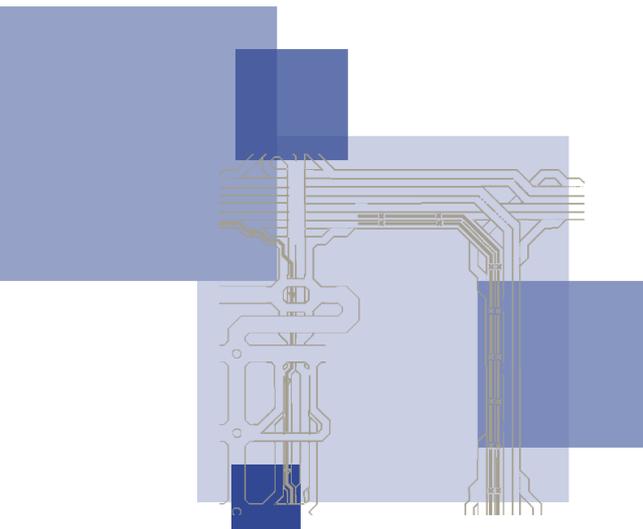


Optimale und stabile Fahrpläne in Bahnhofsregionen

T. Herrmann

IVT- Seminar *Optimale
Verkehrssysteme*

22. Juni 2006



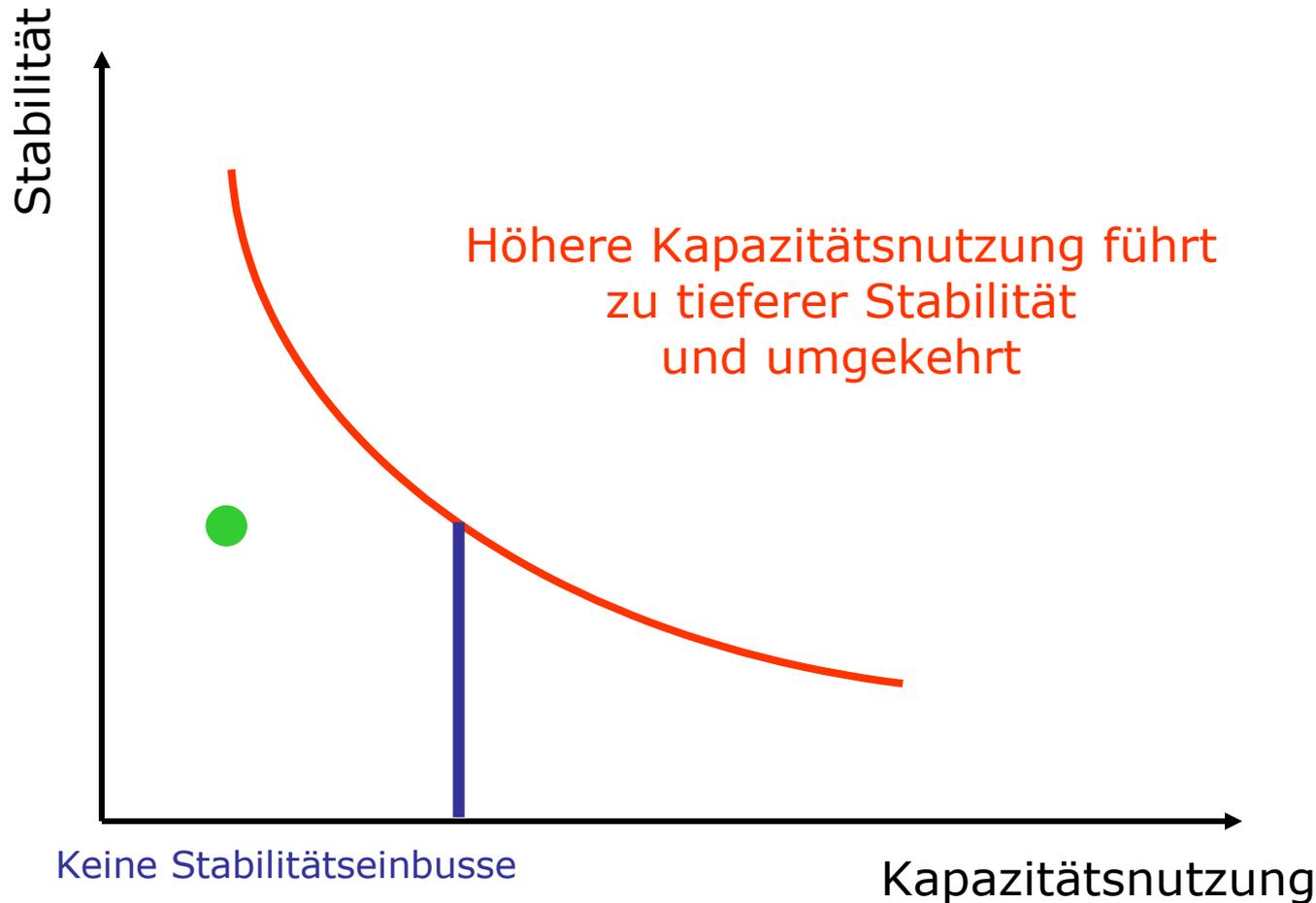
Einleitung

- Wunsch 1: Frequenzerhöhungen bei der Bahn führen zu Problemen in den Knoten, z.B. Bern
- Wunsch 2: Auf bauliche Lösungen („Betonlösungen“) soll möglichst verzichtet werden:
 - Aus Kostengründen
 - In Bahnhofsregionen bauliche Massnahmen kaum möglich
- Wunsch 3: Qualität darf unter den Mehrverbindungen nicht leiden
- **Aufgabe: Auslastung des bisherigen Systems ohne Qualitätsverlust erhöhen**

Stabilität und Kapazität

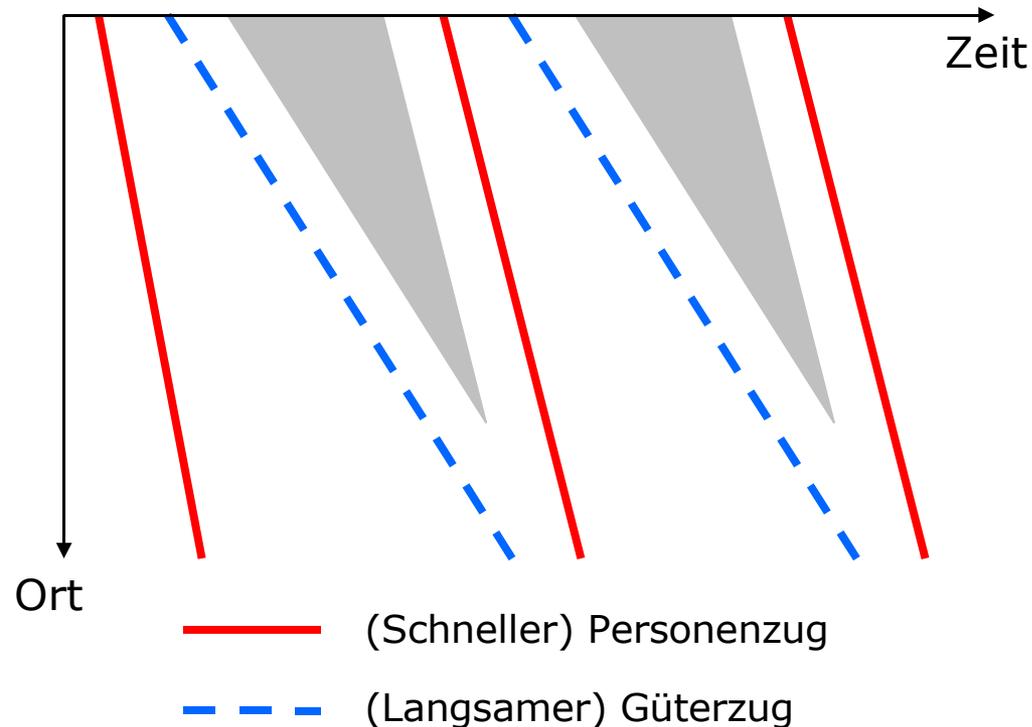
- Standardmethode zur Erhöhung der Stabilität:
Einführen von Reservezeiten (siehe z.B. Kaminsky 2001)
- Grosse Pufferzeiten verhindern hohe Auslastung der Kapazität
- Umgekehrt ist ein Abbau von Verspätungen in einem pufferfreien Fahrplan nicht möglich

2 gegenläufige Ziele: Stabile Fahrpläne und optimale Ressourcennutzung



Kapazität einer Bahninfrastruktur

- Kapazität wird als mögliche Anzahl Trassen in einem bestimmten Zeitintervall angegeben
- Diese Kennzahl ist aber von den gewählten Zügen abhängig



Sicht der Infrastrukturbetreiber

- Eine Kapazitätsbestimmung ohne einen dazugehörigen Fahrplan ist unsinnig
- Ein Fahrplan wird zur Verifikation einer Kapazitätsangabe benötigt!

Problemfall Bahnhofsregionen

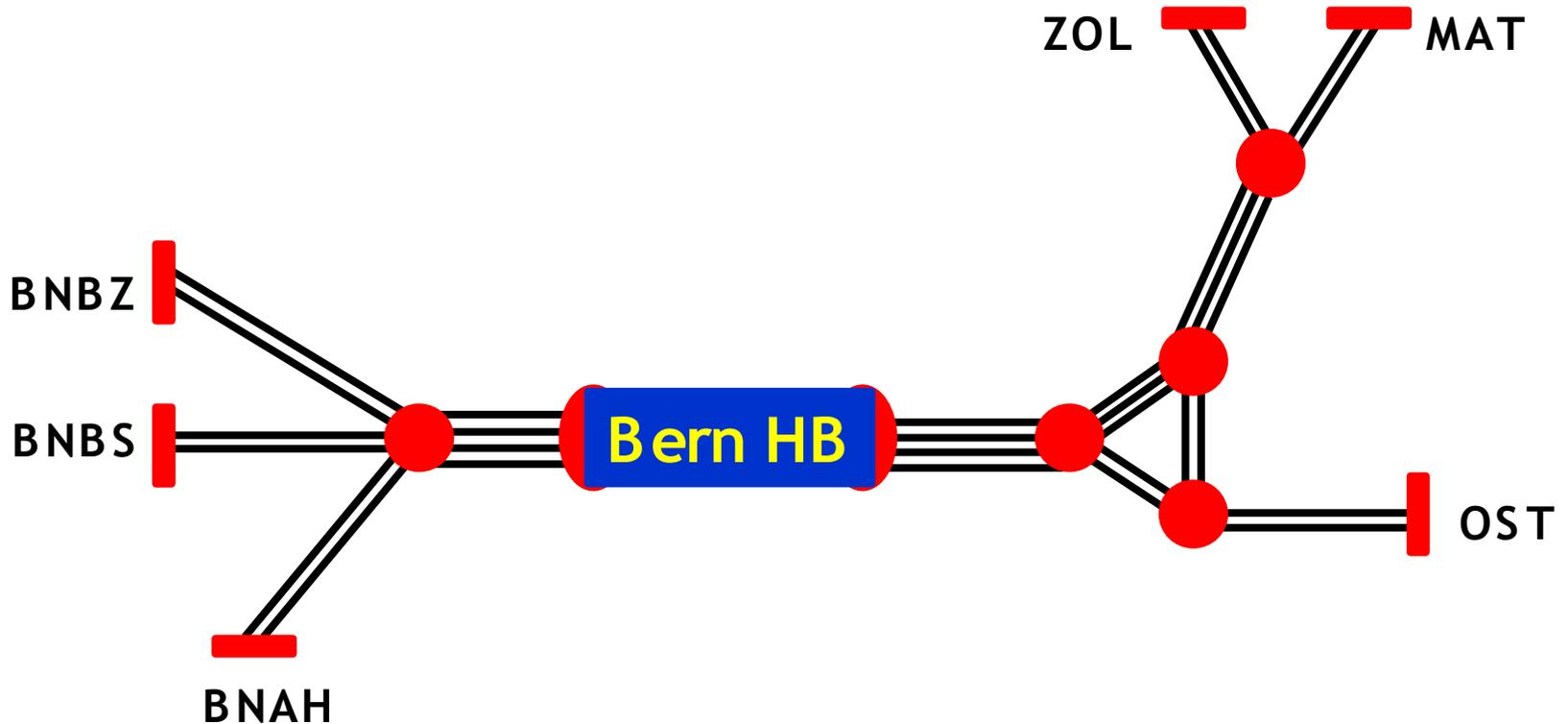
- Die Anzahl der zur Verfügung stehenden Trassen wird in einer Bahnhofsregion zusätzlich erschwert durch:
 - Unterschiedliche Beschleunigungscharakteristiken der Züge
 - Geschwindigkeiten der Züge abhängig vom Weg
 - Grosse Auswahl an möglichen Wegen
- Zusätzlich bilden Zuganschlüsse weitere Restriktionen bei der Fahrplangestaltung

Kapazitätsbestimmung von Gleisanlagen in Bahnhofsregionen (Burkolter 2005)

- Menge von Zügen ist gegeben. Zusätzlich sind bekannt:
 - Ungefähre Route in der Bahnhofsregion, insbesondere Halteorte innerhalb der zu betrachtenden Region
 - Zugstypen
 - Allfällige Anschlussbedingungen zwischen Zügen
- Damit ist die Anzahl Zugfahrten bestimmt, nicht aber die Zeit, die dafür benötigt wird
- **Kapazität einer Gleisanlage = Anzahl Trassen pro Zeit**
- Aufgabe: Finde den dichtesten Fahrplan, um die Kapazität einer Gleisanlage zu bestimmen

Szenariobasiertes Optimierungsproblem

- Unterteile die zu betrachtende Topologie in Weichenregionen und in Regionen mit parallelen Strecken

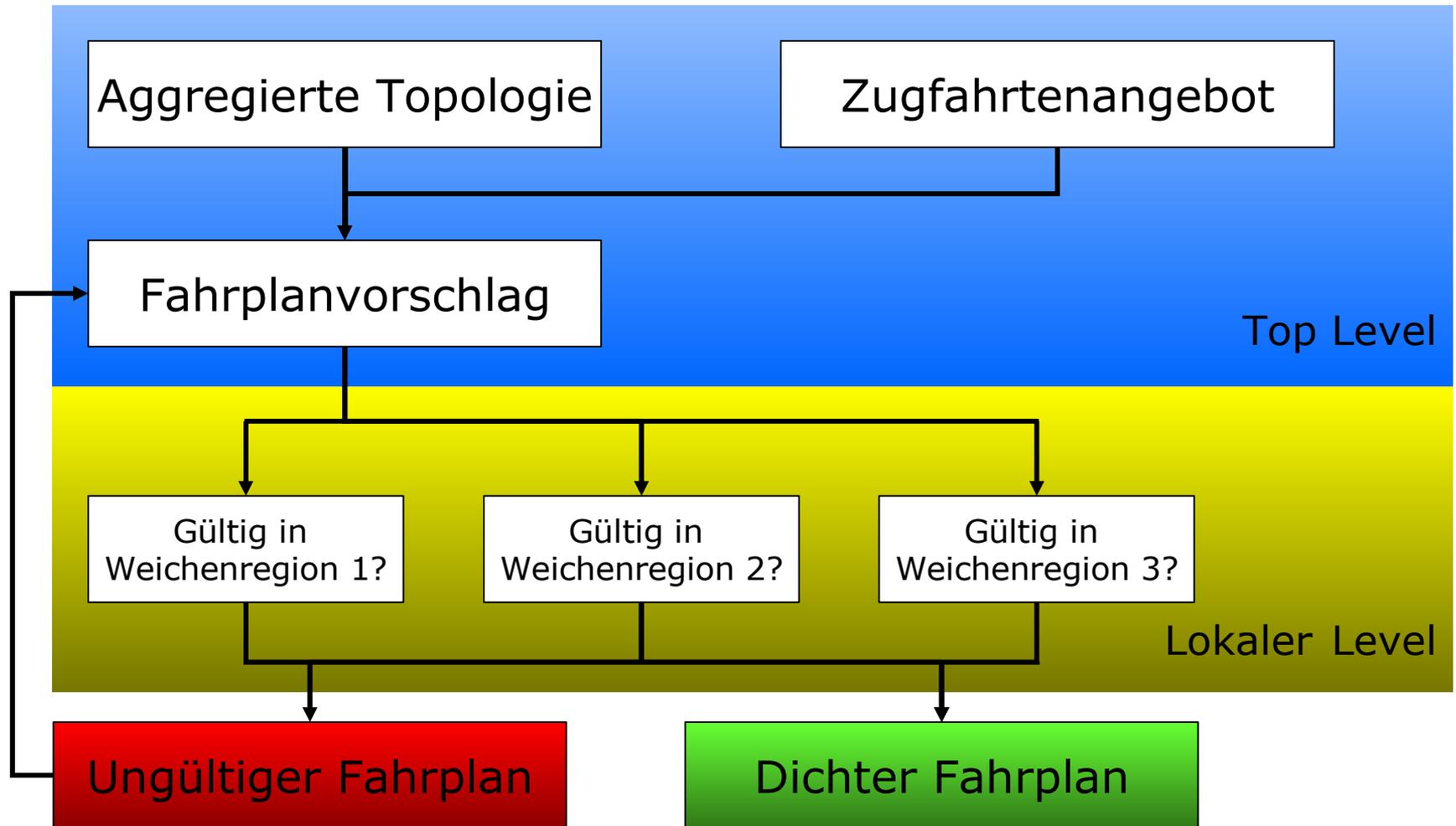


Szenariobasiertes Optimierungsproblem

- Unterteile die zu betrachtende Topologie in Weichenregionen und in Regionen mit parallelen Strecken
- Für jede parallele Strecke
 - Gruppiere die Züge in n Mengen, wobei $n = \text{Anzahl paralleler Gleise}$
 - Ordne die Züge innerhalb jeder Menge
- so dass die Fahrplanperiode minimiert wird

