



Betriebsprozesse und Betriebsplanung im Öffentlichen Verkehr
Betriebsprozesse und Betriebsplanung im öffentlichen
Personenverkehr
Betriebsplanung im öffentlichen Verkehr
Öffentliche Verkehrssysteme
Betriebsplanung Öffentlicher Verkehrssysteme

Dipl.-Ing. Steffen Dutsch



Betriebsprozesse und Betriebsplanung im Öffentlichen Verkehr

Betriebsprozesse und Betriebsplanung im öffentlichen Personenverkehr

Betriebsplanung im öffentlichen Verkehr

Öffentliche Verkehrssysteme

Betriebsplanung Öffentlicher Verkehrssysteme

VI 308-1; VI 621-1; VI 510; BSI 25; Wing-BA-19-18; D-WW-ING-1707; MA-WW-ING-1707

- 1. Öffentliche Nahverkehrsmittel und ihre Verbreitung**
- 2. Zeitelemente**
- 3. Linienplanung**
- 4. Fahrplanung**
- 5. Wagenlaufplanung (VI 308-1; 621-1)**
- 5. Leistungsfähigkeit und –verhalten (VI 510)**
- 6. Dienstplanung**
- 7. Integrierte Planung**
- 8. Streckennetzplanung**

Fachbücher:

- [FIE 11] Fiedler, J.: Bahnwesen – Planung, Bau und Betrieb von Eisenbahnen, S-, U-, Stadt- und Straßenbahnen.- Düsseldorf: Werner Verlag, 2011 (6. Auflage)
- [POT 80] Potthoff, G.: Verkehrsströmungslehre, Band 1 - Die Zugfolge auf Strecken und in Bahnhöfen.- Berlin: Transpress VEB Verlag für Verkehrswesen, 1980 (3. Auflage)
- [REI 12] Reinhardt, W.: Öffentlicher Personennahverkehr – Technik – rechtliche und betriebswirtschaftliche Grundlagen.- Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2012
- [RÜG 86] Rüger, S.: Transporttechnologie Städtischer öffentlicher Personenverkehr.- Berlin: Transpress VEB Verlag für Verkehrswesen, 1986 (3. Auflage)
- [SCH 12] Scholz, G.: IT-Systeme für Verkehrsunternehmen – Informationstechnik im öffentlichen Personenverkehr.- Heidelberg: dpunkt.verlag GmbH, 2012
- [VDV 01] Betriebsausschuss des Verbandes Deutscher Verkehrsunternehmen (VDV): Der Straßenbahner – Handbuch für U-Bahner, Stadt- und Straßenbahner.- Köln: Verband Deutscher Verkehrsunternehmen, 2001
- [VDV 10] VDV-Akademie: Die Fachkraft im Fahrbetrieb – Lehrbuch und Nachschlagewerk für die betriebliche und schulische Ausbildung.- München: Verlag Heinrich Vogel, 2010
- [VUC 05] Vuchic, V. R.: Urban Transit - Operation, Planning and Economics.- John Wiley & Sons, 2005
- [WEN 03] Wende, D.: Fahrdynamik des Schienenverkehrs.- Wiesbaden: B. G. Teubner Verlag, 2003

Fachzeitschriften:

Der Nahverkehr

Organ des Verbandes Deutscher Verkehrsunternehmen (VDV)

Hamburg: DVV Media Group GmbH

Internationales Verkehrswesen

Organ der Deutschen Verkehrswissenschaftlichen Gesellschaft (DVWG)

Hamburg: DVV Media Group GmbH

Nahverkehrspraxis

Dortmund: Fachverlag Dr. H. Arnold

Stadtverkehr

Berlin: Erich Schmidt Verlag

UITP Public Transport International

Organ der Union Internationale des Transports publics (UITP)

Bruxelles: Union Internationale des Transports publics

Verkehr und Technik

Berlin: Erich Schmidt Verlag

Blickpunkt Straßenbahn

Berlin: Arbeitsgemeinschaft Blickpunkt Straßenbahn e.V.

