

Mehr Pünktlichkeit im ÖPNV:
Entwurf robuster Fahrpläne

von Prof. Dr. Ewald Speckenmeyer

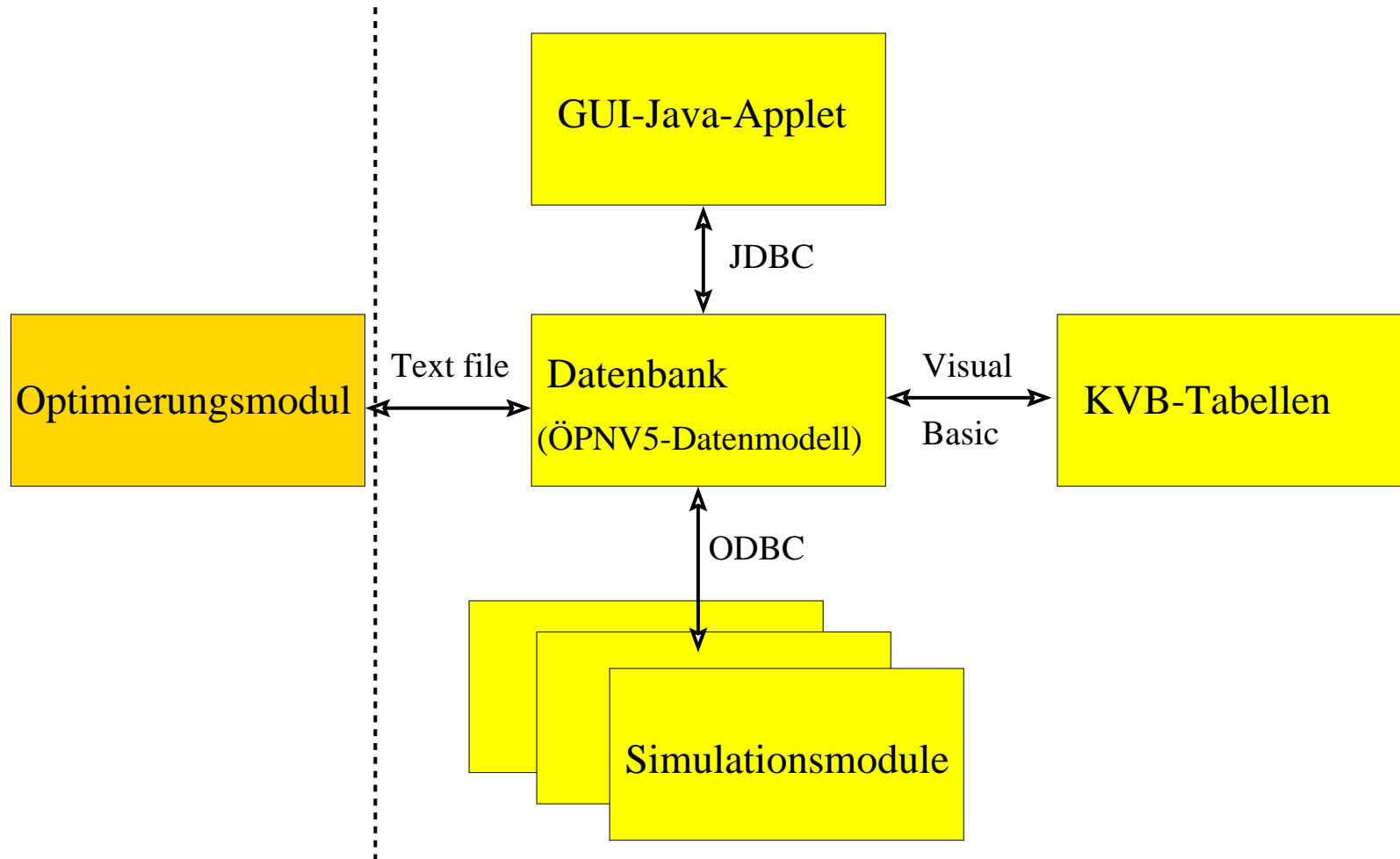
in Zusammenarbeit mit
Dr. Zülfükar Genç und Gero Lückemeyer

*Institut für Informatik
Universität zu Köln*

Vortragsübersicht

- Planungsprozesse im ÖPNV
- Optimierung
 - Motivation
 - Modellierung des Fahrplanoptimierungsproblems
 - Zerlegung des Streckennetzwerks
 - Experimentelle Ergebnisse
- Eingabedaten der Kölner Verkehrsbetriebe (KVB)
- Simulationsmodul auf Basis von Zellularautomaten
 - Definition und benötigte Zusätze
 - Störungen
 - Kalibrierung
- Grafische Oberfläche
- Zusammenfassung und Ausblick

Struktur des Projekts



Planungsprozesse im ÖPNV

Die Planung eines öffentl. Nahverkehrssystems erfolgt in drei Phasen:

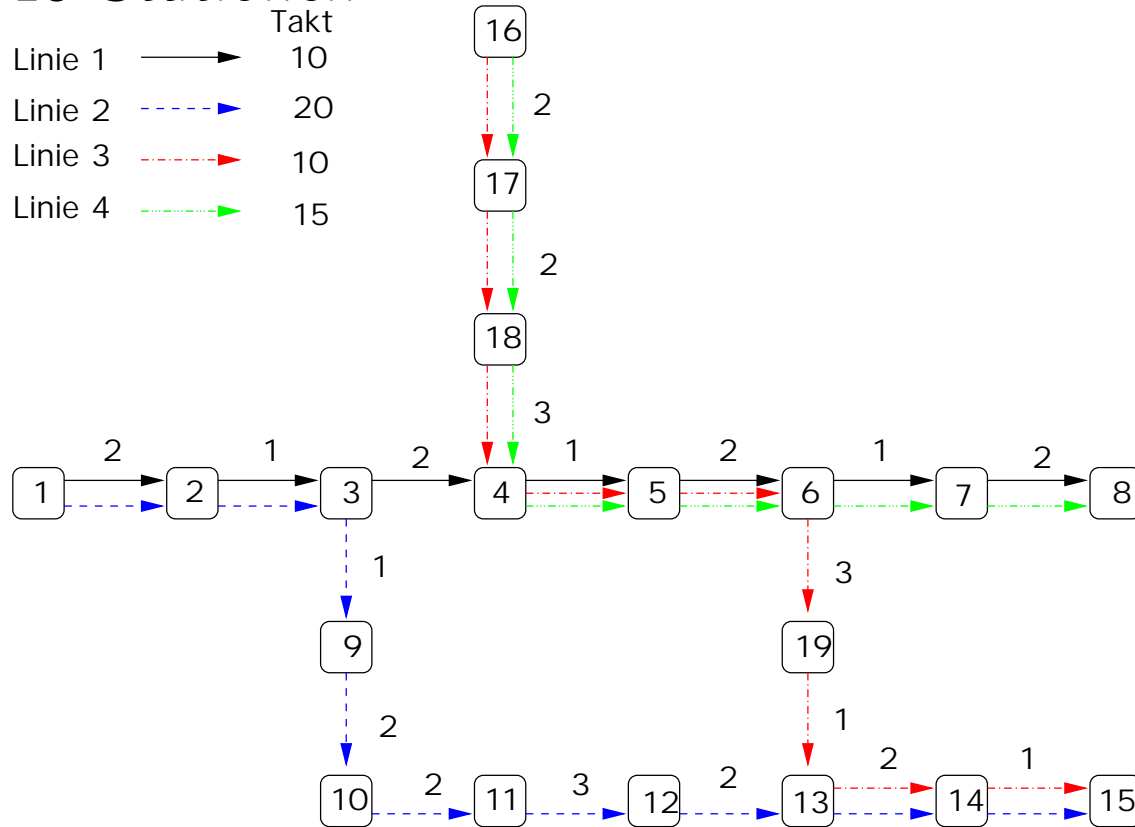
- strategische Planung
 - Ermittlung des Verkehrsbedarfs
 - Entscheidung über das Systemangebot
- taktische Planung
 - Netzstrukturplanung
 - Linienplanung
 - Fahrplan-Planung
- operative Planung
 - Fahrzeugumlaufplanung/Fahrzeugeinsatzplanung (vehicle scheduling)
 - Dienstplanung(crew scheduling)/Dienstreihenfolgeplanung