- Problem ist *NP*-hart (Reduktion auf Job Shop Scheduling)
- Überprüfe, ob der resultierende Fahrplan auch in den Weichenregionen gültig ist

Zwei-Phasen-Modell (Burkolter 2005, Herrmann 2006)

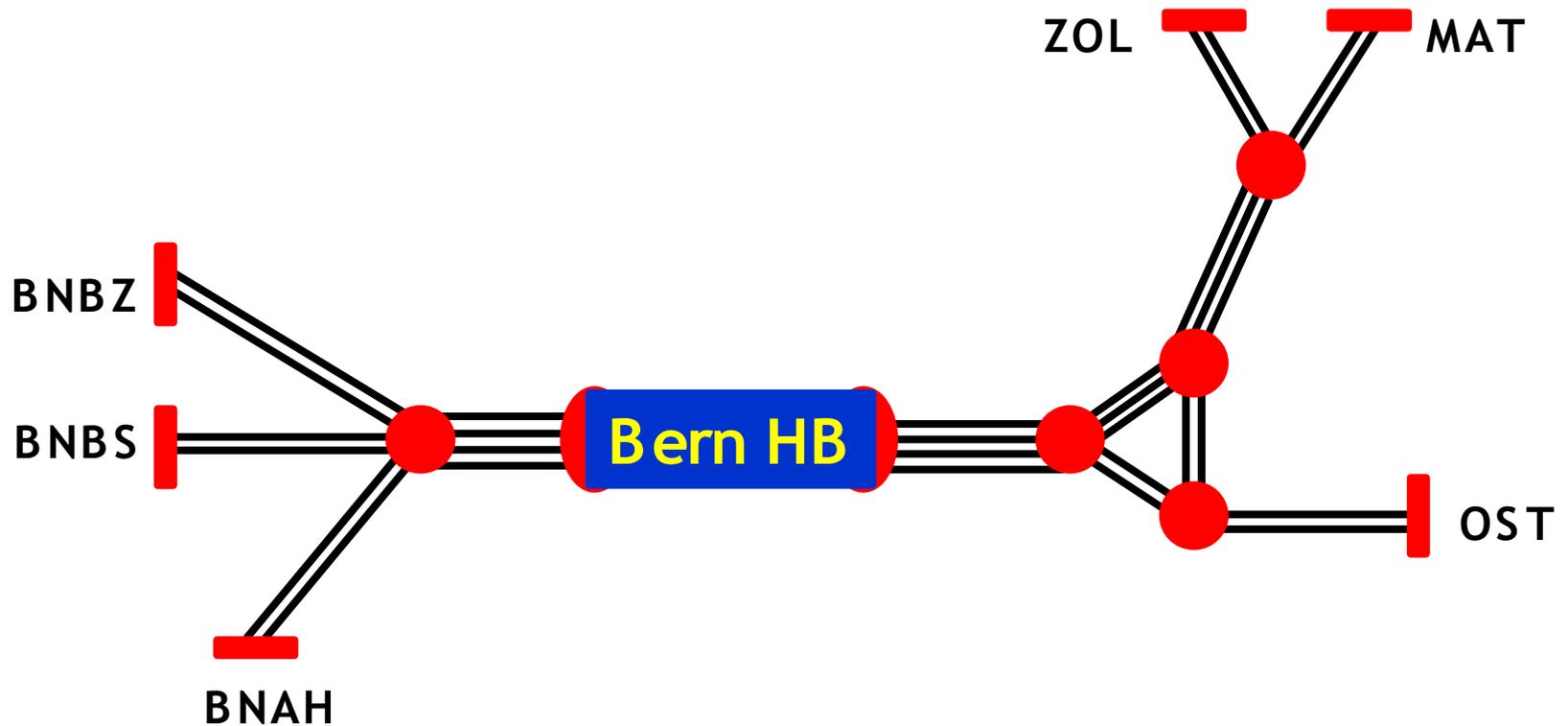


Der verdichtete Fahrplan sagt noch nichts über die tatsächliche Auslastung aus

- Ein praktikabler Takt-Fahrplan hat eine Periodizität, die ein ganzzahliger Teil einer Stunde ist, z.B. 10min, 15min, 30min, ...
- Die Kapazitätsauslastung wird deshalb definiert als:

$$\frac{\text{Zeit, die minimal gebraucht wird}}{\text{gewünschte Taktzeit}}$$

Beispiel Bahnhofsregion Bern



Vergleich zweier Fahrplanvarianten

Fahrplan 2003

- 12 S-Bahnlinien
- 5 RegioExpress
- 4 Intercity

- Takt: 30 Minuten

- 150 Sekunden Zugfolgezeit

Fiktiver Fahrplan

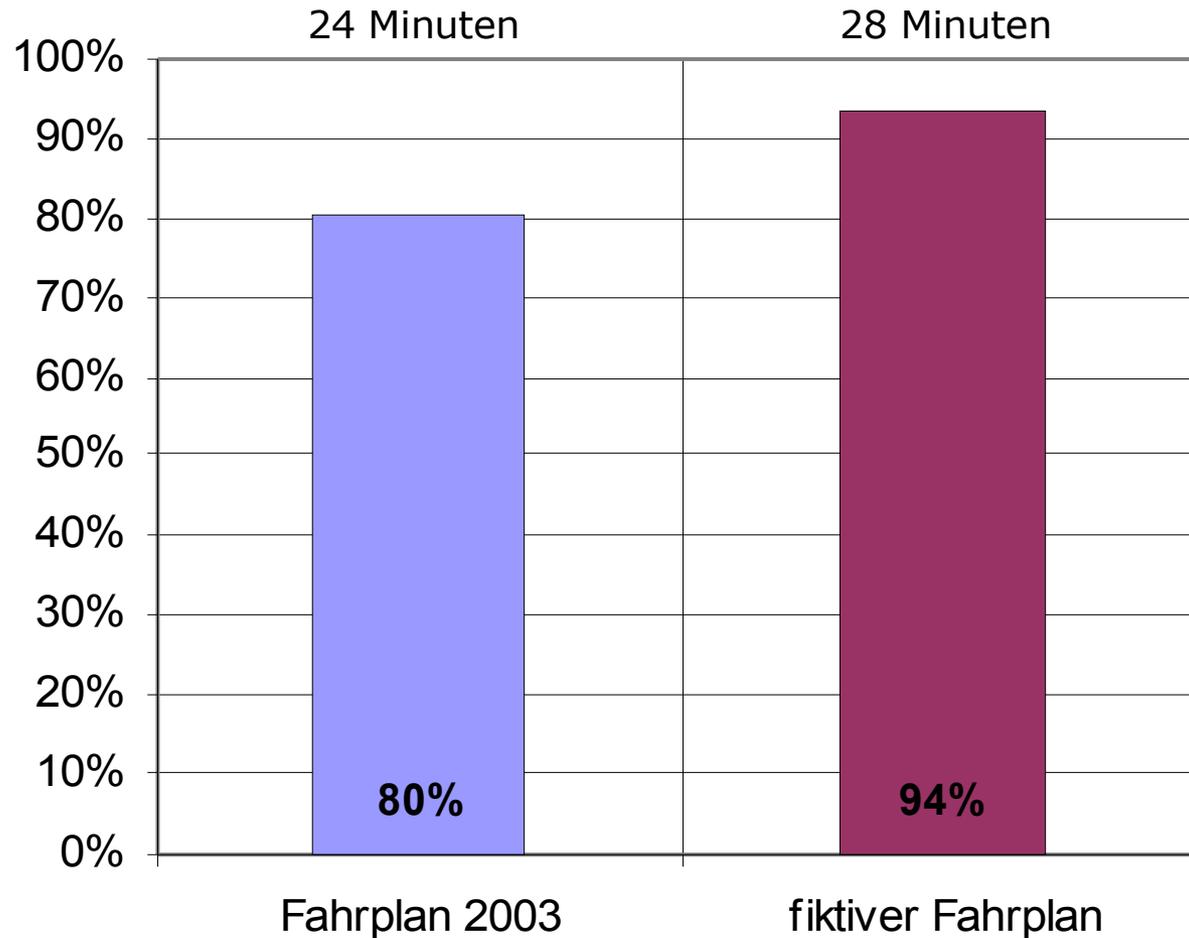
- 12 S-Bahnlinien (modifiziert)
- 8 RegioExpress
- 7 Intercity

- Takt: 30 Minuten

- 90 Sekunden Zugfolgezeit

- Zunahme der Anzahl Zugfahrten um 29%

Im fiktiven Fahrplan wächst die Kapazitätsauslastung um 14%



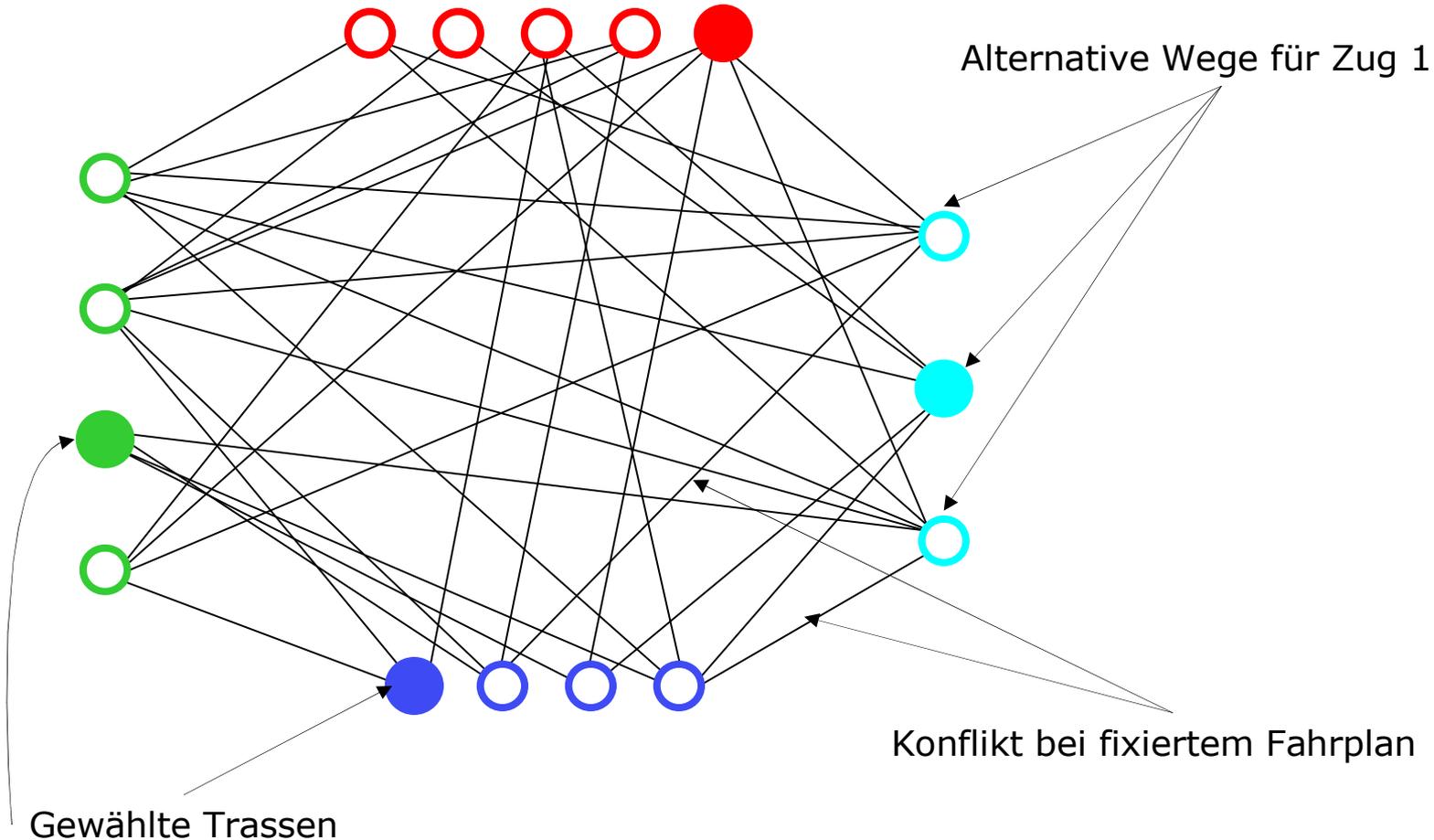
Stabilität

- Ein praktikabler zukünftiger Fahrplan lastet nicht nur die vorhandenen Gleisanlagen stärker aus, sondern muss auch gewisse Stabilitätsanforderungen erfüllen
- Bei einem fixierten Zeitgerüst, bietet nur die Wegwahl einen gewissen Gestaltungsfreiraum
- Gemeinsam genutzte Ressourcen
 - Erhöhen die Auslastung
 - Erhöhen Konfliktpotential
- Stabilität misst den **Grad der gegenseitigen Beeinflussung auf gemeinsam genutzten Ressourcen**

Stabilitätsmasse

- Finde konfliktfreie Trassen, so dass Stabilität maximiert wird:
 - Anzahl erwarteter Konflikte
 - Wie oft muss die Disposition eingreifen?
 - Zeitfenster am Portal/Perron
 - Wie weit sind Trassen zeitlich voneinander entfernt?
- Grundlage: Verspätungsverteilungen abfahrender und ankommender Züge

Der Konflikt-Graph veranschaulicht die Lösungssuche



Generelle Problemformulierung

Das Stabilitätsproblem kann wie folgt formuliert werden

$$\begin{aligned} \min \quad & Z_i \\ \text{s.t.} \quad & \sum_{j=1}^{m_i} x_{ij} = 1 \quad \forall i = 1, \dots, n \\ & x_{ij} + x_{kl} \leq 1 \quad \forall r_{ij} \neq r_{kl} \\ & x_{ij} \in \{0, 1\} \end{aligned}$$

Eine Zielfunktion ein Knoten pro Zug

min Z_i

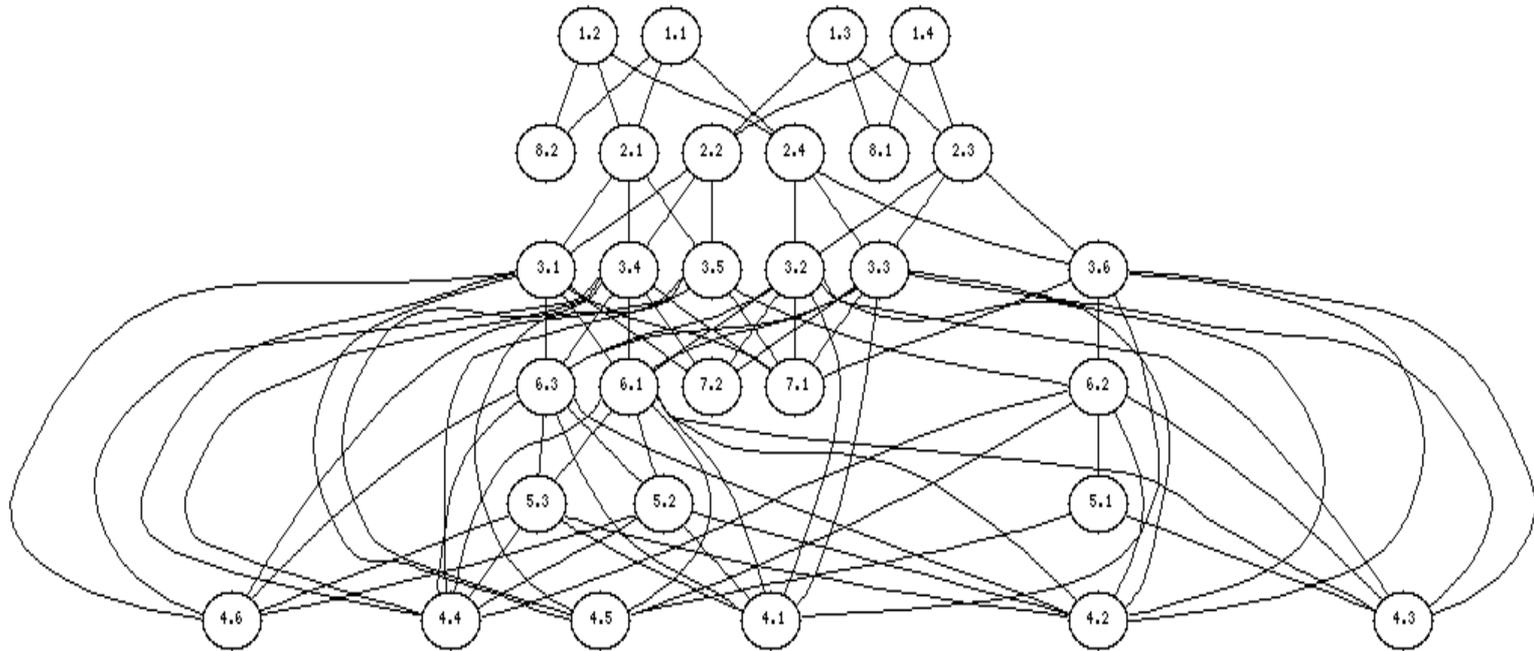
s.t. $\sum_{j=1}^{m_i} x_{ij} = 1 \quad \forall i = 1, \dots, n$