Internet:

www.forschungsinformationssystem.de

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI)

www.newstix.de

Unabhängiger, branchenspezifischer Informationsanbieter für den ÖPNV

4. Fahrplanung

4.1. Einführung

- 4.1.1. Einordnung in die Betriebsplanung
- 4.1.2. Definition und Einteilung von Fahrplänen
- 4.1.3. Fahrplanformen
- 4.1.4. Darstellungsformen
- 4.1.5. Fahrplanelemente
- 4.1.6. Fahrplanverknüpfungen

4.2. Fahrplanelemente einer Fahrt

- 4.2.1 In- und Output der Fahrplanung
- 4.2.2 Übliche Eingangsgrößen

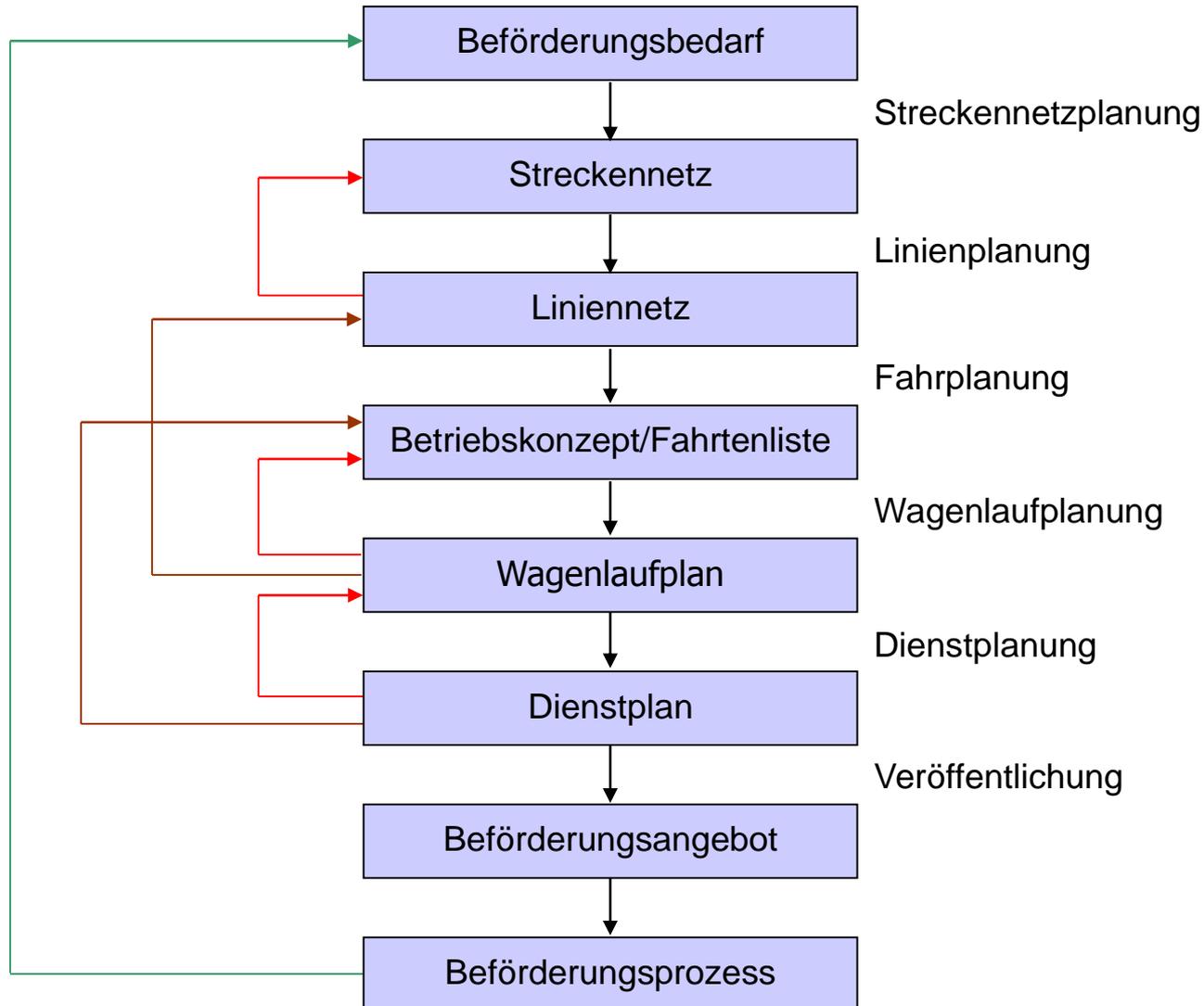
4.3. Fahrplanverknüpfungen zwischen den Fahrten

