



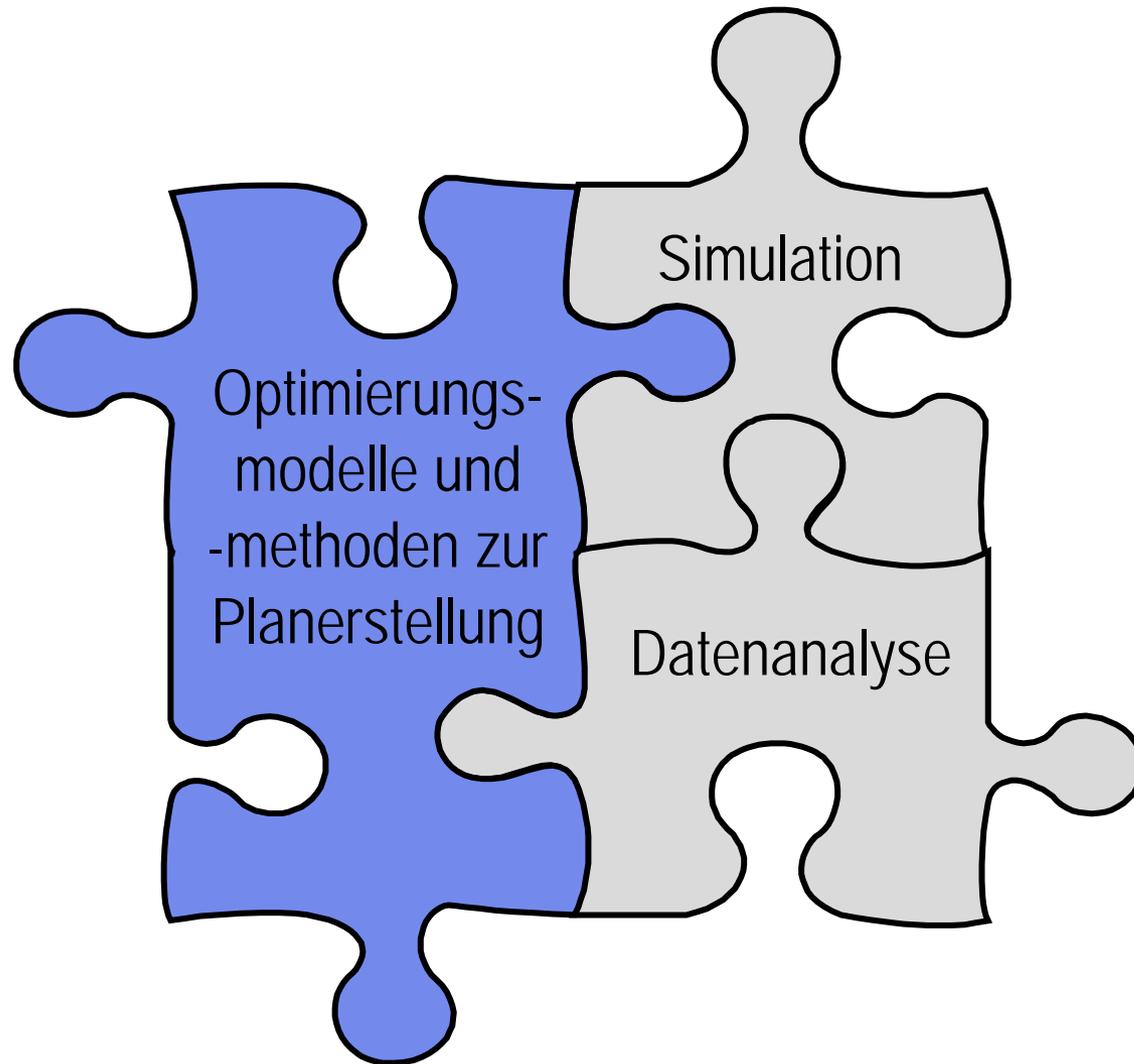
Department Wirtschaftsinformatik
Fachbereich Wirtschaftswissenschaft

**Robuste Effizienz in der
Umlauf- und Dienstplanung
im ÖPNV**

Bastian Amberg

Doktorandenworkshop, Magdeburg, 30. Mai 2013

Arbeitsbereiche

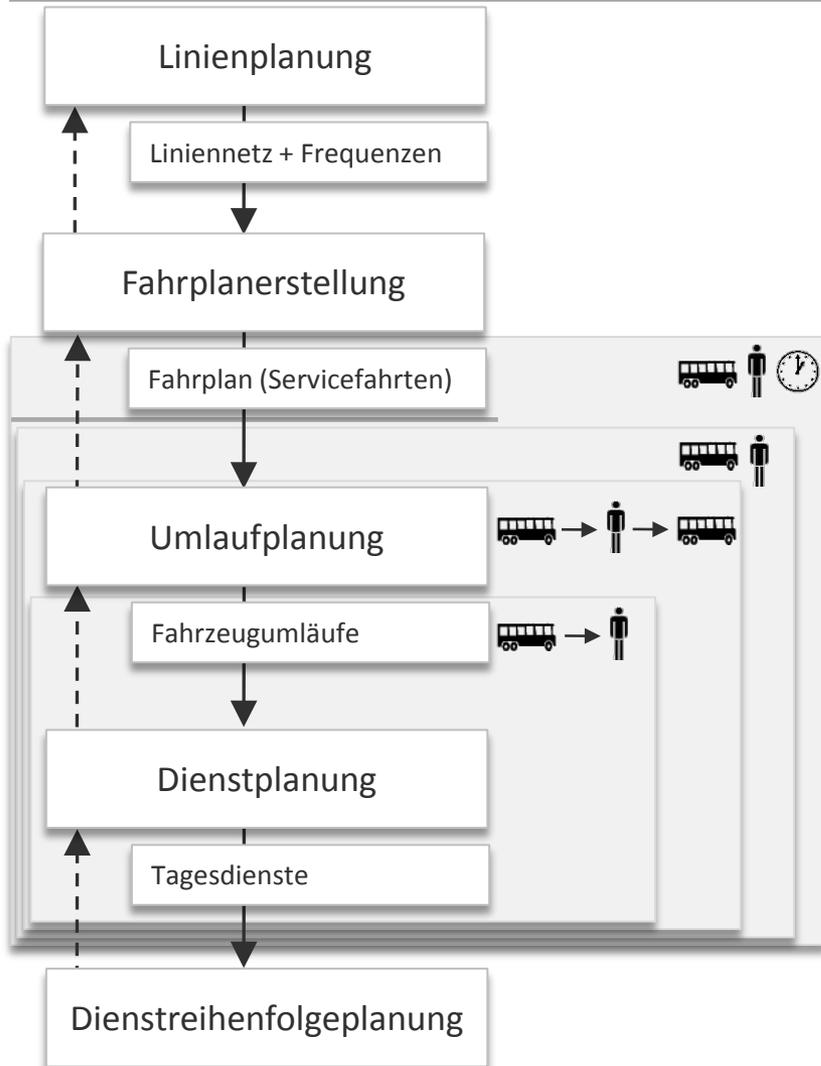


Agenda

- 1) Robuste Effizienz
- 2) Integrierte Umlauf- und Dienstplanung zur Minimierung von Verspätungspropagation
- 3) Numerische Ergebnisse
- 4) Zusammenfassung und Ausblick

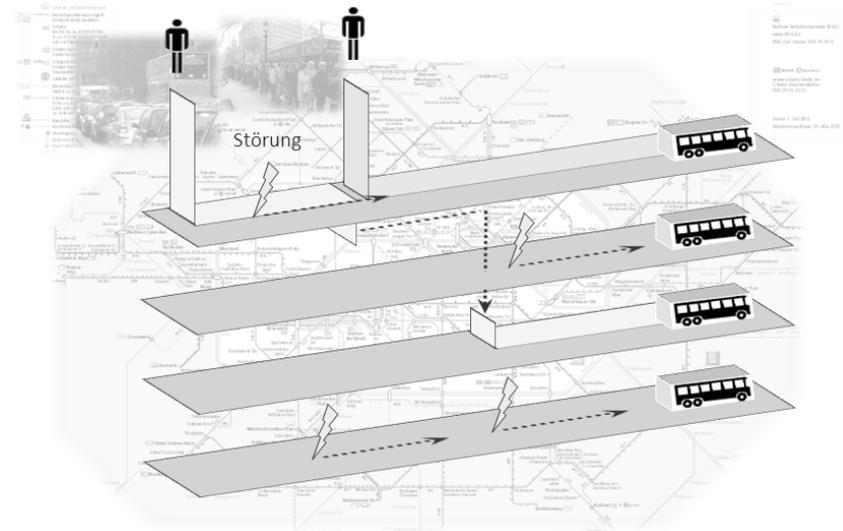
Problembeschreibung

Planung



Ausführung

“Störungen” während
Planausführung   Propagation von
Verspätungen

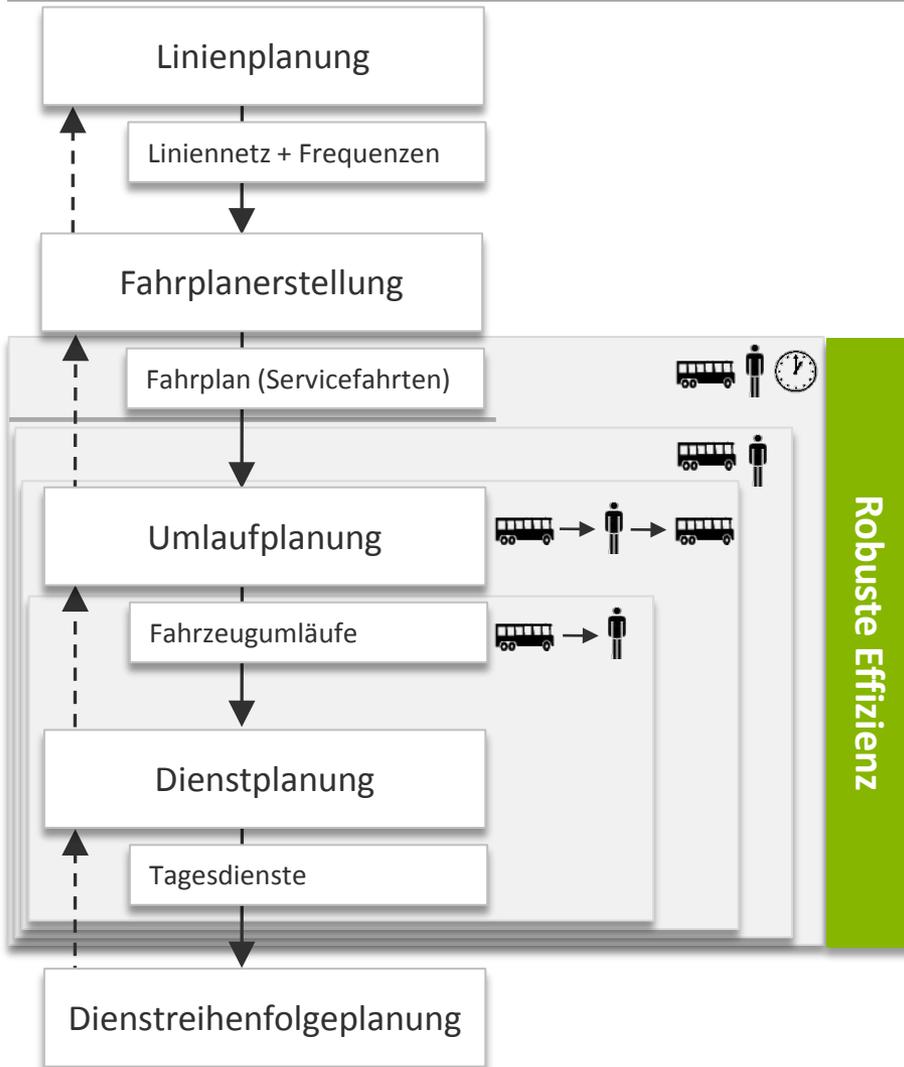


Kosten des **geplanten** \neq Kosten des **realen**
Ressourceneinsatzes Ressourceneinsatzes

