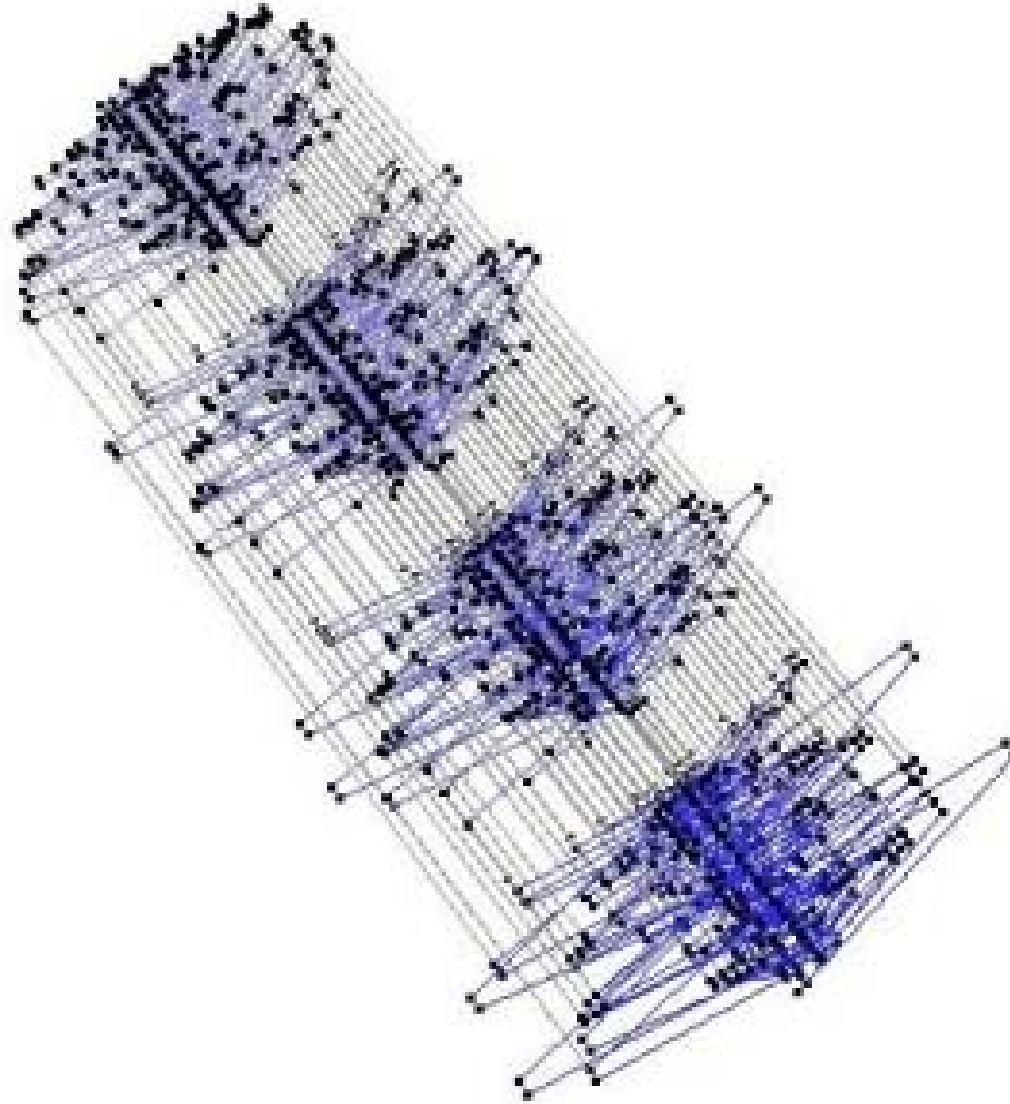
optimization brings further improvements

