

Konferenz Verkehrsökonomie und Verkehrspolitik

Berlin, 27. Juni 2014

Eisenbahninfrastruktur ökonomisch planen

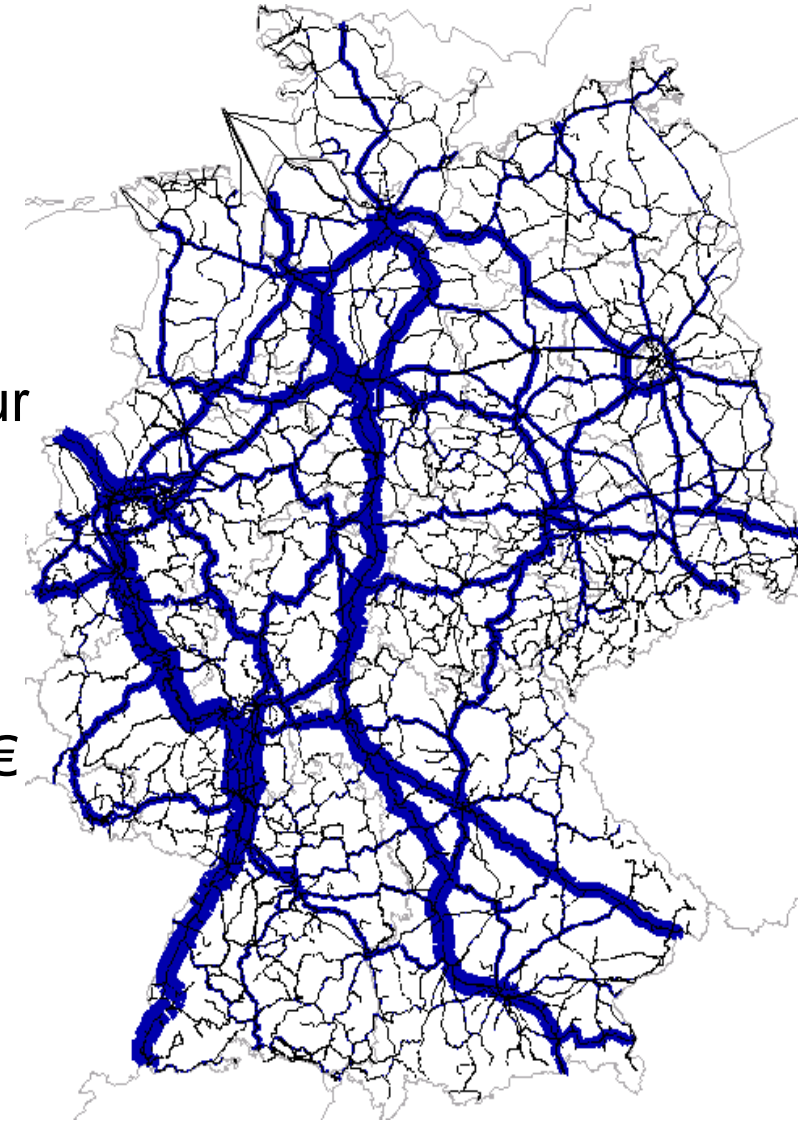
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Nils Nießen

Dipl. Ing. Bastian Kogel



Motivation

- Eisenbahninfrastruktur hat einen langen Lebenszyklus
- Prognostiziertes Verkehrswachstum steigt in den nächsten Jahren stetig
- Neu- und Ausbau der Eisenbahninfrastruktur ist erforderlich, aber kostenintensiv
 - Stuttgart 21: ~ 5-6 Mrd. €
 - NBS Köln Rhein/Main ~ 6 Mrd. €
 - NBS Nürnberg – München ~ 3.5 Mrd. €
 - City Tunnel Leipzig ~ 1 Mrd. €



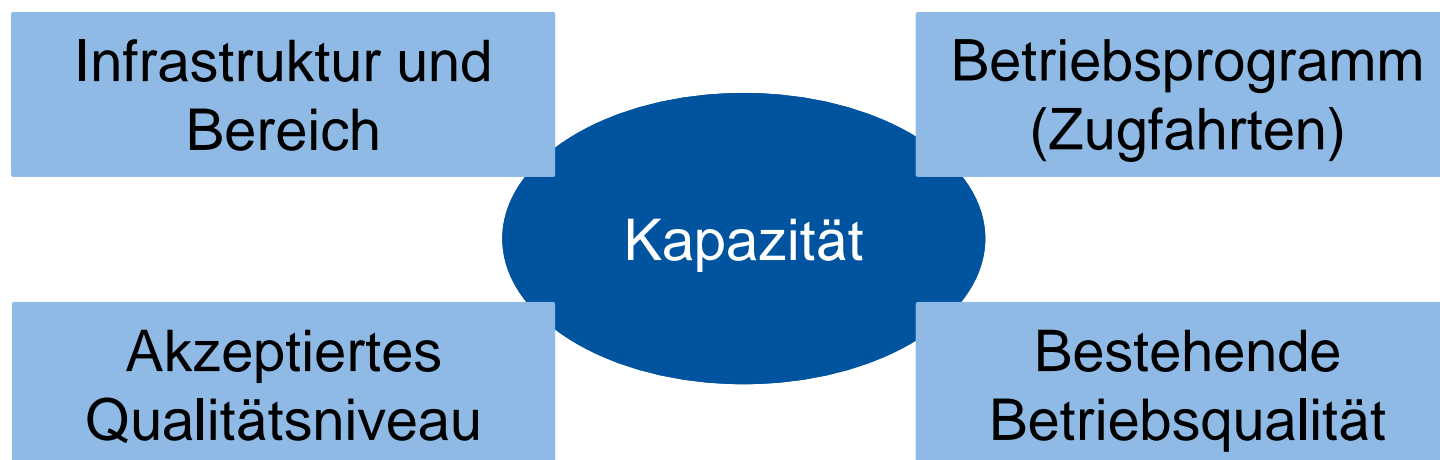
Motivation

- Neben Neubau ist auch Bestandserhaltung notwendig, Gelder werden in Deutschland vom Bund bereitgestellt
 - Gelder für den Ausbau: BSchwAG ~ 1,5 Mrd. €/a
 - Gelder für den Bestand: LuFV 2,5 Mrd. €/a (+0,25 Mrd. €/a)
- Gezielter Einsatz der Mittel / Priorisierung von Maßnahmen
 - Analyse von Engpässen / Ermittlung der Kapazität durch eisenbahnbetriebswissenschaftliche Untersuchungen
 - Kosten einer Untersuchung ~ 50 – 150 T€

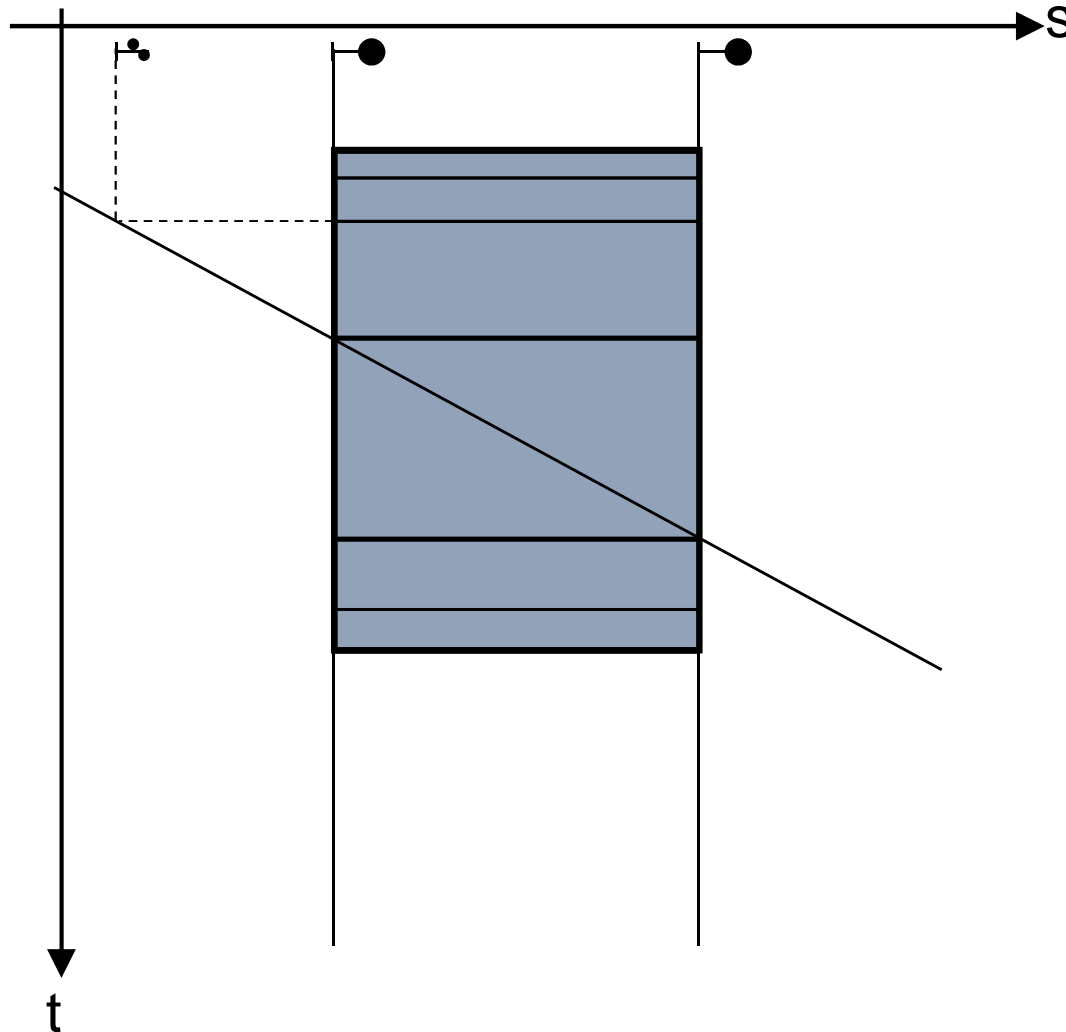
Die Kapazität der Schienenwege hängt nicht nur von den Infrastruktureigenschaften ab

Auch Betriebsprogramm, Fahrplan und akzeptiertes Qualitätsniveau beeinflussen die Kapazität als mögliche Anzahl an Zugfahrten je Zeit

Die Kapazität eines Infrastrukturbereiches ist die Anzahl an Zugfahrten, welche auf diesem bei gegebenem Zugmix innerhalb einer Zeitspanne unter Einhaltung einer definierten Betriebsqualität abgewickelt werden kann.

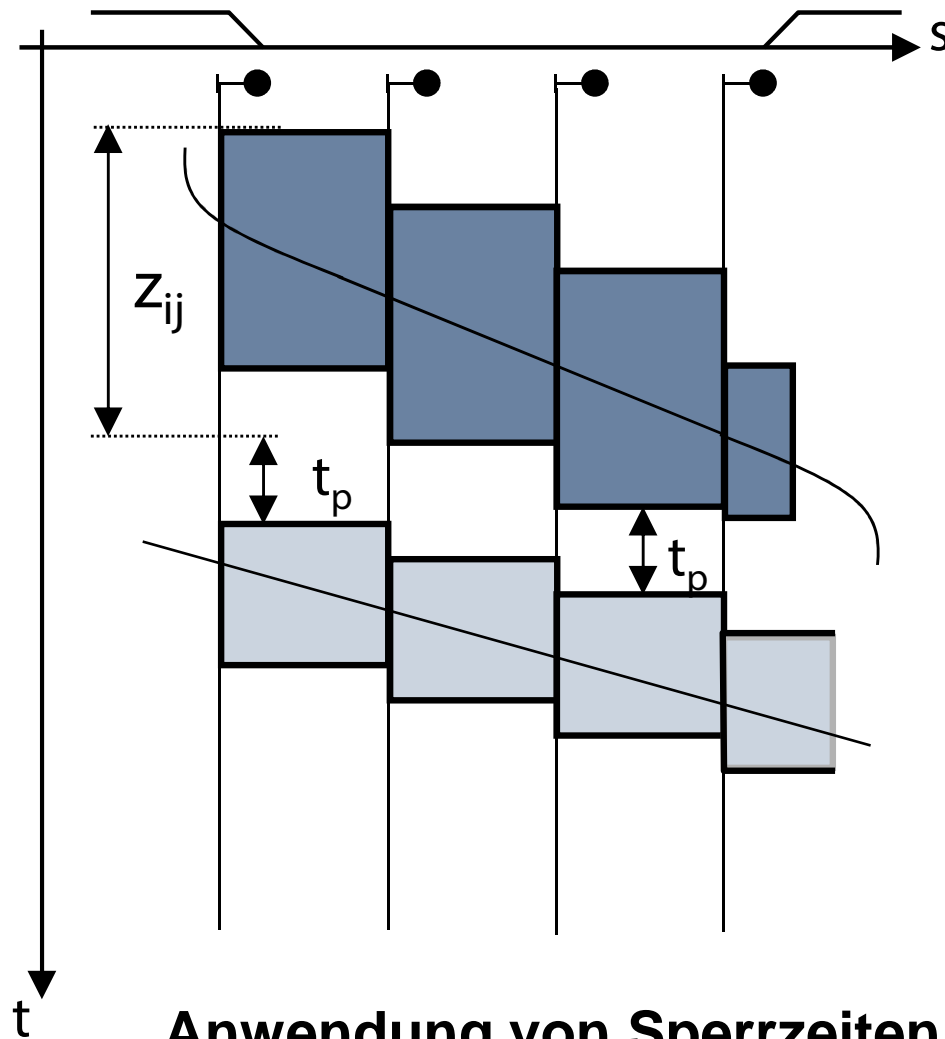


Der Kapazitätsverbrauch einer Zugfahrt lässt sich anhand der Belegungszeiten darstellen