Motivation

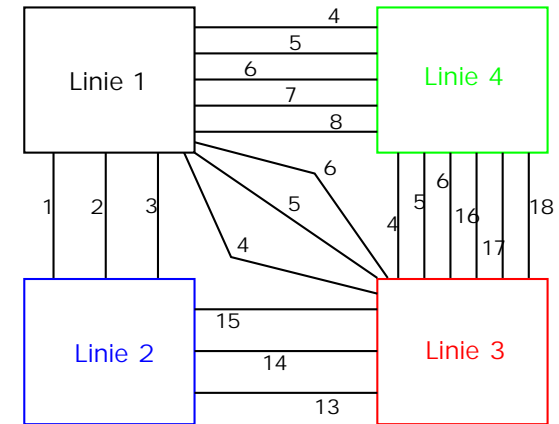
- Anschlussoptimierung sinnvoll im Fernverkehr und in Ballungsräumen am Wochenende und in Abendzeiten
- In Hauptverkehrszeiten: dichter Takt, Wartezeit der Fahrgäste auf Anschlüsse gering
- Verspätungen entstehen, lassen sich kaum verhindern: technische Störungen, erhöhtes Passagieraufkommen, Witterungseinflüsse
- kleine Verspätungen (1-5 Minuten) sollten keine oder nur geringe Auswirkungen auf andere Linien haben
- Möglichkeiten zum Auffangen kleiner Verspätungen
 - Ankunftszeiten der Linien an den einzelnen Stationen gleichmäßig verteilen
 - Zahl der Linien, die in einem Zeitintervall eine Station durchfahren, sollte klein sein

Modellierung

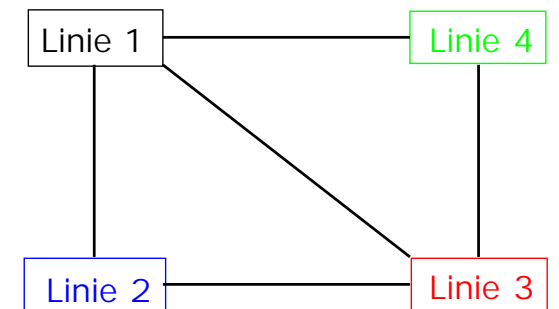
Ein Streckennetzwerk mit 4 Linien und 19 Stationen



Multi-Linienkonflikt-Graph



Linienkonflikt-Graph

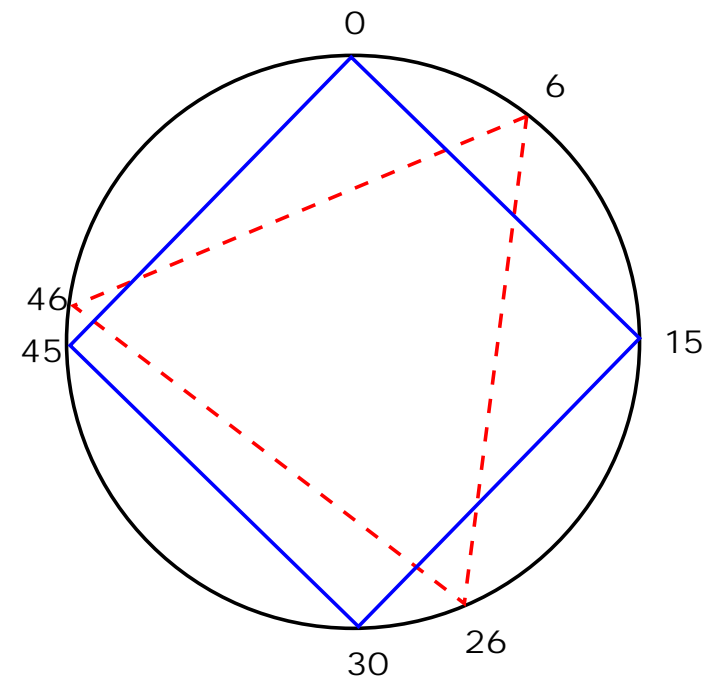


Sicherheitsabstand bei vorgegeben Fahrplan

Sicherheitsabstand bei einem vorgegebenen Fahrplan

- an einer Station: kleinster zeitlicher Abstand der Ankunftszeiten aufeinander folgender Linien
- im Streckennetzwerk: Minimum der Sicherheitsabstände über alle Stationen

Sicherheitsabstand zweier Linien an einer Station mit Takt 15 und 20.



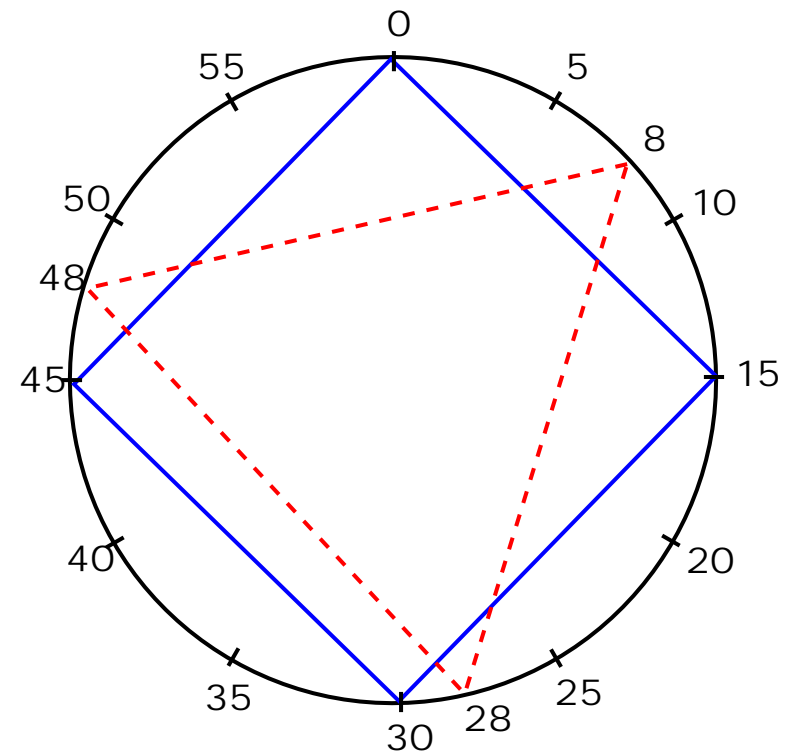
Sicherheitsabstand = 1

Sicherheitsabstand: allgemeine obere Schranken

Satz: Seien l_1, l_2 zwei Linien, die durch die Station s fahren und T_1, T_2 die Takte der beiden Linien. Dann gilt für jeden Fahrplan:
Sicherheitsabstand an der Station $\leq \left\lfloor \frac{ggT(T_1, T_2)}{2} \right\rfloor$

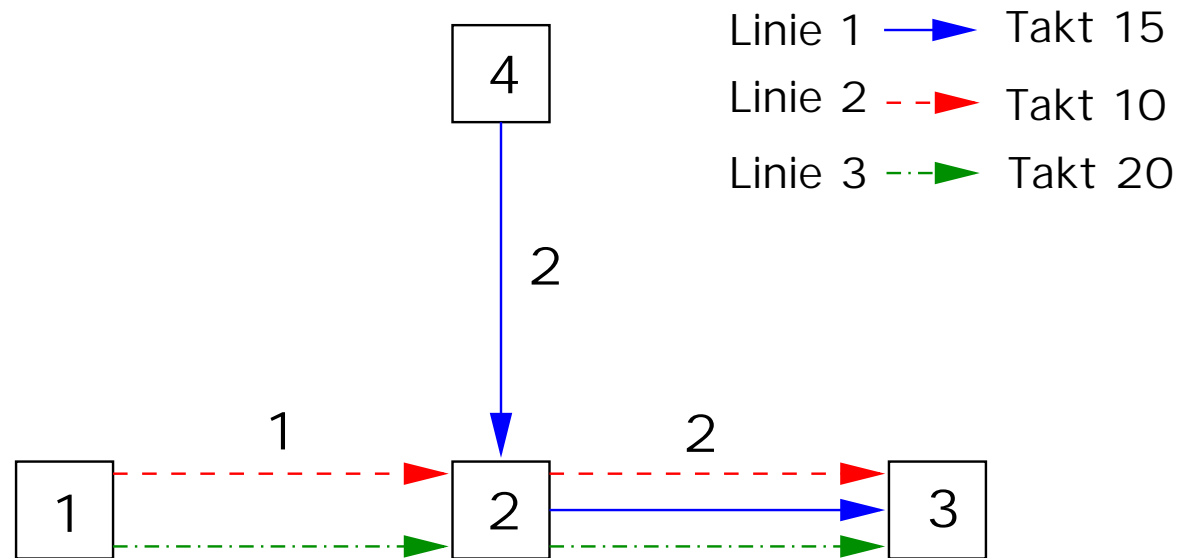
Beispiel: Zwei Linien mit den Takten 15 und 20

obere Schranke für den Sicherheitsabstand $= \left\lfloor \frac{ggT(15, 20)}{2} \right\rfloor = \left\lfloor \frac{60}{2} \right\rfloor = 30$