Problembeschreibung

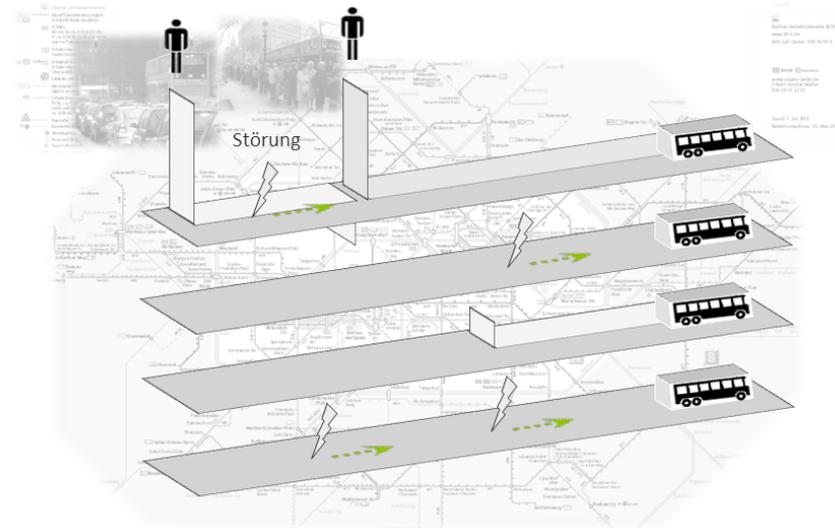
Planung

Ausführung



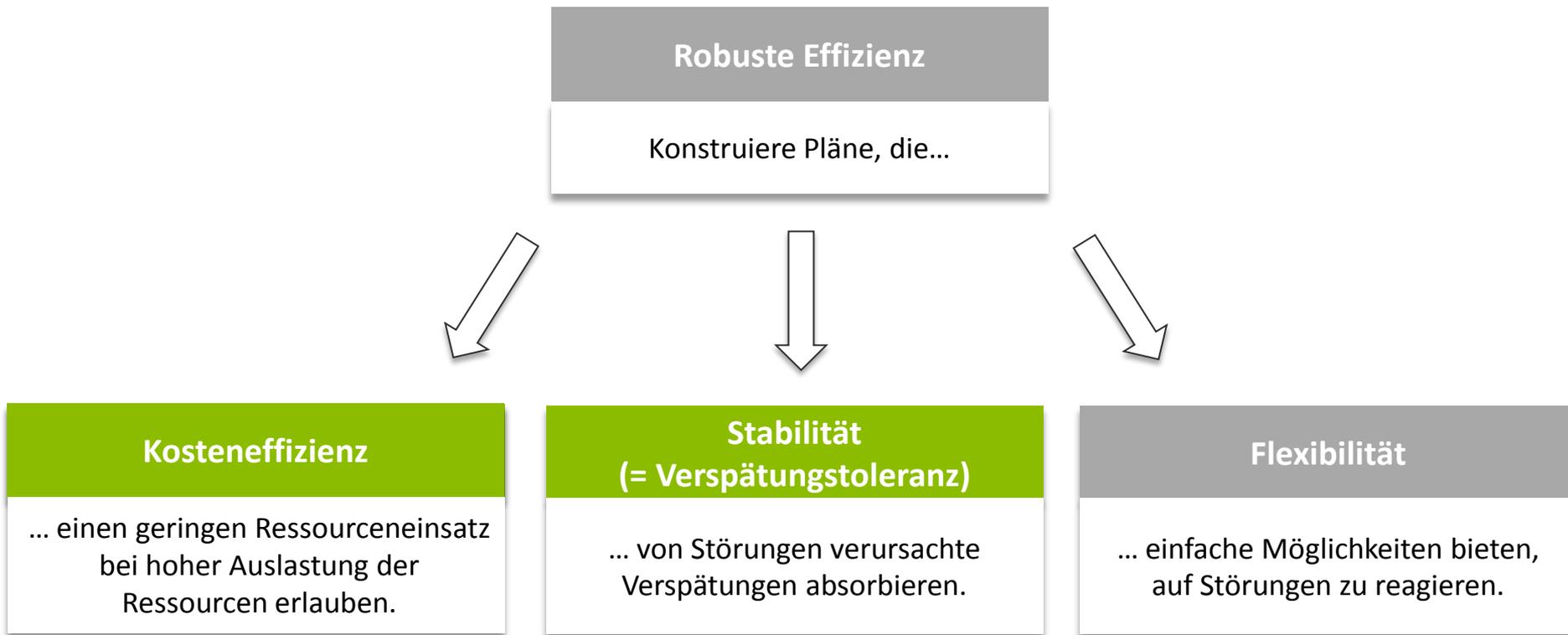
“Störungen” während Planausführung  

Weniger, geringere Propagation von Verspätungen

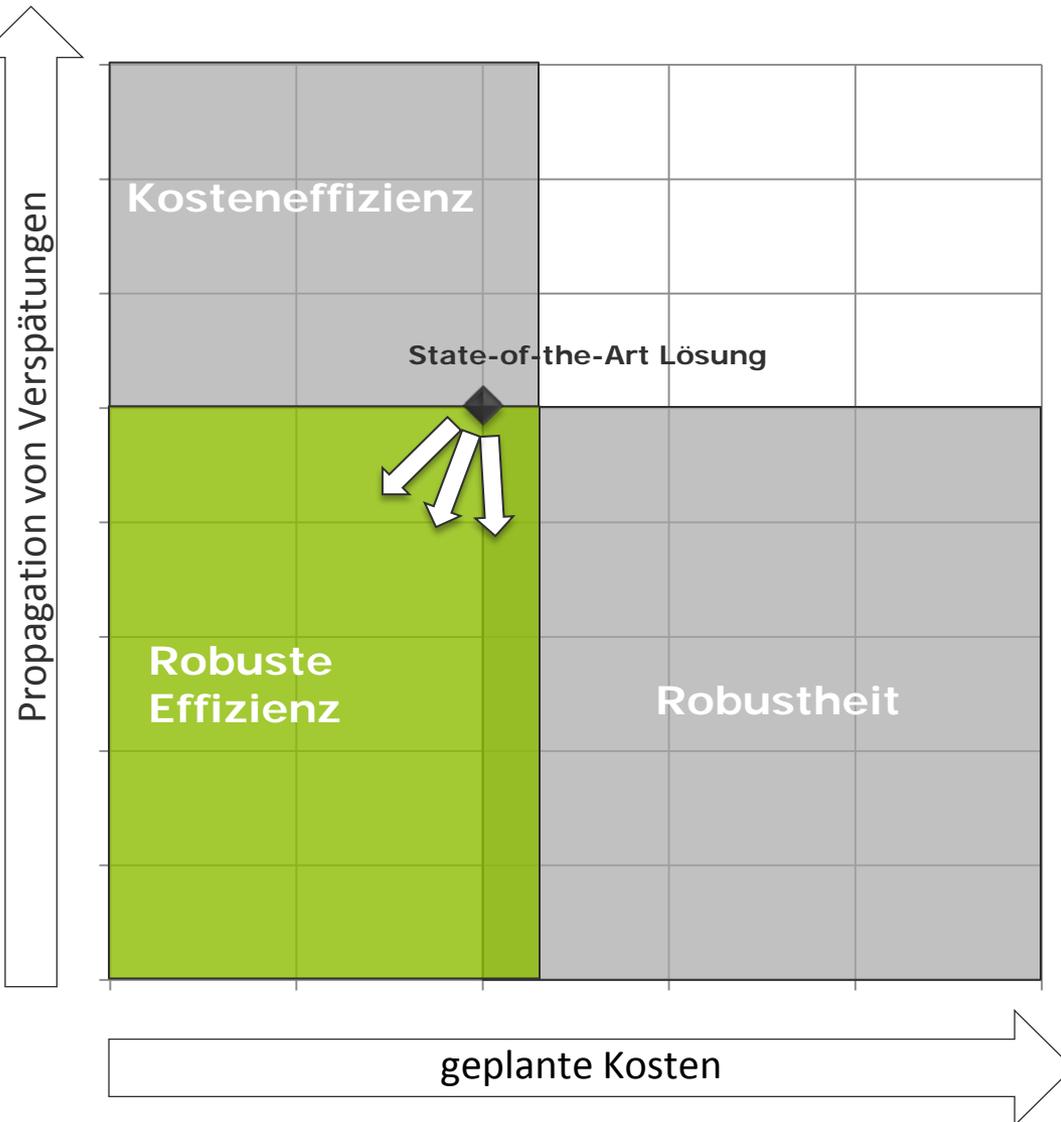


Kosten des **geplanten** \approx Kosten des **realen**
 Ressourceneinsatzes Ressourceneinsatzes

Robuste und kosteneffiziente Ressourcenplanung



Zielsetzung und Forschungsfragen



Ziel:

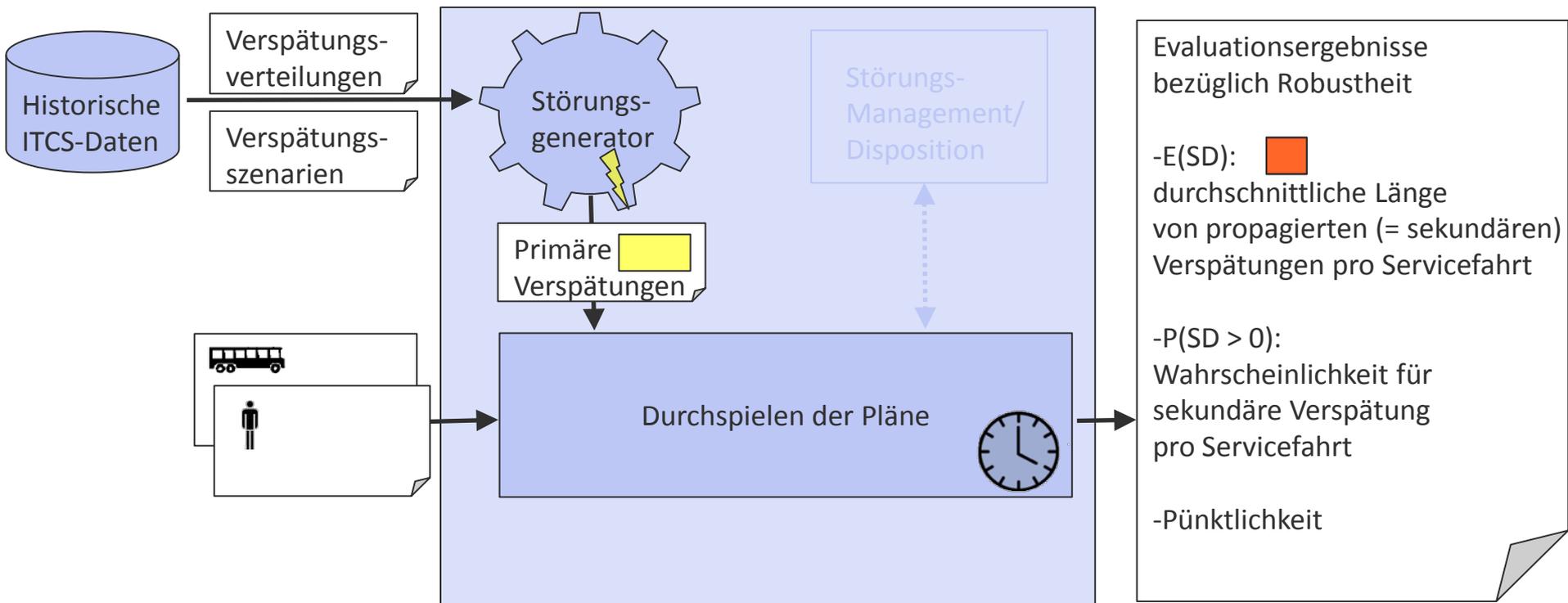
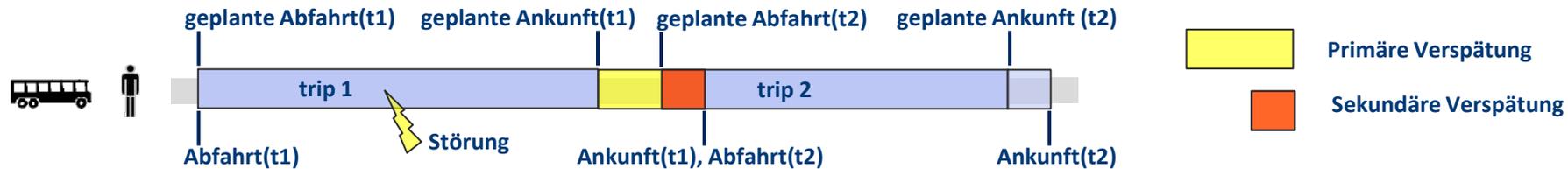
Optimierungsmodelle und -methoden für **Robuste Effizienz** von Umlauf- und Dienstplan

Wie beeinflussen unterschiedliche Planungsmethoden die Robustheit und Effizienz der erstellten Pläne?