Physikalische Belegung
+ Räumfahrzeit
+ Annäherungsfahrzeit
+ Schaltzeiten
+ Reaktionszeiten

= Sperrzeit



**Anwendung von Sperrzeiten und Mindestzugfolgezeiten
ist international anerkannt.**

Anwendungsfälle von Sperrzeiten

- Exakte Bestimmung des Kapazitätskonsums
- Ermittlung der Auswirkung bei Infrastrukturänderungen

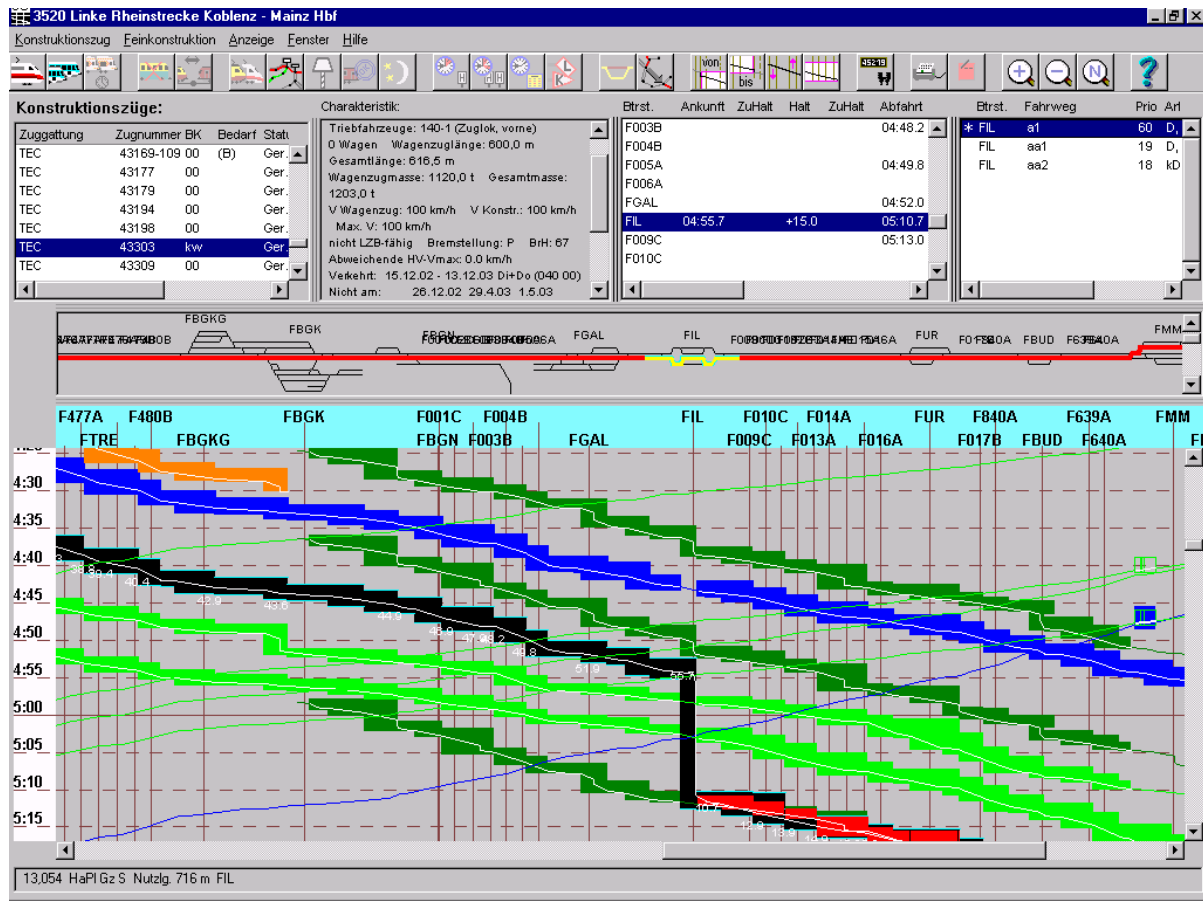
Kapazität ist eine Funktion von Mindestzugfolgezeiten

- STRELE-Formel (Wartezeiten)
- UIC Code 406

Verfahren zur Kapazitätsermittlung

Stand der Technik zur Kapazitätsermittlung

- Sämtliche Verfahren basieren auf der Sperrzeitentheorie:
 - Konstruktive Methode



Verfahren zur Kapazitätsermittlung

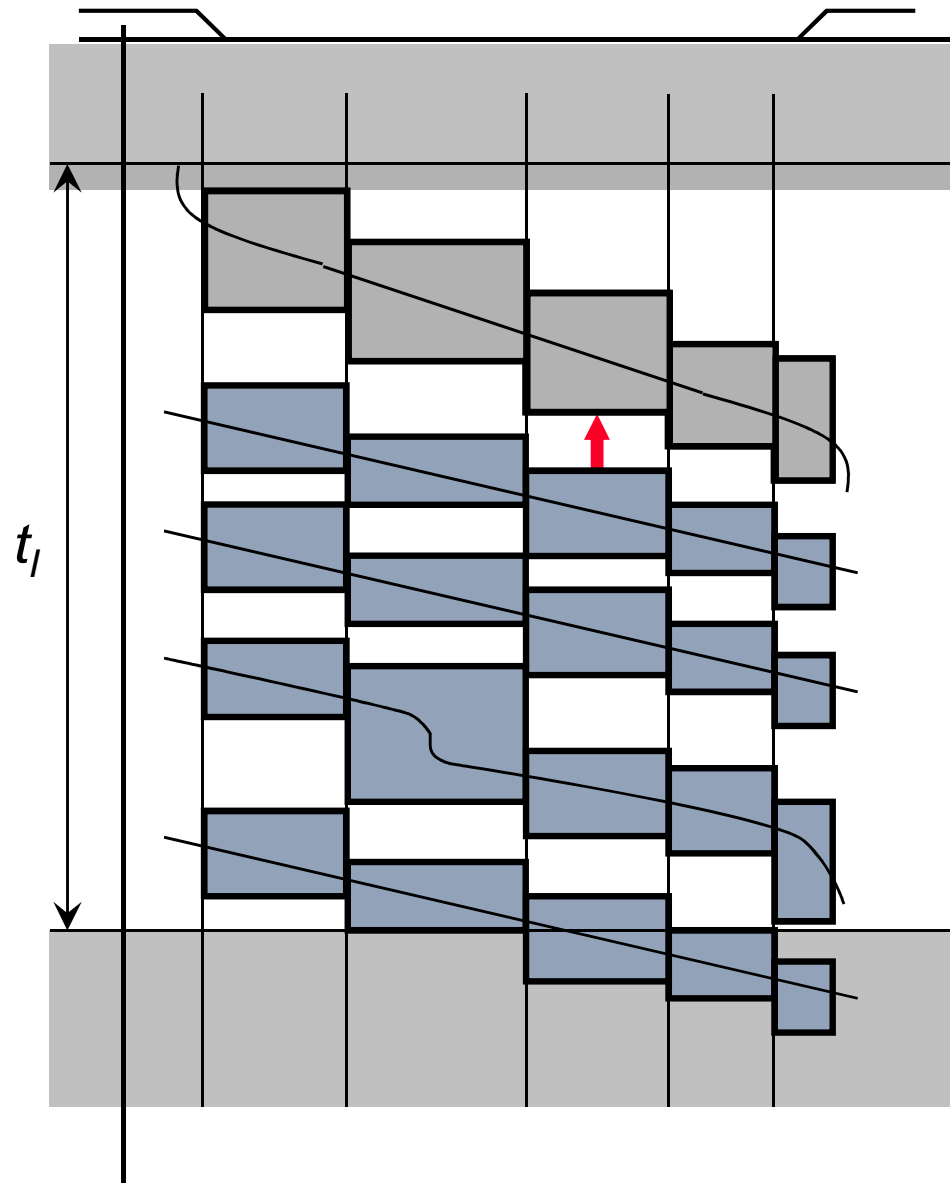
Stand der Technik zur Kapazitätsermittlung

- Sämtliche Verfahren basieren auf der Sperrzeitentheorie:
 - Konstruktive Methode
 - Verkettung nach UIC Code 406
- Zusammenschieben der Sperrzeitentreppen bis diese sich berühren, aber nicht überschneiden
- Ermittlung des Belegungsgrads: $\rho = \frac{t_k}{t_I}$
- Empfohlener Belegungsgrad: $\rho = 0.6 \dots 0.85$

Grenzwerte nach UIC Code 406

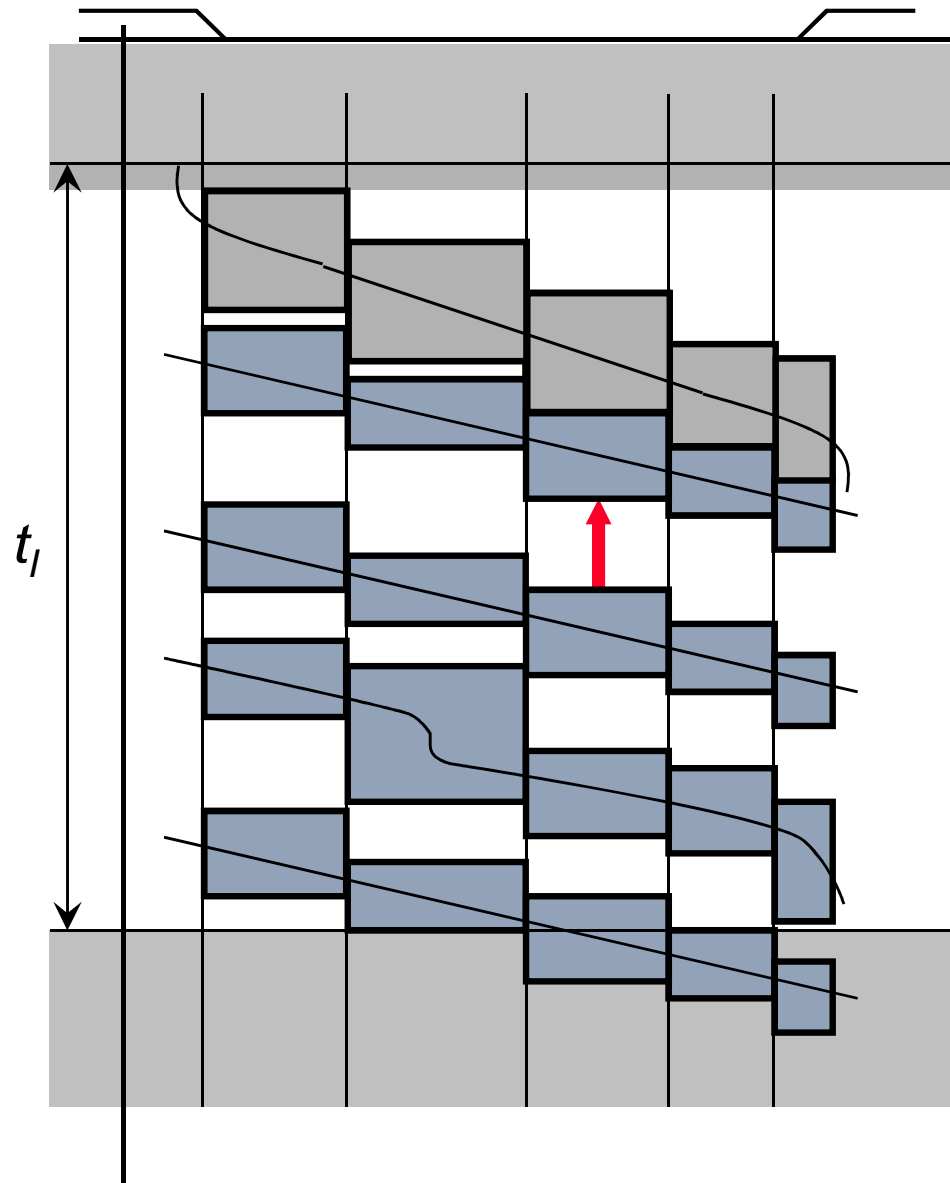
Streckentyp	Spitzenstunde	Tageszeitraum
S-Bahn-Strecke	85 %	70 %
Hochgeschwindigkeitsstrecke	75 %	60 %
Mischverkehrsstrecke	75 %	60 %