Modellierung: Beispiel

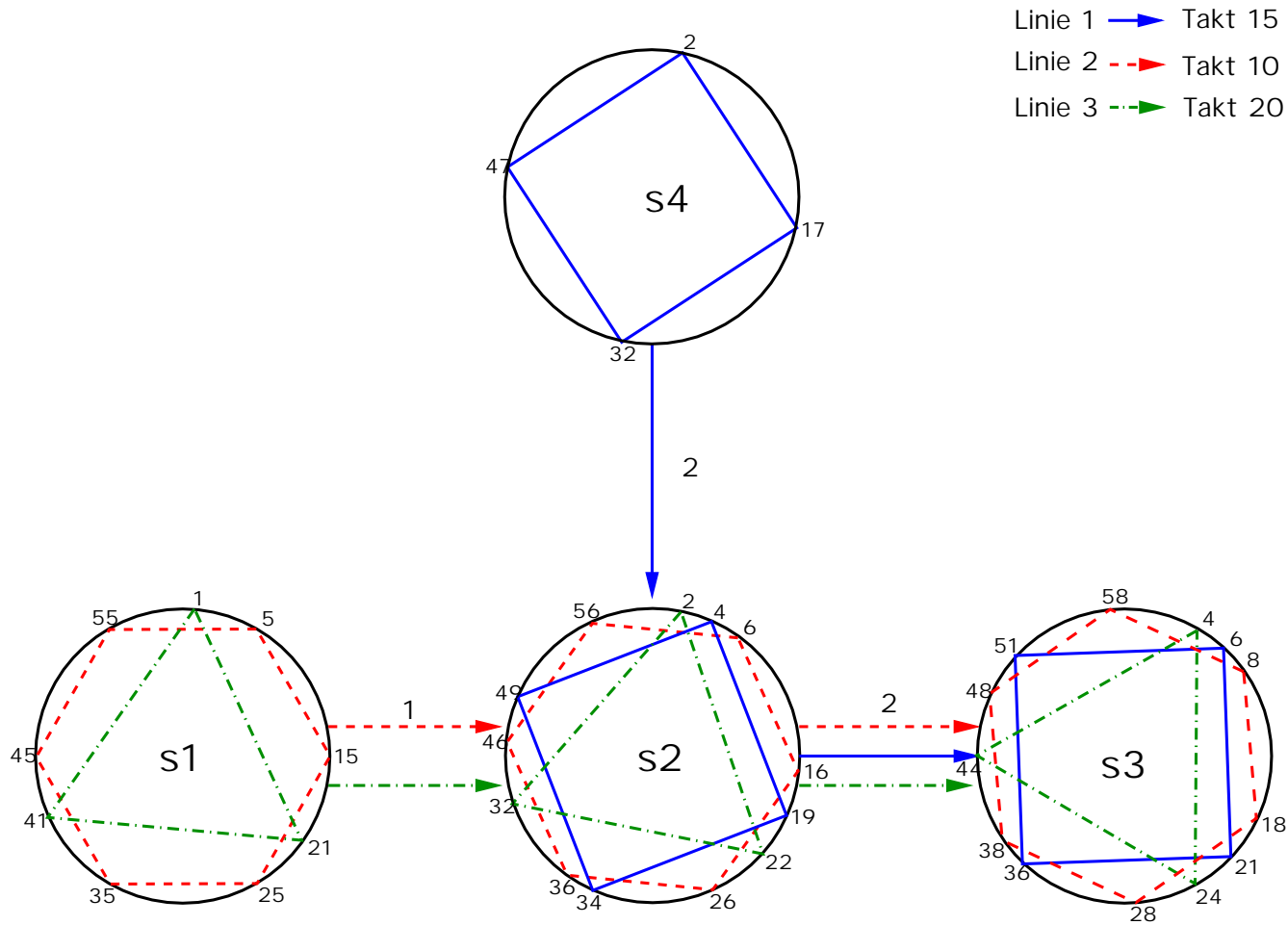
Ein Streckennetzwerk mit 3 Linien und 4 Stationen



Taktfahrplan: $[l_1, 4, 15; 2]$, $[l_2, 1, 10; 5]$, $[l_3, 1, 20; 1]$

Alle Ankunftszeiten der Linien an Stationen errechnen sich aus den Fahrzeiten für die Strecken.

Modellierung: Beispiel mit Fahrplan $\lambda = (2,5,1)$

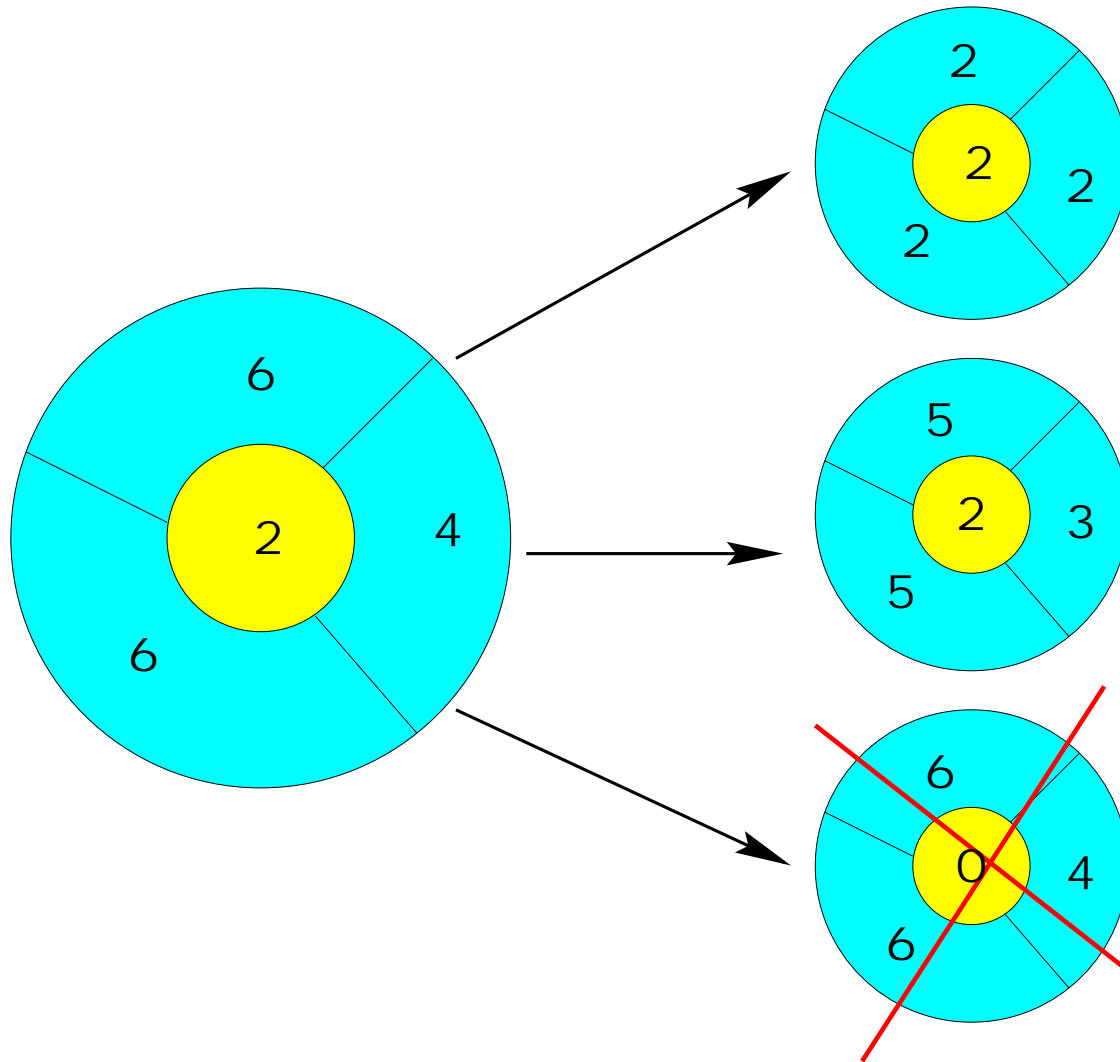


Sicherheitsabstände
an den einzelnen
Stationen:

s_1	4
s_2	2
s_3	2
s_4	15

Summe der
Sicherheitsab-
stände: 23

Unterschied der Zielfunktionen



- Sicherheitsabstands-Problem

$$\delta^* := \max_{\lambda \in \Lambda} \delta(\lambda) = 2$$

- Fahrplan-Problem:

$$\max_{\lambda \in \Lambda: \delta(\lambda) = \delta^*} \delta_{\Sigma}(\lambda) = 15$$