Wieviel Robustheit kann in kostenoptimalen Plänen realisiert werden?

Welche Empfehlungen können für Fahrzeug- und Personaleinsatz hergeleitet werden?

Wie kann Robustheit/Stabilität gemessen werden?

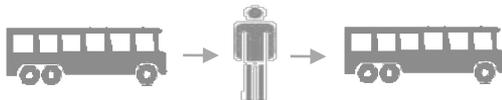


Wie kann die Propagation von Verspätungen minimiert werden?

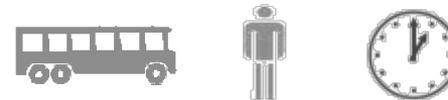
- Die gegenseitigen Abhängigkeiten zwischen Umläufen und Diensten berücksichtigen
- An geeigneten Stellen im Umlauf- und Dienstplan Pufferzeiten vorsehen



Teilintegrierter Ansatz

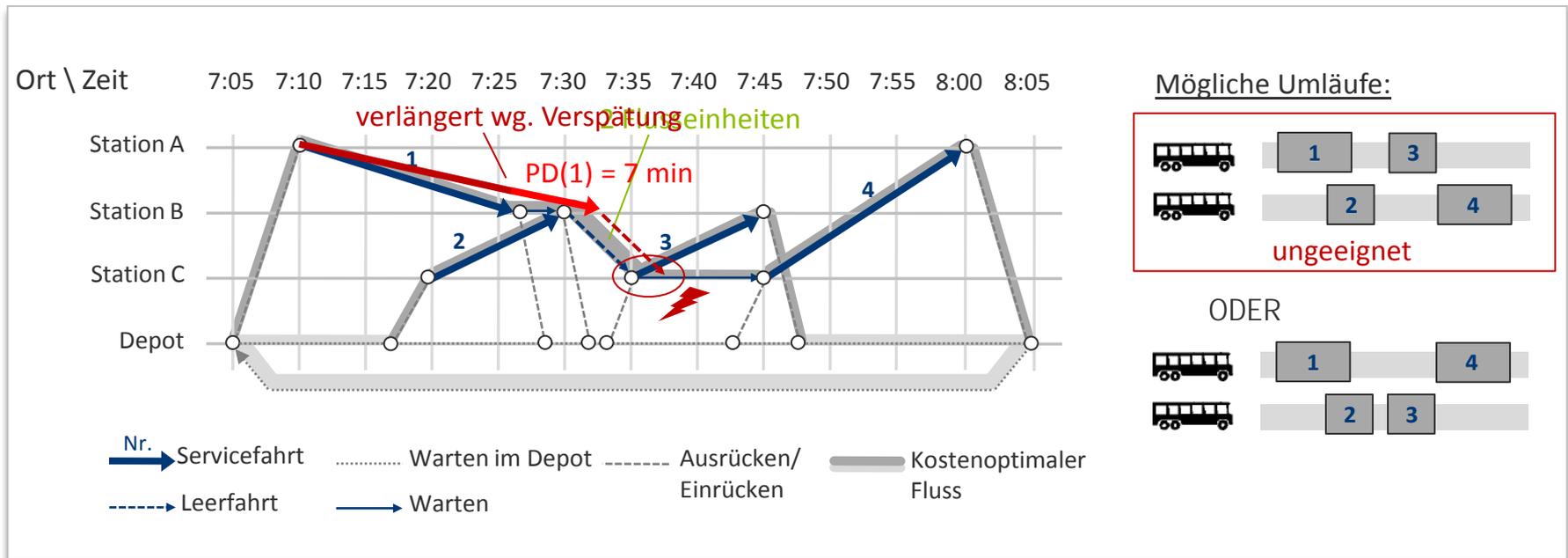


Integrierte Ansätze



„Vorteil“ : Zugrunde liegendes Netzwerkmodell

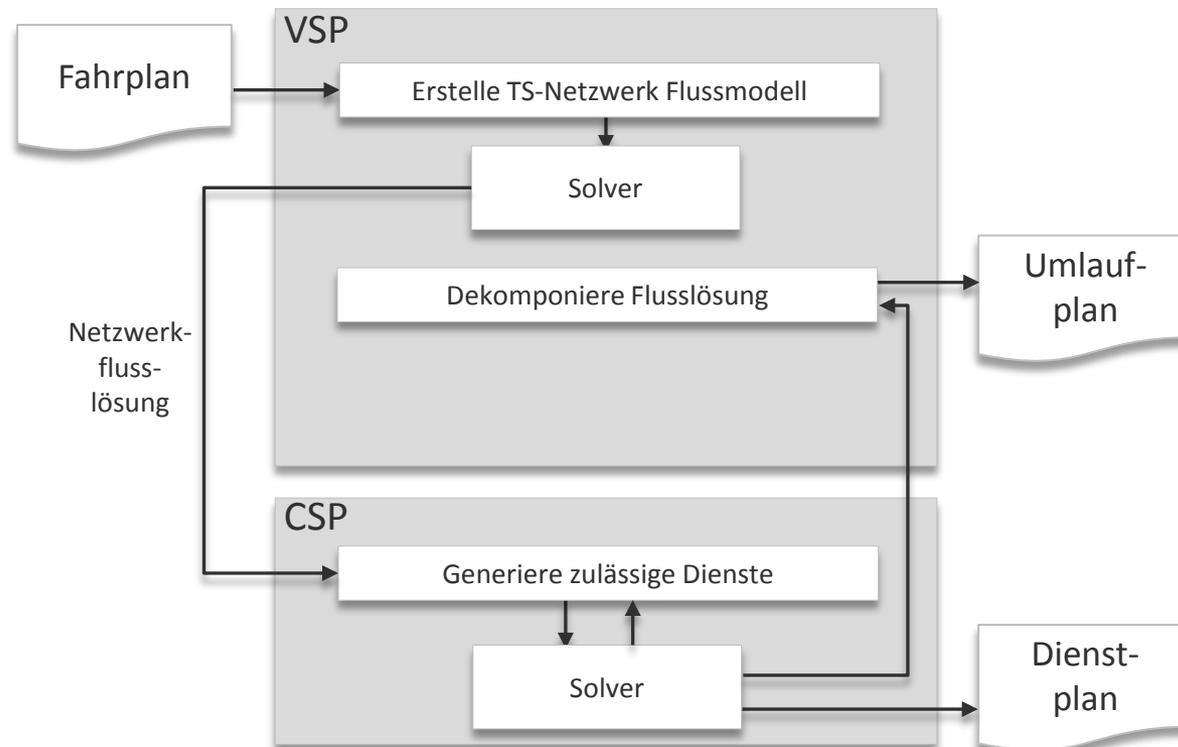
- Basismodell für teilintegrierten und integrierten Lösungsansatz
- Aufgrund der Time-Space-Netzwerkstruktur repräsentiert eine (kostenoptimale) Flusslösung eine Vielzahl (kostenoptimaler) Umlaufpläne ^[1]



[1] Kliewer, N., Mellouli, T., Suhl, L.,

A time-space network based exact optimization model for multiple-depot bus scheduling. European Journal of Operations Research 175(3), 2006

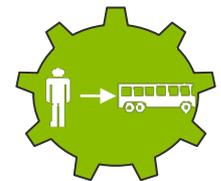
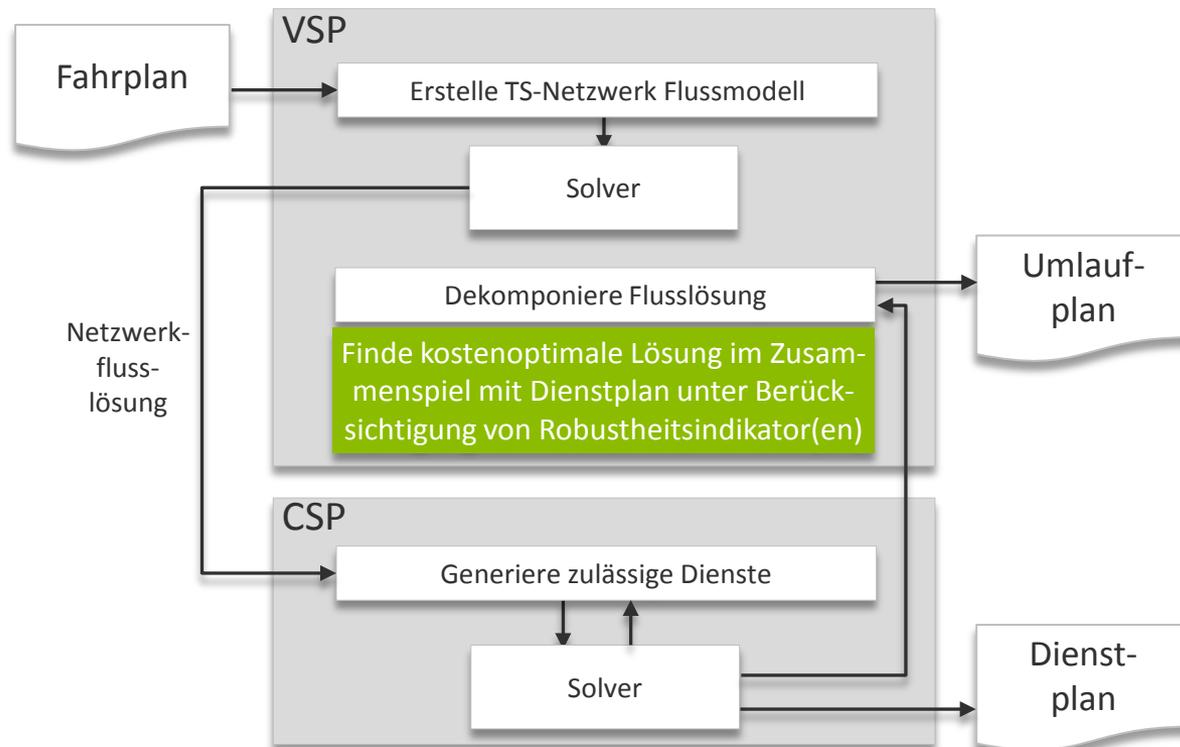
Teilintegriertes Lösungsschema