Verfahren zur Kapazitätsermittlung



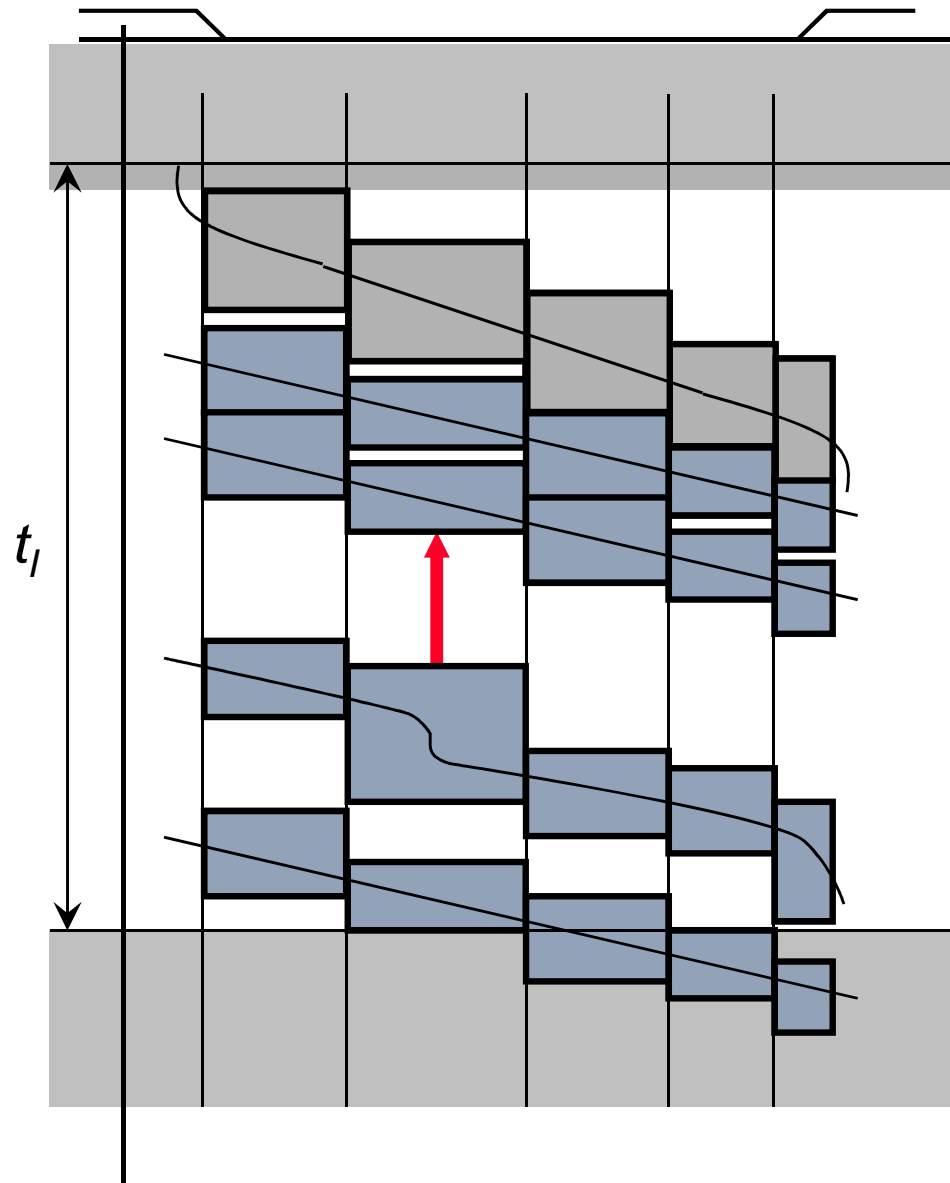
- Basis:
 - Fahrplan eines Streckenabschnitts
 - Untersuchungszeitraum
- Die erste Sperrzeitentreppe wird fixiert
- Übrige Sperrzeitentreppen:
 - Ermittlung der Pufferzeiten
 - Verschieben der Sperrzeiten nach oben

Verfahren zur Kapazitätsermittlung



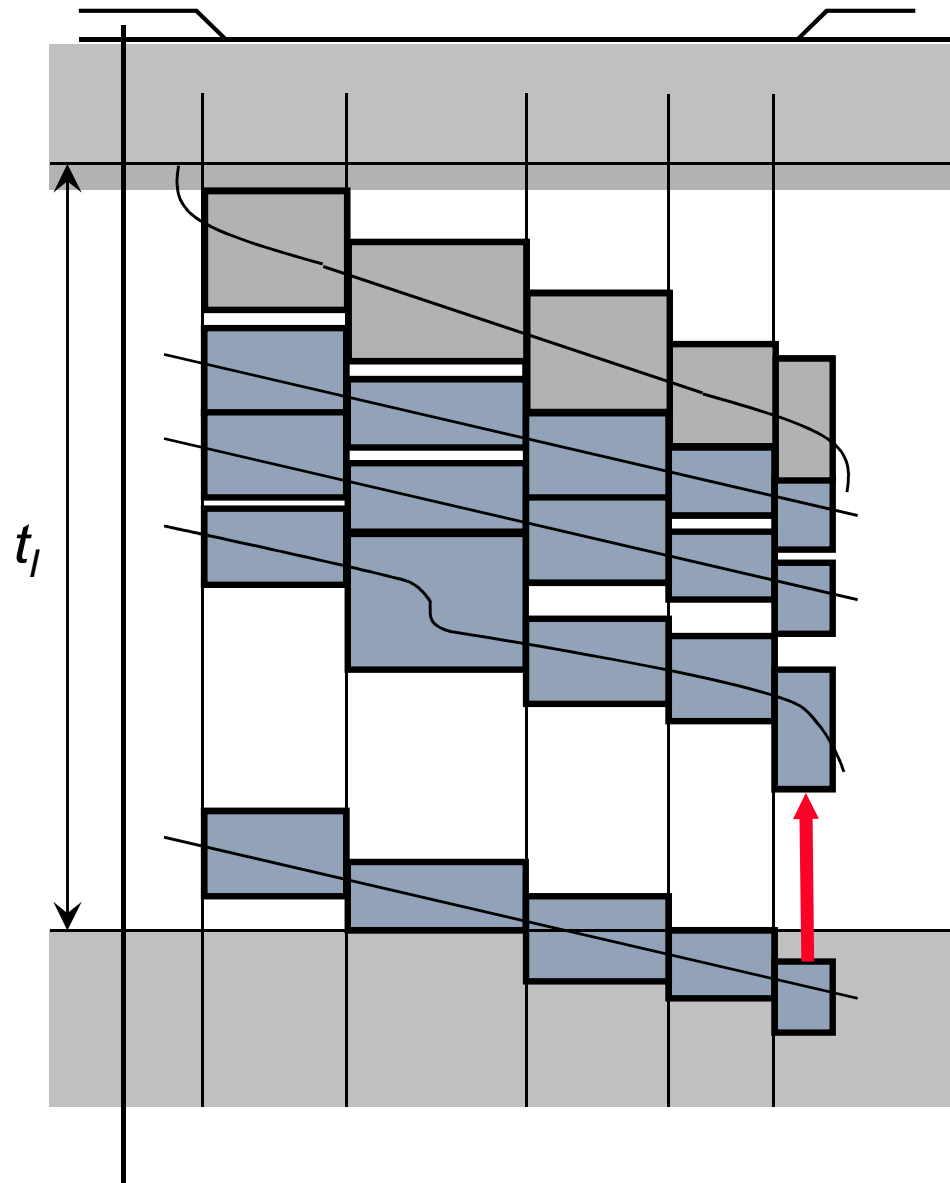
- Basis:
 - Fahrplan eines Streckenabschnitts
 - Untersuchungszeitraum
- Die erste Sperrzeitentreppe wird fixiert
- Übrige Sperrzeitentreppen:
 - Ermittlung der Pufferzeiten
 - Verschieben der Sperrzeiten nach oben

Verfahren zur Kapazitätsermittlung



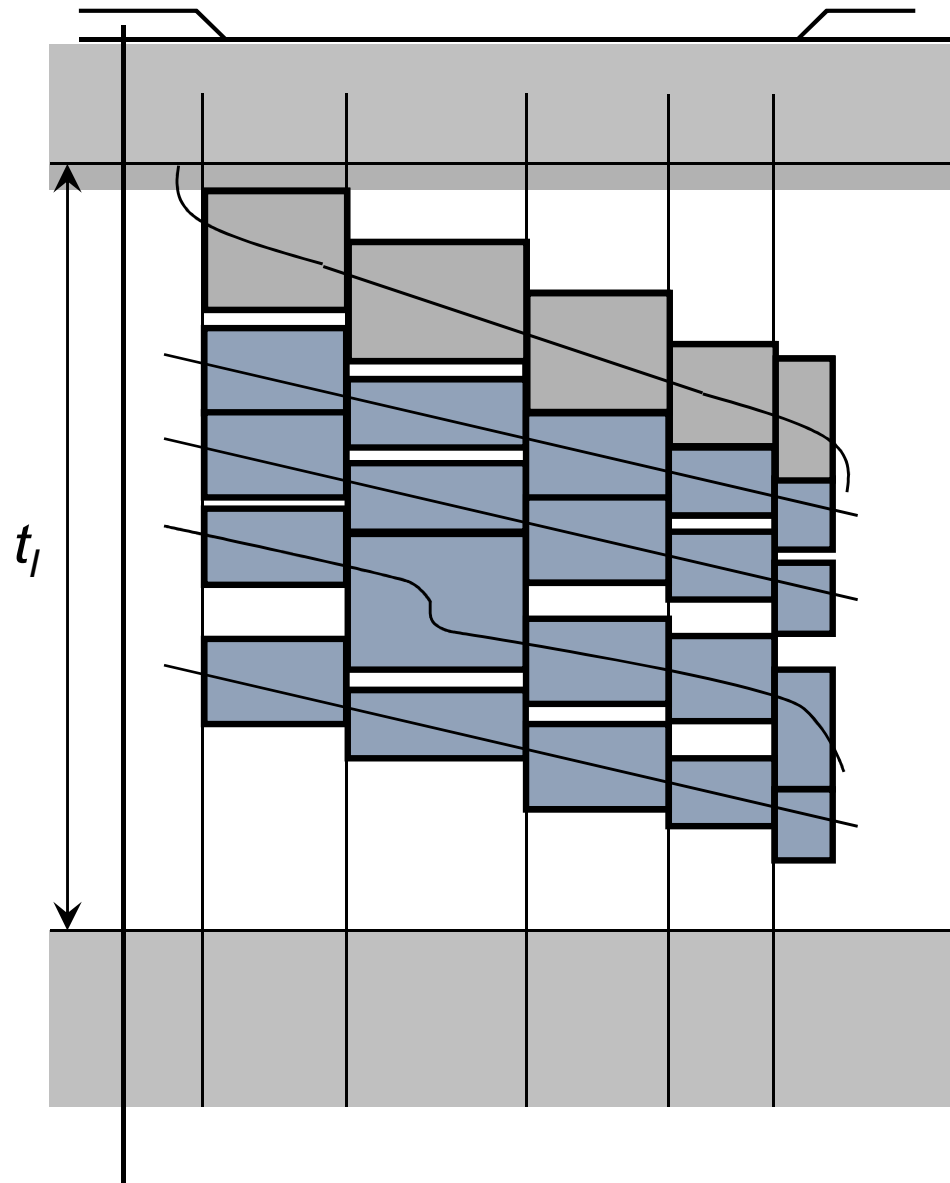
- Basis:
 - Fahrplan eines Streckenabschnitts
 - Untersuchungszeitraum
- Die erste Sperrzeitentreppe wird fixiert
- Übrige Sperrzeitentreppen:
 - Ermittlung der Pufferzeiten
 - Verschieben der Sperrzeiten nach oben