- 4.3.1 Fahrzeug- und Personalübergänge
- 4.3.2 Übliche Eingangsgrößen
- 4.3.3 Behinderung von Gegenfahrten
- 4.3.4 Anschlüsse
- 4.3.5 Zugfolge

4.4. Gesetzmäßigkeiten von Fahrplänen

- 4.4.1 Struktur des Fahrplangrafen
- 4.4.2 Fahrplangrafen bei Taktfahrplänen
- 4.4.3 Ansätze für die Fahrplanung

- [FGSV01] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitskreis 1.6.13: Merkblatt zum Integralen Taktfahrplan. Ausgabe 2001. FGSV Verlag Köln 2001
- [FGSV04] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitskreis 1.6.14: Verlässliche Bedienung im öffentlichen Personenverkehr – Empfehlungen zur Vermeidung von Verspätungen, Anschlussverlusten und deren Auswirkungen. Ausgabe 2004. FGSV Verlag Köln 2004

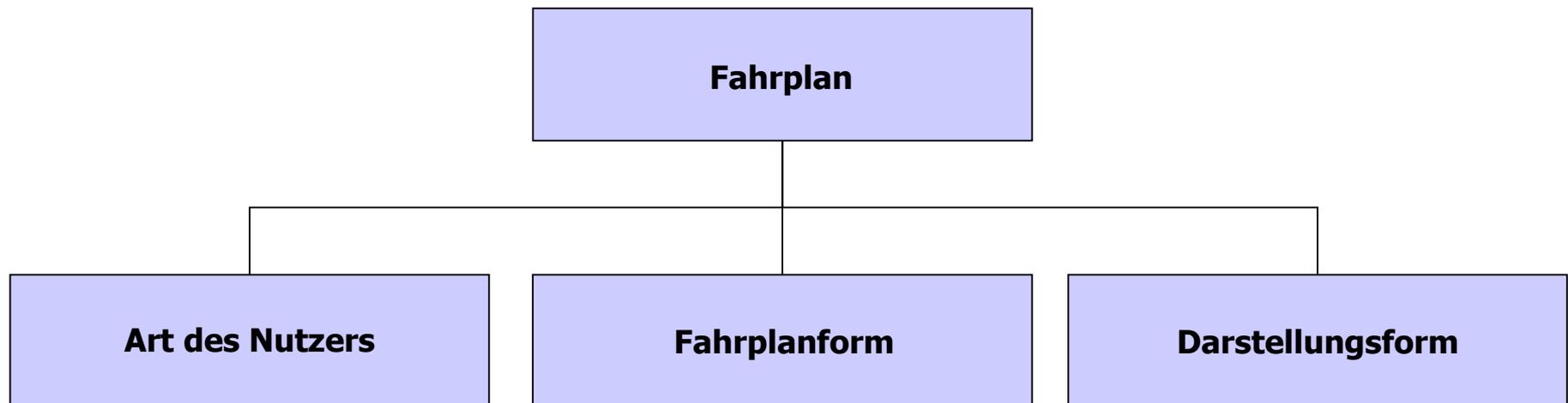


Definition:

= die für die Betriebsabwicklung unerlässliche konkrete Festlegung des beabsichtigten Verkehrseinsatzes