VSP: vehicle scheduling problem
CSP: crew scheduling problem

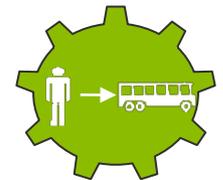
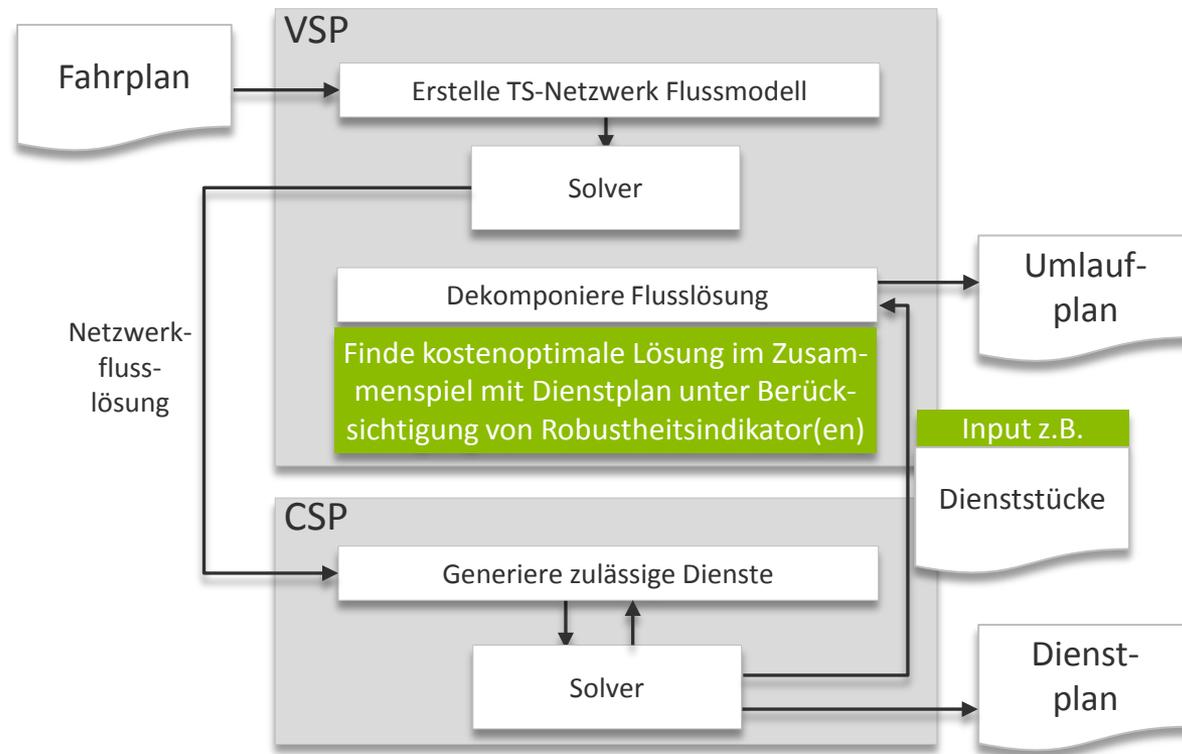
Basiert auf Verfahren nach Gintner, V., Kliewer, N., Suhl, L., (2008)
A Crew Scheduling Approach for Public Transit Enhanced with Aspects from Vehicle Scheduling

Teilintegriertes Lösungsschema



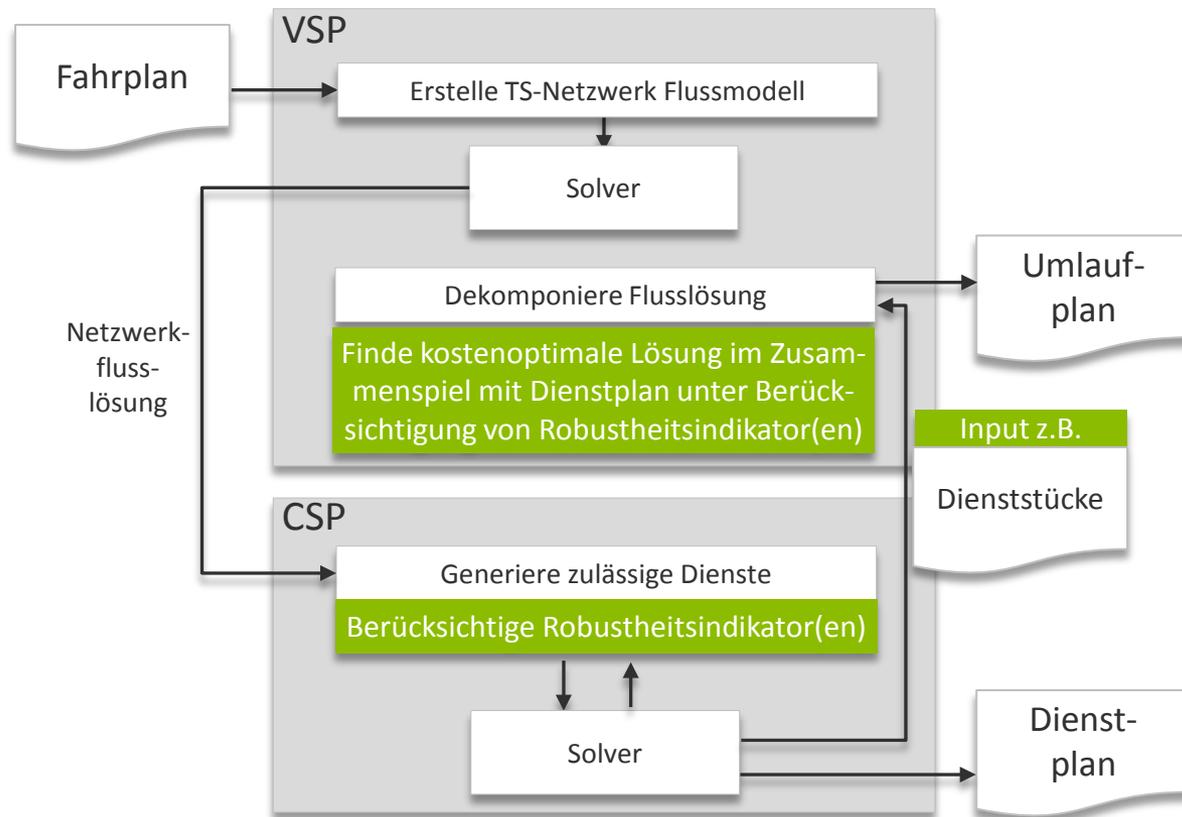
VSP: vehicle scheduling problem
CSP: crew scheduling problem

Teilintegriertes Lösungsschema



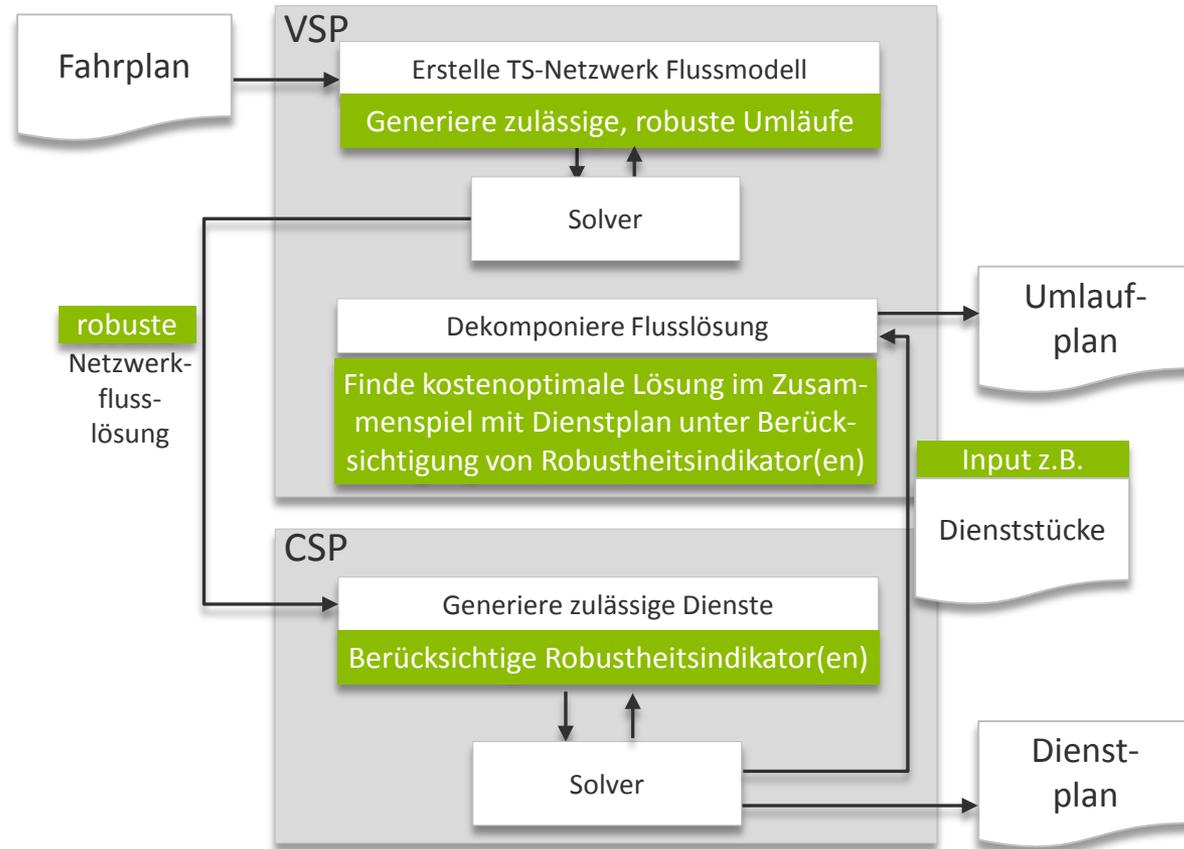
VSP: vehicle scheduling problem
CSP: crew scheduling problem

Teilintegriertes Lösungsschema



VSP: vehicle scheduling problem
CSP: crew scheduling problem

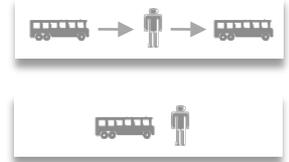
Teilintegriertes Lösungsschema



VSP: vehicle scheduling problem
CSP: crew scheduling problem

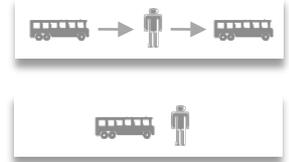
(Teil) Integrierte Umlauf- und Dienstplanung

- Zielfunktion



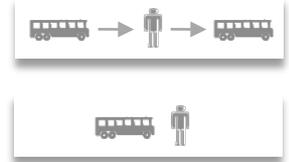
(Teil) Integrierte Umlauf- und Dienstplanung

- Zielfunktion



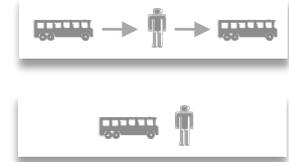
(Teil) Integrierte Umlauf- und Dienstplanung

- Zielfunktion



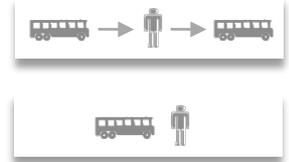
(Teil) Integrierte Umlauf- und Dienstplanung

- Zielfunktion



(Teil) Integrierte Umlauf- und Dienstplanung

- Zielfunktion



Robustes, integriertes Umlauf- und Dienstplanungsproblem

Minimiere Kosten

Minimiere
Propagation in VSMinimiere
Propagation in CS

$$\sum_{d \in \mathcal{D}} \sum_{(i,j) \in A^d} y_{ij}^d c_{ij}^d + \sum_{d \in \mathcal{D}} \sum_{k \in K^d} x_k^d f_k^d + \alpha_{vs} \sum_{d \in \mathcal{D}} \sum_{l \in L^d} z_l^d w_l^d + \alpha_{cs} \sum_{d \in \mathcal{D}} \sum_{k \in K^d} x_k^d v_k^d \rightarrow \min \quad (1.1)$$

↑ Kosten
↑ Kosten
↑ Propagierte Verspätungen
↑ Propagierte Verspätungen

$$\text{s.t.} \quad \sum_{d \in \mathcal{D}} \sum_{(i,j) \in A^d(t)} y_{ij}^d = 1 \quad \forall t \in \mathcal{T} \quad (1.2) \quad \text{cover constraints}$$

↑ Menge Servicefahrten

$$\sum_{\{j:(j,i) \in A^d\}} y_{ji}^d - \sum_{\{j:(i,j) \in A^d\}} y_{ij}^d = 0 \quad \forall d \in \mathcal{D}, \forall i \in N^d \quad (1.3) \quad \text{flow conservation}$$

↑ Knotenmenge

$$\sum_{k \in K^d(i,j)} x_k^d - y_{ij}^d = 0 \quad \forall d \in \mathcal{D}, \forall (i,j) \in \tilde{A}^d \quad (1.4) \quad \text{linking constraints}$$

↑ Kantenmenge

$$\sum_{l \in L^d(i,j)} z_l^d - y_{ij}^d = 0 \quad \forall d \in \mathcal{D}, \forall (i,j) \in A^d \quad (1.5) \quad \text{linking constraints}$$

↑ Kantenmenge

$$0 \leq y_{ij}^d \leq u_{ij}^d, \quad y_{ij}^d \in \mathbb{N} \quad \forall d \in \mathcal{D}, \forall (i,j) \in A^d \quad (1.6) \quad \text{capacity constraints}$$

$$x_k^d \in \{0,1\} \quad \forall d \in \mathcal{D}, \forall k \in K^d \quad (1.7) \quad \text{integrality}$$

$$z_l^d \in \{0,1\} \quad \forall d \in \mathcal{D}, \forall l \in L^d \quad (1.8) \quad \text{integrality}$$

↑ Menge Dienste

↑ Menge Umläufe

Basierend auf Modell: Steinzen, I., Gintner, V., Suhl, L., Kliewer, N. (2010)

A Time-Space Network Approach for the Integrated Vehicle- and Crew-Scheduling Problem with Multiple Depots. *Transportation Science* 44(3), 367-382.