Example optimization

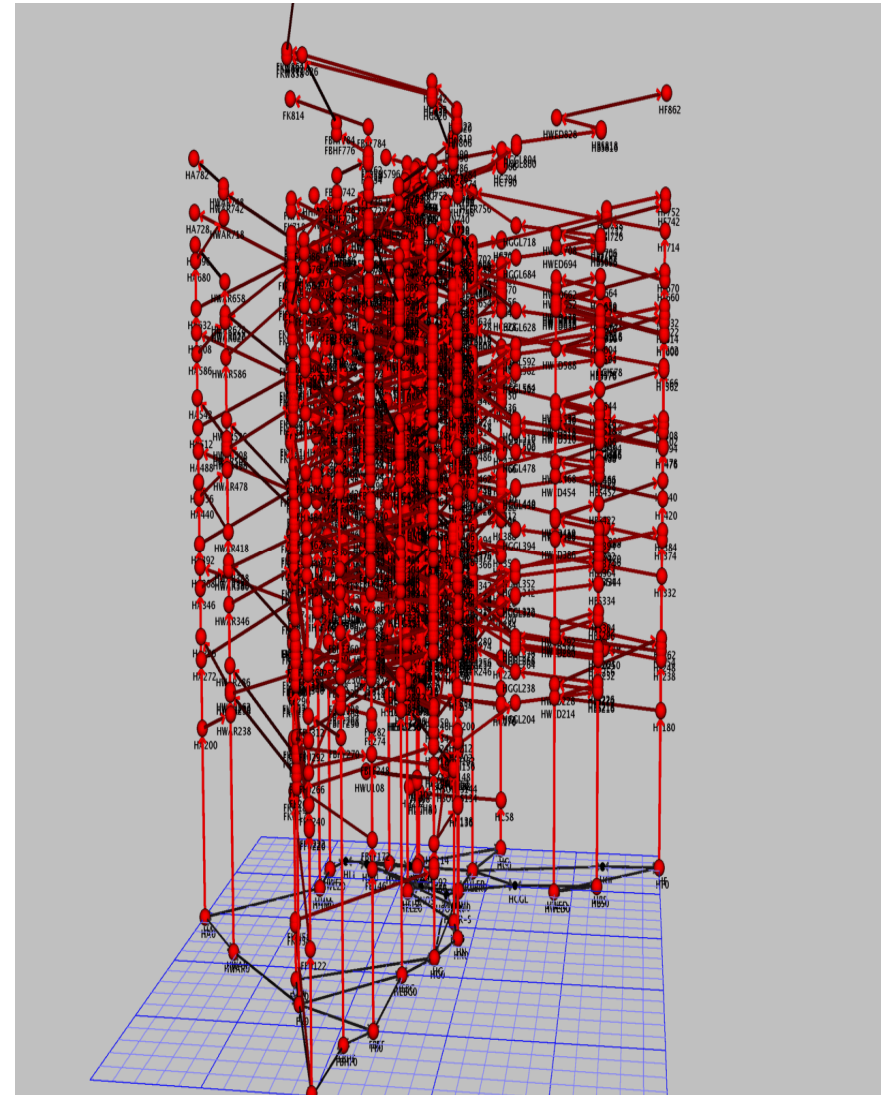
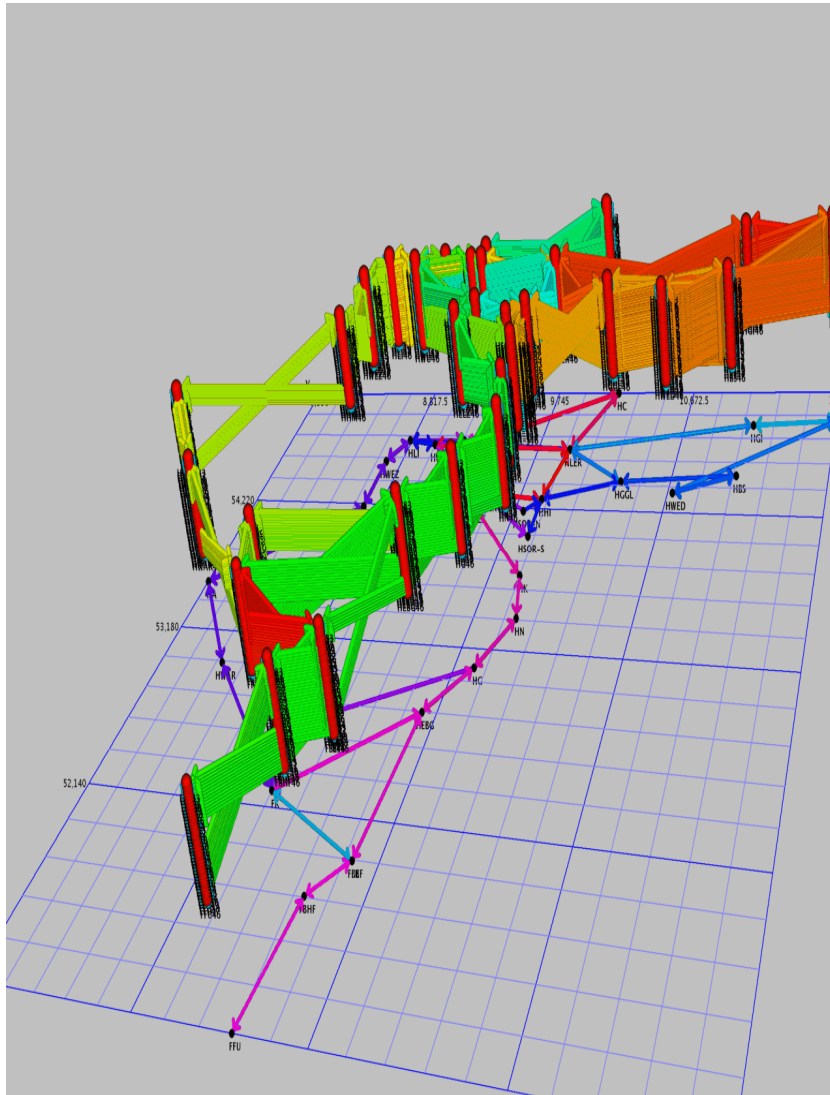
Folie der DB



Dienstplanung im Luftverkehr



Trassenplanung im Bahnverkehr



Verkehrsoptimierung: Umlaufplanung & Dienstplanung

TU Berlin
Summer Semester 2012
Lecture on June 11, 2012

Ralf Borndörfer & Martin Grötschel
ZIB, TU, and MATHEON, Berlin



Ralf Borndörfer

- DFG Research Center MATHEON "Mathematics for key technologies"
- Konrad-Zuse-Zentrum für Informationstechnik Berlin (ZIB)
- Löbel, Borndörfer & Weider GbR (LBW)

borndoerfer@zib.de

<http://www.zib.de/borndoerfer>