- Modell eines idealisierten Betriebsablaufs
- Basis der Betriebsabwicklung insgesamt

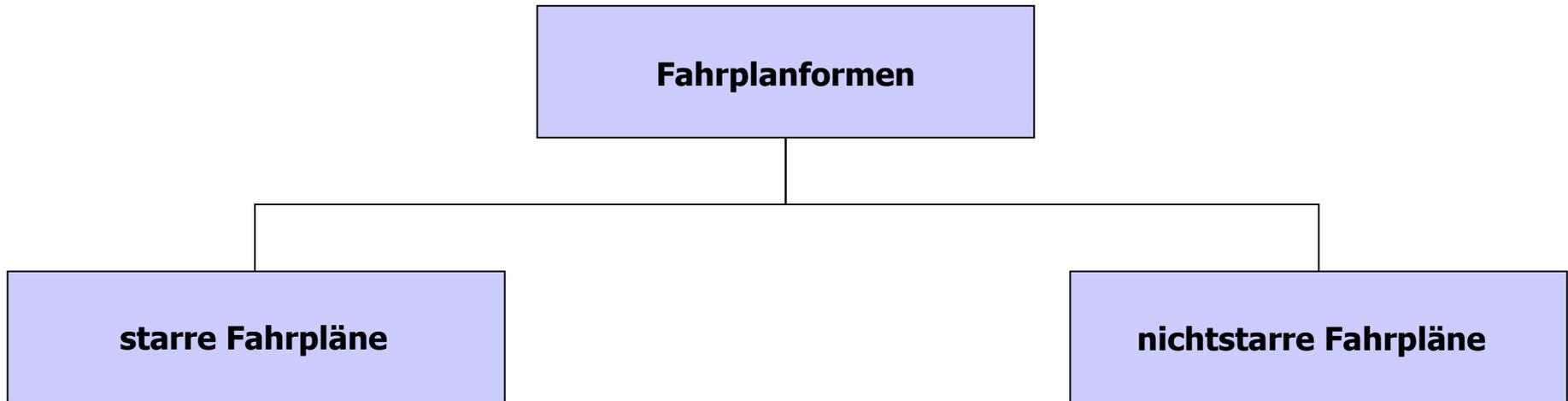
Einteilung:



- öffentliche Fahrpläne
- Dienstfahrpläne

- starre Fahrpläne
- nichtstarre Fahrpläne

- tabellarische Fahrpläne
- grafische Fahrpläne



- wechselnd starre Fahrpläne
- quasi starre Fahrpläne
- Taktfahrpläne
- Integrale Taktfahrpläne

Starrer Fahrplan:

- Fahrplan mit einheitlicher Zugfolgezeit t_{zf} zwischen den mit gleicher Reisegeschwindigkeit v_R verkehrenden Zügen einer Linie oder Zuggattung, der **Taktzeit t_T** (auch **Taktintervall, Taktperiode**)

Nichtstarrer Fahrplan:

- Fahrplan, bei dem Zugfolgezeit t_{zf} , Reisegeschwindigkeit v_R oder Streckenführung sehr häufig wechseln

Starrer Fahrplan:

- Fahrplan mit einheitlicher Zugfolgezeit t_{zf} zwischen den mit gleicher Reisegeschwindigkeit v_R verkehrenden Zügen einer Linie oder Zuggattung, der **Taktzeit t_T** (auch **Taktintervall, Taktperiode**)

Wechselnd starrer Fahrplan (Atmender Fahrplan):

- Fahrplan, bei dem Taktzeit t_T oder Reisegeschwindigkeit v_R im Tagesverlauf ein- oder mehrmals wechselt

Quasi starrer Fahrplan:

- Fahrplan, bei dem die Zugfolgezeit gelegentlich geringfügig von der Taktzeit t_T abweicht
Die entsprechenden Fahrten sollten möglichst nicht früher als nach dem eigentlichen Taktschema liegen.
Anwendung: aus betrieblichen Gründen bei Mischbetriebsstrecken der Eisenbahn
aus verkehrlichen Gründen infolge spezieller zeitlicher Kundenwünsche