Robustes, integriertes Umlauf- und Dienstplanungsproblem

Minimiere Kosten

Minimiere
Propagation in VSMinimiere
Propagation in CS

$$\sum_{d \in \mathcal{D}} \sum_{(i,j) \in A^d} y_{ij}^d c_{ij}^d + \sum_{d \in \mathcal{D}} \sum_{k \in K^d} x_k^d f_k^d + \alpha_{vs} \sum_{d \in \mathcal{D}} \sum_{l \in I^d} z_l^d w_l^d + \alpha_{cs} \sum_{d \in \mathcal{D}} \sum_{k \in K^d} x_k^d v_k^d \rightarrow \min \quad (1.1)$$

↑ Kosten
↑ Kosten
↑ Propagierte Verspätungen
↑ Propagierte Verspätungen

↓ Fahrten bedient von Dienst k

$$v_k = \sum_{i=1}^{\Gamma^k-1} p(t_i, t_{i+1}) \quad \text{(Summe von propagierten Verspätungen innerhalb eines Dienstes)}$$

↓ Fahrten bedient von Umlauf l

$$w_l = \sum_{i=1}^{\Gamma^l-1} p(t_i, t_{i+1}) \quad \text{(Summe von propagierten Verspätungen innerhalb eines Umlaufes)}$$

mit

$$p(t_i, t_{i+1}) = \max \left\{ 0, \underbrace{\text{PAT}(t_i)}_{\text{geplante Ankunftszeit}} + \underbrace{\text{PD}(t_i)}_{\text{erwartete primäre Verspätung}} + \underbrace{p(t_{i-1}, t_i)}_{\text{propagierte Verspätung}} - \underbrace{\text{PDT}(t_{i+1})}_{\text{geplante Abfahrtszeit}} \right\}$$

$$p(t_0, t_1) = 0$$

Basierend auf

A Time-Space Network Approach for the Integrated Vehicle- and Crew-Scheduling Problem with Multiple Depots. Transportation Science 44(3), 367-382.

Robustes, integriertes Umlauf- und Dienstplanungsproblem

Minimiere Kosten

Minimiere
Propagation in VSMinimiere
Propagation in CS

$$\sum_{d \in \mathcal{D}} \sum_{(i,j) \in A^d} y_{ij}^d c_{ij}^d + \sum_{d \in \mathcal{D}} \sum_{k \in K^d} x_k^d f_k^d + \alpha_{vs} \sum_{d \in \mathcal{D}} \sum_{l \in L^d} z_l^d w_l^d + \alpha_{cs} \sum_{d \in \mathcal{D}} \sum_{k \in K^d} x_k^d v_k^d \rightarrow \min \quad (1.1)$$

↑ Kosten
↑ Kosten
↑ Propagierte Verspätungen
↑ Propagierte Verspätungen

$$\text{s.t.} \quad \sum_{d \in \mathcal{D}} \sum_{(i,j) \in A^d(t)} y_{ij}^d = 1 \quad \forall t \in \mathcal{T} \quad (1.2) \quad \text{cover constraints}$$

↑ Menge Servicefahrten

$$\sum_{\{j:(j,i) \in A^d\}} y_{ji}^d - \sum_{\{j:(i,j) \in A^d\}} y_{ij}^d = 0 \quad \forall d \in \mathcal{D}, \forall i \in N^d \quad (1.3) \quad \text{flow conservation}$$

↑ Knotenmenge

$$\sum_{k \in K^d(i,j)} x_k^d - y_{ij}^d = 0 \quad \forall d \in \mathcal{D}, \forall (i,j) \in \tilde{A}^d \quad (1.4) \quad \text{linking constraints}$$

↑ Kantenmenge

$$\sum_{l \in L^d(i,j)} z_l^d - y_{ij}^d = 0 \quad \forall d \in \mathcal{D}, \forall (i,j) \in A^d \quad (1.5) \quad \text{linking constraints}$$

↑ Kantenmenge

$$0 \leq y_{ij}^d \leq u_{ij}^d, \quad y_{ij}^d \in \mathbb{N} \quad \forall d \in \mathcal{D}, \forall (i,j) \in A^d \quad (1.6) \quad \text{capacity constraints}$$

$$x_k^d \in \{0,1\} \quad \forall d \in \mathcal{D}, \forall k \in K^d \quad (1.7) \quad \text{integrality}$$

$$z_l^d \in \{0,1\} \quad \forall d \in \mathcal{D}, \forall l \in L^d \quad (1.8) \quad \text{integrality}$$

↑ Menge Dienste

↑ Menge Umläufe

Basierend auf Modell: Steinzen, I., Gintner, V., Suhl, L., Kliewer, N. (2010)

A Time-Space Network Approach for the Integrated Vehicle- and Crew-Scheduling Problem with Multiple Depots. *Transportation Science* 44(3), 367-382.

Robustes, integriertes Umlauf- und Dienstplanungsproblem

Minimiere Kosten

Minimiere
Propagation in VSMinimiere
Propagation in CS

$$\sum_{d \in \mathcal{D}} \sum_{(i,j) \in A^d} y_{ij}^d c_{ij}^d + \sum_{d \in \mathcal{D}} \sum_{k \in K^d} x_k^d f_k^d + \alpha_{vs} \sum_{d \in \mathcal{D}} \sum_{l \in L^d} z_l^d w_l^d + \alpha_{cs} \sum_{d \in \mathcal{D}} \sum_{k \in K^d} x_k^d v_k^d \rightarrow \min \quad (1.1)$$

↑ Kosten
↑ Kosten
↑ Propagierte Verspätungen
↑ Propagierte Verspätungen

$$\text{s.t.} \quad \sum_{d \in \mathcal{D}} \sum_{(i,j) \in A^d(t)} y_{ij}^d = 1 \quad \forall t \in \mathcal{T} \quad (1.2) \quad \text{cover constraints}$$

↑ Menge Servicefahrten

$$\sum_{\{j:(j,i) \in A^d\}} y_{ji}^d - \sum_{\{j:(i,j) \in A^d\}} y_{ij}^d = 0 \quad \forall d \in \mathcal{D}, \forall i \in N^d \quad (1.3) \quad \text{flow conservation}$$

↑ Knotenmenge

$$\sum_{k \in K^d(i,j)} x_k^d - y_{ij}^d = 0 \quad \forall d \in \mathcal{D}, \forall (i,j) \in \tilde{A}^d \quad (1.4) \quad \text{linking constraints}$$

↑ Kantenmenge

$$\sum_{l \in L^d(i,j)} z_l^d - y_{ij}^d = 0 \quad \forall d \in \mathcal{D}, \forall (i,j) \in A^d \quad (1.5) \quad \text{linking constraints}$$

↑ Kantenmenge

$$0 \leq y_{ij}^d \leq u_{ij}^d, y_{ij}^d \in \mathbb{N} \quad \forall d \in \mathcal{D}, \forall (i,j) \in A^d \quad (1.6) \quad \text{capacity constraints}$$

$$x_k^d \in \{0,1\} \quad \forall d \in \mathcal{D}, \forall k \in K^d \quad (1.7) \quad \text{integrality}$$

$$z_l^d \in \{0,1\} \quad \forall d \in \mathcal{D}, \forall l \in L^d \quad (1.8) \quad \text{integrality}$$

↑ Menge Dienste

↑ Menge Umläufe

Basierend auf Modell: Steinzen, I., Gintner, V., Suhl, L., Kliewer, N. (2010)

A Time-Space Network Approach for the Integrated Vehicle- and Crew-Scheduling Problem with Multiple Depots. Transportation Science 44(3), 367-382.

Generelles Lösungsschema

Grundlegende Idee, um Integrierte Umlauf- und Dienstplanungsprobleme zu lösen^[1]:

- Berechne eine untere Schranke der optimalen Lösung mit Column Generation in Kombination mit Lagrange-Relaxation
- Konstruiere eine zulässige Lösung mit Hilfe einer Lagrange-Heuristik



Initialisierung

Löse MDVSP und CSP sequenziell/ teilintegriert.

Nutze CSP Lösungen als
initiale Dienst/Spaltenmenge

(Beschränktes) Master Problem

Berechne Dualwerte durch Lösen des Lagrange-Dualen-
Problems auf der aktuellen Spaltenmenge.

Dual-
werte

Generiere Dienste/Spalten

Löse Ressourcenbeschränkte Kürzeste-Wege-Probleme unter
Berücksichtigung von (komplexen) Dienstregeln mit einem Label
Setting Algorithmus.

Füge neue [neue Dienste gefunden]
Dienste hinzu

[keine Dienste gefunden
ODER anderes Terminierungskriterium]

Erstelle Umlaufplan und Dienstplan

mit einer Lagrange-Heuristik.

[1] Steinzen I.: Topics in Integrated Vehicle and Crew Scheduling in Public Transit. Ph.D. Thesis, University of Paderborn, Germany, 2007.

[1] Huisman D.: Integrated and Dynamic Vehicle and Crew Scheduling. Ph.D. Thesis, Erasmus University of Rotterdam, The Netherlands, 2004.