-

$$\max_{\lambda \in \Lambda} \delta_{\Sigma}(\lambda) = 16$$

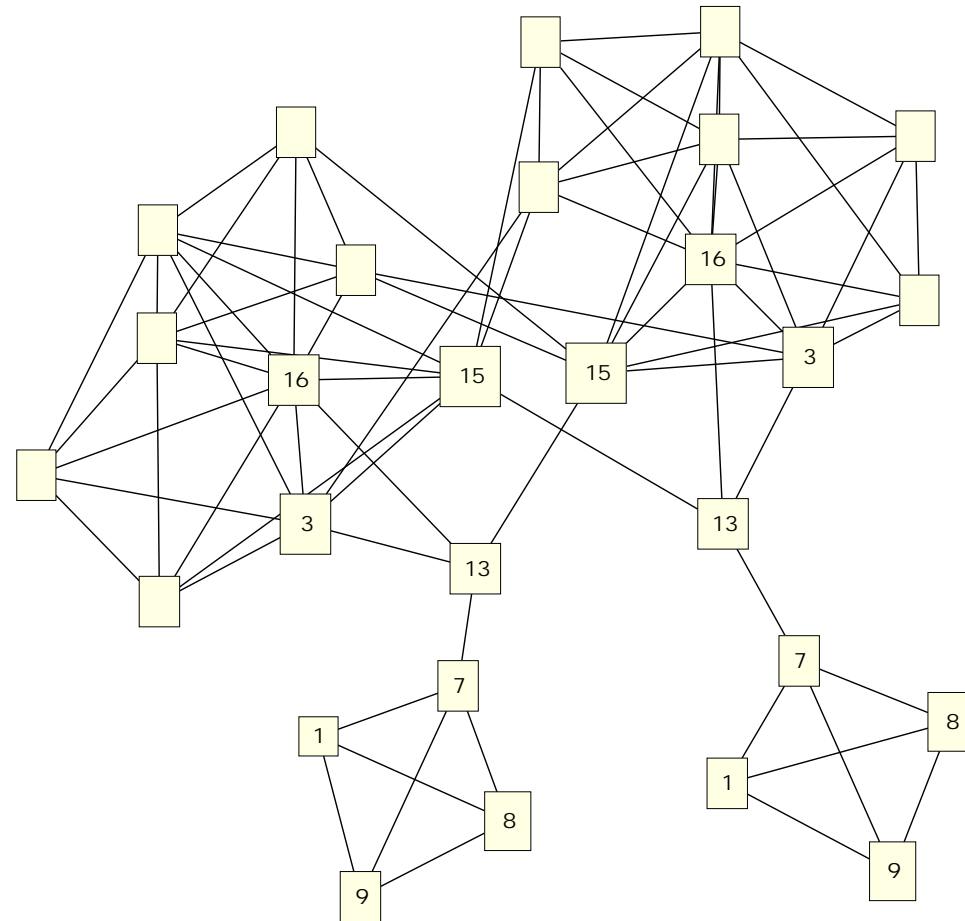
Reduktion der Haltepunkte

- Reduktionsergebnisse für das Liniennetz der KVB (2001):
 - um 12 Uhr: 28 Linien, 542 Haltepunkte (Stationen)
 - für die Optimierung des Fahrplans relevante Haltepunkte: 48
- Haltepunkt ist nicht von Bedeutung, wenn
 - er nur von einer Linie befahren wird oder
 - ein vorgelagerter Haltepunkt von gleichen Linien befahren wird
- Beschleunigung der Rechenzeit um Faktor 4
- Weitere Reduktionen auf den Kanten des Linienkonflikt-Graphen ergeben einen Beschleunigungsfaktor von 10.

Zerlegung des Streckennetzwerkes

Linienkonflikt-Graph für eine Instanz des Liniennetzes der KVB (2001)

- 28 Linien, 543 Stationen
- 383 (76) Linienkonflikte (Kanten)



Darstellung des Problems als ganzzahliges lineares Programm

$$\max \quad \delta \cdot \bar{\delta}_\Sigma + \sum_{s \in S} \delta_s$$

$$a_i^s = \lambda_i + a(s, l_i, 0) \quad \forall s \in S \quad \forall i \in L(s)$$

$$x_{ij}^s = a_i^s - a_j^s - z_{ij}^s \cdot ggT(T_i, T_j) \quad \forall s \in S \quad \forall i, j \in L(s), i \neq j$$

$$\delta_s \leq x_{ij}^s \quad \forall s \in S \quad \forall i, j \in L(s), i \neq j$$

$$\delta_s \leq ggT(T_i, T_j) - x_{ij}^s \quad \forall s \in S \quad \forall i, j \in L(s), i \neq j$$

$$\delta \leq \delta_s \quad \forall s \in S$$

$$0 \leq \lambda_i \leq T_i - 1 \quad \forall i \in L$$

$$0 \leq \delta_s \leq \bar{\delta}_s \quad \forall s \in S$$

$$0 \leq \delta \leq \bar{\delta}$$

$$0 \leq x_{ij}^s \leq ggT(T_i, T_j) - 1 \quad \forall s \in S \quad \forall i, j \in L(s), i \neq j$$

$$x_{ij}^s, z_{ij}^s, \lambda_i, \delta_s, \delta \quad \text{integer}$$

Ergebnisse für die KVB-Testinstanzen

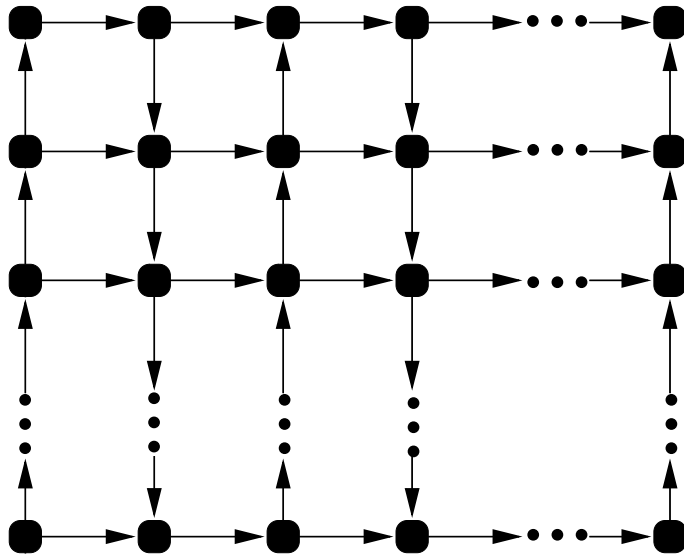
Inst.	B&B Ergebnisse							
	Ergebnis nach 5 Minuten				Ergebnis nach einer Stunde			
	δ	δ_{Σ}	gap	time	δ	δ_{Σ}	gap	time
I_2	12	23548	570	156.74	12	23548	445	271.80
I_{12}	2	4613	128	16.80	2	4622	112	92.38
I_{20}	3	6518	173	233.17	3	6544	143	1858.54

Ins.	CPLEX Ergebnisse							
	nach 5 Minuten				nach einer Stunde			
	δ	δ_{Σ}	gap	time	δ	δ_{Σ}	gap	time
I_2	12	23214	857	297.02	12	23675	12	1894.54
I_{12}	2	4541	224	37.56	2	4651	99	1043.50
I_{20}	3	6452	262	20.59	3	6570	116	1452.05