$x_{ij} + x_{kl} \leq 1 \quad \forall r_{ij} \neq r_{kl}$

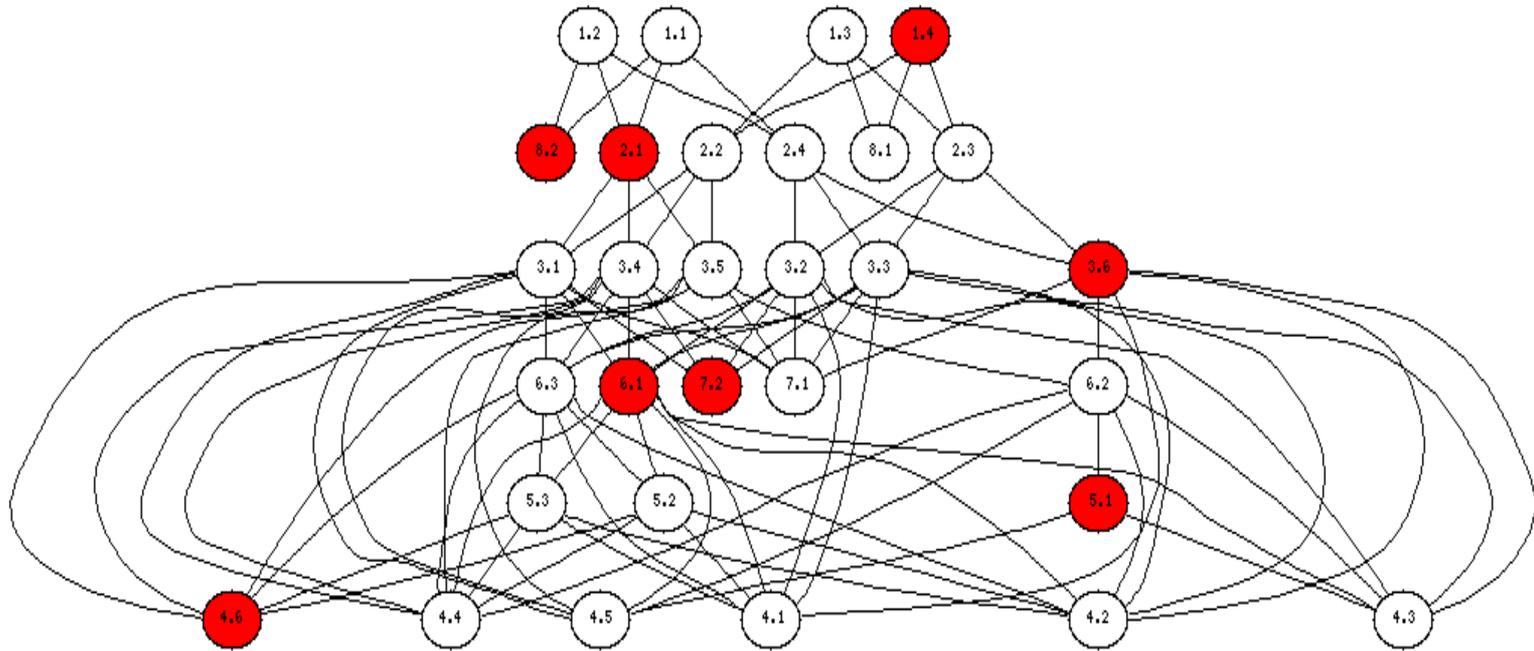
$x_{ij} \in \{0, 1\}$

Nur unverbundene Knoten

Kleines Beispiel



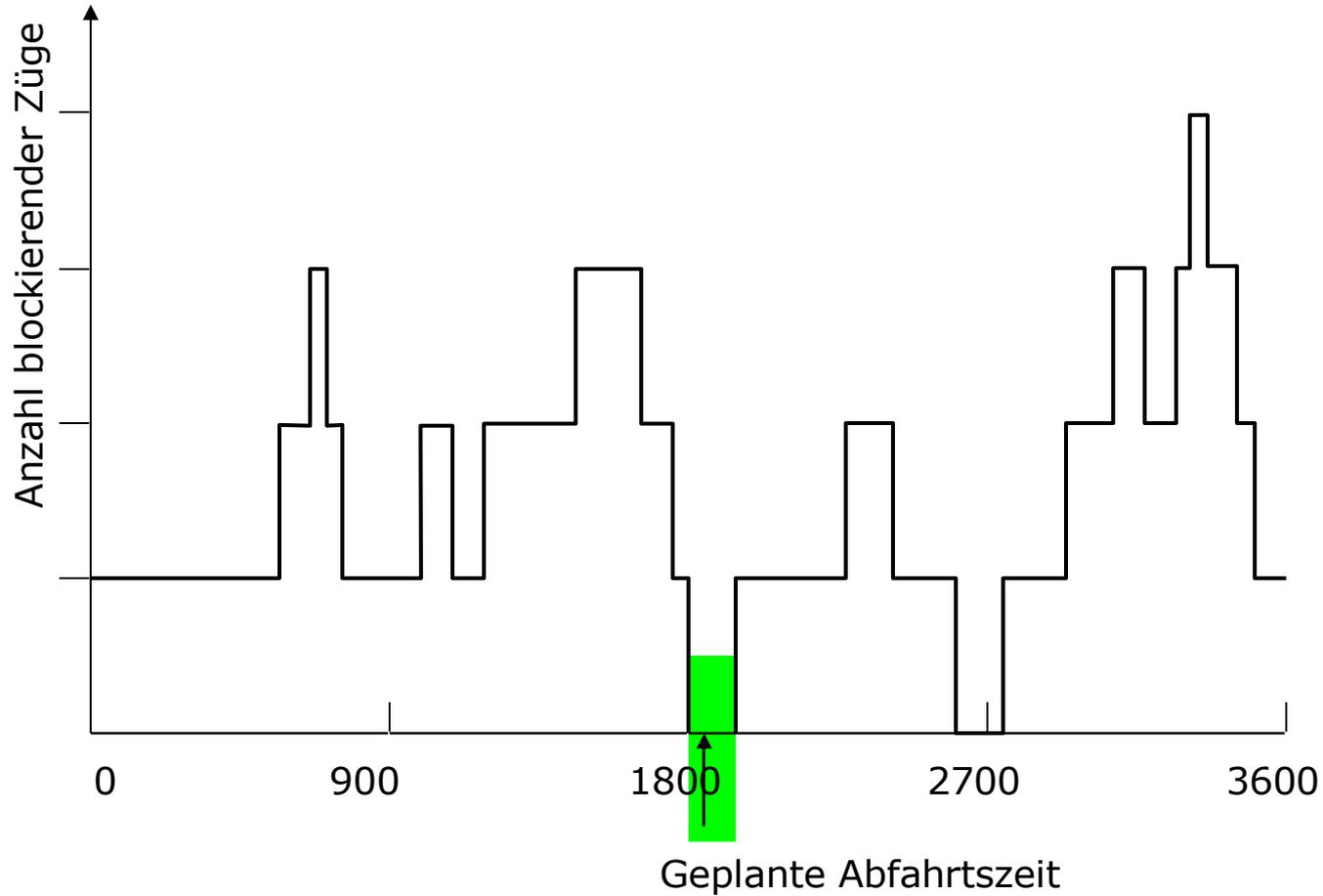
Kleines Beispiel



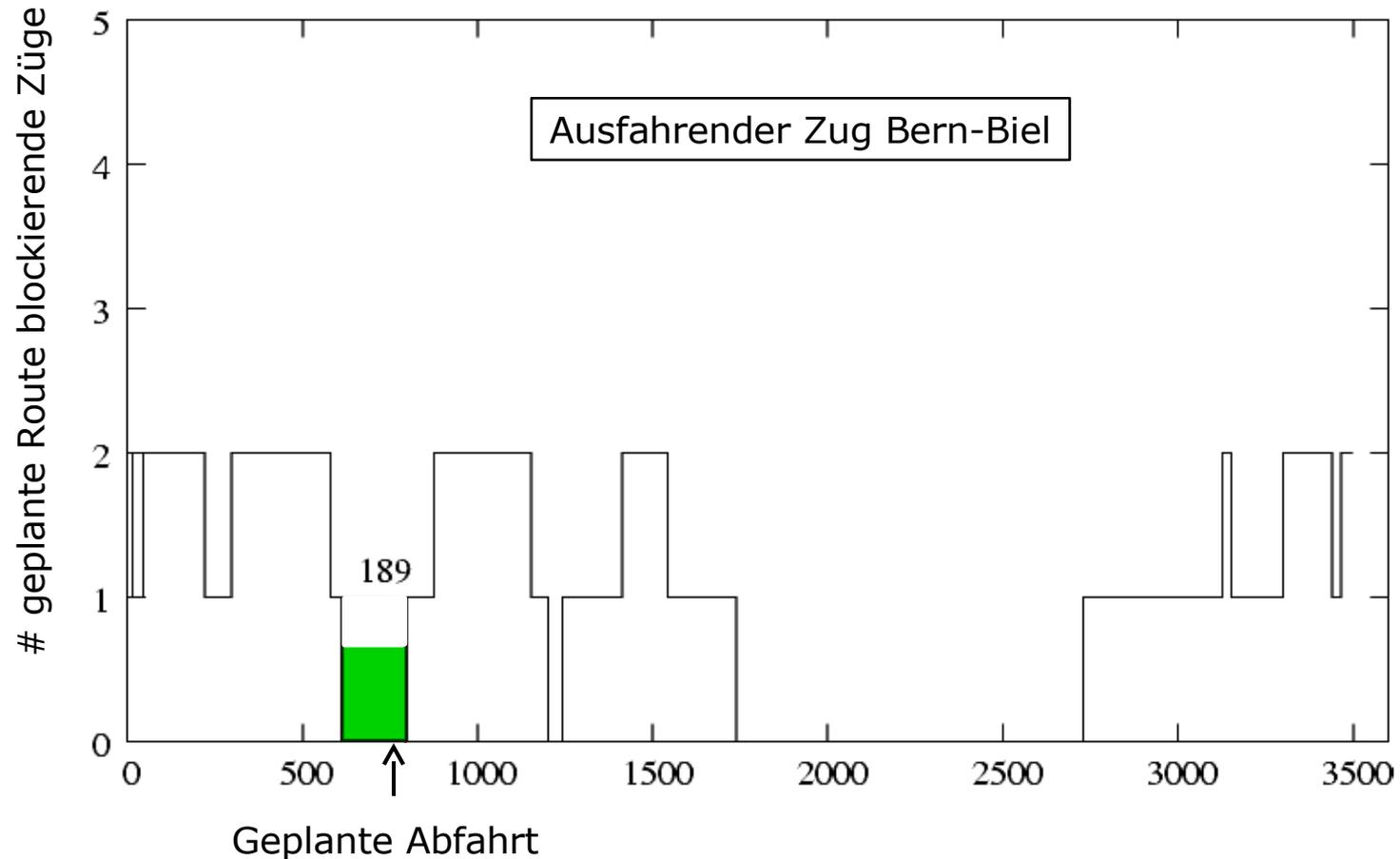
Rechenzeit zum Auffinden einer beliebigen Lösung (nicht-optimal nur restriktionserfüllend)

	Zugfahrten	Routen	Konflikte	Rechenzeit
Fahrplan 2003 (per ½ Stunde)				
Ost	19	5500	740 000	<1 min
West	19	1400	70 000	<1 min
Fiktiver Fahrplan (per ¼ Stunde)				
Ost	16	6800	7 100 000	40 min
West	11	1800	300 000	<1 min

Stabilitätsmass - Zeitfenster

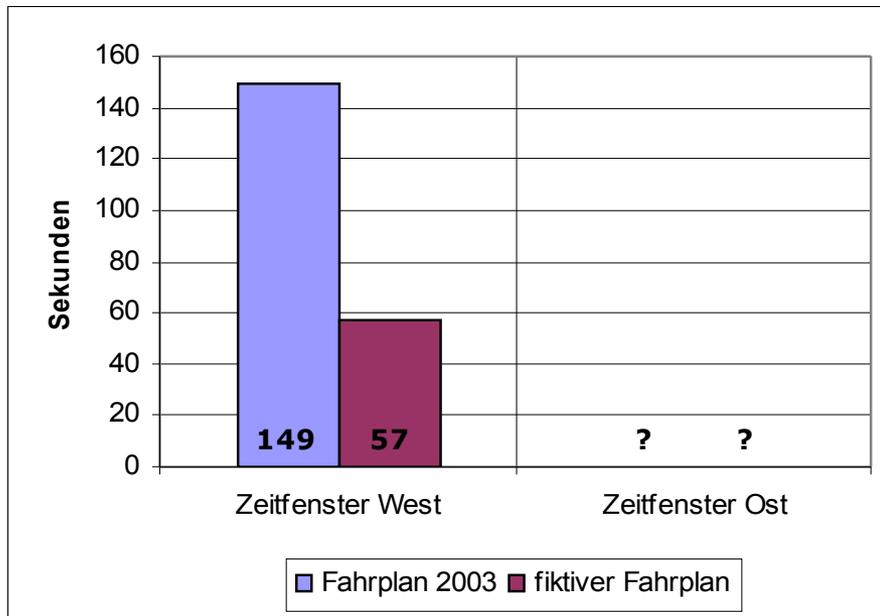


Die Wahl der Route hat entscheidenden Einfluss auf die Stabilität: Zeitfenster vor/nach Optimierung (Bern Ost 2003)