Taktfahrplan:

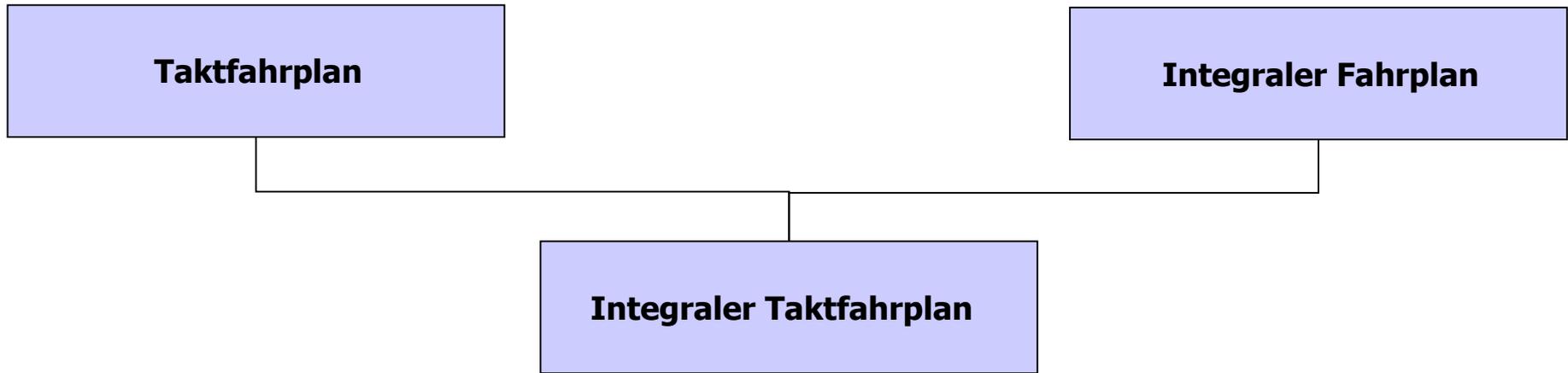
- Fahrplan, bei dem sich i.d.R. mehrere starre Fahrpläne einzelner Linien oder Zuggruppen überlagern.
Dabei kann es streckenbezogen zu unterschiedlichen Zugfolgezeiten kommen, aber die Folge der Zuggruppen und Zugfolgezeiten wiederholt sich regelmäßig.

Integraler Taktfahrplan:

- Fahrplan, bei dem die vertakteten Linien in einem Raum so miteinander verknüpft sind, dass optimale Anschlüsse zwischen ihnen existieren. Dies wird insbesondere auch verkehrsmittelübergreifend realisiert.

Integraler Taktfahrplan:

Fahrplan, bei dem die vertakteten Linien in einem Raum so miteinander verknüpft sind, dass optimale Anschlüsse zwischen ihnen existieren. Dies wird insbesondere auch verkehrsmittelübergreifend realisiert.