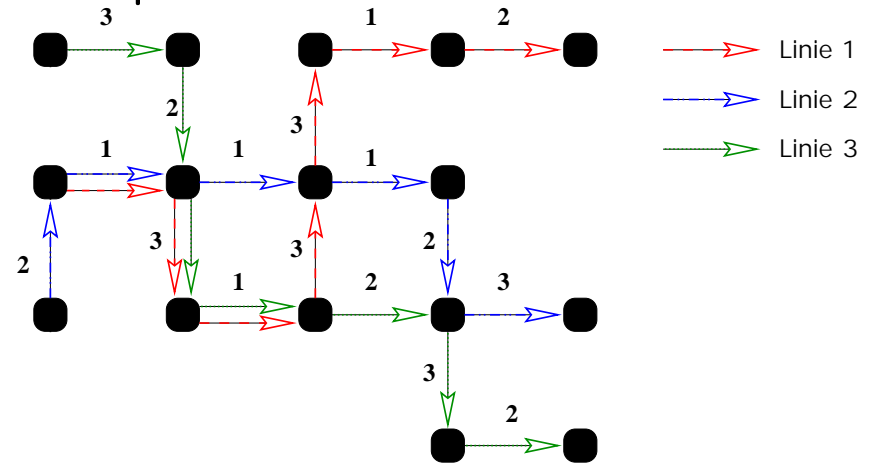
Rechner: SUNW,Ultra-4,

4 CPU's ('296 MHz SUNW,UltraSPARC-II'), 1024 MB RAM

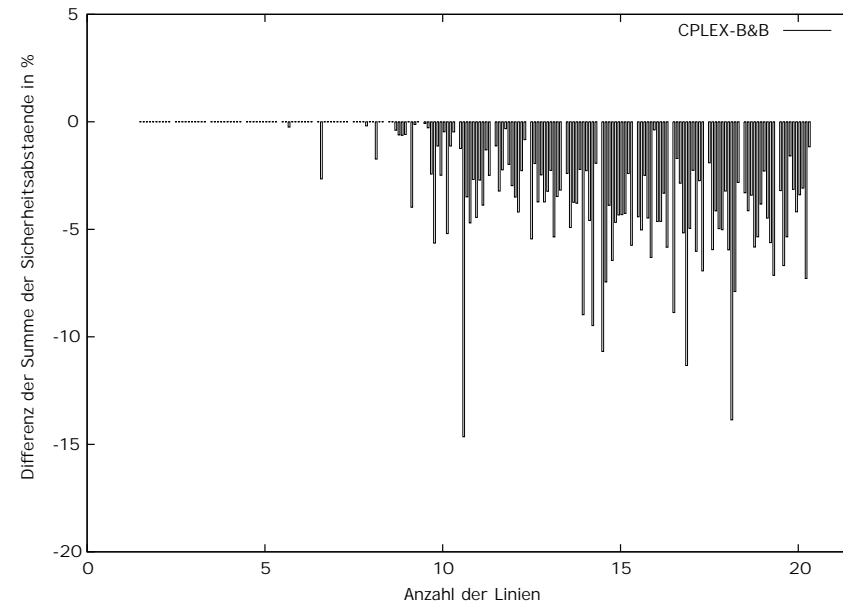
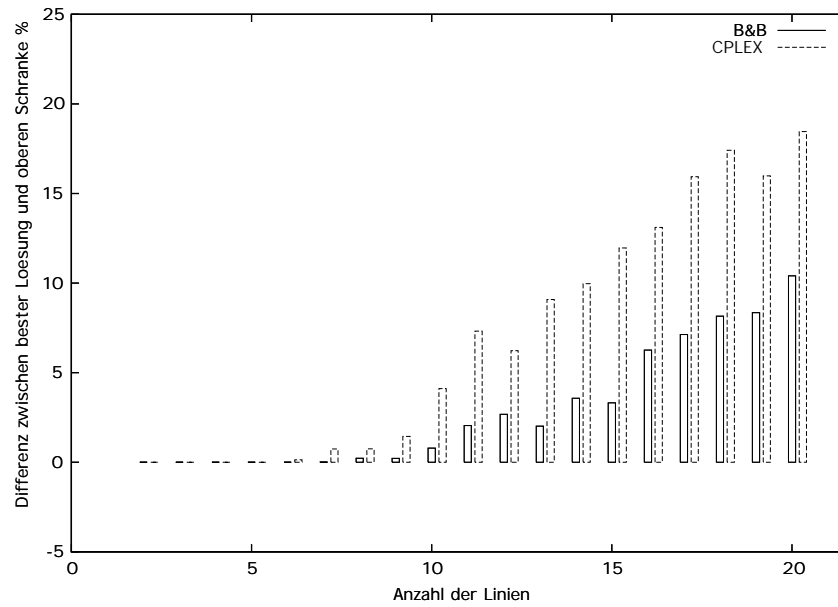
Zufall-Gitter-Streckennetzwerke



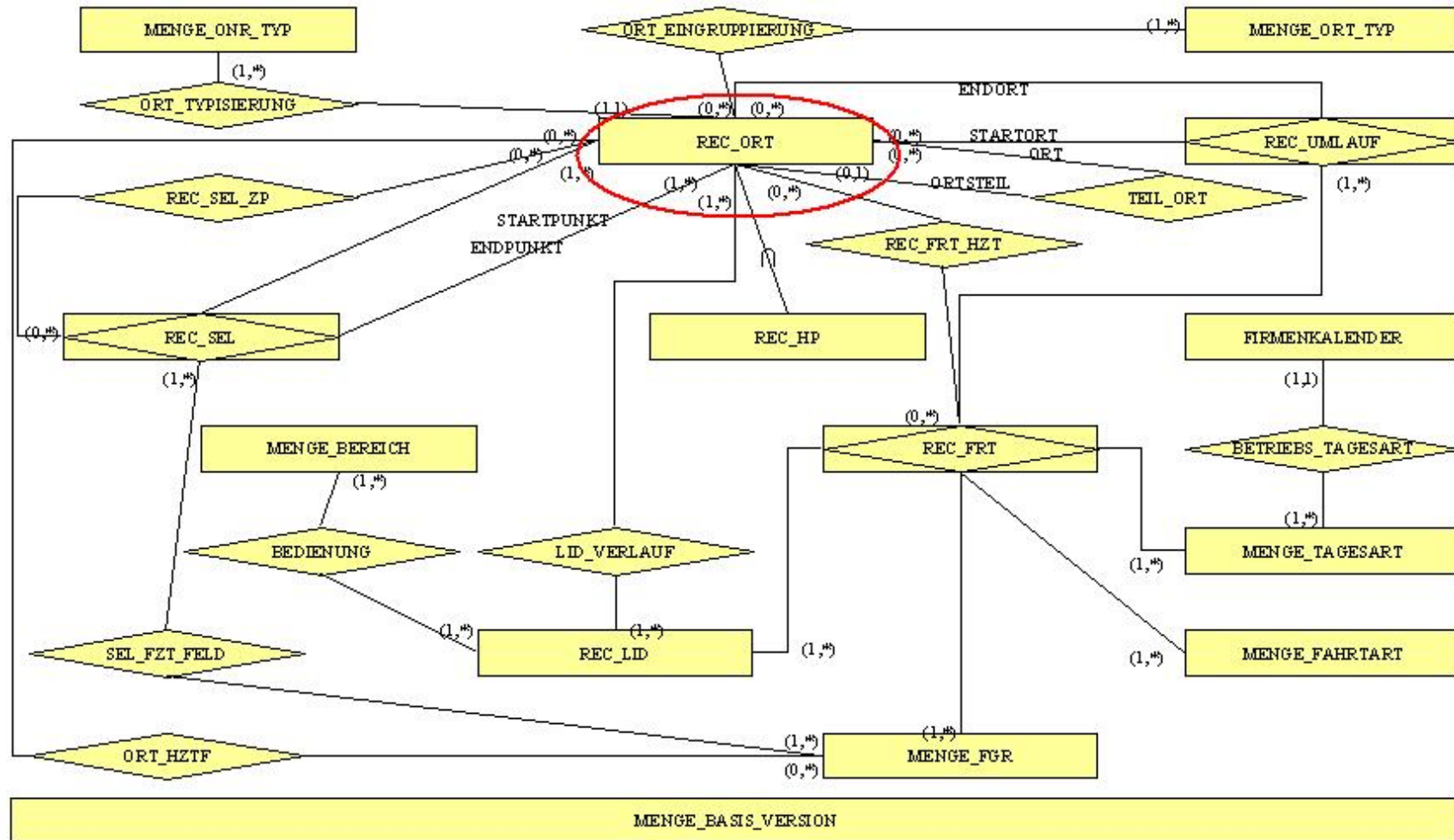
Beispiel SNW:



Ergebnisse für 20x20 Gitter-Streckennetzwerke



Straßenbahnsimulation: Objekte



Straßenbahnsimulation: Modellierung und Bedingungen

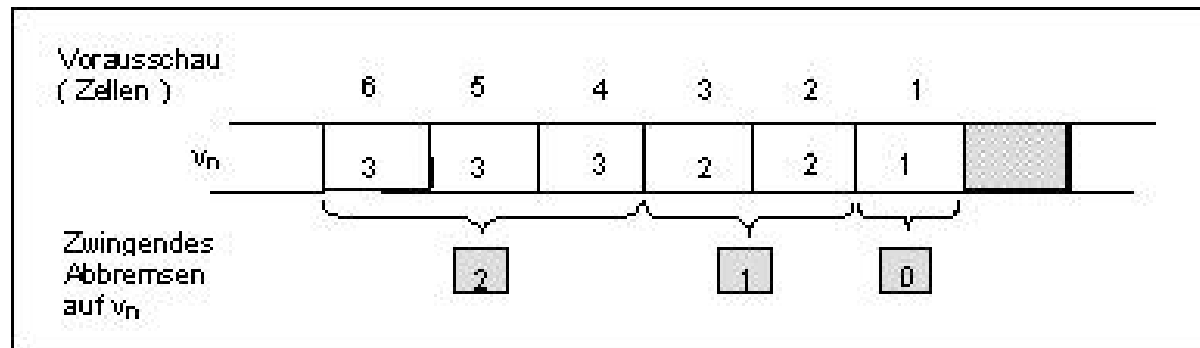
- Haltepunkte, Weichen und Gleise bilden Netzwerk $N(V, E)$ mit Bewertungsfunktion $c : E \rightarrow \mathbb{N}_0$, wobei Knoten $v \in V$ entweder Haltepunkte v_h oder Weichen v_w repräsentieren. Kanten $e \in E$ sind gerichtete Gleisstrecken mit Länge $c(e)$.
- Straßenbahnen fließen unter Nebenbedingungen als Pakete durch N .
- Zulässige Höchstgeschwindigkeit des Streckenabschnitts und der Bahn darf nicht überschritten werden.
- Überholen von Bahnen und Überfahren von Haltesignalen sind verboten.
- Eine Bahn darf eine Haltestelle nicht vorzeitig verlassen.
- Verspätungen werden durch schnelleres Fahren möglichst aufgeholt.