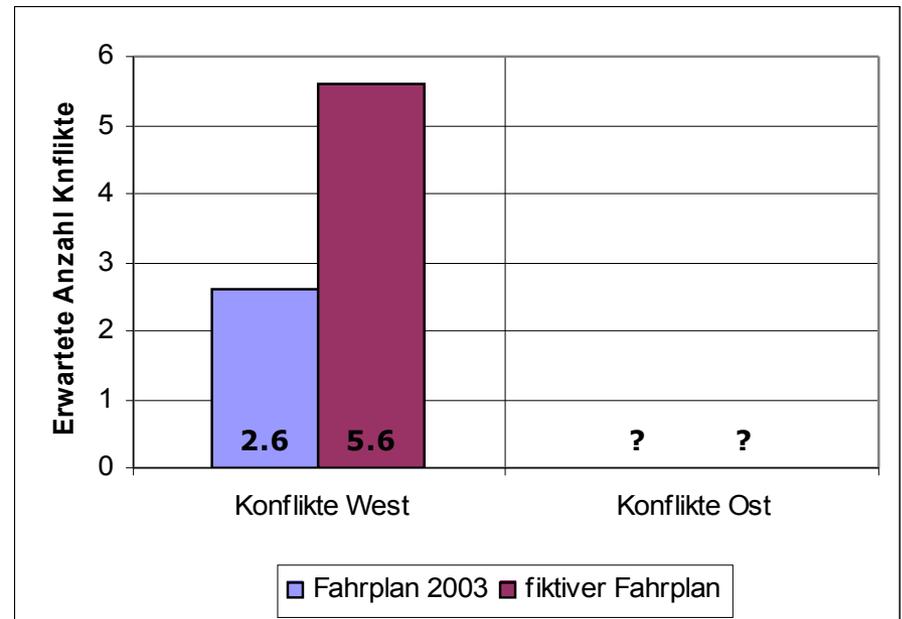


Verdichtung des Angebots ist auf der Westseite von Bern verkräftbar

Gewichteter Durchschnitt der 4 kleinsten Zeitfenster

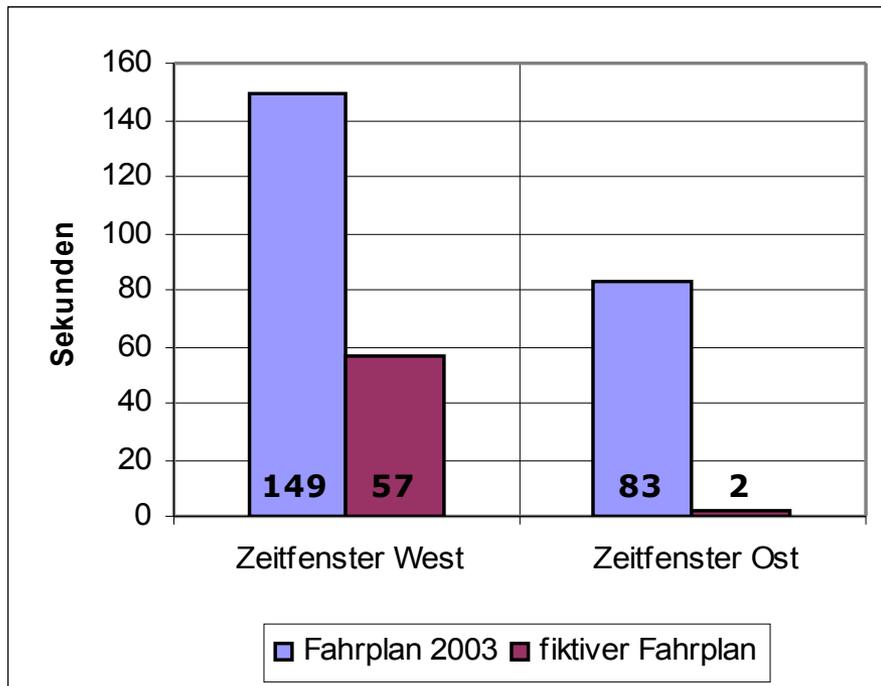


Mit aktueller Verspätungsstatistik

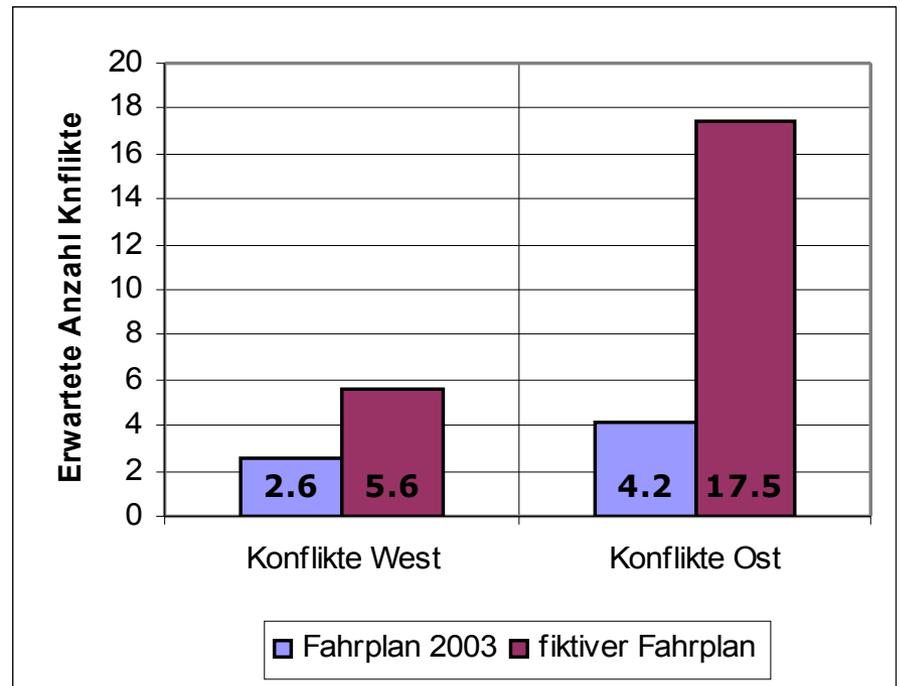


Verdichtung des Angebots ist im Osten untolerierbar

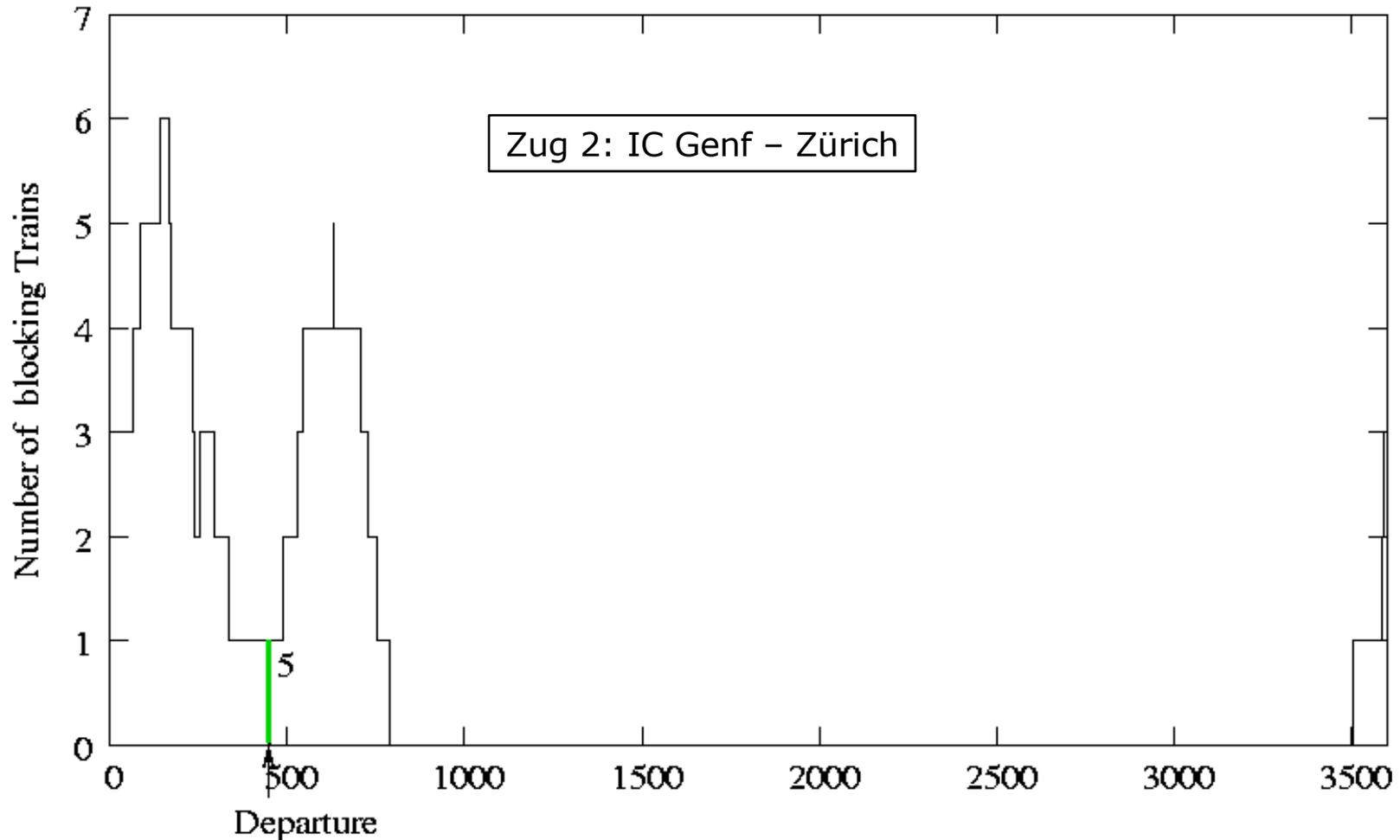
Gewichteter Durchschnitt der 4 kleinsten Zeitfenster



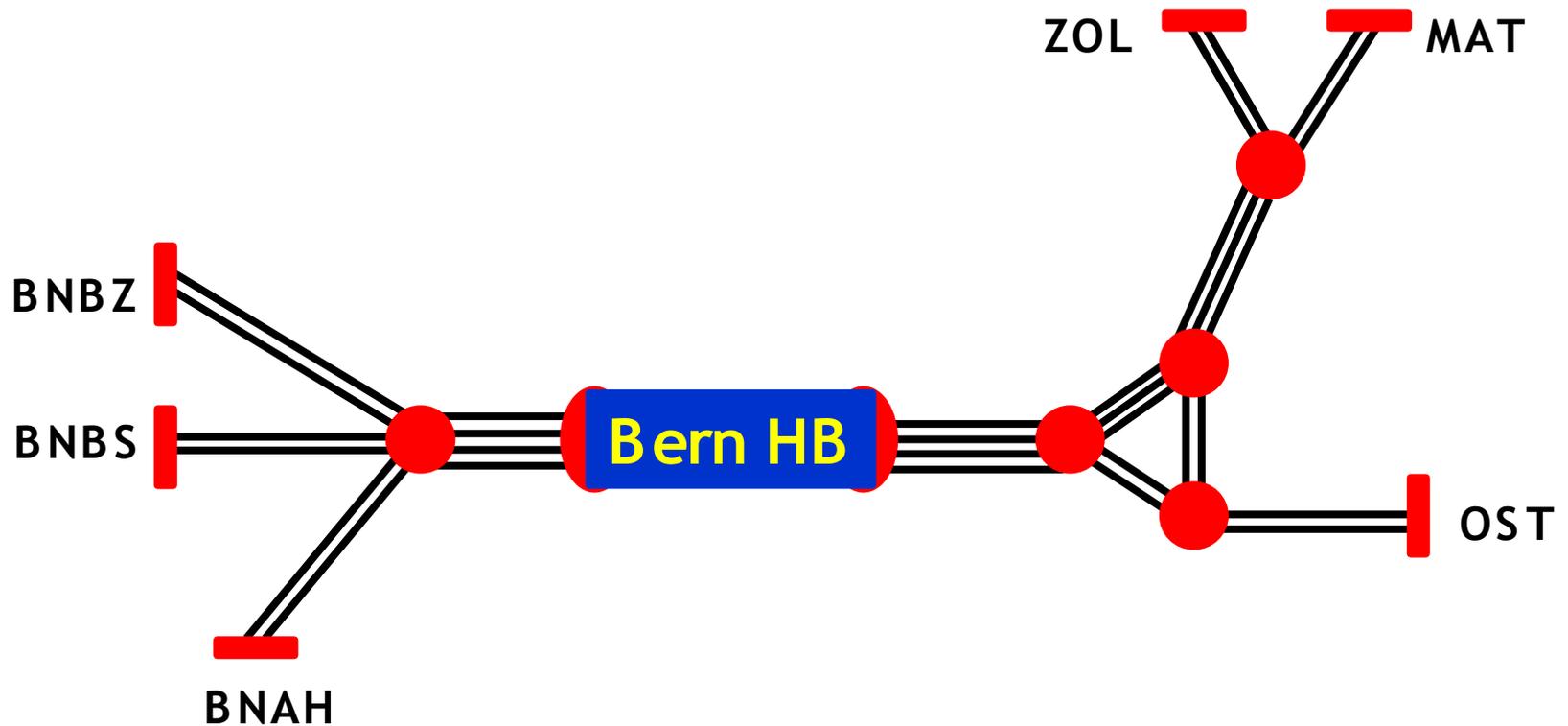
Mit aktueller Verspätungsstatistik



Verdichtung wirkt sich auf das Zeitfenster eines Zuges beträchtlich aus (Bern Ost fiktiver Fahrplan)