Verfahren zur Kapazitätsermittlung



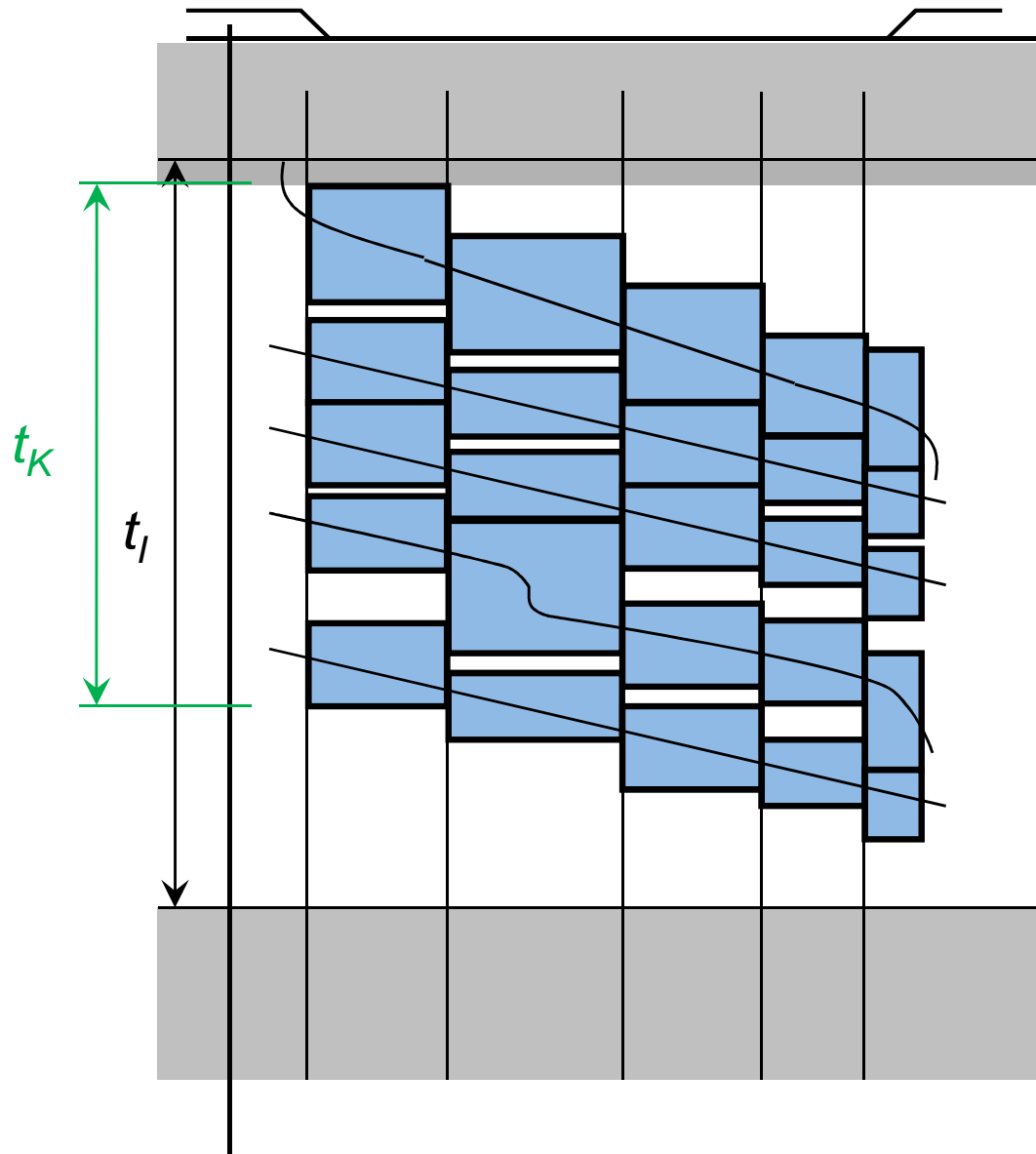
- Basis:
 - Fahrplan eines Streckenabschnitts
 - Untersuchungszeitraum
- Die erste Sperrzeitentreppe wird fixiert
- Übrige Sperrzeitentreppen:
 - Ermittlung der Pufferzeiten
 - Verschieben der Sperrzeiten nach oben

Verfahren zur Kapazitätsermittlung



- Basis:
 - Fahrplan eines Streckenabschnitts
 - Untersuchungszeitraum
- Die erste Sperrzeitentreppe wird fixiert
- Übrige Sperrzeitentreppen:
 - Ermittlung der Pufferzeiten
 - Verschieben der Sperrzeiten nach oben

Verfahren zur Kapazitätsermittlung



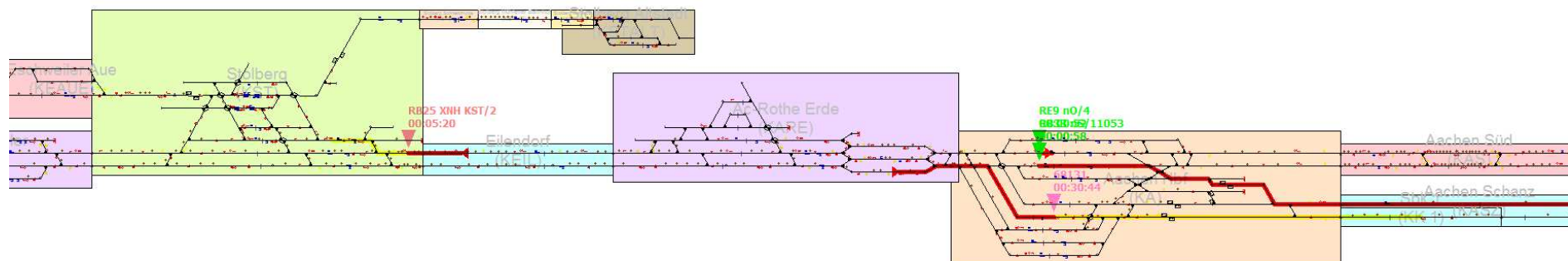
- Basis:
 - Fahrplan eines Streckenabschnitts
 - Untersuchungszeitraum
- Die erste Sperrzeitentreppe wird fixiert
- Übrige Sperrzeitentreppen:
 - Ermittlung der Pufferzeiten
 - Verschieben der Sperrzeiten nach oben
- Verketteter Belegungsgrad:

$$\rho = \frac{t_k}{t_l}$$

Verfahren zur Kapazitätsermittlung

Stand der Technik zur Kapazitätsermittlung

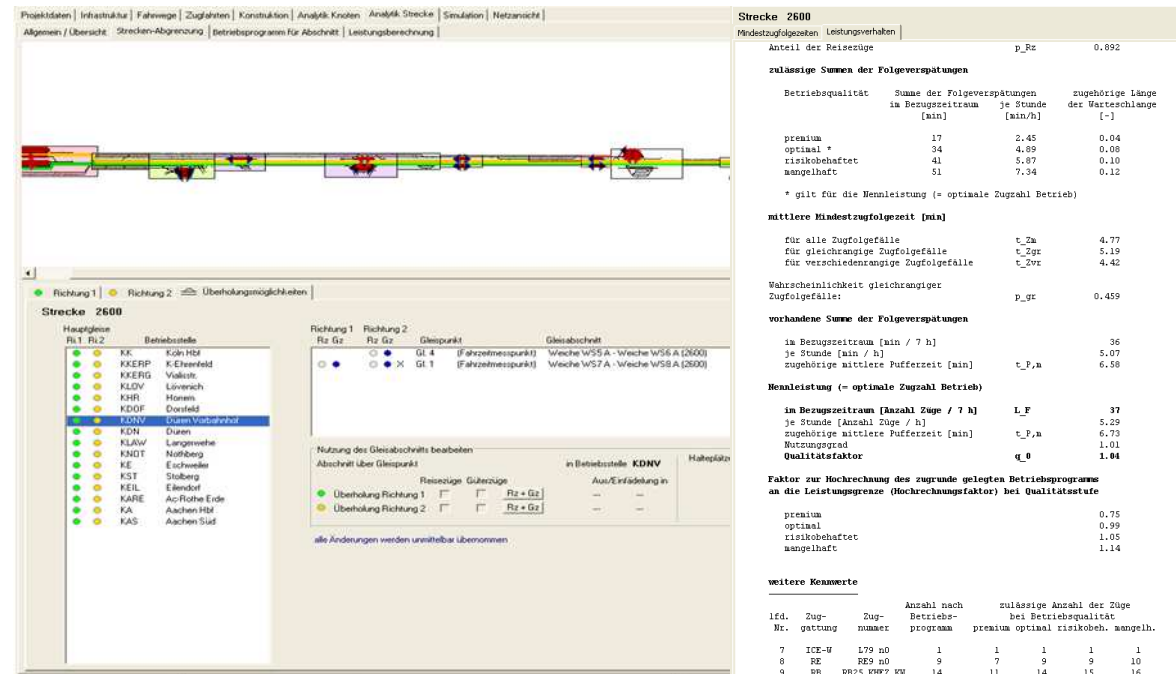
- Sämtliche Verfahren basieren auf der Sperrzeitentheorie:
 - Konstruktive Methode
 - Verkettung nach UIC Code 406
 - Simulation



Verfahren zur Kapazitätsermittlung

Stand der Technik zur Kapazitätsermittlung

- Sämtliche Verfahren basieren auf der Sperrzeitentheorie:
 - Konstruktive Methode
 - Verkettung nach UIC Code 406
 - Simulation
 - Analytische Berechnung



Strecke 2600

Mindestzugfolgen | Leistungsverhalten

Anteil der Reisezüge: p_{Rz} 0.892

zulässige Summe der Folgeverspätungen

Betriebsqualität	Summe der Folgeverspätungen im Bezugszeitraum [min]	je Stunde [min/h]	zugehörige Länge der Werteschlange [-]
premium	17	2.45	0.04
optimal *	34	4.89	0.08
risikobehaftet	41	5.87	0.10
mangelhaft	51	7.34	0.12

* gilt für die Nennleistung (= optimale Zugzahl Betrieb)

mittlere Mindestzugfolgezeit [min]

	t_{Za}	
für alle Zugfolgefälle	4.77	
für gleichrangige Zugfolgefälle	5.19	
für verschiedenrangige Zugfolgefälle	4.42	

Wahrscheinlichkeit gleichrangiger Zugfolgefälle: p_{gr} 0.459

vorhandene Summe der Folgeverspätungen

im Bezugszeitraum [min / 7 h]	
je Stunde [min / h]	36
zugehörige mittlere Pufferzeit [min]	5.07
	$t_{F,n}$ 6.58

Nennleistung (= optimale Zugzahl Betrieb)

im Bezugszeitraum [Anzahl Züge / h]	L_F	
je Stunde [Anzahl Züge / h]	37	5.29
zugehörige mittlere Pufferzeit [min]	$t_{F,n}$	6.73
Nutzungsgrad		1.01
Qualitätsfaktor	q_0	1.84