Zellularautomat

Ein Zellularautomat ist ein Quadrupel (G, Z, I, f) mit

- einem regulären Gitter G
- einer endlichen Menge von Elementzuständen Z
- einer endlichen Menge von Umgebungsindizes I
- einer lokalen Übergangsfunktion $f : Z^n \rightarrow Z$ für $n = |I|$.

Beispielabbildung:



Simulation mit Zellularautomaten

Von Nagel/Schreckenberg erstmals für Verkehrssimulation eingesetzt.

Erweiterungen für Straßenbahnsimulation

- Zellen, die über mehr als eine Zustandsvariable verfügen.
- Unterschiedlich weite Auslegungen der Umgebung von Zellen, so dass Interaktion auch über die direkt angrenzenden Zellen hinaus stattfindet.
- Irreguläre Gitter mit Zellen unterschiedlichen Typs, die eine unterschiedliche Anzahl von Nachbarzellen besitzen können.

Straßenbahnsimulation: Zellen

N wird in äquidistante, disjunkte Zellen unterteilt, die über einen booleschen Belegungsgrad *occupied* verfügen. Die Zellen gehören jeweils genau einem Typ an, wobei gilt:

- SWITCH ist die Menge aller Weichenzellen
- TRAMSTOP ist die Menge aller Bahnsteigzellen
- TRACK ist die Menge aller reinen Gleiszellen

Simulation mit Zellenlängen von 30m (entspricht einer Wagenlänge) und 10m.

Straßenbahnsimulation: Weichen

Zusammenführende Weichen verändern nach Rückschau auf die beiden ankommenden Gleise ihren Zustand und sperren das Gleis, auf dem die nächste Bahn weiter entfernt ist. Sei die Weichenzelle $Cell_{Switch}$, die Entfernung einer Bahn auf dem ersten Gleis $dist_{Track1}$, die Entfernung einer Bahn auf dem zweiten Gleis $dist_{Track2}$, $Cell_{Switch} \rightarrow Previous1$ und $Cell_{Switch} \rightarrow Previous2$ die Vorgängerkzellen auf den Gleissträngen:

Falls $dist_{Track1} \leq dist_{Track2}$:

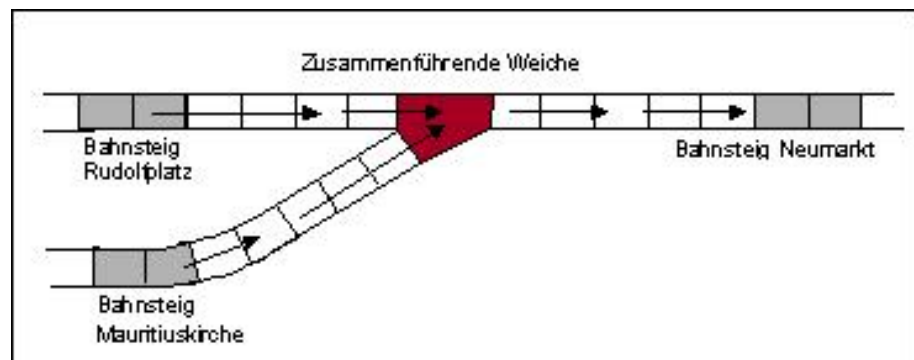
$occupied (Cell_{Switch} \rightarrow Previous1) = false$

$occupied (Cell_{Switch} \rightarrow Previous2) = true$

Sonst:

$occupied (Cell_{Switch} \rightarrow Previous1) = true$

$occupied (Cell_{Switch} \rightarrow Previous2) = false$



Straßenbahnsimulation: Objekte

- Linienverläufe definieren gerichtete Wege durch das Streckennetzwerk
- Fahrten definieren den Startzeitpunkt für eine Bahn für deren Fluss durch das Netzwerk gemäß eines Linienverlaufs
- restliche Abfahrzeiten an Haltepunkten ergeben sich aus tageszeitabhängigen Fahrzeiten über Gleisabschnitte
- Signale zur Kontrolle von Sicherungsblöcken
- Verkehrsampeln zur Koordination von mobilem Individualverkehr (MIV) und öffentlichem Personennahverkehr (ÖPNV)

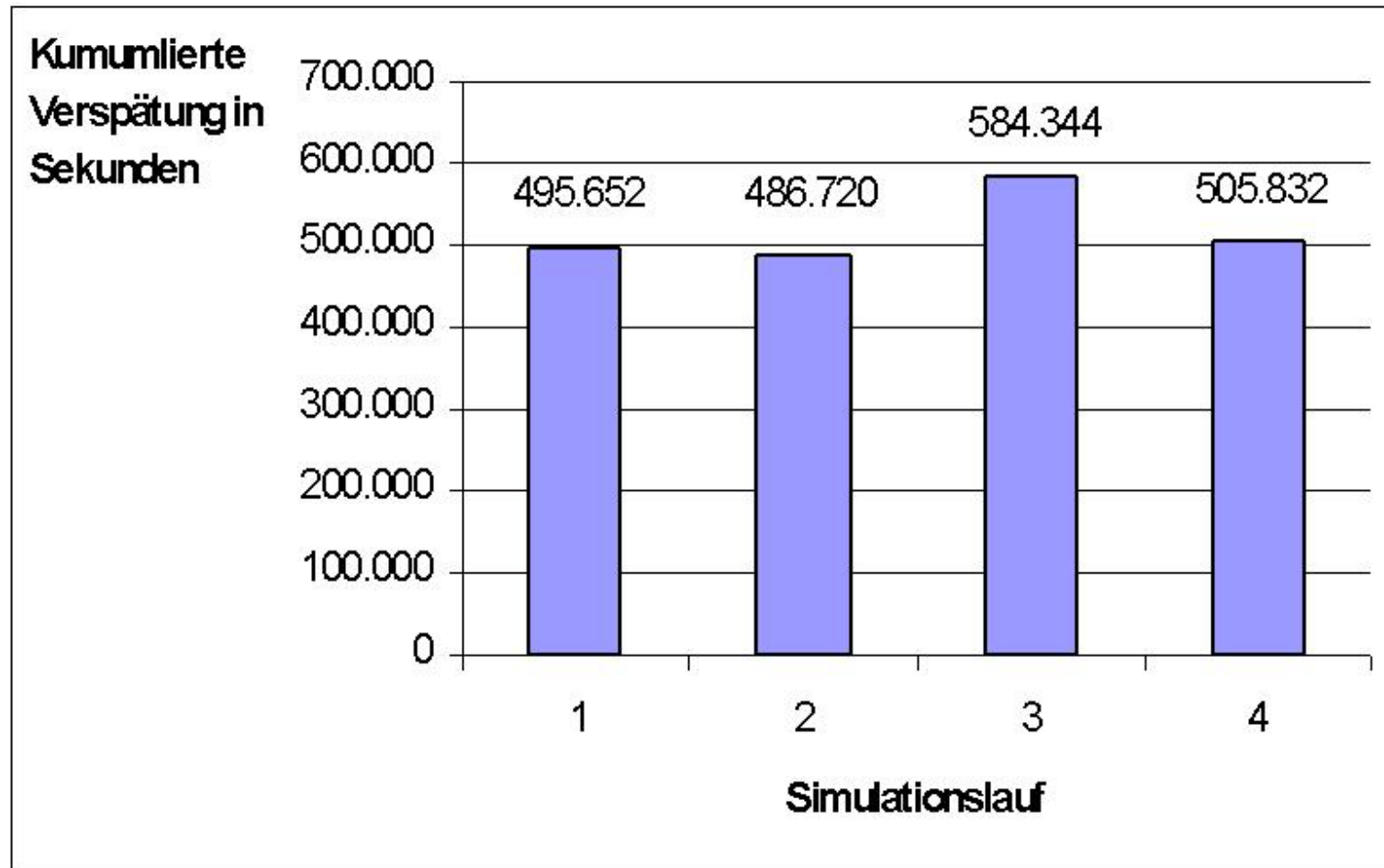
Straßenbahnsimulation: Störungen

- kurzfristig (approximiert durch Trödel- und Beladeparameter)
 - Witterung
 - Längere Verweildauer an der Haltestelle durch verzögerte Beladezeiten
 - Kleinere Bahndefekte
 - Warten auf das Umschalten von Signalen oder Verkehrsampeln
 - Behinderung durch Individual- und Wirtschaftsverkehr
 - Wartungs- und Reparaturarbeiten
- gravierend (explizit angegeben in Tabelle REC_SIM_PARAM, Zusammenfassung zu Szenarien möglich), u.a.
 - Verkehrsunfälle, in die Bahnen verwickelt wurden (49%)
 - Behinderungen durch Falschparker (31%)
 - Abgeirrte Kraftfahrzeuge im Gleis (12%)
 - Fahrleitungsstörungen durch Fremdeinwirkung (7,5%)