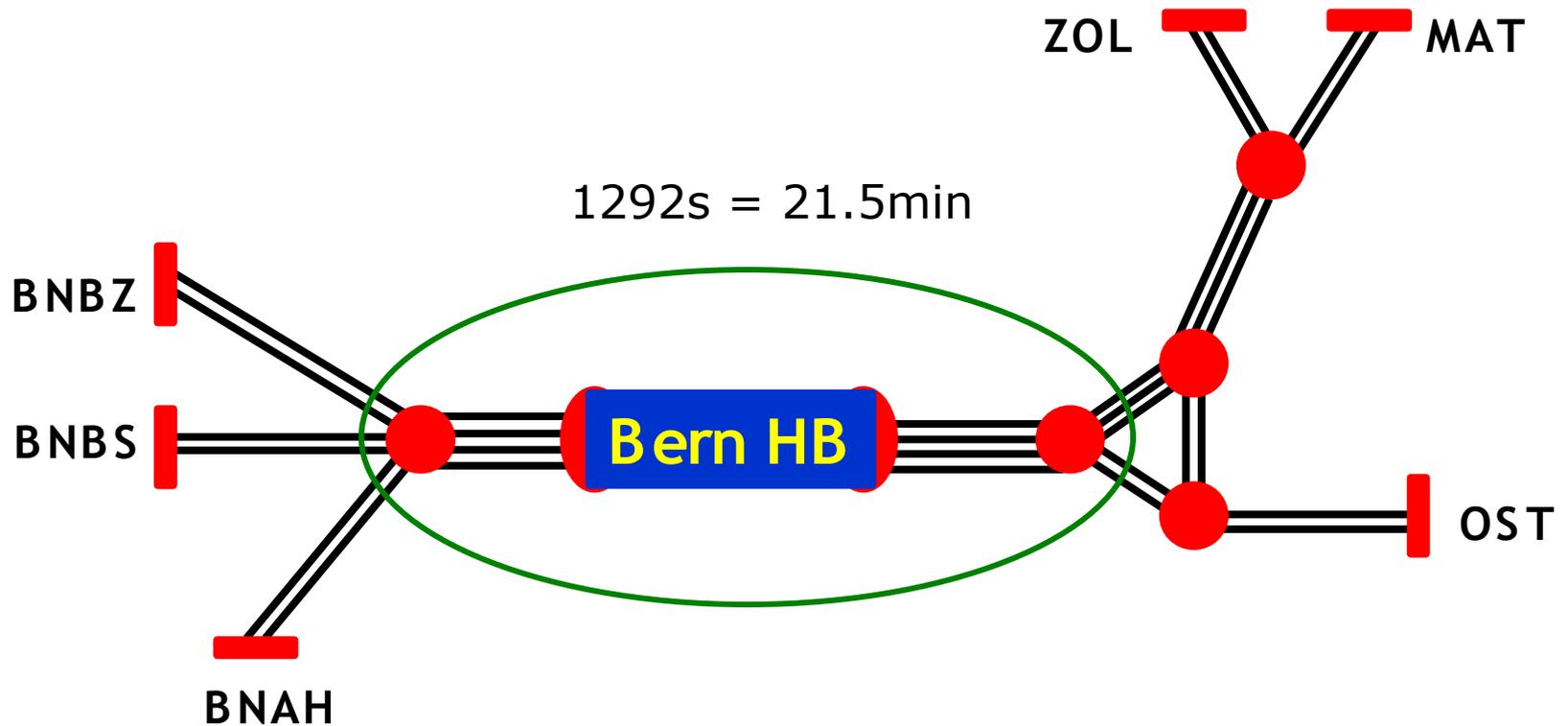


Kapazitätseingrenzende Strecken



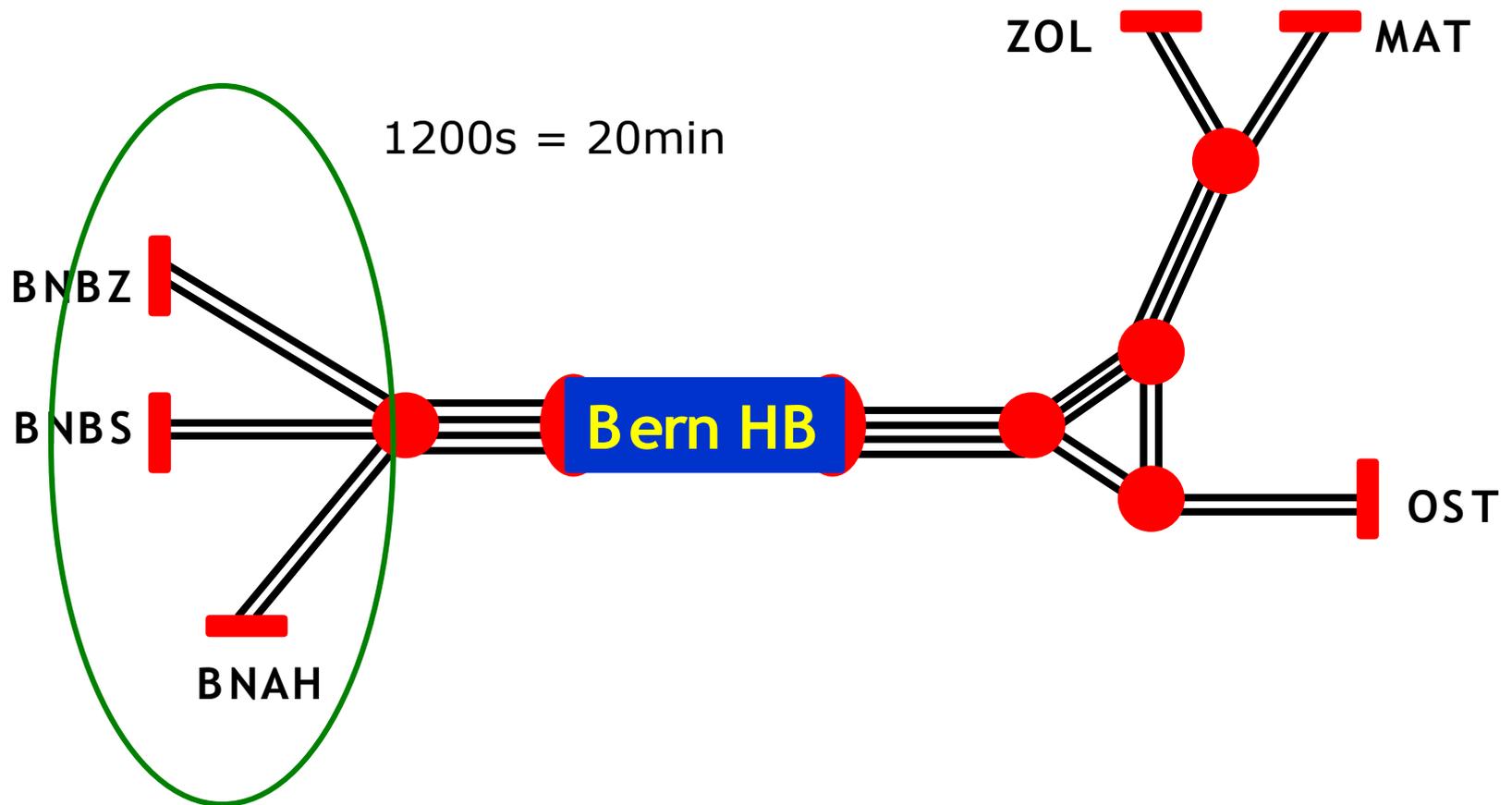
Kürzester Fahrplantakt: 1683s = 28min

Kapazitätseingrenzende Strecken



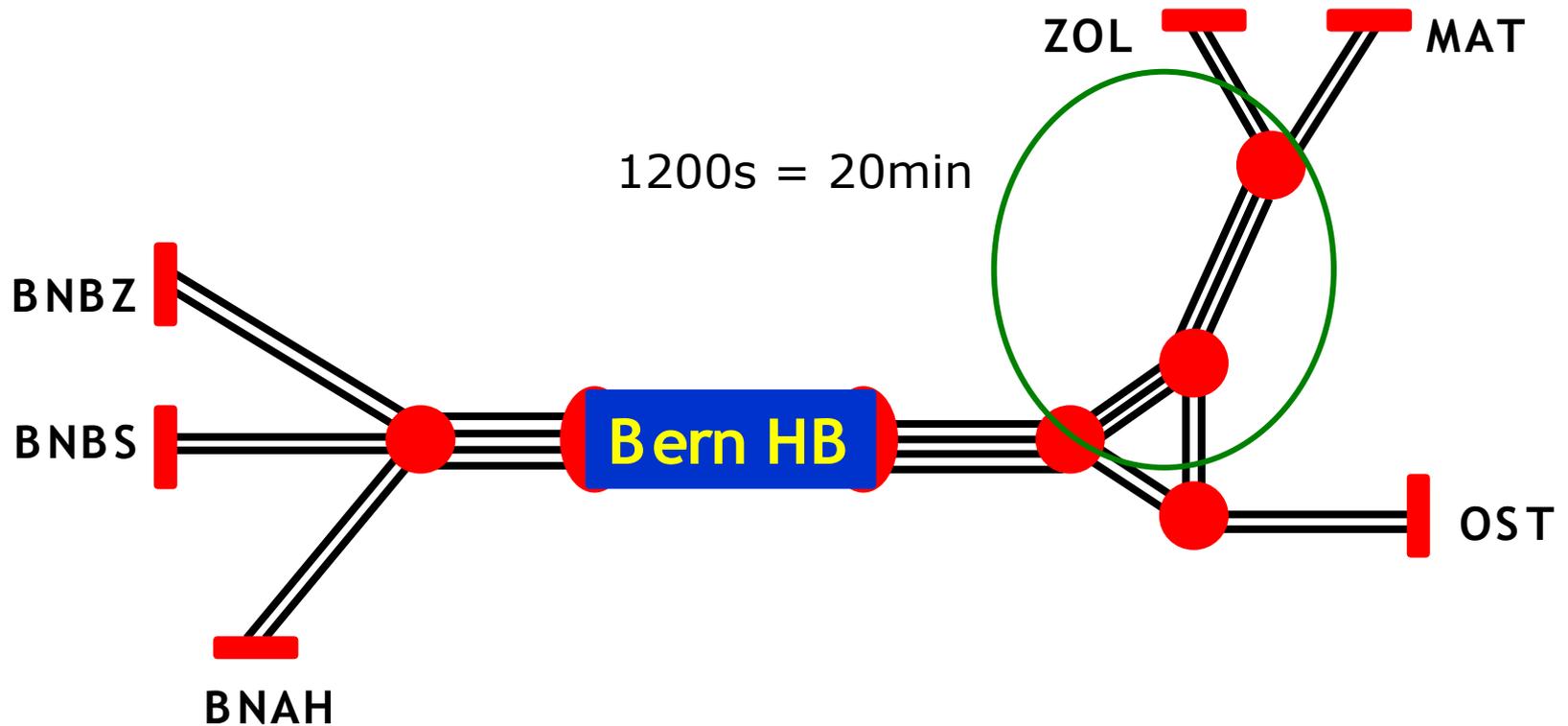
Kürzester Fahrplantakt : 1683s = 28min

Kapazitätseingrenzende Strecken



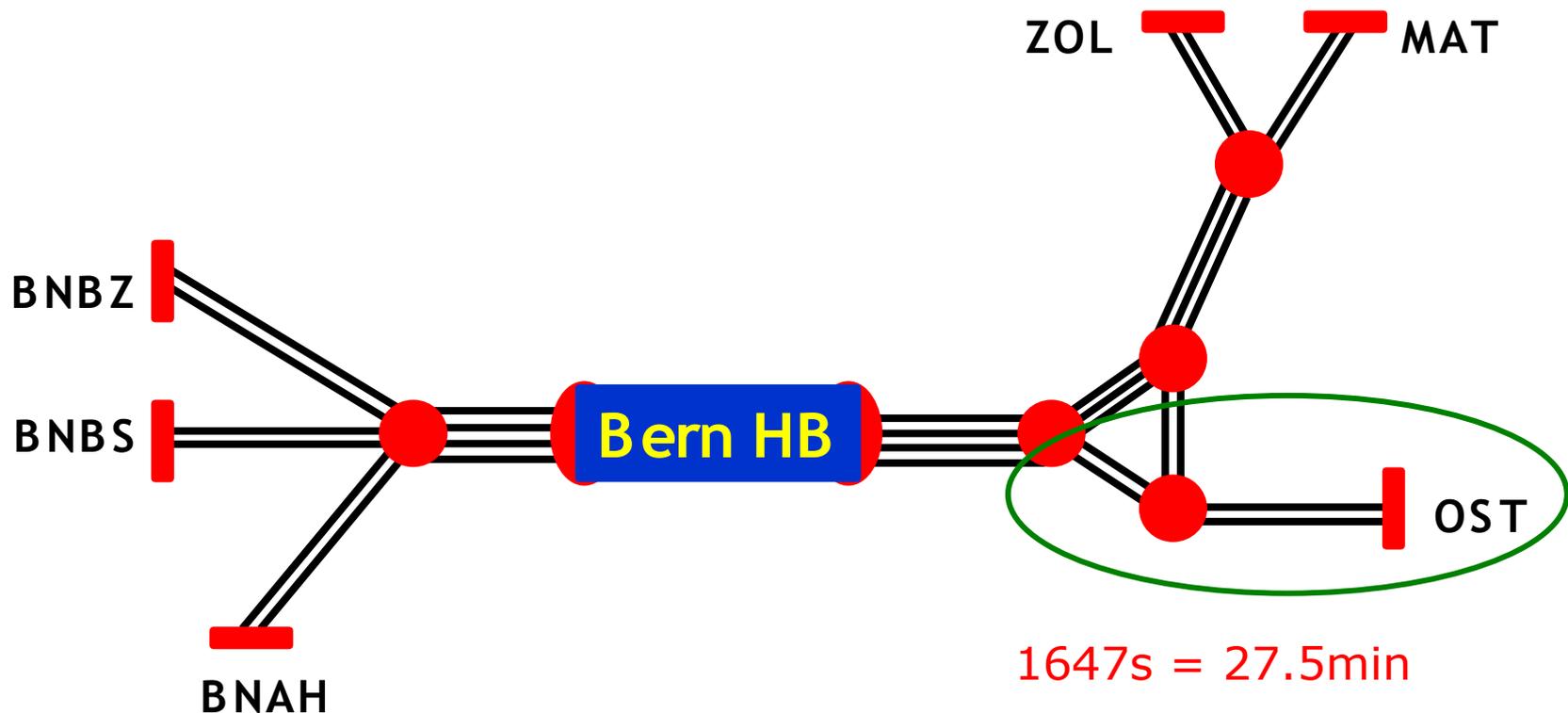
Kürzester Fahrplantakt : 1683s = 28min

Kapazitätseingrenzende Strecken



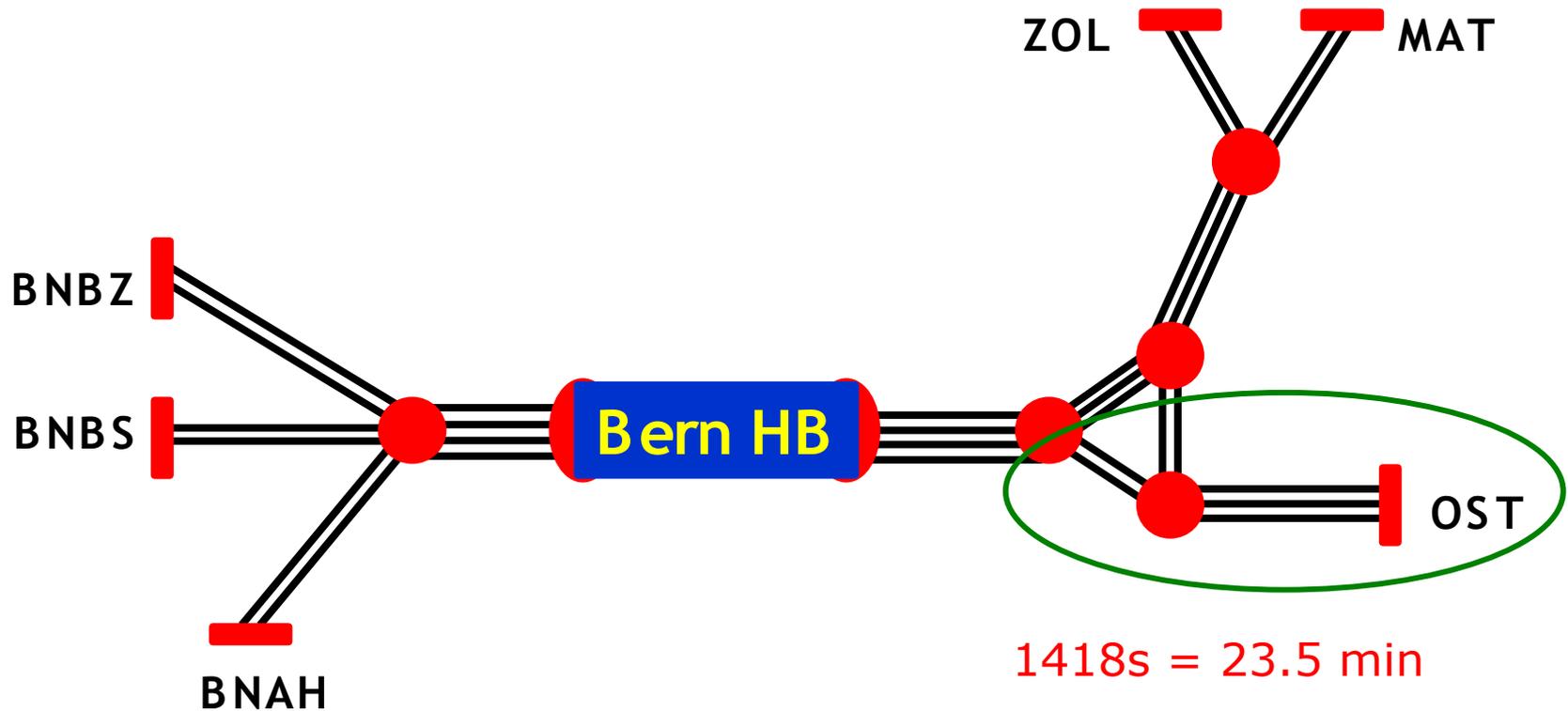
Kürzester Fahrplantakt : 1683s = 28min

Kapazitätseingrenzende Strecken



Kürzester Fahrplantakt : 1683s = 28min

Kapazitätseingrenzende Strecken



Kürzester Fahrplantakt : 1683s = 28min

Was "kosten" die Anschlüsse in der Spinne 15 im fiktiven Fahrplan?

- Gleiche Anzahl Züge, jedoch Spinne "15" ohne Anschlüsse
- Kürzeste Taktzeit reduziert sich von 28 auf 24 Minuten
- Die "Kosten" der Anschlüsse der Spinne 15 sind ungefähr gleich gross wie der Nutzen des dritten Gleises bei Ostermundigen

Kann man das Angebot um einen Güterzug erweitern?

- Güterzug
 - Ankunft: Mattstetten
 - Ausfahrt: Ausserhollingen
 - Durchschnittsgeschwindigkeit 60km/h
 - Keine Anschlüsse

- Taktzeit: **30.5 Minuten** (2.5 Minuten länger)

Kann man den Güterzug in einem bereits bestehenden Fahrplan einfügen?

- Fiktiver Fahrplan fix (Taktzeit 28 Minuten)
- Zugfolgen fixiert, Einfügen des Güterzuges auf allen Strecken mit tiefster Priorität
- Taktzeit: **30.5 Minuten**

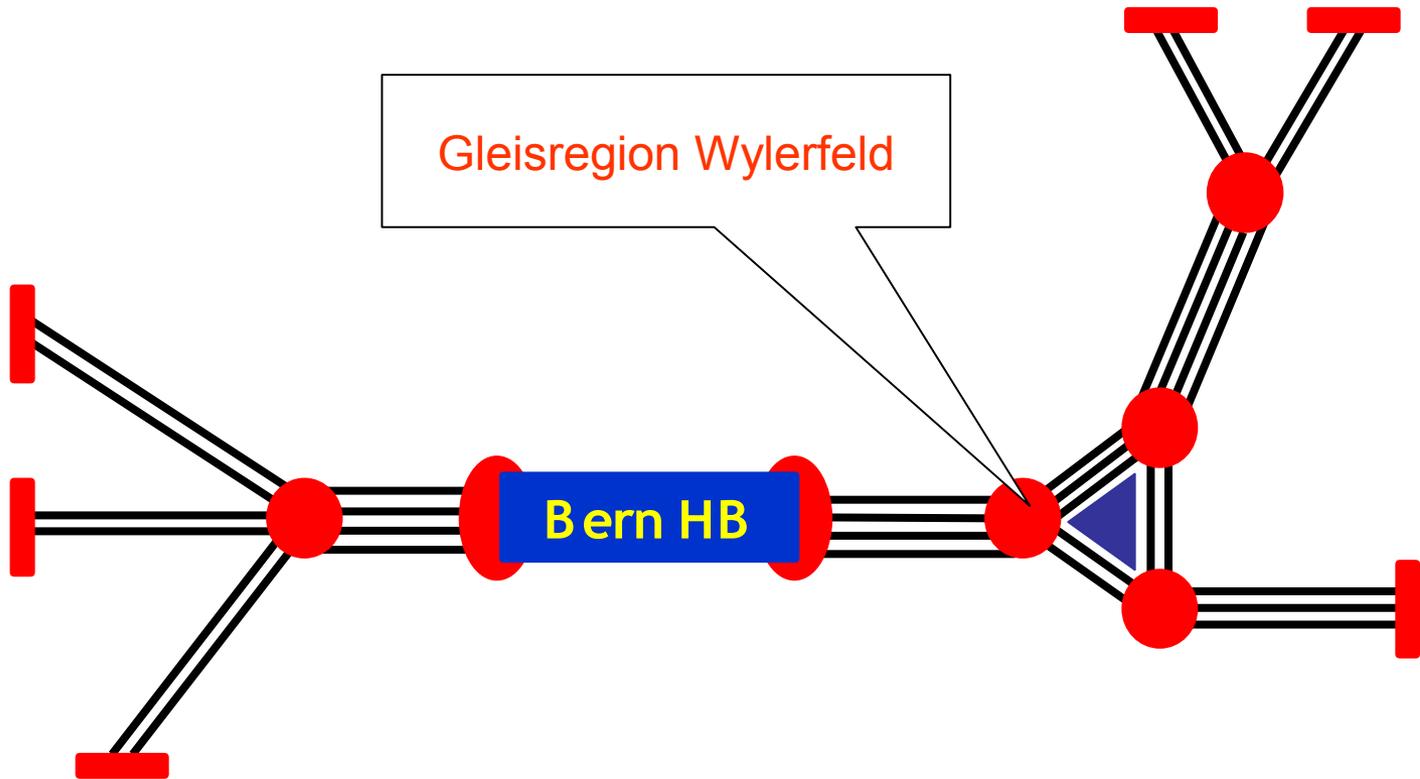
Zusammenfassung und Fazit

- Masse für Stabilitäts- und Kapazitätsfragen der Bahninfrastruktur
 - Tools zur Analyse von Infrastrukturausbauten
 - Evaluation von Fahrplanvarianten
- Quantifizierung der Gegenläufigkeit von Stabilität und Kapazität
- Nur Bahnhofsregionen betrachtet – was ist aus globaler Sicht möglich?