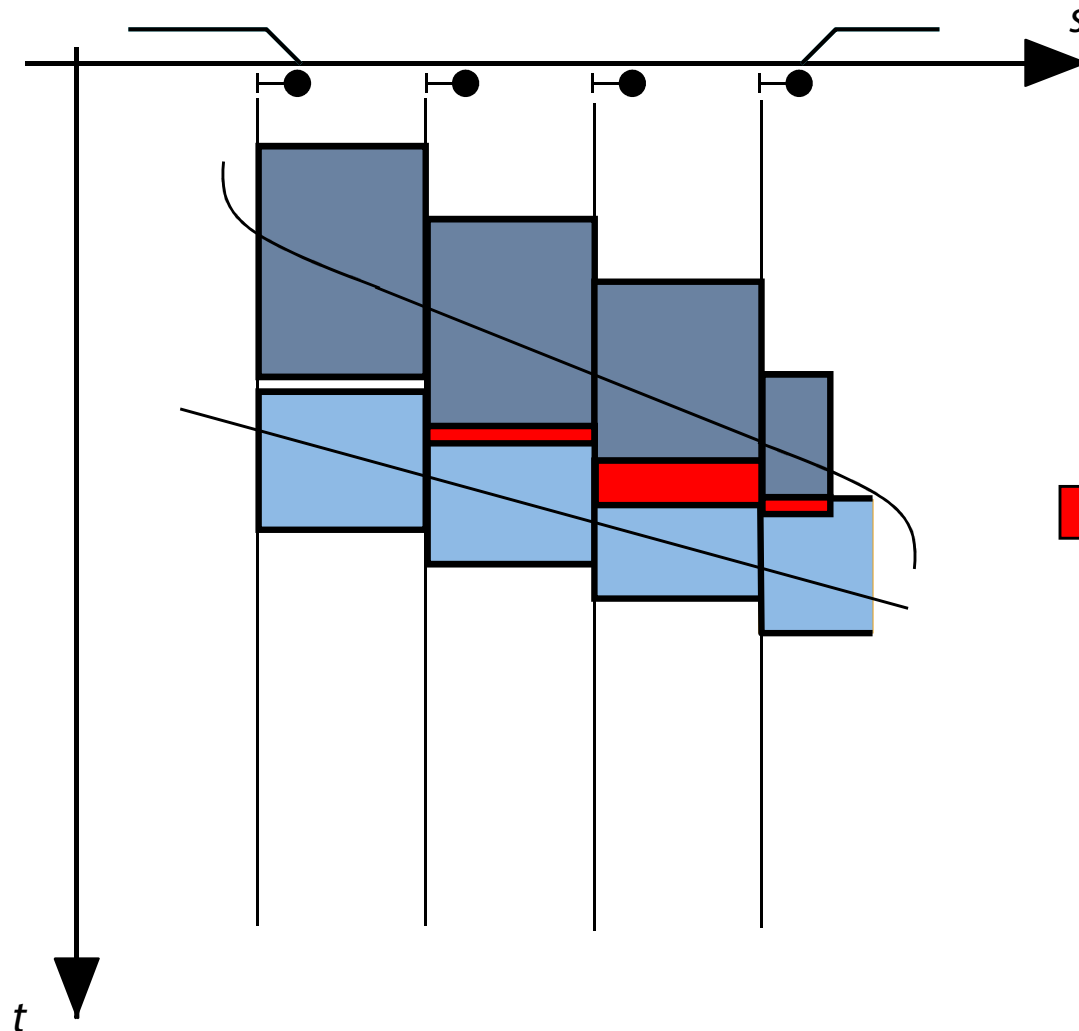
Faktor zur Hochrechnung des zugrunde gelegten Betriebsprogramms an die Leistungsgrenze (Hochrechnungsfaktor) bei Qualitätsstufe

premium	0.75
optimal	0.99
risikobehaftet	1.05
mangelhaft	1.14

weitere Kennwerte

Id.	Zug- Nr.	Zug- gattung	Zug- nummer	Anzahl nach Betriebs- programm	zulässige Anzahl der Züge bei Betriebsqualität	premium	optimal	risikobeh.	mangelh.
7	ICE-W	179	n0	1	1	1	1	1	1
8	RE	REX	n0	9	7	9	9	10	10
9	RB	RB25	RHE2	KW	14	11	14	15	16

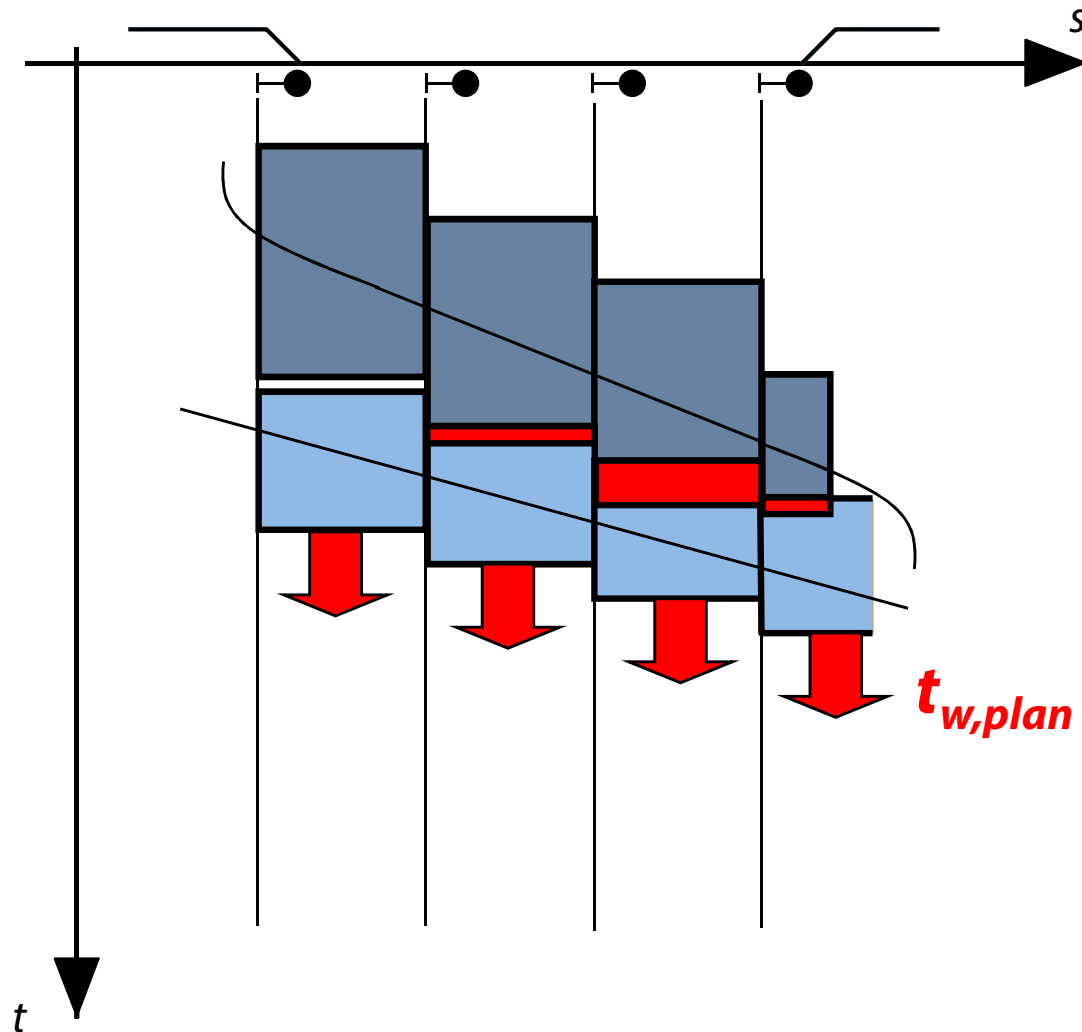
Analytische Kapazitätsberechnung: Wartezeiten als Qualitätsniveau



➔ *Belegungskonflikt*

Konfliktlösung erforderlich!

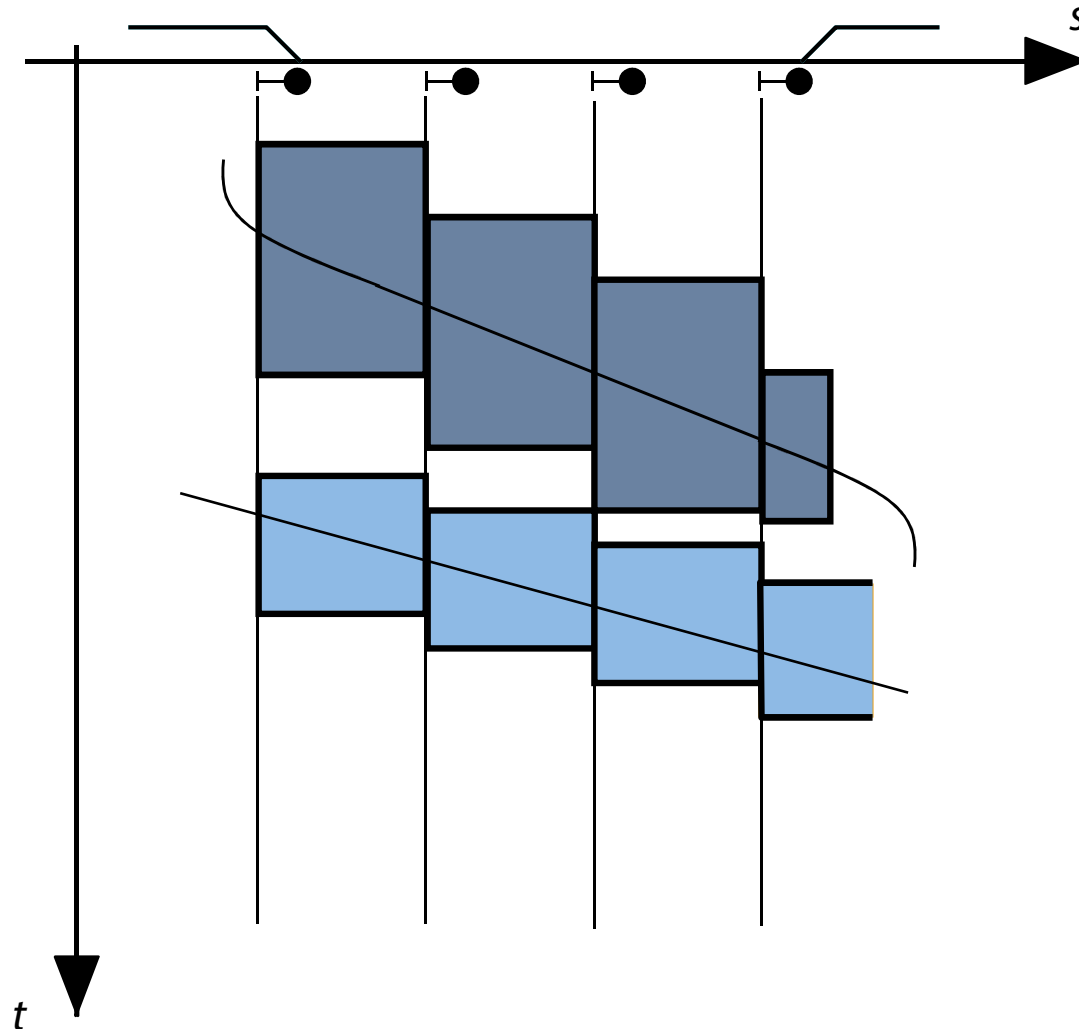
Analytische Kapazitätsberechnung: Wartezeiten als Qualitätsniveau



Mögliche Konfliktlösungen:

1. Verschieben

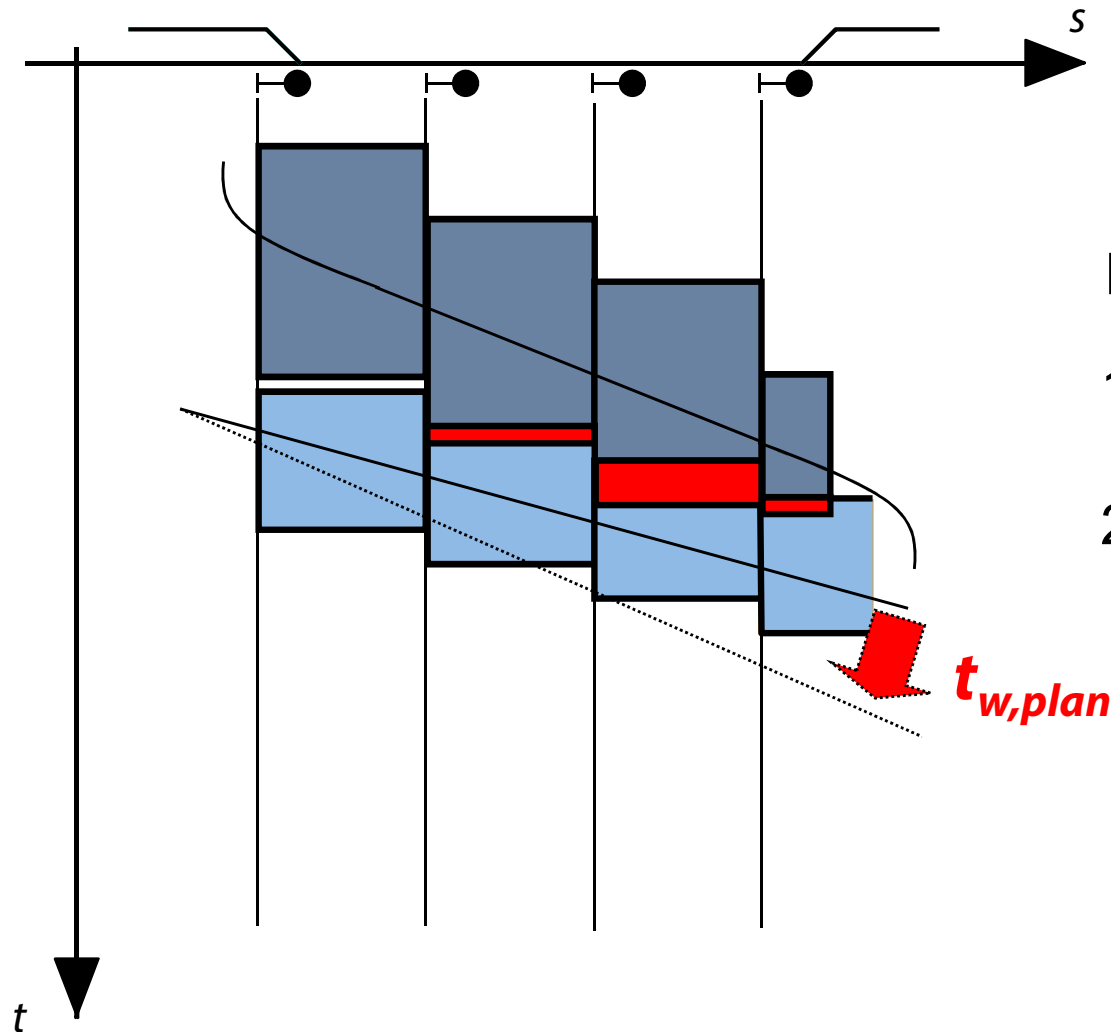
Analytische Kapazitätsberechnung: Wartezeiten als Qualitätsniveau