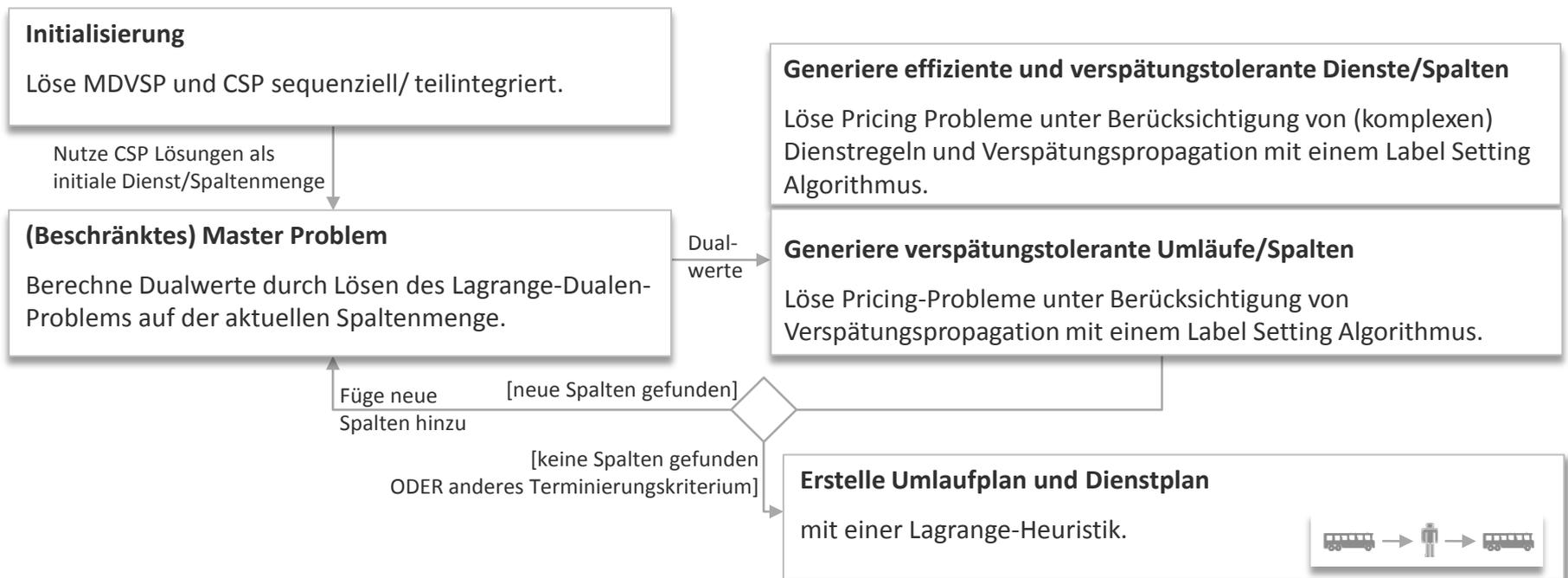
[1] Freling R.: Models and Techniques for Integrating Vehicle and Crew Scheduling. Ph.D. Thesis, Erasmus University of Rotterdam, The Netherlands, 1997.

MDVSP: Multiple Depot Vehicle Scheduling Problem; CSP: Crew Scheduling Problem

Schema Minimierung von Kosten und Verspätungspropagation

Grundlegende Idee, um Integrierte Umlauf- und Dienstplanungsprobleme zu lösen:

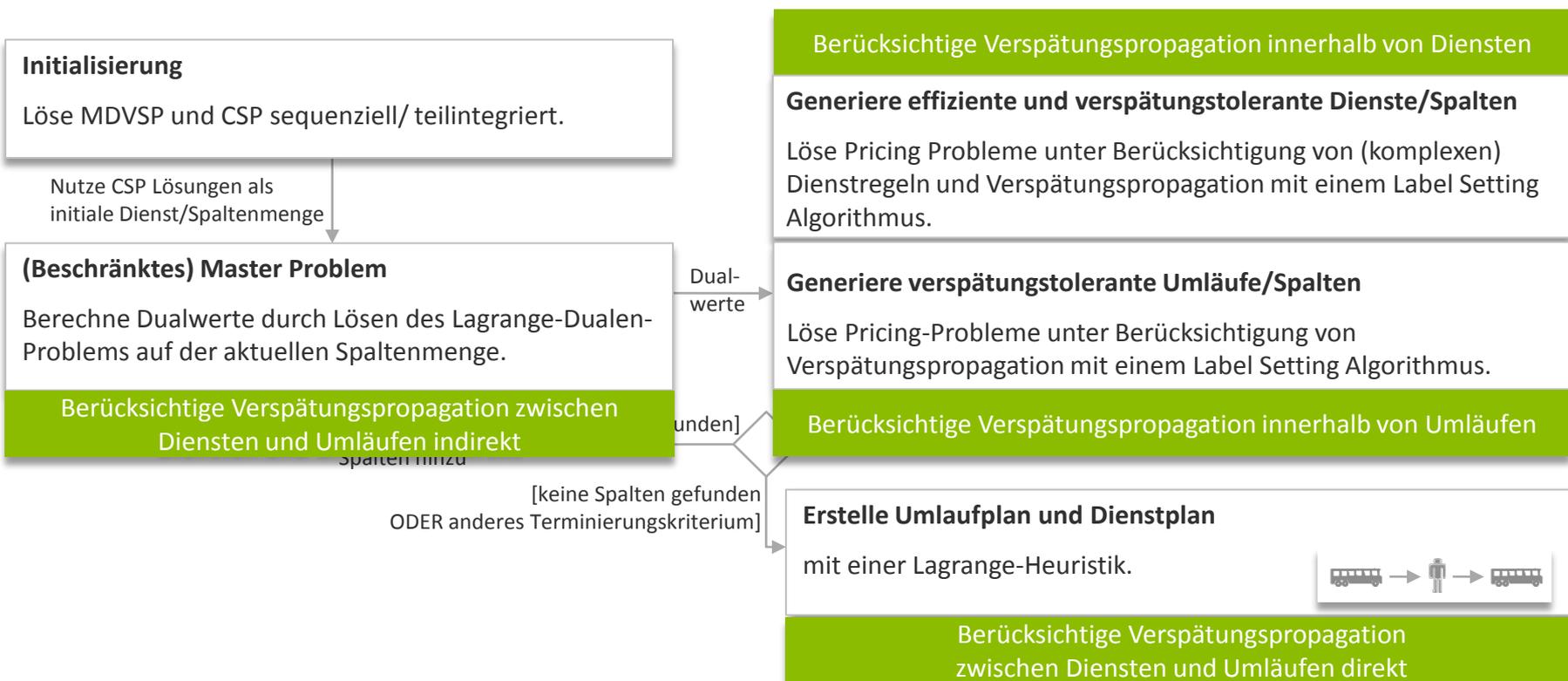
- Berechne eine untere Schranke der optimalen Lösung mit Column Generation in Kombination mit Lagrange-Relaxation
- Konstruiere eine zulässige Lösung mit Hilfe einer Lagrange-Heuristik



Schema Minimierung von Kosten und Verspätungspropagation

Grundlegende Idee, um Integrierte Umlauf- und Dienstplanungsprobleme zu lösen:

- Berechne eine untere Schranke der optimalen Lösung mit Column Generation in Kombination mit Lagrange-Relaxation
- Konstruiere eine zulässige Lösung mit Hilfe einer Lagrange-Heuristik



Robustes, integriertes Umlauf- und Dienstplanungsproblem - relaxiert

$$\begin{aligned}
 & \sum_{d \in \mathcal{D}} \sum_{(i,j) \in A^d} y_{ij}^d c_{ij}^d + \sum_{d \in \mathcal{D}} \sum_{k \in K^d} x_k^d f_k^d + \alpha_{vs} \sum_{d \in \mathcal{D}} \sum_{l \in L^d} z_l^d w_l^d + \alpha_{cs} \sum_{d \in \mathcal{D}} \sum_{k \in K^d} x_k^d v_k^d \\
 & + \sum_{d \in \mathcal{D}} \sum_{(i,j) \in \tilde{A}^d} \mu_{ij}^d \left(\sum_{d \in \mathcal{D}} y_{ij}^d - \sum_{k \in K^d(i,j)} x_k^d \right) + \sum_{d \in \mathcal{D}} \sum_{l \in L^d} v_{ij}^d \left(\sum_{d \in \mathcal{D}} y_{ij}^d - \sum_{l \in L^d(i,j)} z_l^d \right) \\
 & + \sum_{t \in \mathcal{T}} \pi_t \left(1 - \sum_{d \in \mathcal{D}} \sum_{(i,j) \in A^d(t)} y_{ij}^d \right) \rightarrow \min \quad (1.1)
 \end{aligned}$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{d \in \mathcal{D}} \sum_{(i,j) \in A^d(t)} y_{ij}^d = 1 \quad \forall t \in \mathcal{T}$$

~~(1.2)~~
trip cover



$$\sum_{\{j:(j,i) \in A^d\}} y_{ji}^d - \sum_{\{j:(i,j) \in A^d\}} y_{ij}^d = 0 \quad \forall d \in \mathcal{D}, \forall i \in N^d$$

(1.3)
flow conservation

$$\sum_{k \in K^d(i,j)} x_k^d - y_{ij}^d = 0 \quad \forall d \in \mathcal{D}, \forall (i,j) \in \tilde{A}^d$$

~~(1.4)~~
linking



$$\sum_{l \in L^d(i,j)} z_l^d - y_{ij}^d = 0 \quad \forall d \in \mathcal{D}, \forall (i,j) \in A^d$$

~~(1.5)~~
linking



$$0 \leq y_{ij}^d \leq u_{ij}^d, \quad y_{ij}^d \in \mathbb{N} \quad \forall d \in \mathcal{D}, \forall (i,j) \in A^d \quad (1.6)$$

$$x_k^d \in \{0,1\} \quad \forall d \in \mathcal{D}, \forall k \in K^d \quad (1.7)$$

$$z_l^d \in \{0,1\} \quad \forall d \in \mathcal{D}, \forall l \in L^d \quad (1.8)$$

Robust

Minimize Costs

Minimize
Delay Propagation in VSMinimize
Delay Propagation in CS

m - relaxiert

$$\begin{aligned}
& \sum_{d \in \mathcal{D}} \sum_{(i,j) \in A^d} y_{ij}^d c_{ij}^d + \sum_{d \in \mathcal{D}} \sum_{k \in K^d} x_k^d f_k^d + \alpha_{vs} \sum_{d \in \mathcal{D}} \sum_{l \in L^d} z_l^d w_l^d + \alpha_{cs} \sum_{d \in \mathcal{D}} \sum_{k \in K^d} x_k^d v_k^d \\
& + \sum_{d \in \mathcal{D}} \sum_{(i,j) \in \tilde{A}^d} \mu_{ij}^d \left(\sum_{d \in \mathcal{D}} y_{ij}^d - \sum_{k \in K^d(i,j)} x_k^d \right) + \sum_{d \in \mathcal{D}} \sum_{l \in L^d} v_{ij}^d \left(\sum_{d \in \mathcal{D}} y_{ij}^d - \sum_{l \in L^d(i,j)} z_l^d \right) \\
& + \sum_{t \in \mathcal{T}} \pi_t \left(1 - \sum_{d \in \mathcal{D}} \sum_{(i,j) \in A^d(t)} y_{ij}^d \right) \rightarrow \min \quad (1.1)
\end{aligned}$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{d \in \mathcal{D}} \sum_{(i,j) \in A^d(t)} y_{ij}^d = 1 \quad \forall t \in \mathcal{T}$$

~~(1.2)~~
trip cover

$$\sum_{\{j:(j,i) \in A^d\}} y_{ji}^d - \sum_{\{j:(i,j) \in A^d\}} y_{ij}^d = 0 \quad \forall d \in \mathcal{D}, \forall i \in N^d \quad (1.3)$$

flow conservation

$$\sum_{k \in K^d(i,j)} x_k^d - y_{ij}^d = 0 \quad \forall d \in \mathcal{D}, \forall (i,j) \in \tilde{A}^d \quad (1.4)$$

~~(1.4)~~
linking

$$\sum_{l \in L^d(i,j)} z_l^d - y_{ij}^d = 0 \quad \forall d \in \mathcal{D}, \forall (i,j) \in A^d \quad (1.5)$$

~~(1.5)~~
linking

$$0 \leq y_{ij}^d \leq u_{ij}^d, \quad y_{ij}^d \in \mathbb{N} \quad \forall d \in \mathcal{D}, \forall (i,j) \in A^d \quad (1.6)$$

$$x_k^d \in \{0,1\} \quad \forall d \in \mathcal{D}, \forall k \in K^d \quad (1.7)$$

$$z_l^d \in \{0,1\} \quad \forall d \in \mathcal{D}, \forall l \in L^d \quad (1.8)$$