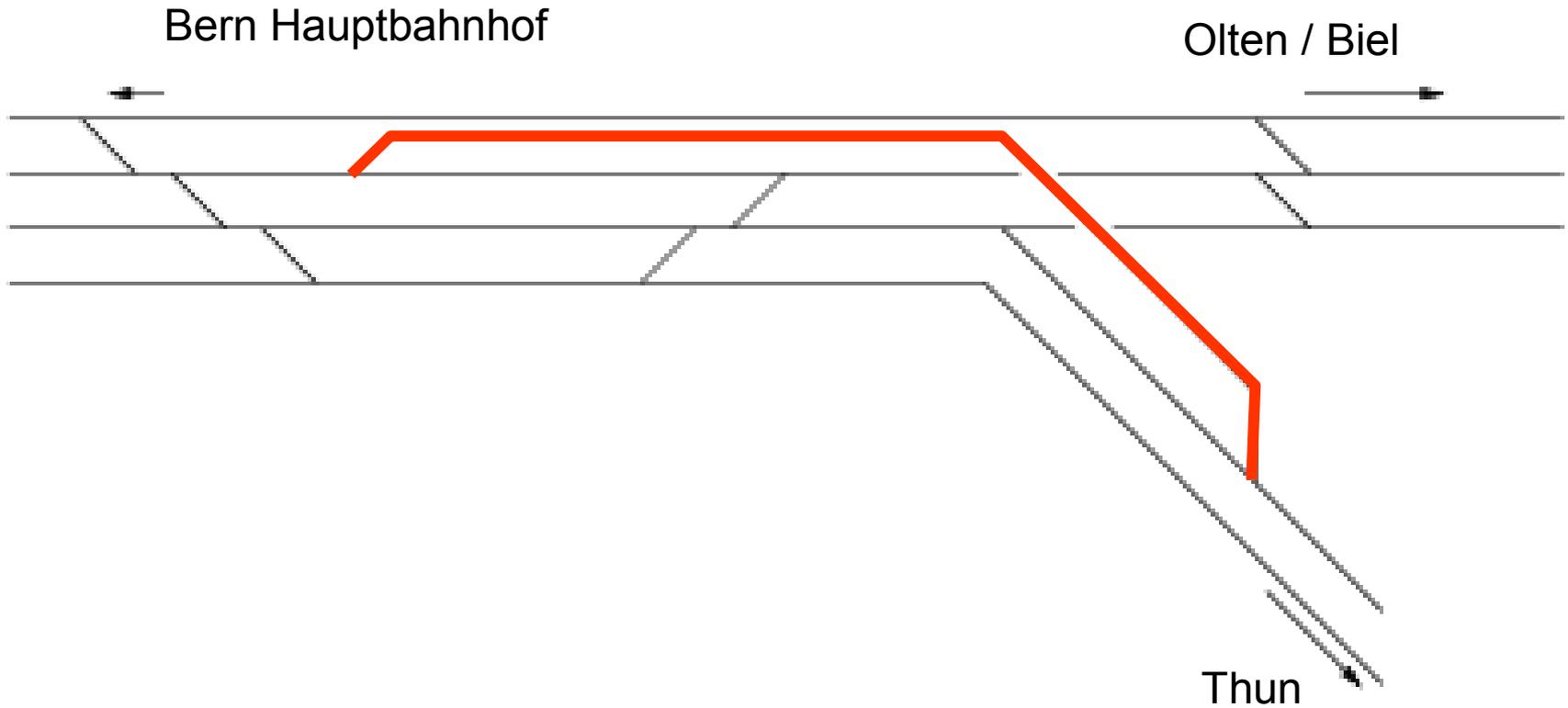
Vielen Dank für
Ihre Aufmerksamkeit!



“Kosten” des Wylerfelds



Wylerfeld Topologie



Was bringt die Überwerfung?

	Verspätung	Zeitfenster	Konflikte
Ost	Daten	2 sec.	8 ½
OstÜ	Daten	6 sec.	7 ½ – 8

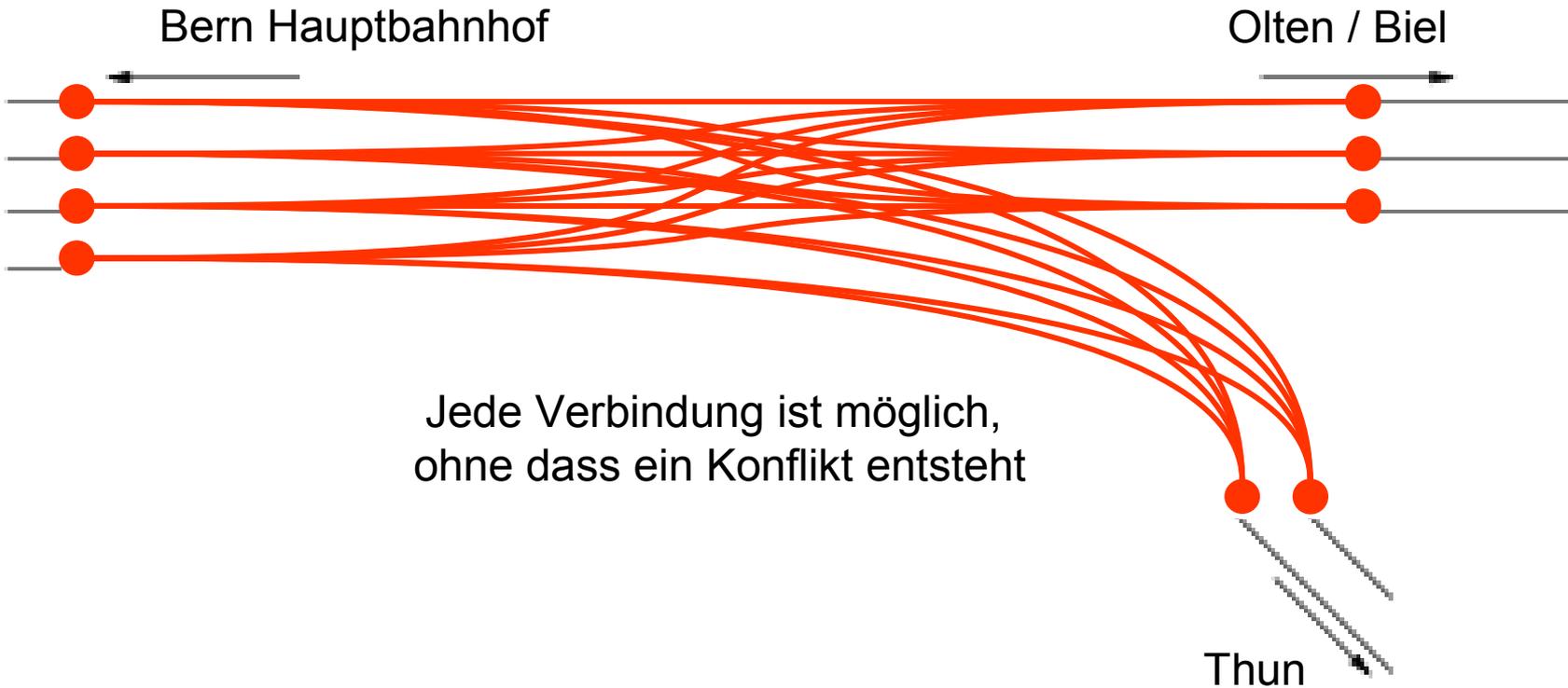
Was bringt das Ändern des Verspätungsverhaltens?

	Verspätung	Zeitfenster	Konflikte (per ¼h)
Ost	Daten	2 sec.	8 ½
OstÜ	Daten	6 sec.	7 ½ – 8
OstV	Zugfolge	2 sec.	6 – 6 ½

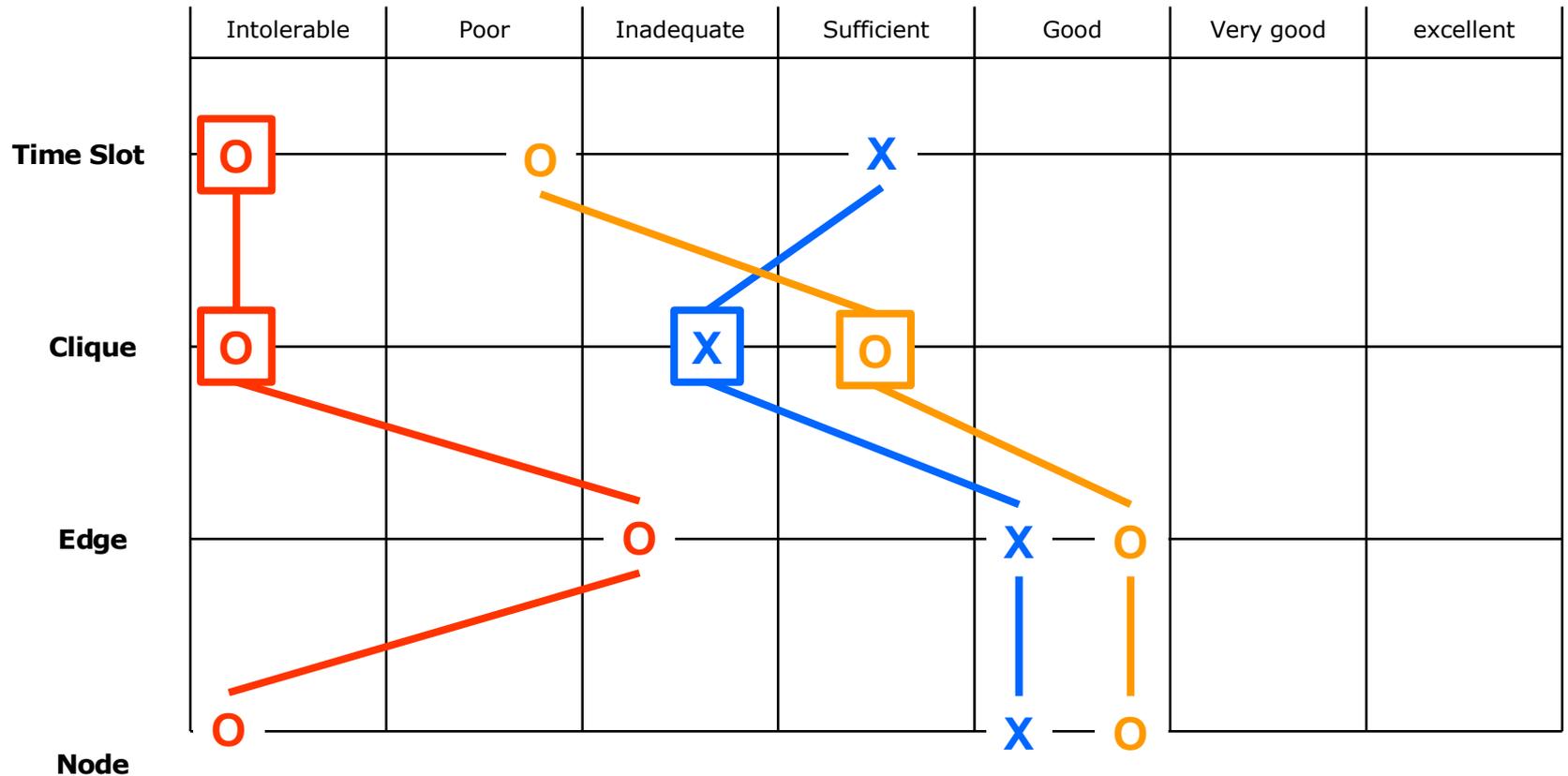
Was bringt das Entfernen des kritischen Zuges?

	Verspätung	Zeitfenster	Konflikte
Ost	Daten	2 sec.	8 ½
OstÜ	Daten	6 sec.	7 ½ – 8
OstV	Zugfolge	2 sec.	6 – 6 ½
OstZ	Daten	15 sec.	5 ½

Was bringt eine Super-Überwerfung?



Performance Profiles East 2020 with Super-Underpass



Bern Ost fiktiv Clique/Time Slot Empirical

Bern Ost fiktiv Clique Underpass Train Removed Pulse

Bern Ost fiktiv Clique Super Underpass

Where is the challenge?

- Many switching regions in stations areas
 - MANY routing alternatives (→ vertices)
 - Due to interconnection possibilities, the trains arrive and depart at about the same time (→ edges)

Scenario	Trains	Vertices	Edges
Bern East 2003	19	5500	740 000
Bern West 2003	19	1400	70 000
Bern East 2020	16	6800	7 100 000
Bern West 2020	11	1800	300 000

Fixed Point Iteration Algorithm

(Adapted Version, Cochand 1993)

- Choose initial values randomly such that

$$0 < p_{ij}^0 < 1 \text{ and } \sum_{j=1}^{m_i} p_{ij}^0 = 1$$

- Iterate:
$$p_{ij}^{t+1} := p_{ij}^t \prod_{r_{kl} \neq r_{ij}} (1 - p_{kl}^t)$$

rescale such that

$$\sum_{j=1}^{m_i} p_{ij}^{t+1} = 1$$

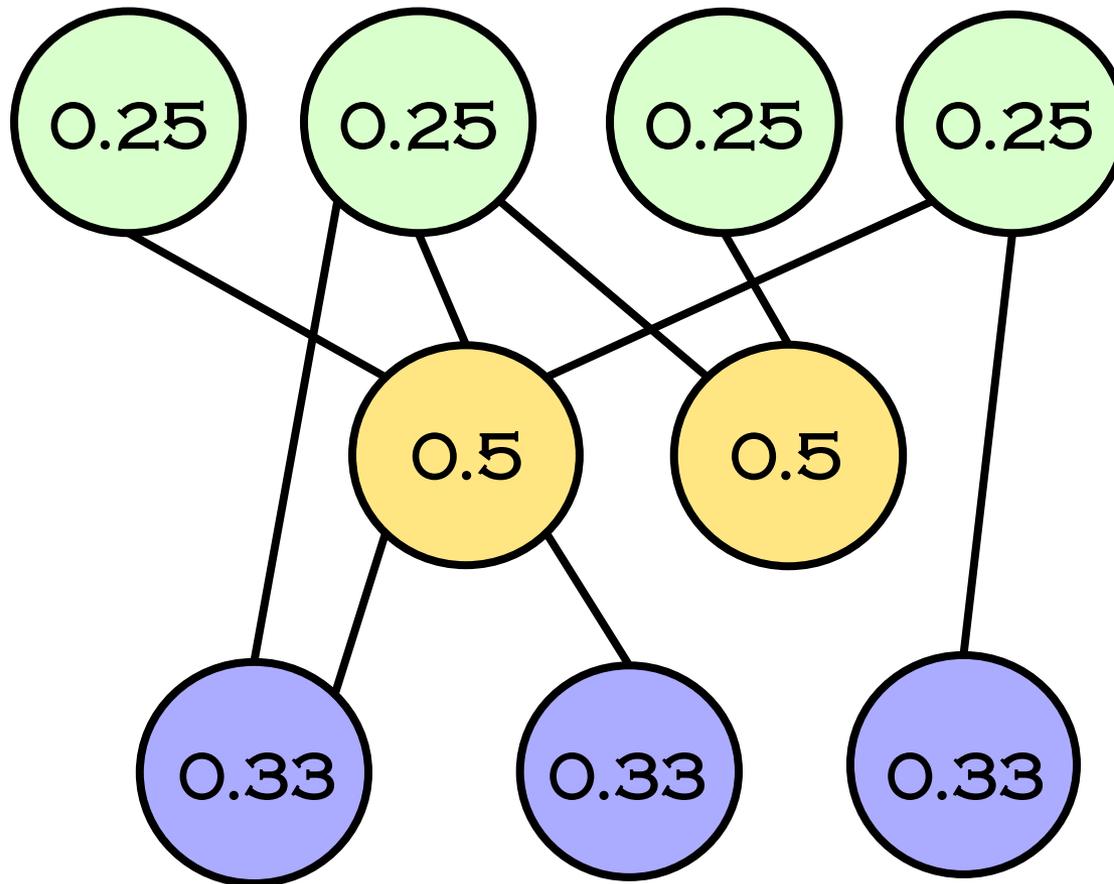
Fixed Point Iteration Algorithm

- Number of iterations:
 - Either cap at given number N
 - Or after finding a fixed point, i.e.