Mögliche Konfliktlösungen:

1. Verschieben

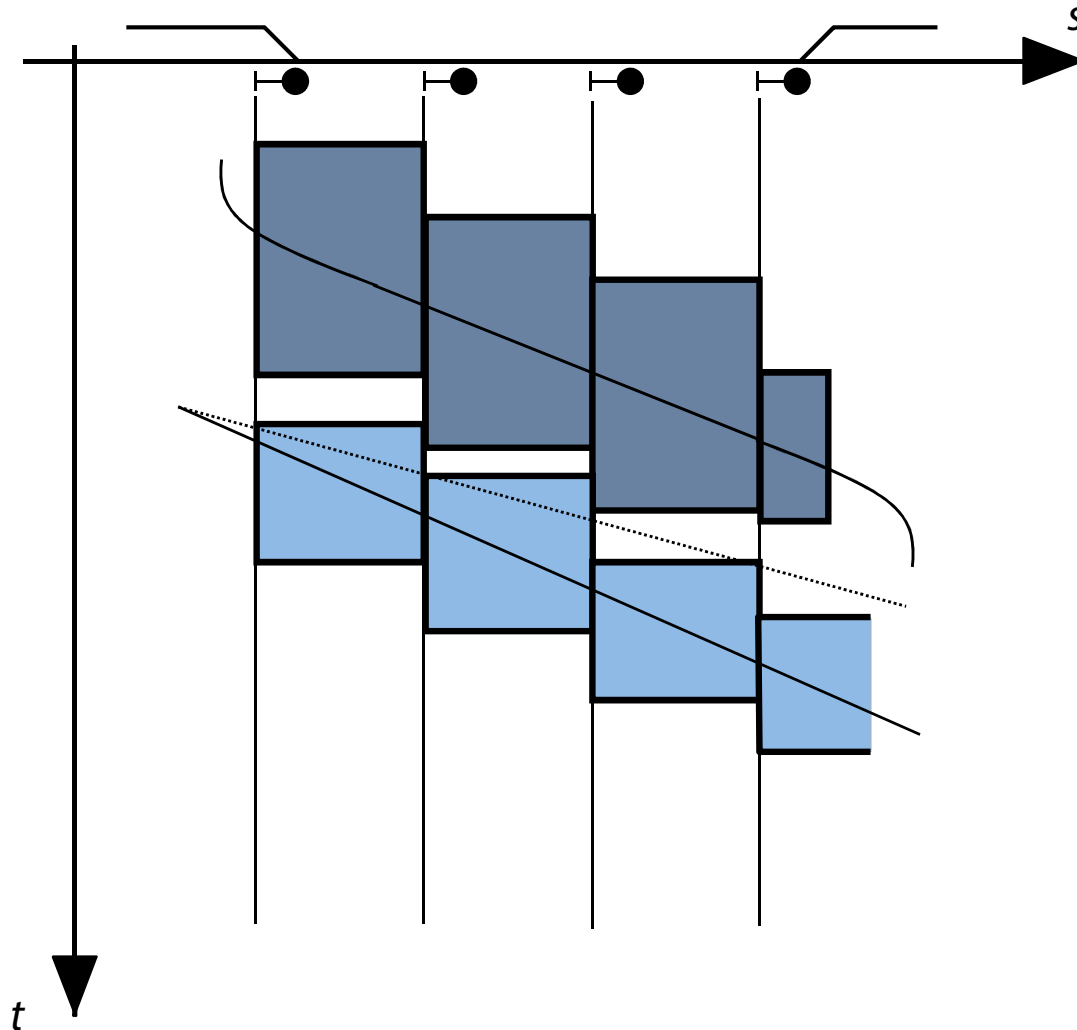
Analytische Kapazitätsberechnung: Wartezeiten als Qualitätsniveau



Mögliche Konfliktlösungen:

1. Verschieben
2. Biegen

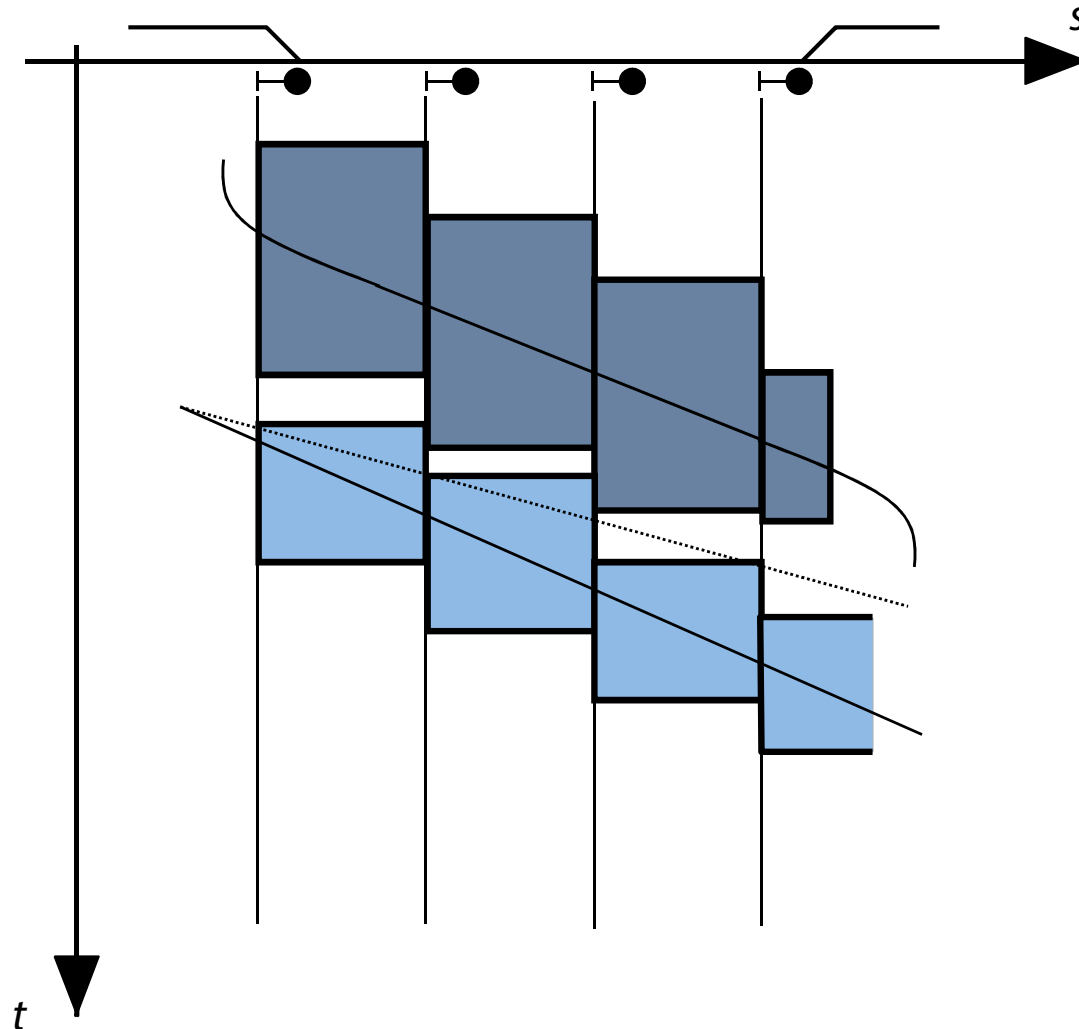
Analytische Kapazitätsberechnung: Wartezeiten als Qualitätsniveau



Mögliche Konfliktlösungen:

1. Verschieben
2. Biegen

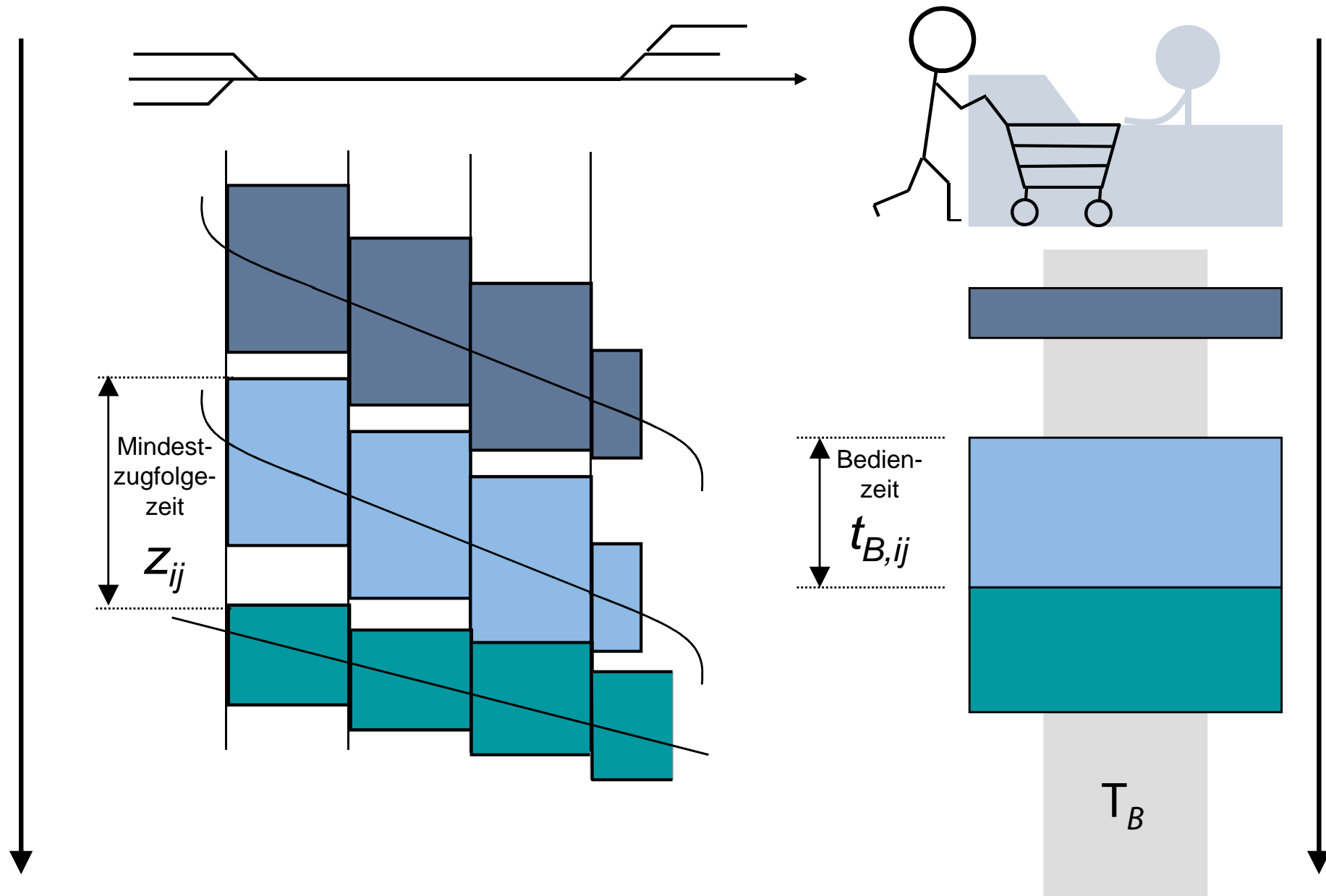
Analytische Kapazitätsberechnung: Wartezeiten als Qualitätsniveau