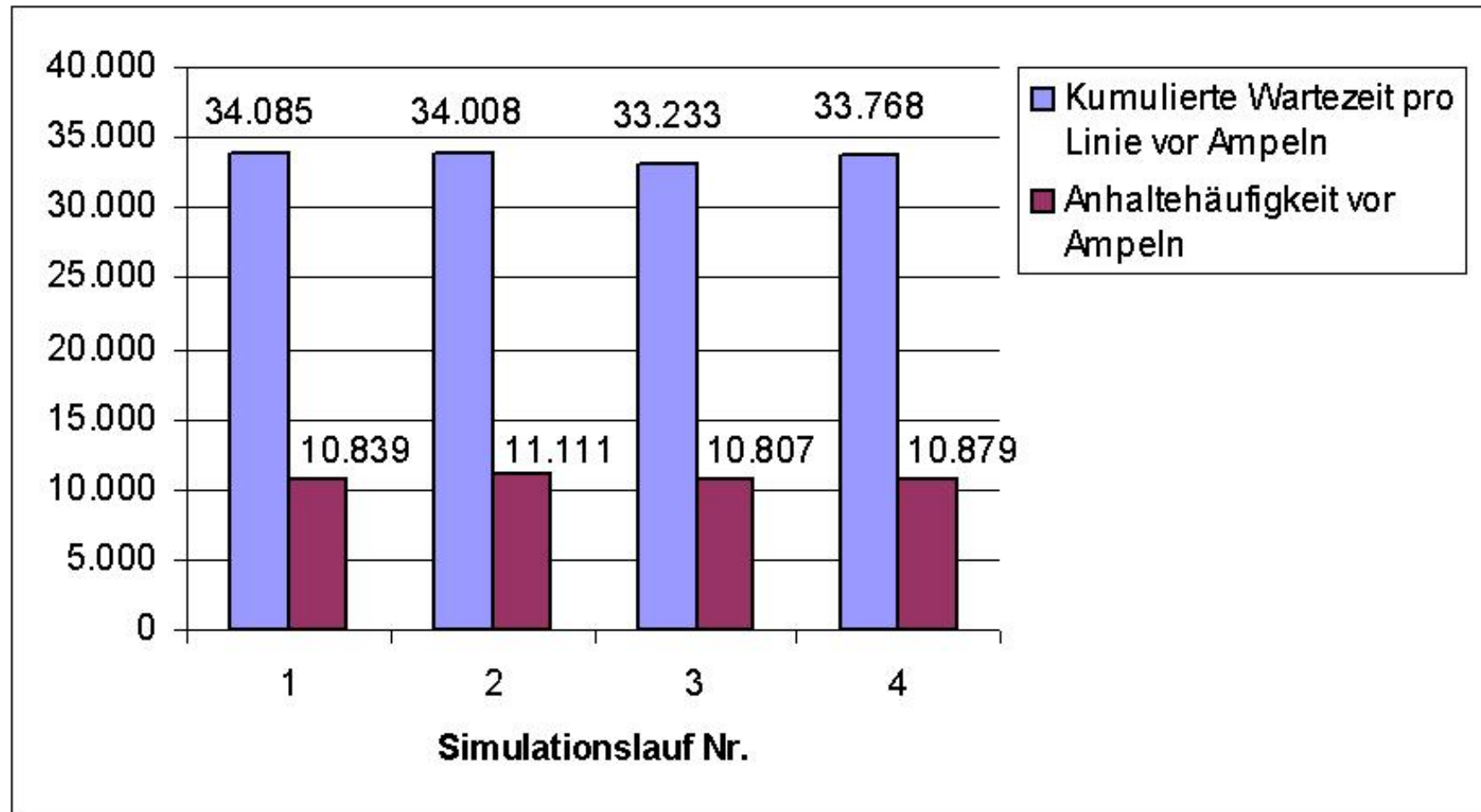
Eigenschaften von Straßenbahnfahrzeugen

- Länge (ca. 30m)
- Kapazität
- Fahreigenschaften (unterliegen wetterbedingten Veränderungen)
 - Höchstgeschwindigkeit (ca. 80 km/h), entsprechend 7 Zellen pro Zeitschritt (3 sec)
 - Beschleunigung (ca. $1,4 \text{ m/s}^2$)
 - Abbremsvermögen (ca. $1,4 \text{ m/s}^2$)
 - Notbremsvermögen (ca. 3 m/s^2)

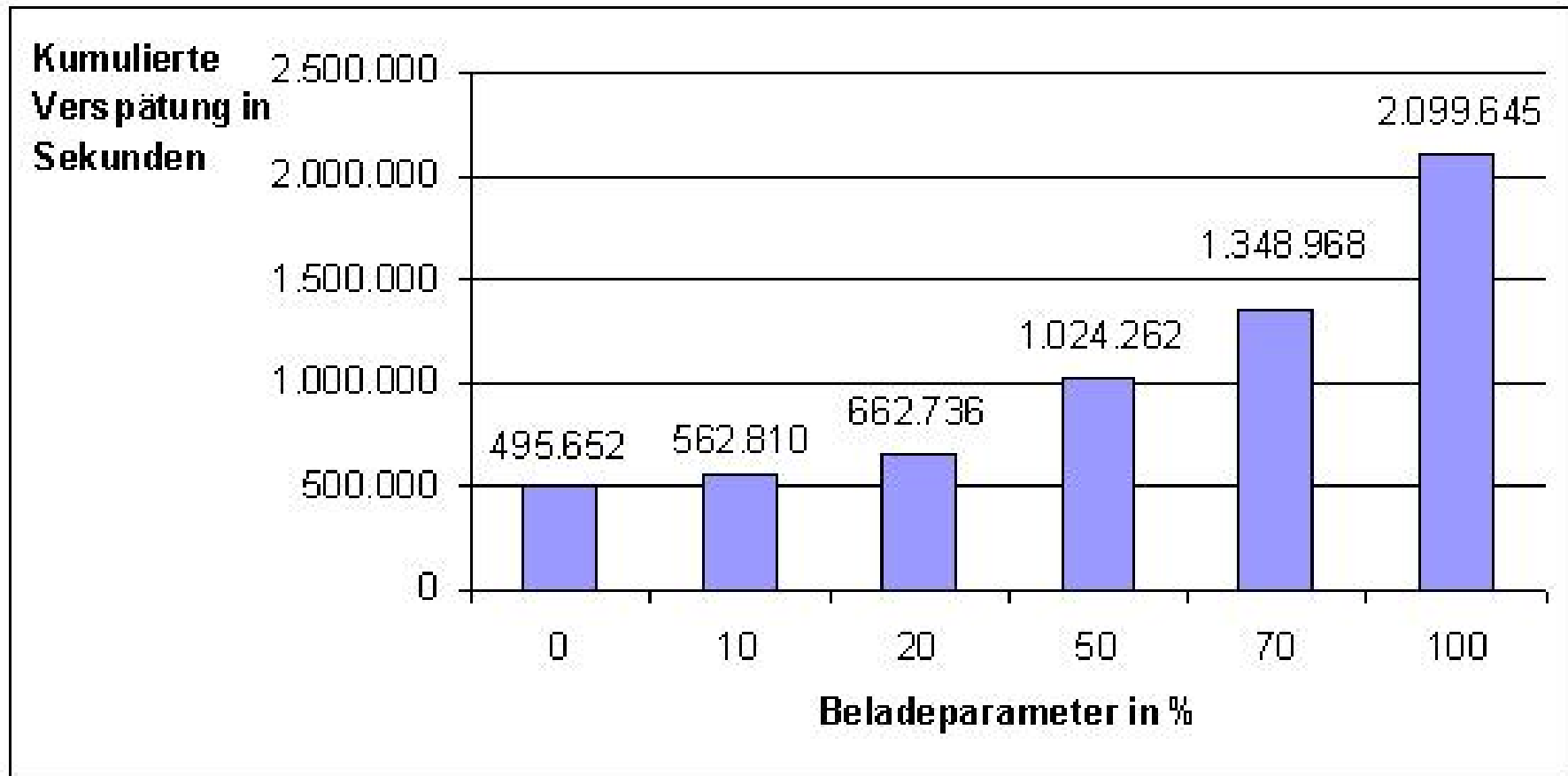
Straßenbahnsimulation: Ampelinitialisierung