Lagrange Subproblem

$$\phi(\mu, \pi, \nu) = \phi_y(\mu, \pi, \nu) + \phi_z(\nu) + \phi_x(\mu) + \sum_{t \in \mathcal{T}} \pi_t$$

with

$$\phi_y(\mu, \pi, \nu) = \left\{ \min \sum_{d \in \mathcal{D}} \sum_{(i,j) \in A^d} y_{ij}^d \bar{c}_{ij}^d \mid \sum_{\{j:(j,i) \in A^d\}} y_{ji}^d - \sum_{\{j:(i,j) \in A^d\}} y_{ij}^d = 0, \forall d \in \mathcal{D}, \forall i \in N^d \right. \\ \left. 0 \leq y_{ij}^d \leq u_{ij}^d, y_{ij}^d \in \mathbb{N}, \forall d \in \mathcal{D}, \forall (i,j) \in A^d \right\}$$



$$\phi_z(\nu) = \left\{ \min \sum_{d \in \mathcal{D}} \sum_{l \in L^d} z_l^d \bar{w}_l^d \mid z_l^d \in \{0,1\}, \forall d \in \mathcal{D}, \forall l \in L^d \right\}$$



$$\phi_x(\mu) = \left\{ \min \sum_{d \in \mathcal{D}} \sum_{k \in K^d} x_k^d \bar{f}_k^d \mid x_k^d \in \{0,1\}, \forall d \in \mathcal{D}, \forall k \in K^d \right\}$$



$$\text{and } \bar{c}_{ij}^d = \begin{cases} c_{ij}^d + \mu_{ij}^d + \nu_{ij}^d - \pi_t & \text{for } (i,j) \in \tilde{A}^d \text{ and } \exists t \in \mathcal{T} : (i,j) \in A^d(t) \\ c_{ij}^d + \mu_{ij}^d + \nu_{ij}^d & \text{for } (i,j) \in \tilde{A}^d \text{ and } \nexists t \in \mathcal{T} : (i,j) \in A^d(t) \\ c_{ij}^d + \nu_{ij}^d & \text{for } (i,j) \notin \tilde{A}^d \end{cases}$$

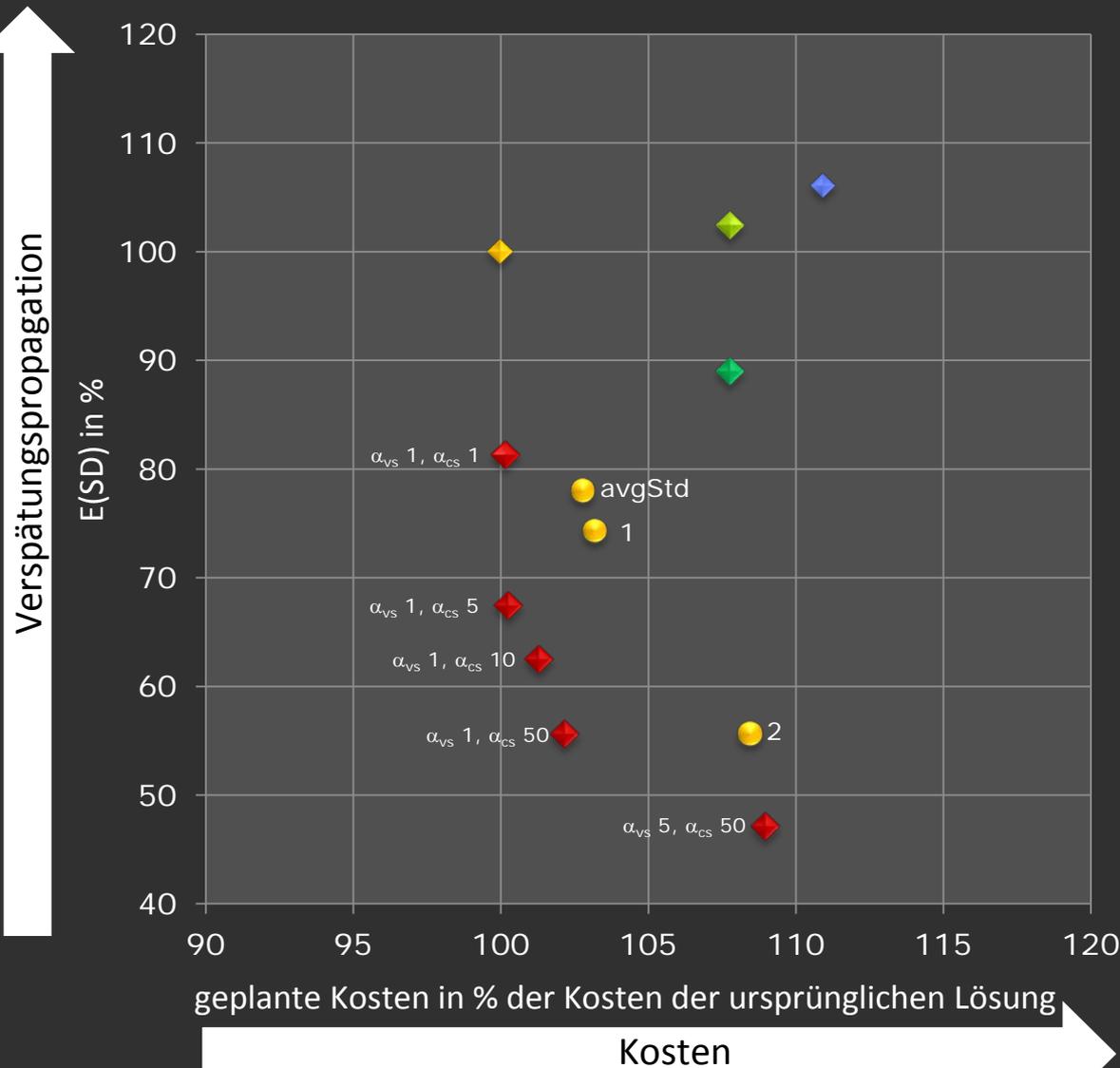
penalized propagated delays

$$\bar{w}_l^d = \alpha_{vs} w_l^d - \sum_{(i,j) \in A^d(l)} \nu_{ij}^d$$

penalized propagated delays

$$\bar{f}_k^d = f_k^d + \alpha_{cs} v_k^d - \sum_{(i,j) \in \tilde{A}^d(k)} \mu_{ij}^d$$

Ergebnisse – Instanz I

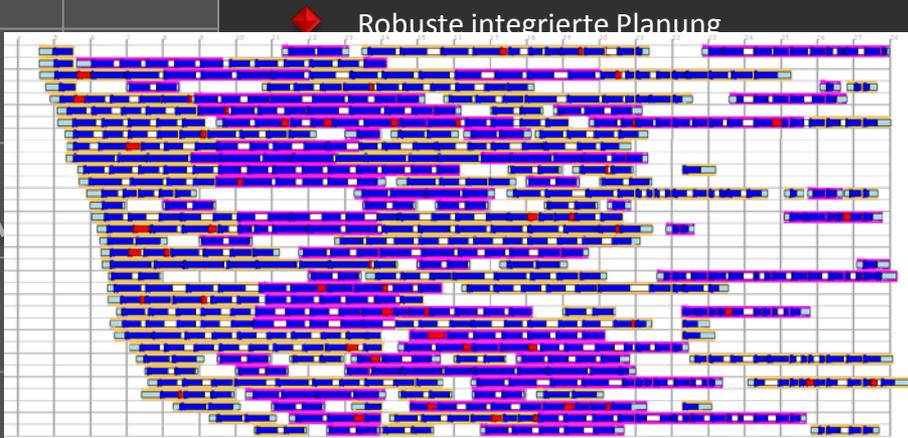
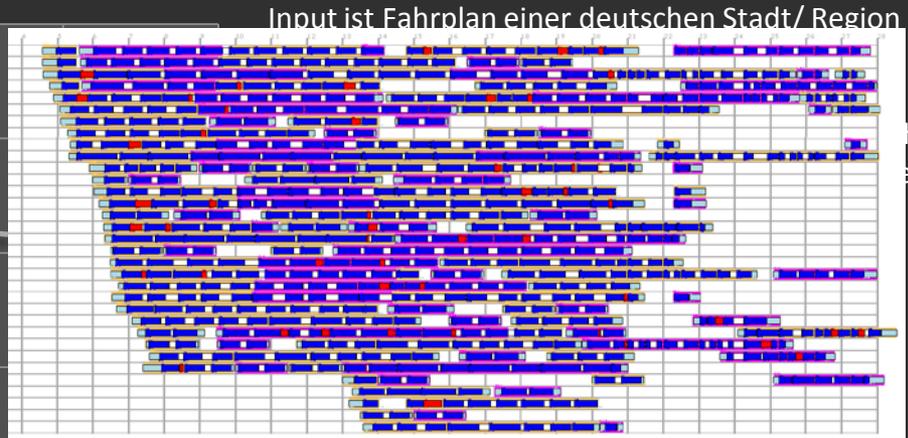
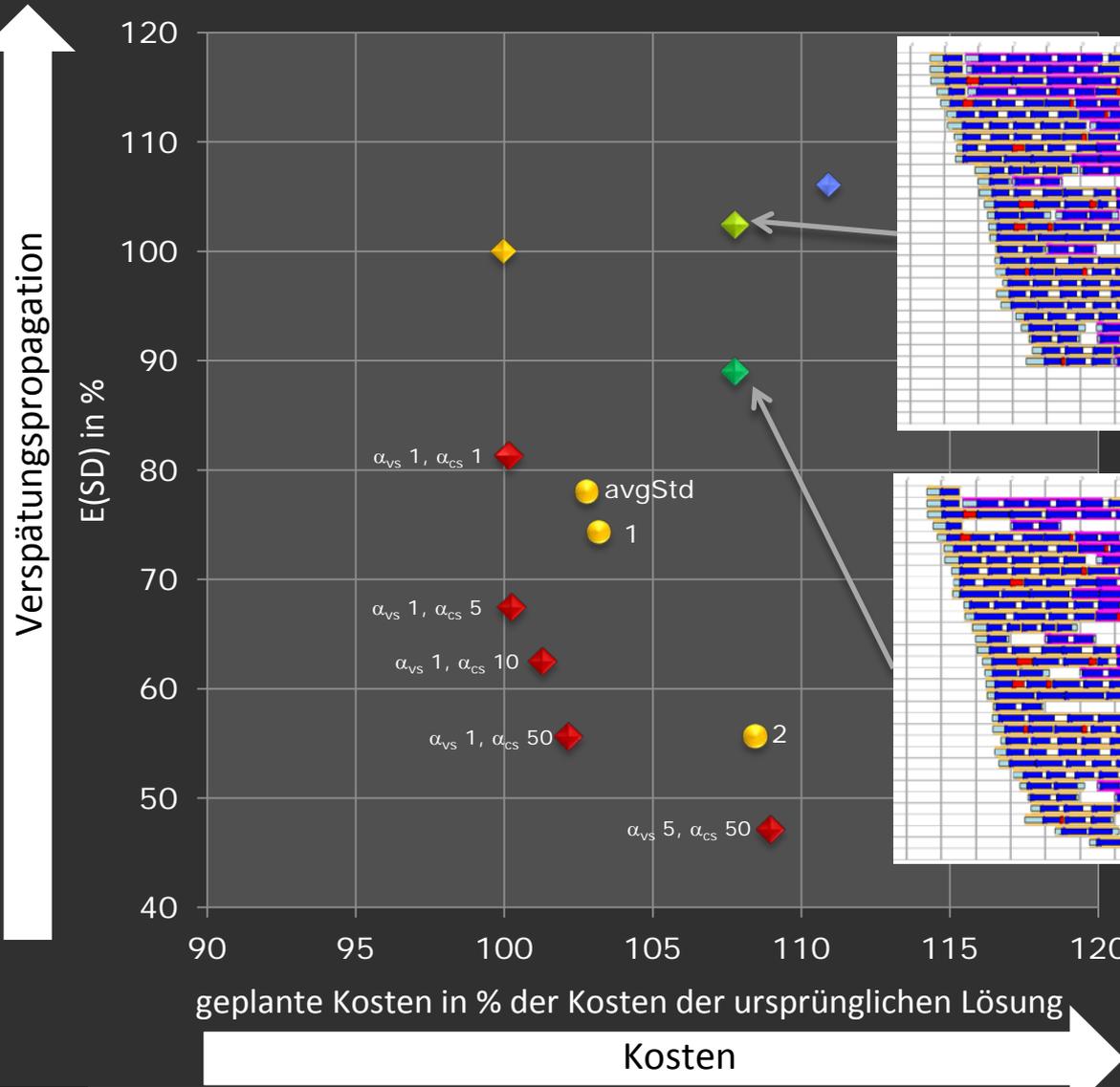