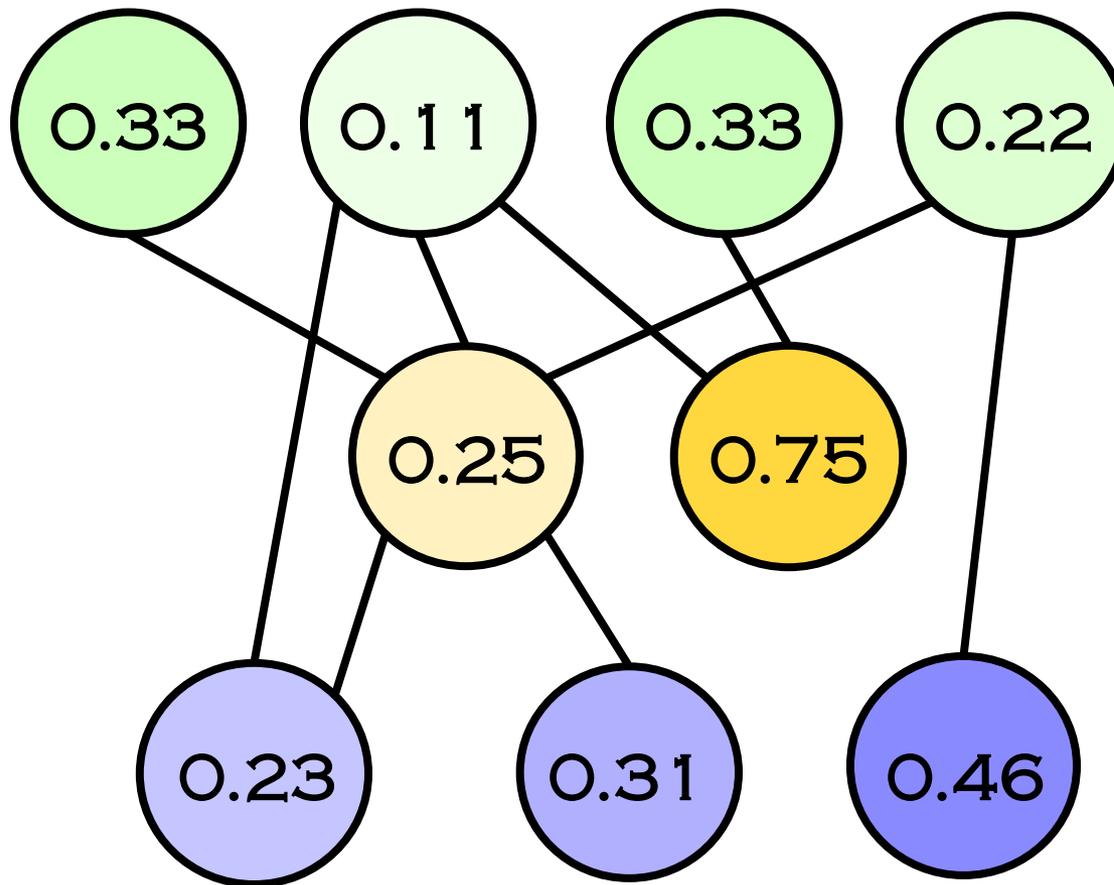
$$p_{ij}^{t+1} := p_{ij}^t \quad \forall ij$$

- Randomize with given probabilities p_{ij}^N
 - For each train (random order) choose a vertex according to the probabilities
- In case of failure restart randomization or whole procedure (at most M times)