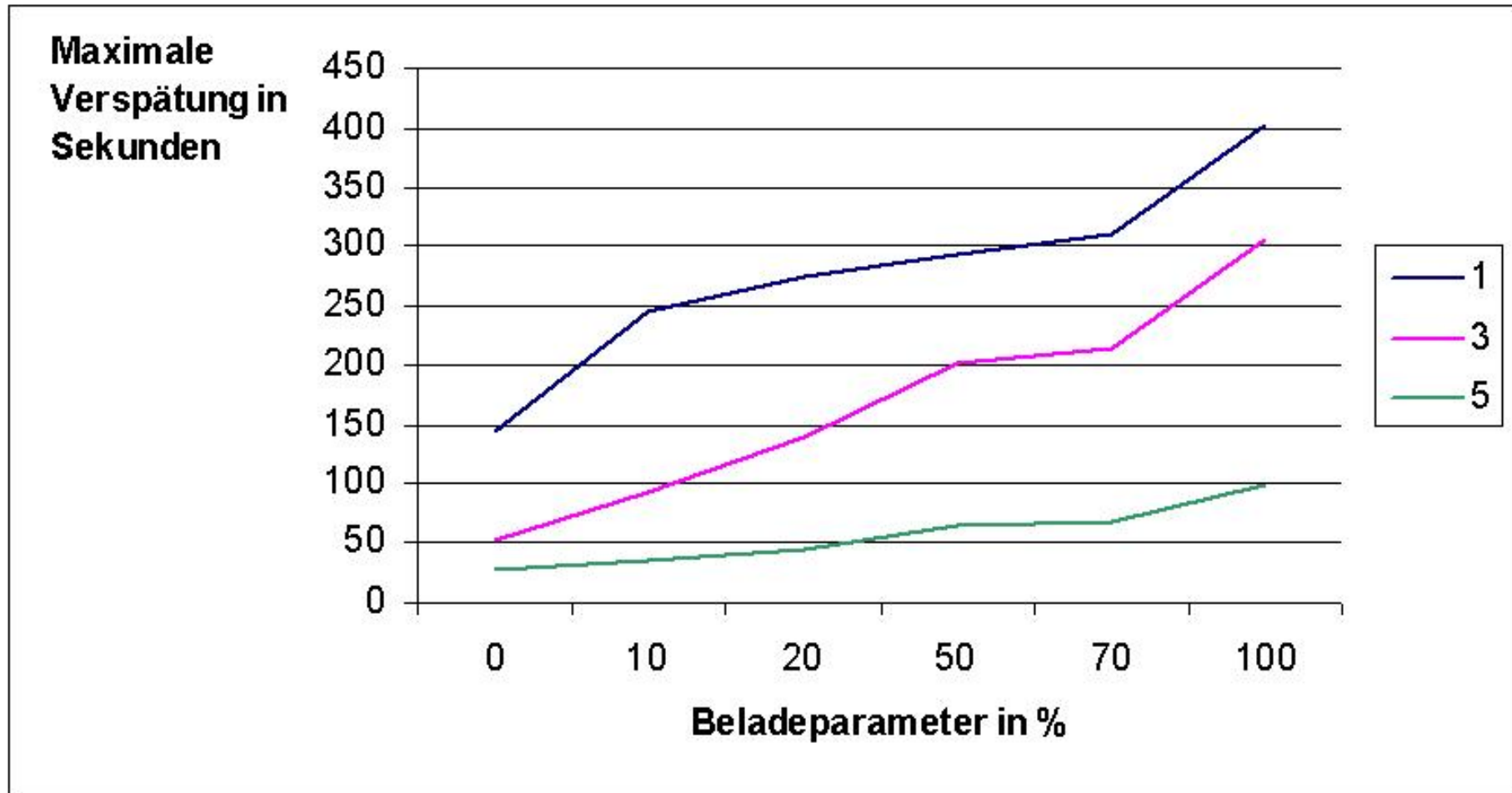
Straßenbahnsimulation: Einfluss der Ampeln



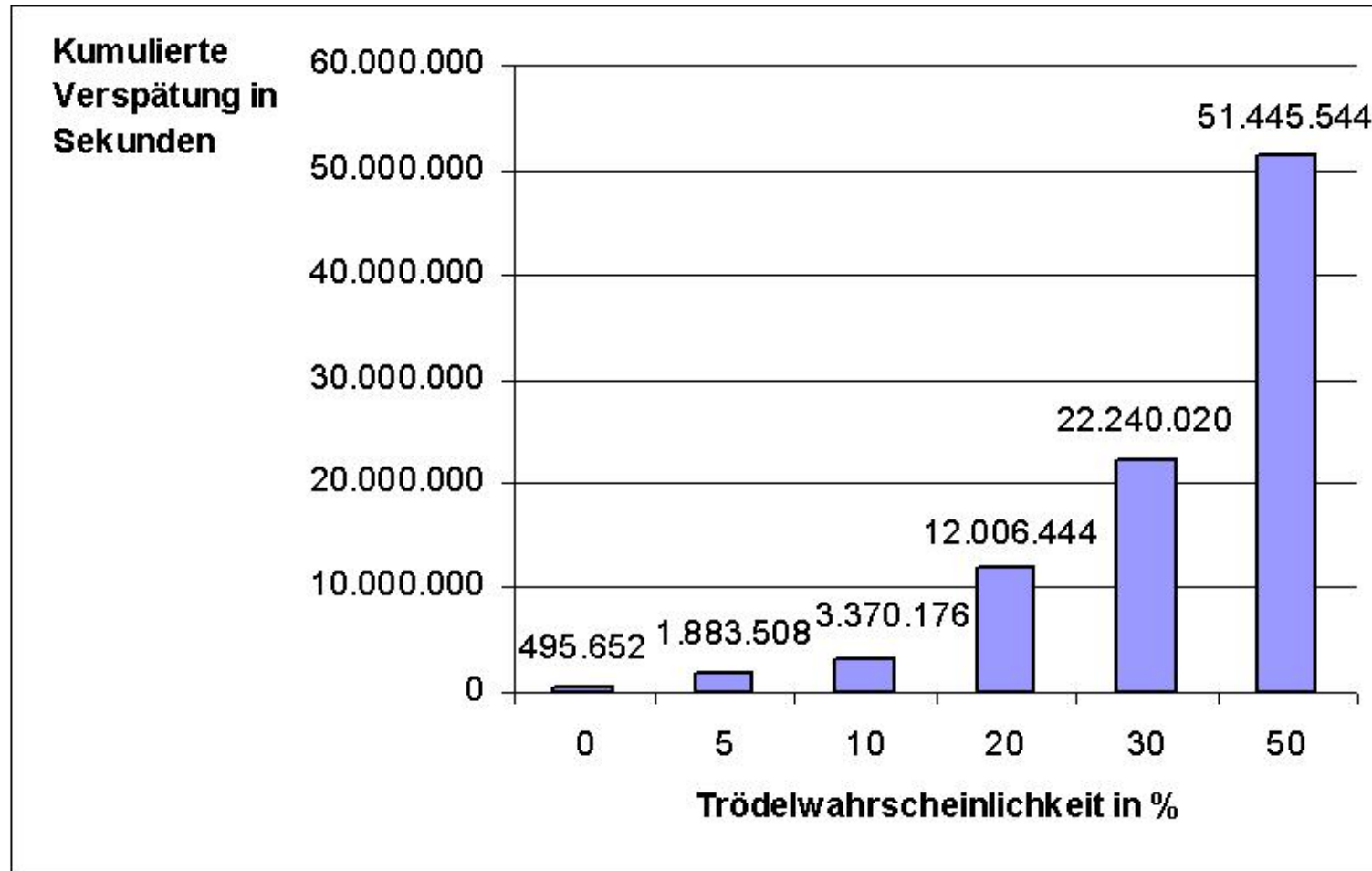
Straßenbahnsimulation: Einfluss des Fahrgastaufkommens



Einfluss des Fahrgastaufkommens auf unterschiedliche Linien



Straßenbahnsimulation: Einfluss kleinerer Störungen



Zusammenfassung und Ausblick

- Optimierung

- Verfahren B&B, LP-Ansatz liefern nach kurzer Zeit gute Fahrpläne
- Zerlegung des Streckennetzwerkes beschleunigt Berechnung eines guten Fahrplans
- Darstellung als ganzzahliges lineares Programm
- Zerlegungsansatz erweitern und neue obere Schranken untersuchen

- Simulation

- Simulation mittels Zellularautomaten reproduziert viele reale Phänomene bei Variation von nur drei Parametern (Trödel-, Beladeparameter und Ampelinitialisierung)
- Variation weiterer Parameter (z.B. Wahrscheinlichkeitsverteilung für Beladung und Ampelschaltung) nähert Realität weiter an
- Mikroanalyse der Ergebnisse mit erweiterter Protokollierung von Simulationsdaten möglich