Mögliche Konfliktlösungen:

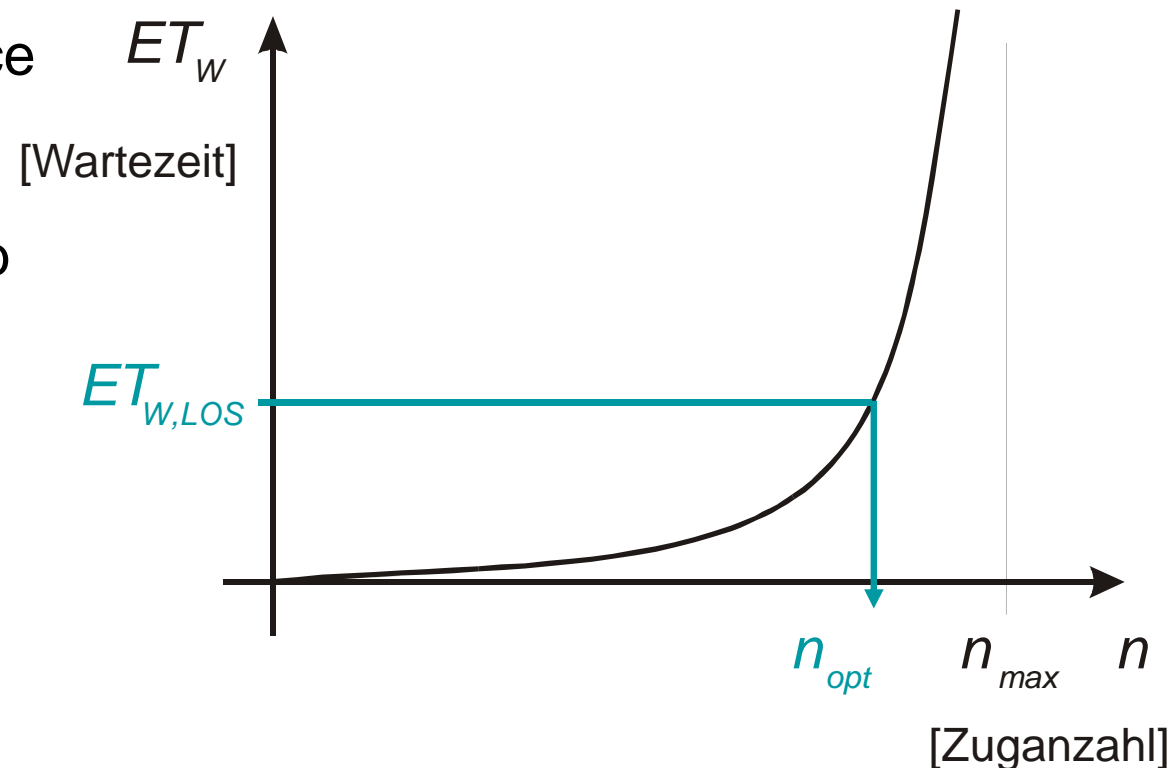
1. Verschieben
2. Biegen
3. Abweichendes Routing

Analytische Kapazitätsberechnung: Abbildung des Bahnbetriebs mittels Warteschlangentheorie



Warteschlangentheorie liefert die praktische Kapazität

- Theoretische Kapazität n_{max}
- Praktische Kapazität n_{opt}
Anzahl der Züge, welche zu einem marktgerechten Level-of-Service $ET_{W,LOS}$ führen
- Anerkannter geeichter Maßstab



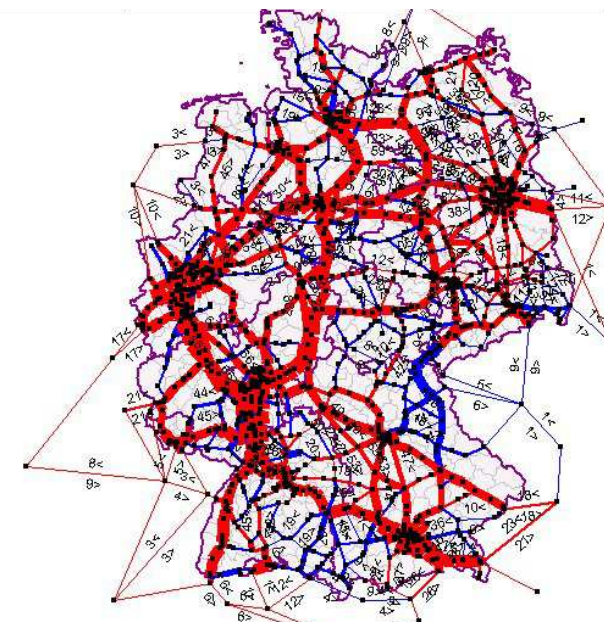
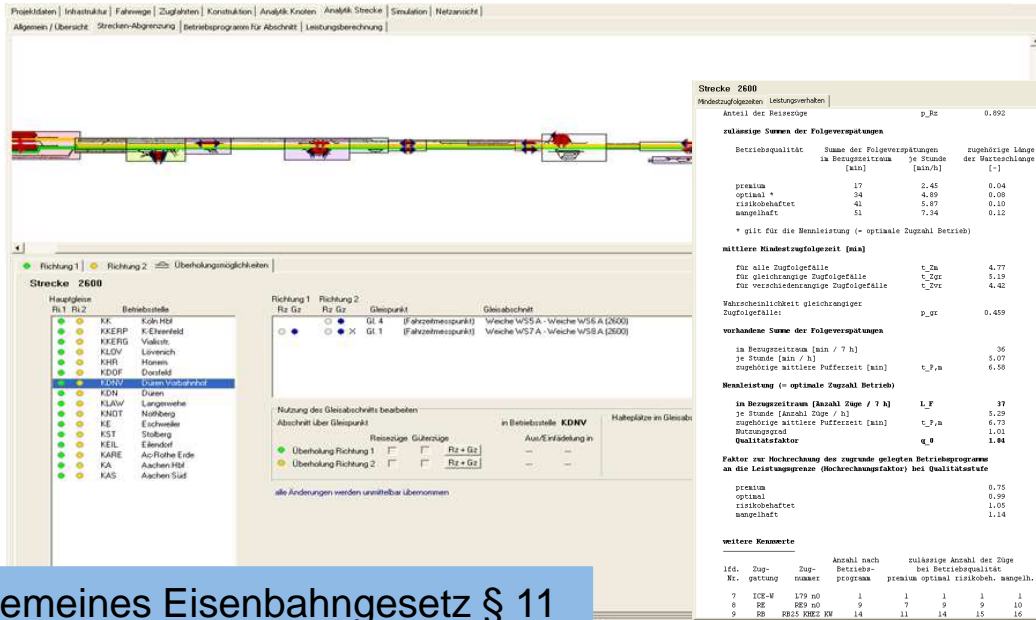
Praktische Kapazität liefert eine verlässliche Aussage über die Infrastruktur

- Nachfrage nach Trassen durch EVU führt zu Wartezeiten ET_W
- n_{opt} beschreibt, wie viele Trassen des Betriebsprogramms mit dem gewünschten Qualitätsniveau $ET_{W,LOS}$ auf der Infrastruktur realisierbar sind.

Stand der Technik zur Kapazitätsermittlung

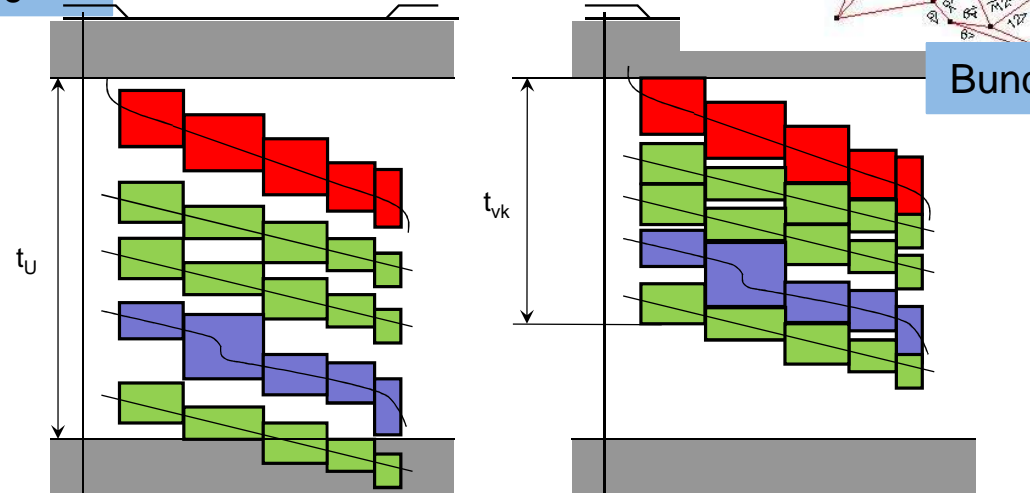
- Sämtliche Verfahren basieren auf der Sperrzeitentheorie:
 - Konstruktive Methode
 - Verkettung nach UIC Code 406
 - Simulation
 - Analytische Berechnung
- Die derzeitigen Anwendungsfelder der Verfahren:
 - Bundesverkehrswegeplanung
 - Allgemeines Eisenbahngesetz § 11 (Verringerung der Kapazität)
 - Bestimmung überlasteter Schienenwege
 - Ermittlung rahmenvertraglich gebundener Schienenwegkapazität (Richtlinie 2001/14/EG sowie § 14a AEG)
 - interne Infrastrukturplanung von EIU

Anwendungsfelder der Verfahren zur Kapazitätsermittlung



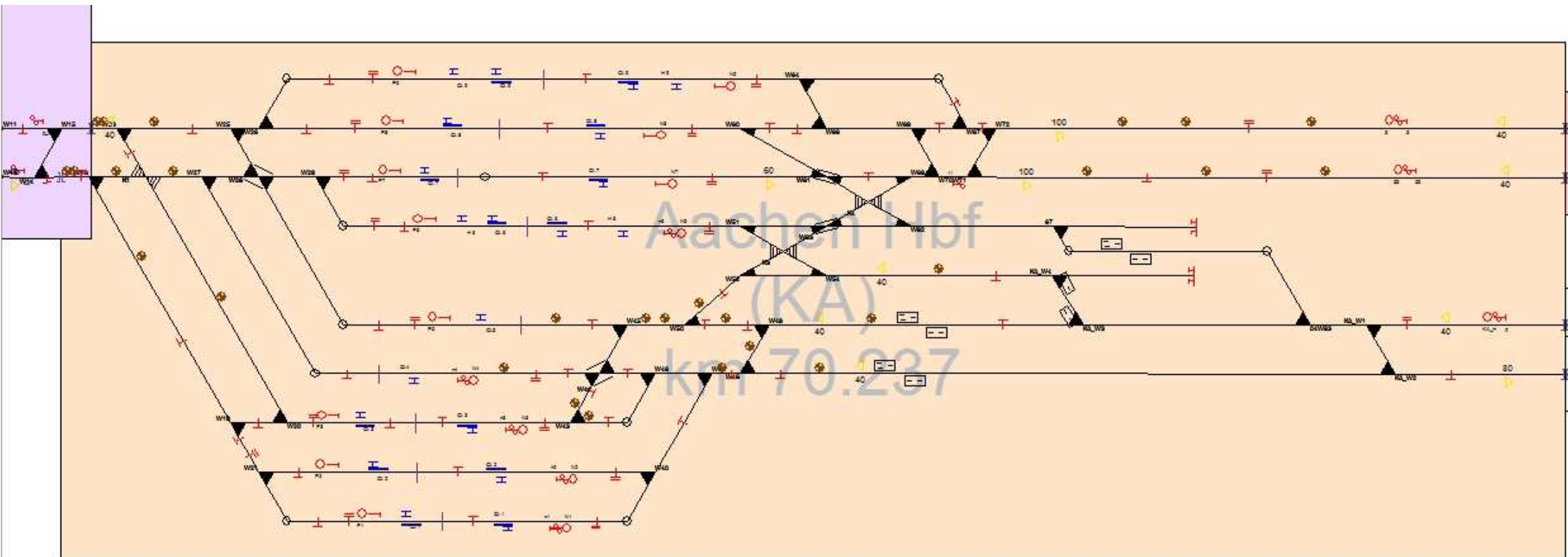
Allgemeines Eisenbahngesetz § 11

Bundesverkehrswegeplanung



Rahmenvertraglich gebundene Schienenwegkapazität (2001/14/EG sowie § 14a AEG)