Input ist Fahrplan einer deutschen Stadt/ Region mit 611 Servicefahrten, 1 Fahrzeugdepot; E(SD) berechnet als Durchschnitt über 500 unabhängige Simulationsläufe; Nutzen einer Wahrscheinlichkeitsverteilung für primäre Verspätungen, die aus Verspätungsdaten abgeleitet wurde

- ◆ Integrierte Planung 
- mit festen Pufferzeiten
- ◆ Robuste integrierte Planung
- ◆ Teilintegrierte Planung 
- ◆ Robuste teilintegrierte Planung 
- ◆ Sequenzielle Planung 

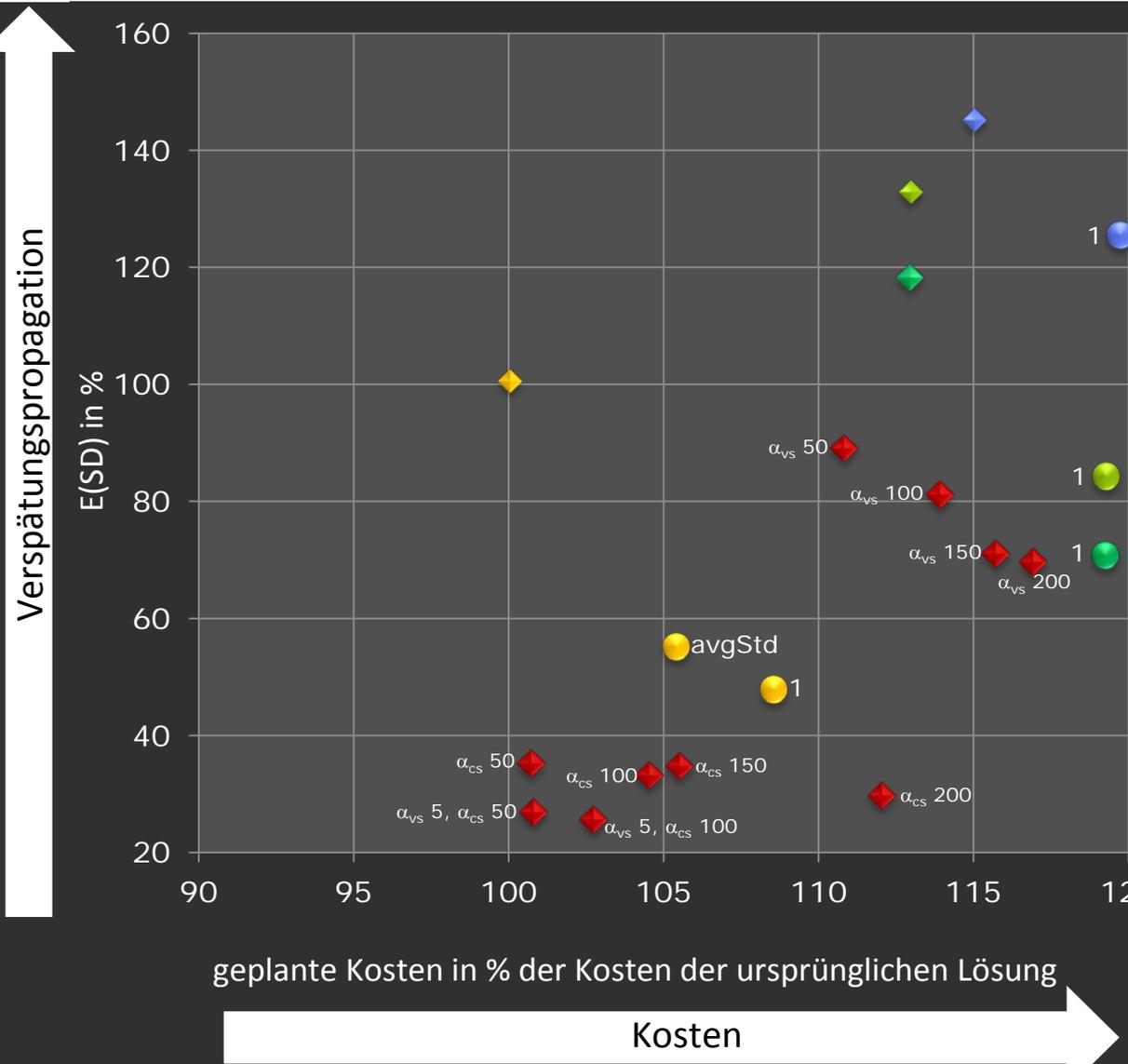
Alle Tests auf Dell OptiPlex 980 PC mit Intel Pentium Core i7-870 @2.93 GHz/ 8 GB unter Windows 7 professional. ILOG CPLEX 12.5 wird zum Lösen von LPs/MIPs eingesetzt.

Ergebnisse – Instanz I



Alle Tests auf Dell OptiPlex 980 PC mit Intel Pentium Core i7-870 @2.93 GHz/ 8 GB unter Windows 7 professional. ILOG CPLEX 12.5 wird zum Lösen von LPs/MIPs eingesetzt.

Ergebnisse – Instanz II

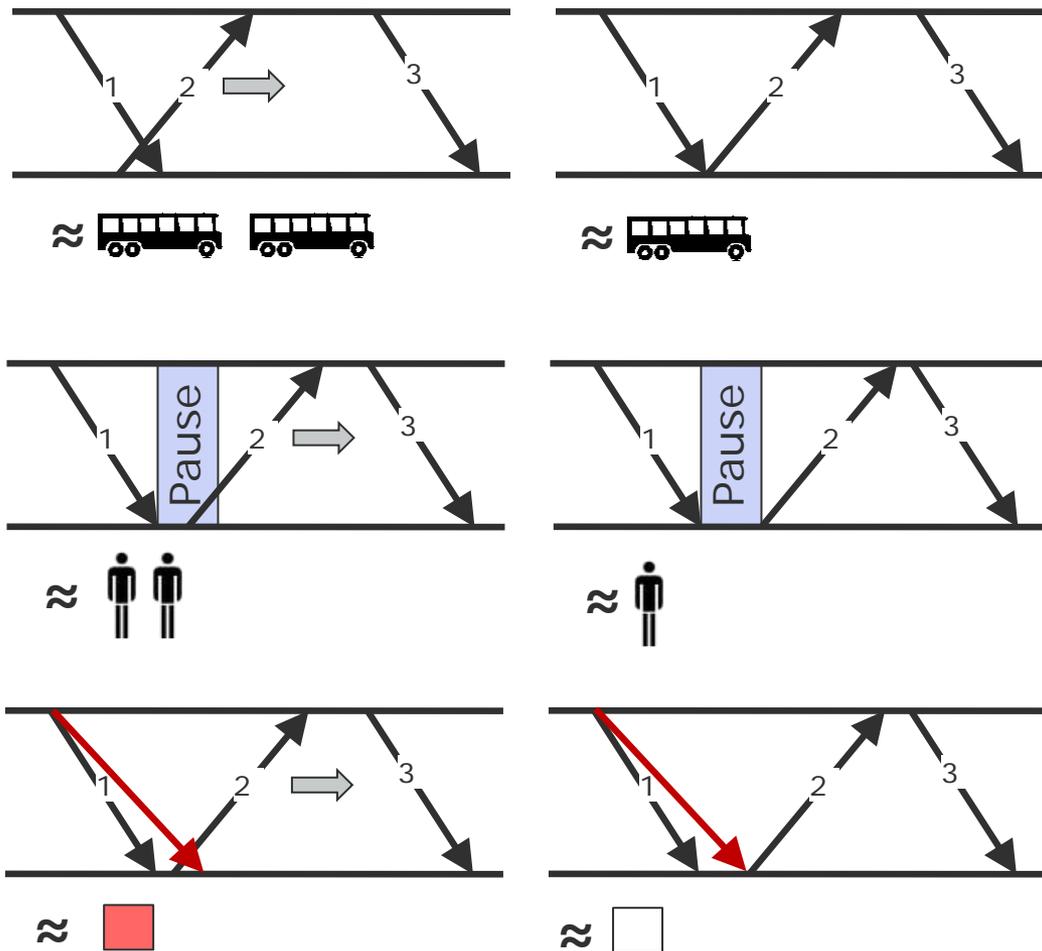
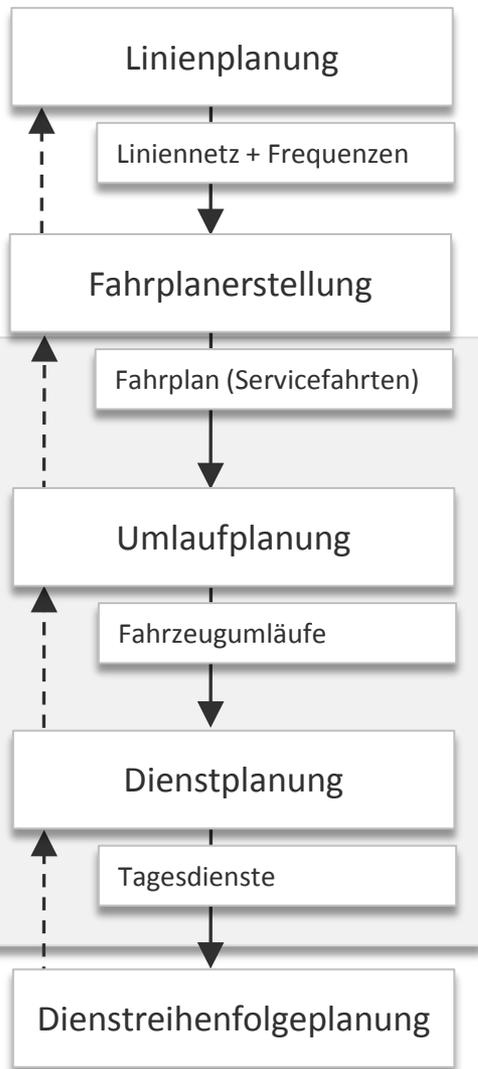


Input ist Fahrplan einer deutschen Stadt/ Region mit 426 Servicefahrten, 1 Fahrzeugdepot; E(SD) berechnet als Durchschnitt über 500 unabhängige Simulationsläufe; Nutzen einer Wahrscheinlichkeitsverteilung für primäre Verspätungen, die aus Verspätungsdaten abgeleitet wurde

- ◆ Integrierte Planung
- mit festen Pufferzeiten
- ◆ Robuste integrierte Planung
- ◆ Teilintegrierte Planung
- mit festen Pufferzeiten
- ◆ Robuste teilintegrierte Planung
- mit festen Pufferzeiten
- ◆ Sequenzielle Planung
- mit festen Pufferzeiten

Alle Tests auf Dell OptiPlex 980 PC mit Intel Pentium Core i7-870 @2.93 GHz/ 8 GB unter Windows 7 professional. ILOG CPLEX 12.5 wird zum Lösen von LPs/MIPs eingesetzt.

Integrierte Robuste Planung mit Zeitfenstern



Zusammenfassung und Ausblick

- ✓ Integrierte Ansätze um kosteneffiziente und robuste Umlauf- und Dienstpläne zu erstellen
- ✓ Minimierung Verspätungspropagation unter Beibehaltung Kosteneffizienz
- ✓ Pläne *steuerbar* zwischen **Kosteneffizienz** (Plankosten) und **Robustheit** (Stabilität)

Nächste Schritte im Rahmen dieser Arbeit:

- Berücksichtigen von Fahrplananpassungen (Integrierte Planung mit Zeitfenstern)
- Vergleich mit Retiming-Ansätzen

Ausblick auf weitere Forschungsmöglichkeiten:

- Einbeziehen von Passagierzufriedenheit

Vielen Dank für die Aufmerksamkeit!
Fragen?



Bastian Amberg
bastian.amberg@fu-berlin.de