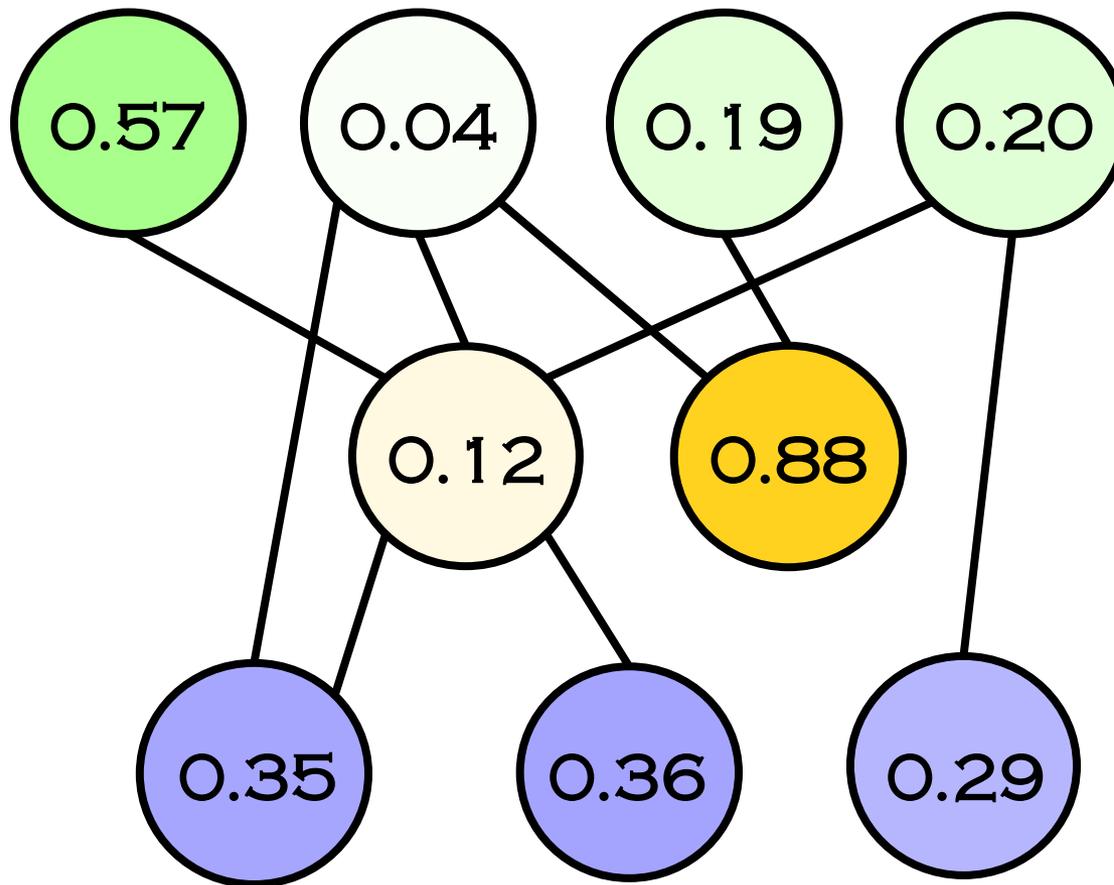
Example of Iteration



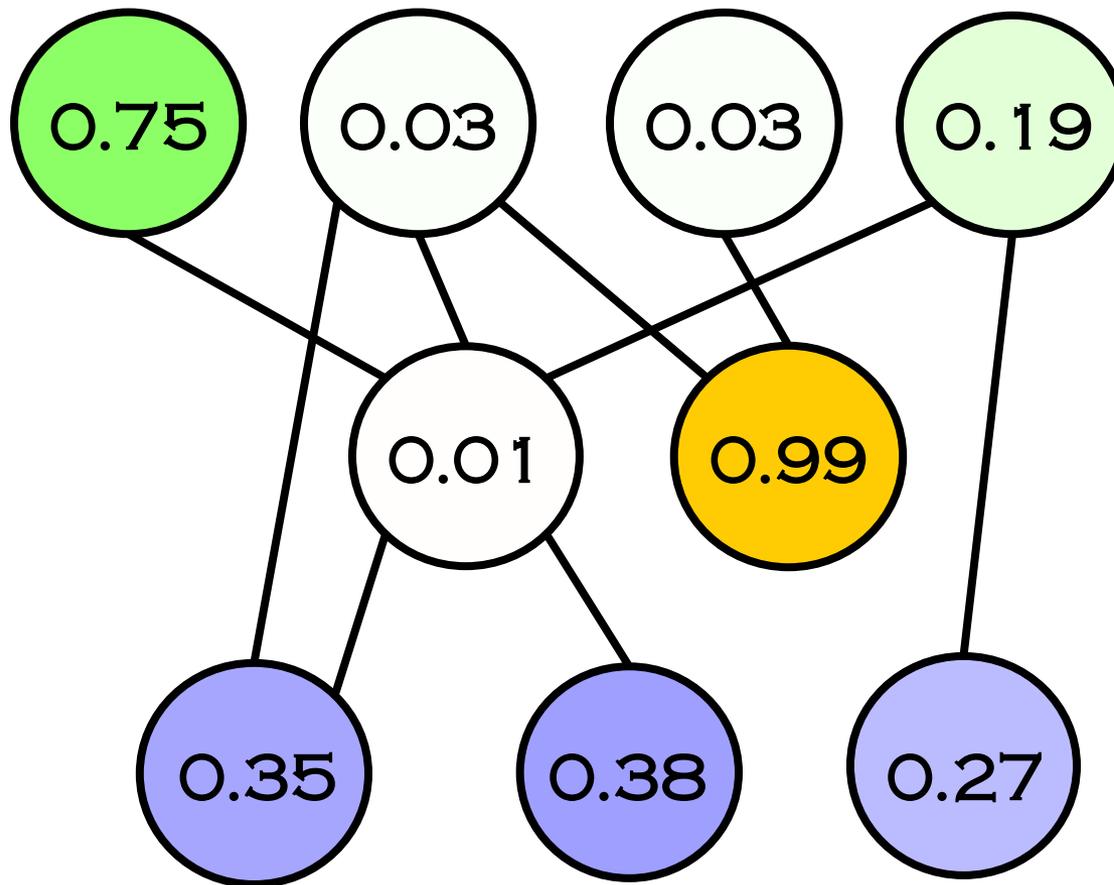
Example of Iteration



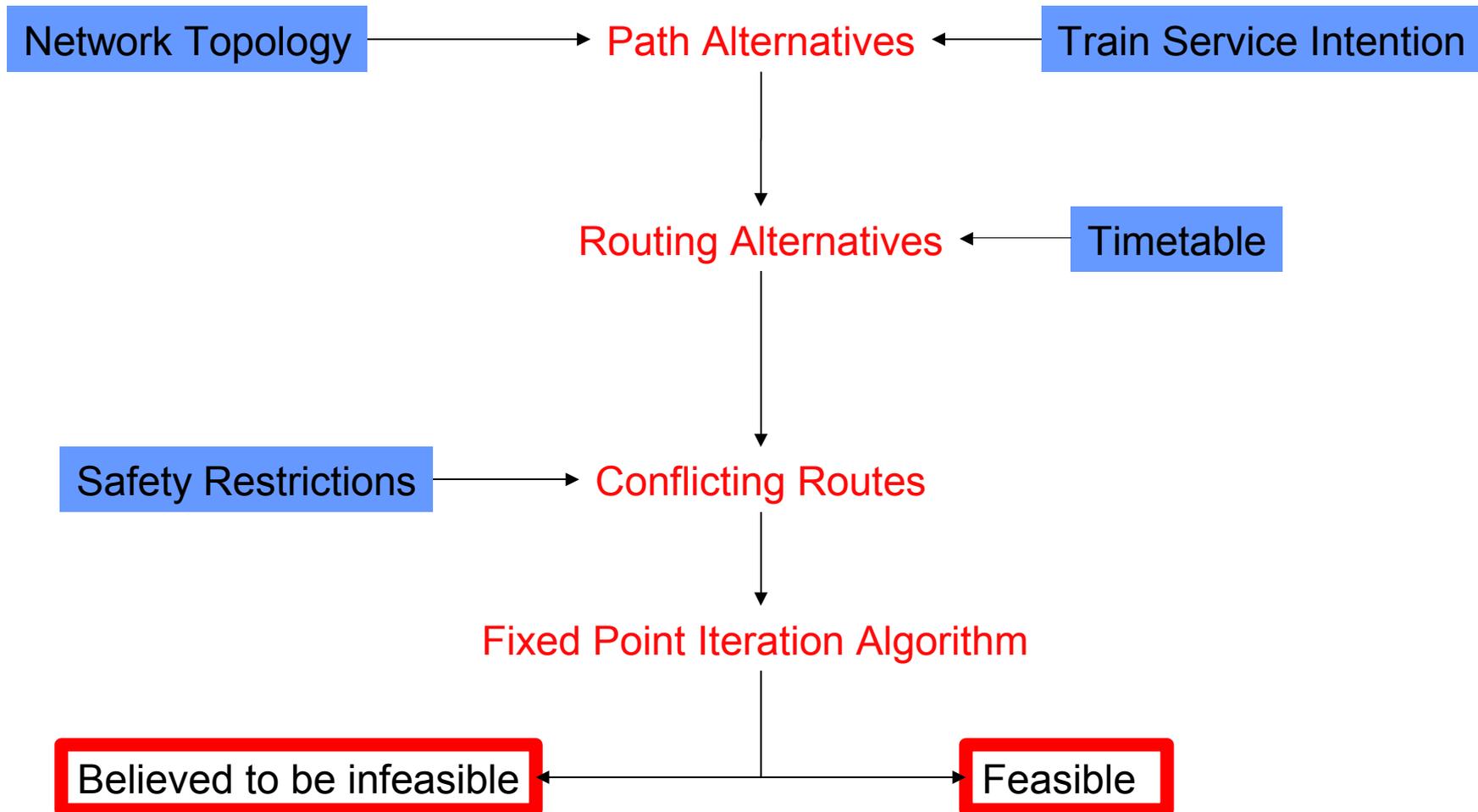
Example of Iteration



Example of Iteration



Recap: Train Routing Problem

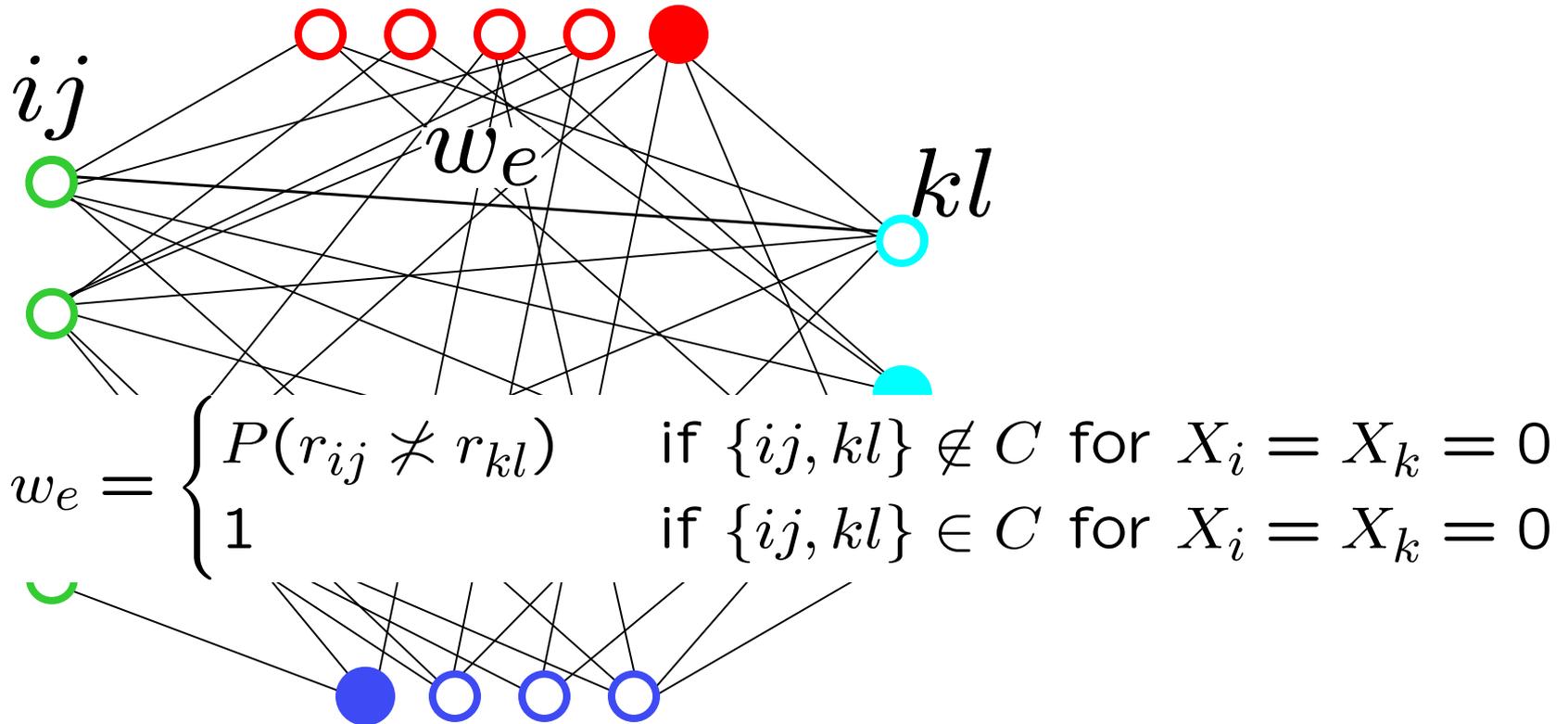


Probabilistic Stability Measures

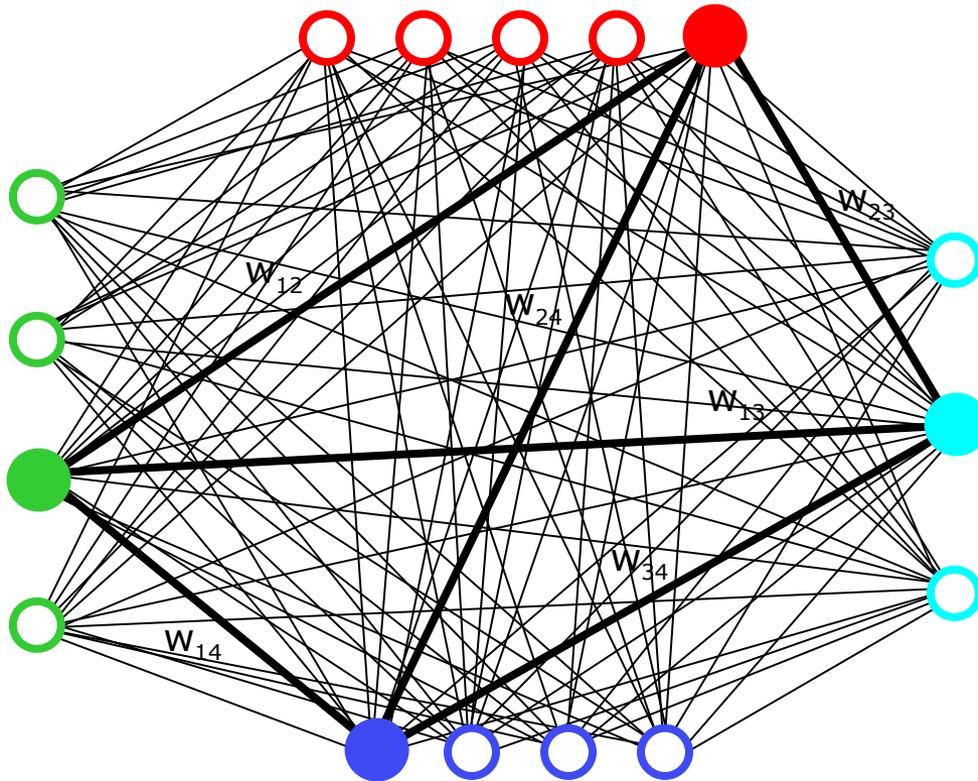
- Introduce random variable X_i indicating the delay of train i at the initial node (portal or platform)
- Define indicator variable $Y_{ij,kl}$

$$Y_{ij,kl} = \begin{cases} 1 & \text{if } r_{ij} \neq r_{kl} \text{ according to } X_i, X_k \\ 0 & \text{if } r_{ij} \asymp r_{kl} \text{ according to } X_i, X_k \end{cases}$$

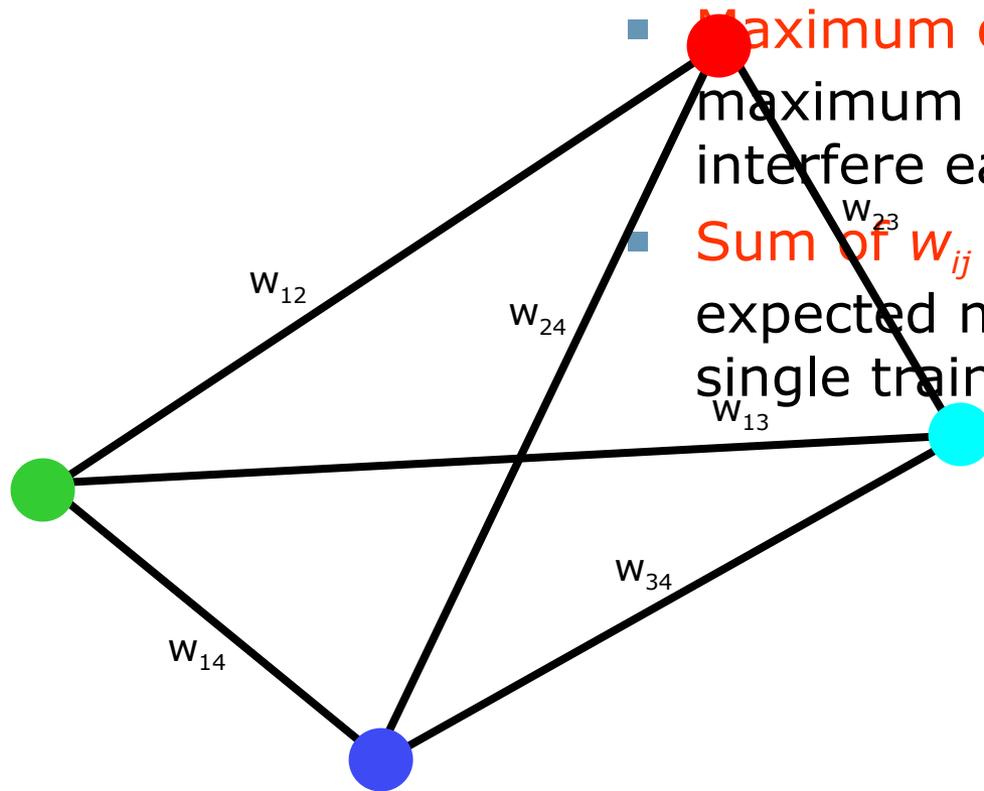
Conflict Graph: Edge Weights



Extended Conflict Graph



Extended Conflict Graph



- Sum of all weights corresponds to expected number of conflicts
- Maximum of w_{ij} corresponds to the maximum probability that two routes interfere each other
- Sum of w_{ij} (i fixed) corresponds to the expected number of conflicts for a single train

Expected Number of Conflicts

- Look at a **specific schedule L** for which each train is assigned to a route.
- Let $Y_{i,k}$ indicate whether the chosen routes for trains i and k are compatible
- Let $Y_C = \sum_{i,k} Y_{i,k}$ count the number of conflicts for schedule L .
- **Expected number of conflicts** $E[Y_C]$ is:

$$E[Y_C] = E \left[\sum_{i,k} Y_{i,k} \right] = \sum_{i,k} P(Y_{i,k} = 1) = \sum_{i,k} P(r_i \neq r_k)$$

Expected Number of Conflicts

- Instead of maximizing the minimal time slot, the expected number of conflicts is minimized:

$$\min \sum_{i,j,k,l} x_{ij} x_{kl} P(r_{ij} \neq r_{kl})$$

$$s.t. \quad \sum_{j=1}^{m_i} x_{ij} = 1 \quad \forall i = 1, \dots, n$$

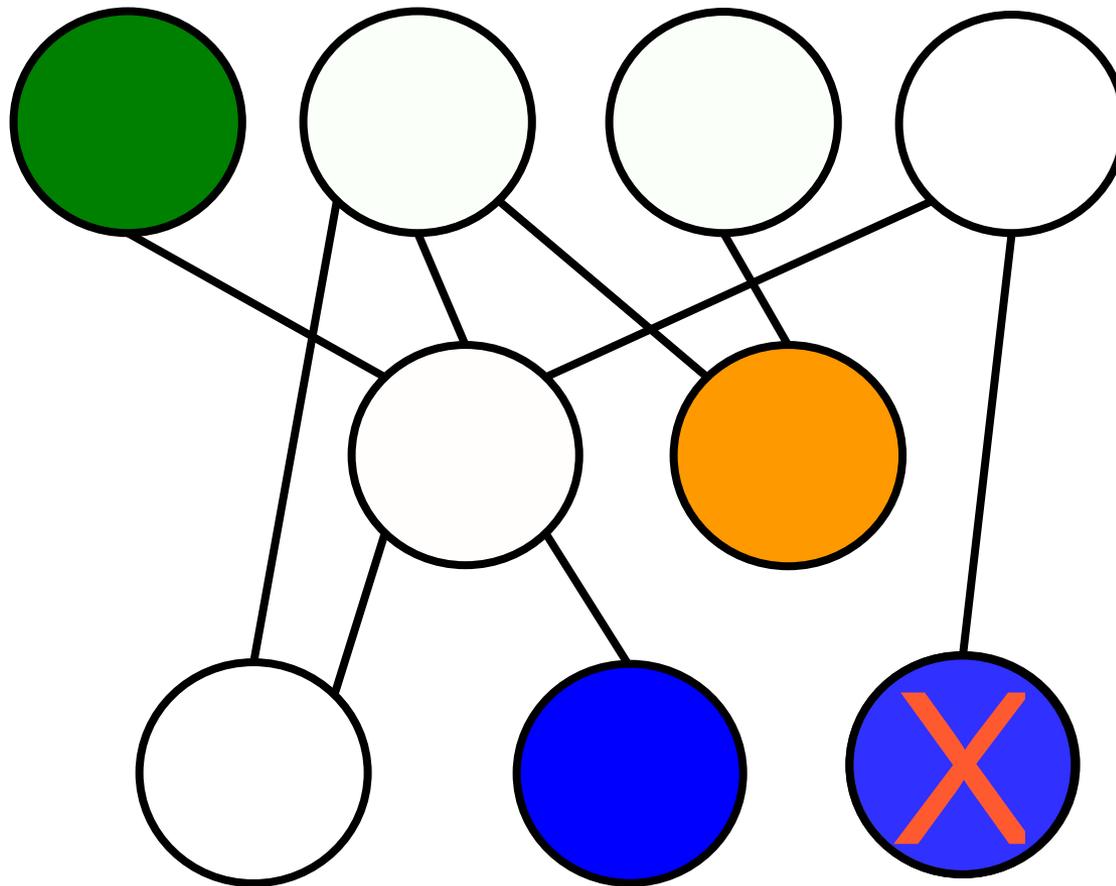
$$x_{ij} + x_{kl} \leq 1 \quad \forall r_{ij} \neq r_{kl}$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\}$$

Local Search Optimization

- Initialization:
 - With help of the fixed point iteration method, choose initial schedule L
 - Choose a maximum neighborhood size K
 - Set *bestvalue* to $Z_i(L)$
- Iteration:
 - Choose neighborhood size $s \leq K$
 - Try to find L' in neighborhood such that $Z_i(L') \leq Z_i(L)$ and set *bestvalue* to $Z_i(L')$
 - If no such L' can be found:
 - Increase s
 - Restart with new initial L
 - Return *bestvalue*

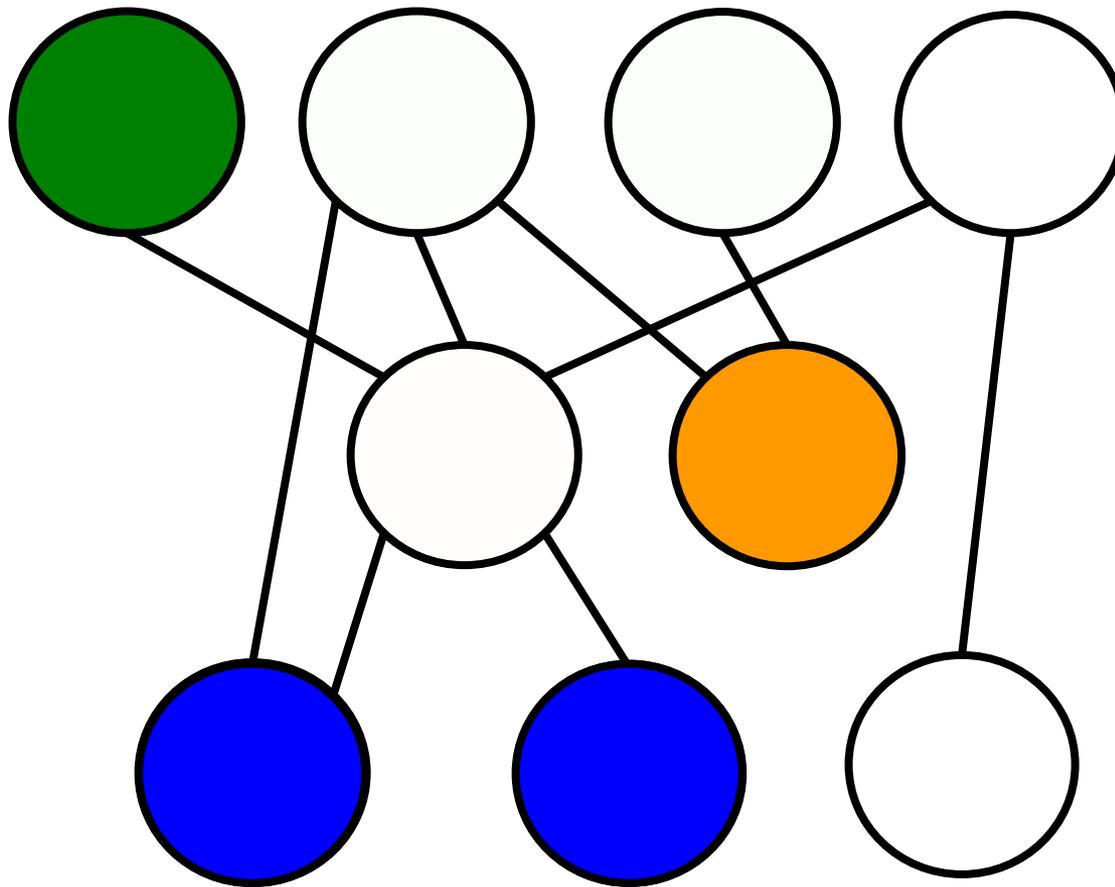
Example of Local Search Method



Neighborhood size: 1

New solution improves the quality

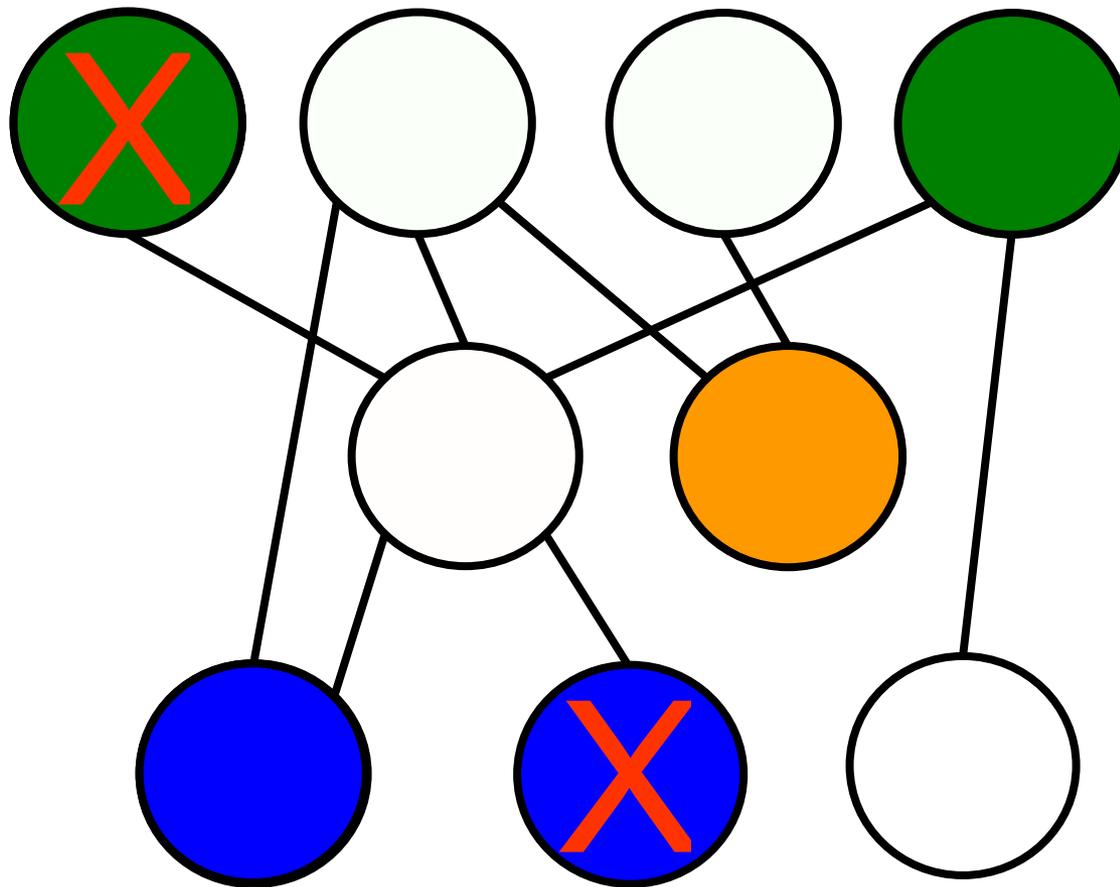
Example of Local Search Method



Neighborhood size: 1

Does not improve
the Solution quality

Example of Local Search Method



Neighborhood size: 2