Anwendungsbeispiel Aachen Hbf: Spurplan



Anwendungsbeispiel Aachen Hbf: Fahrzeit- und Belegungsrechnung

Projektdaten | Infrastruktur | Fahrwege | Zugfahrten | Konstruktion | Analytik Knoten | Analytik Strecke | Simulation | Netzansicht

Suchtext

Suchen Zugfamilien
 Von vorne Modellzüge
 Teilmodellzüge
 Im Namen Einzelzüge
 Teileinzelzüge
 In Bezeichnung Einzelzüge
 Teileinzelzüge

RE RE1 n0/30

Zugdaten | Fahrdynamik | Verspätungsdaten | Laufweg | Gesamtlaufweg | Verknüpfungen | Fahrzeiten | Geschwindigkeitsgraphik

Geschwindigkeitsgraphik

Geschwindigkeitsband anzeigen
 Geschwindigkeit
 Streckengeschwindigkeit
 zul. Geschwindigkeit
 Achsenbeschriftung (Kilometrierung)
 bei Geschwindigkeitswechsel abstands-gleich
 Widerstandsband anzeigen
 Skala

Fahrzeit neu berechnen

NRz RE1 n0/10
 382 [t], 178 [m], 220 [BH], 160 [km/h]
 Traktkon: 146-1.2
 Zus. Halt DS100 Ab

Zeit	Geschwindigkeit [km/h]	Streckengeschwindigkeit [km/h]	zul. Geschwindigkeit [km/h]
0.00	0.0	0.0	0.0
0.07	0.0	0.0	0.0
0.08	100.0	100.0	100.0
0.19	130.0	130.0	130.0
0.20	160.0	160.0	160.0
0.22	160.0	160.0	160.0
0.23	160.0	160.0	160.0
0.24	160.0	160.0	160.0
0.25	160.0	160.0	160.0
0.26	160.0	160.0	160.0
0.27	160.0	160.0	160.0
0.28	160.0	160.0	160.0
0.29	160.0	160.0	160.0
0.30	160.0	160.0	160.0
0.31	160.0	160.0	160.0
0.32	160.0	160.0	160.0
0.33	160.0	160.0	160.0
0.34	160.0	160.0	160.0
0.35	160.0	160.0	160.0
0.36	160.0	160.0	160.0
0.37	160.0	160.0	160.0
0.38	160.0	160.0	160.0
0.39	160.0	160.0	160.0
0.40	160.0	160.0	160.0
0.41	160.0	160.0	160.0
0.42	160.0	160.0	160.0
0.43	160.0	160.0	160.0
0.44	160.0	160.0	160.0
0.45	160.0	160.0	160.0
0.46	160.0	160.0	160.0
0.47	160.0	160.0	160.0
0.48	160.0	160.0	160.0
0.49	160.0	160.0	160.0
0.50	160.0	160.0	160.0
0.51	160.0	160.0	160.0
0.52	160.0	160.0	160.0
0.53	160.0	160.0	160.0
0.54	160.0	160.0	160.0
0.55	160.0	160.0	160.0
0.56	160.0	160.0	160.0
0.57	160.0	160.0	160.0
0.58	160.0	160.0	160.0
0.59	160.0	160.0	160.0
0.60	160.0	160.0	160.0
0.61	160.0	160.0	160.0
0.62	160.0	160.0	160.0
0.63	160.0	160.0	160.0
0.64	160.0	160.0	160.0
0.65	160.0	160.0	160.0
0.66	160.0	160.0	160.0
0.67	160.0	160.0	160.0
0.68	160.0	160.0	160.0
0.69	160.0	160.0	160.0
0.70	160.0	160.0	160.0
0.71	160.0	160.0	160.0
0.72	160.0	160.0	160.0
0.73	160.0	160.0	160.0
0.74	160.0	160.0	160.0
0.75	160.0	160.0	160.0
0.76	160.0	160.0	160.0
0.77	160.0	160.0	160.0
0.78	160.0	160.0	160.0
0.79	160.0	160.0	160.0
0.80	160.0	160.0	160.0
0.81	160.0	160.0	160.0
0.82	160.0	160.0	160.0
0.83	160.0	160.0	160.0
0.84	160.0	160.0	160.0
0.85	160.0	160.0	160.0
0.86	160.0	160.0	160.0
0.87	160.0	160.0	160.0
0.88	160.0	160.0	160.0
0.89	160.0	160.0	160.0
0.90	160.0	160.0	160.0
0.91	160.0	160.0	160.0
0.92	160.0	160.0	160.0
0.93	160.0	160.0	160.0
0.94	160.0	160.0	160.0
0.95	160.0	160.0	160.0
0.96	160.0	160.0	160.0
0.97	160.0	160.0	160.0
0.98	160.0	160.0	160.0
0.99	160.0	160.0	160.0
1.00	160.0	160.0	160.0

Betriebsstelle KA [Aachen Hbf]

Haltezeiten
 Haltezeit: 00:01:00
 Mindesthaltezeit: 00:01:00

Wunschfahrzeit
 Abfahrt (akt. BS): 06:56:00

Abfahrts-/Durchfahrzeiten
 Abfahrt (akt. BS): 06:56:00
 2. Betriebsstelle: ...
 Abfahrt (2. BS): ...

Biegen (akt. BS)
 Zuschlag [%/min]: 0 00:00:00

Biegen (Eisenbahänderung)
 Bis Betriebsstelle: ...
 Absolute Reisezeit: ...
 Zusatzzeit [min]: ...

Fahrwegänderung
 Neuer Fahrweg: West-P2* (75)

Annehmen Verwerfen Vorschau
 Als Wunschlage Auf Wunschlage

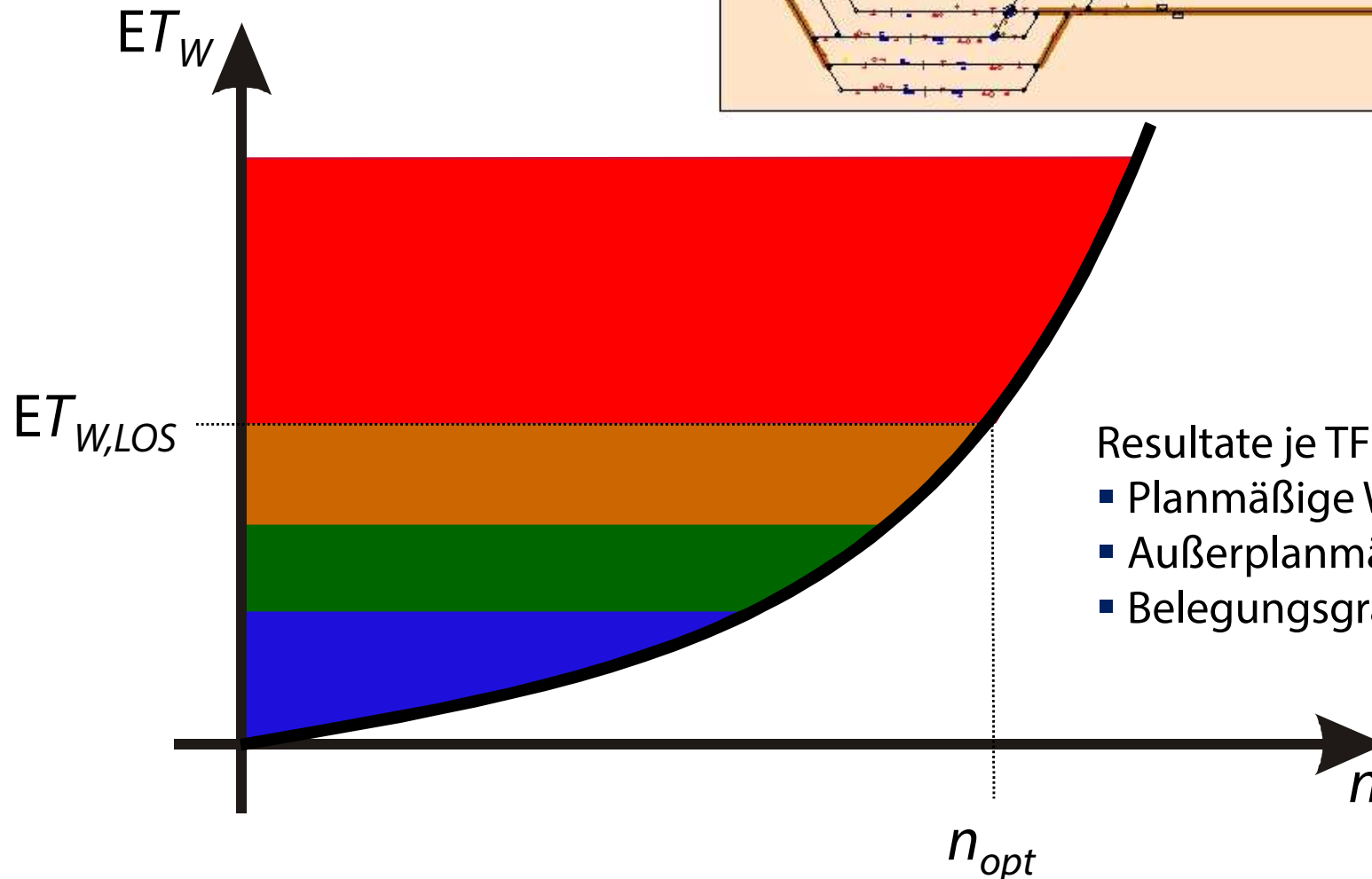
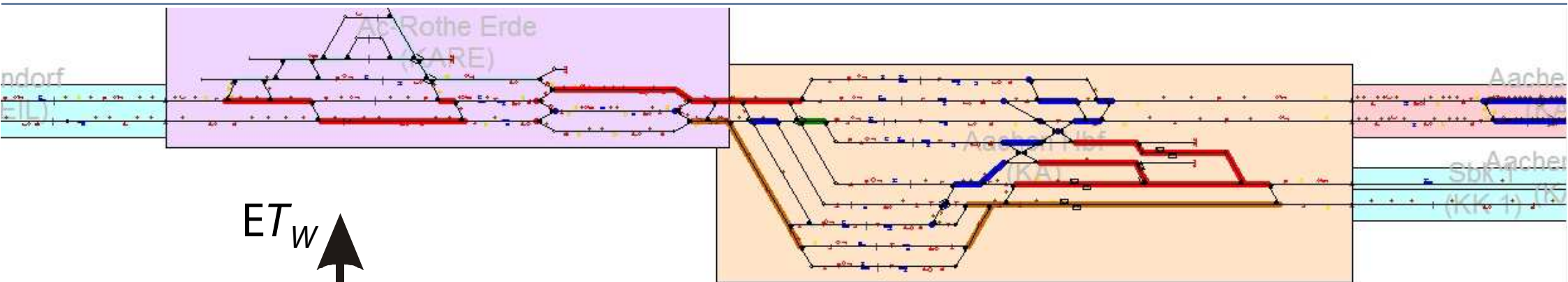
Wunschfahrzeit setzen
 Mindesthaltezeiten setzen
 Biegezuschläge löschen
 Mindestübergangszeiten setzen
 Betriebsstelle entfernen

Alle Trassen anpassen

Zeit-Weg-Diagramm Gleisbelegungsplan

KKERG KLOV KKKO KHR KSID KDOF KBUI KDNV KDN KDEW KLAU KNOT KE KST KEIL KARE

Anwendungsbeispiel Aachen Hbf: Identifikation von Engpässen



Resultate je TFK:

- Planmäßige Wartezeit
- Außerplanmäßige Wartezeit
- Belegungsgrad (UIC Code 406)

Fazit

- Die Kapazität der Eisenbahninfrastruktur steht im Rahmen verkehrspolitischer Fragestellungen oftmals im Fokus.
- Insbesondere in Zeiten knapper Kassen ist es von Interesse, wo aufgrund des prognostizierten Verkehrswachstums die derzeitige Kapazität zukünftig nicht ausreichen wird.
- Gleichzeitig stellt der Erhalt des Bestandsnetzes eine große Herausforderung dar.
- Die prognostizierte Nachfrage und die vorhandene bzw. zukünftige Kapazität der Eisenbahninfrastruktur sind dabei die wesentlichen Messgrößen zur Priorisierung von Neubau oder Ausbaumaßnahmen.
- Mit Hilfe eisenbahnbetriebswissenschaftlicher Methoden gelingt es,
 - die zur Verfügung stehenden Kapazitäten zu ermitteln
 - Vorhandene Engpässe zu identifizieren und
 - Maßnahmen zu deren Beseitigung zu bewerten.