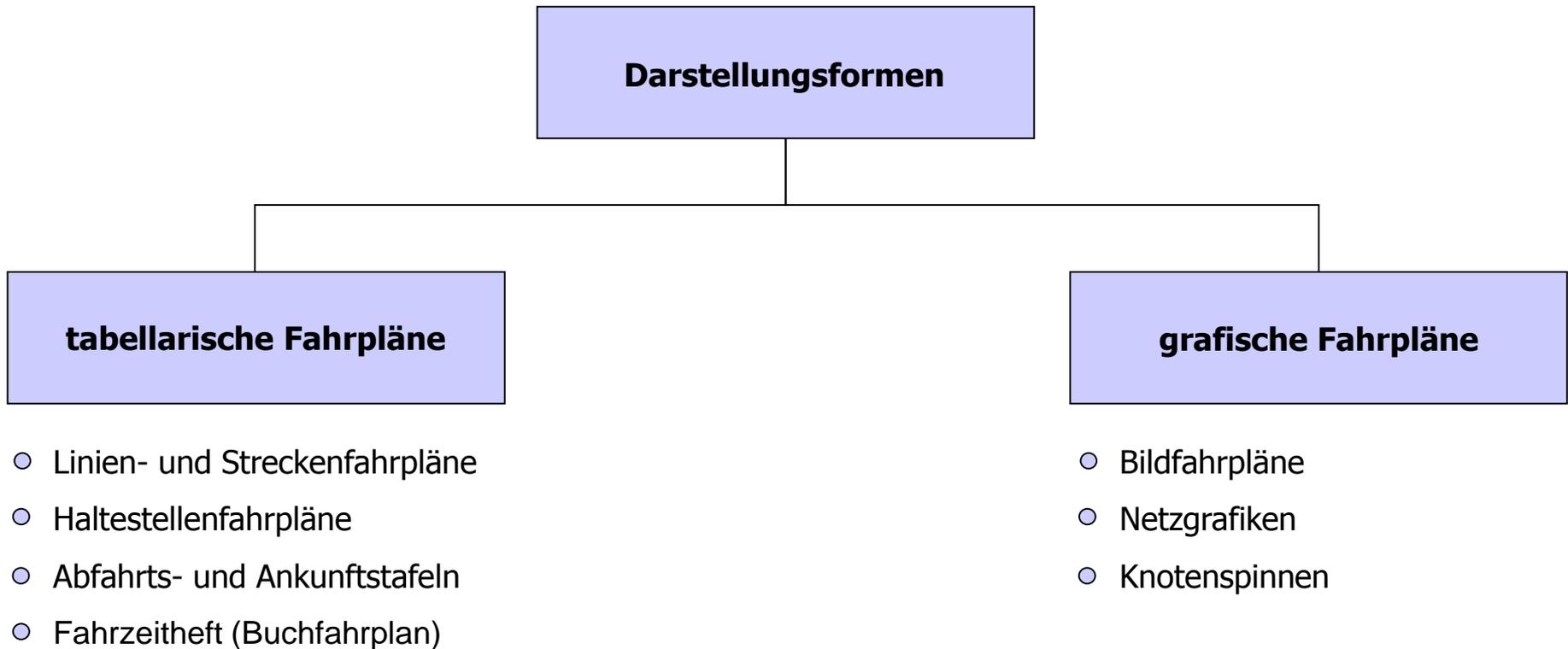
Taktfahrplan:

- **Häufige, regelmäßige Verfügbarkeit** als Äquivalent zur zeitlichen Verfügbarkeit des MIV

Integraler Fahrplan:

- **Durchgängige Verbindungen (Direktverbindungen oder -anschlüsse)** als Äquivalent zur räumlichen Verfügbarkeit des MIV

Im engeren Sinn wird der ITF oft mit dem sogenannten **Knotenpunktsystem** gleichgesetzt, bei dem optimale Anschlüsse für **alle** Fahrtenketten realisierbar sind. Dieses System ist allerdings sehr restriktiv bezüglich der Randbedingungen, so dass es praktisch kaum ohne Abweichungen realisierbar ist.



Linienfahrplan:

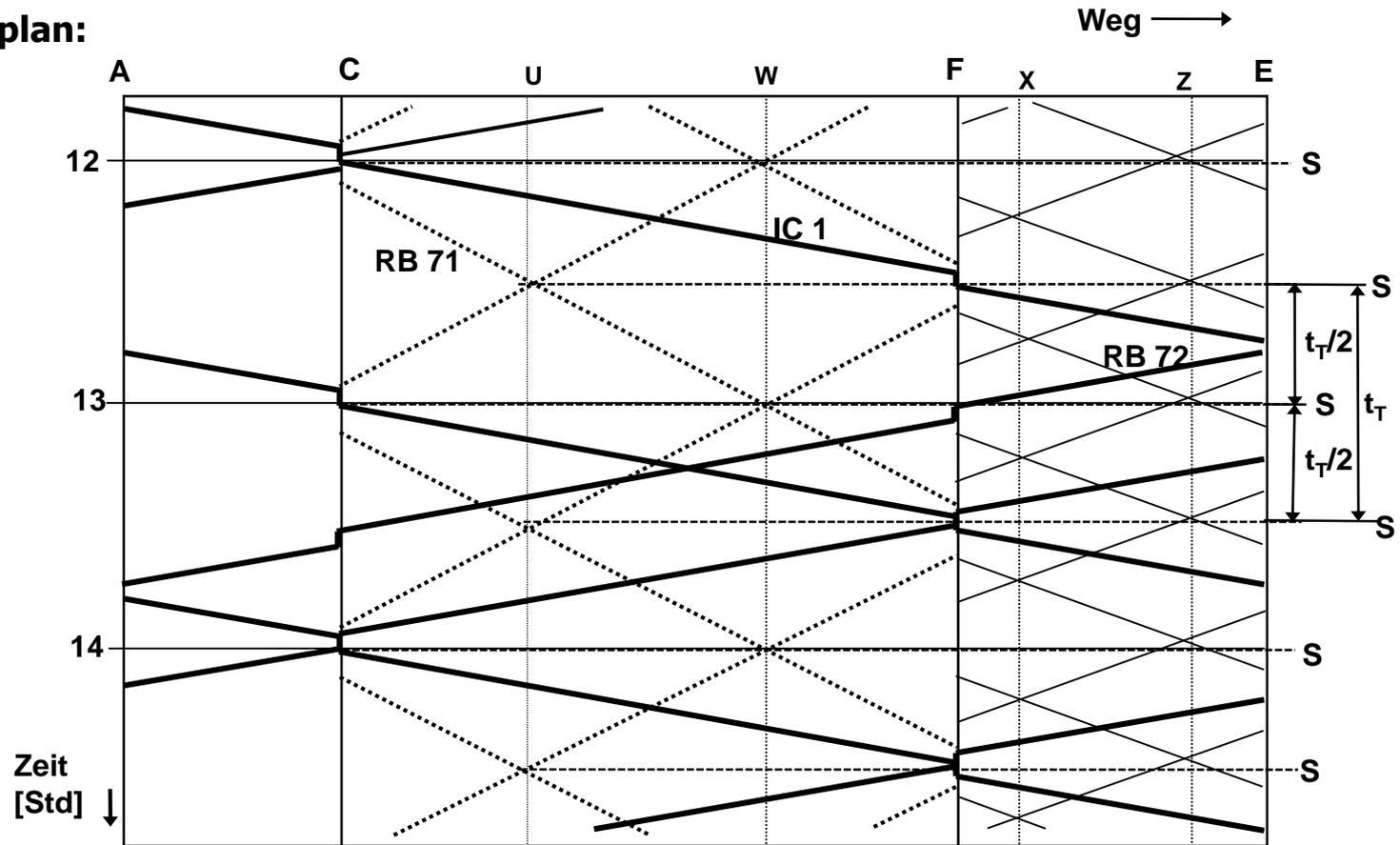
		RB 72		RB 72
Fburg	ab	13.07	Alle	14.37
Xhausen	ab	13.14	30	14.44
Zellwald	ab	13.29	Minuten	14.50
Ehingen	an	13.34		15.04

Streckenfahrplan:

		RB 72	RB 71	IC 1	RB 72	RB 72	RB 71	IC 1	RB 72
Adorf	ab			12.48				13.48	
Cstadt	an			12.57				13.57	
Cstadt	ab		12.05	13.00			13.05	14.00	
Uberg	ab		12.30				13.30		
Waldau	ab		13.01				14.01		
Fburg	an		13.24	13.27			14.24	14.27	
Fburg	ab	13.07		13.30	13.37	14.07		14.30	14.37
Xhausen	ab	13.14			13.44	14.14			14.44
Zellwald	ab	13.29			13.59	14.29			14.50
Ehingen	an	13.34		13.43	14.04	14.34		14.43	15.04

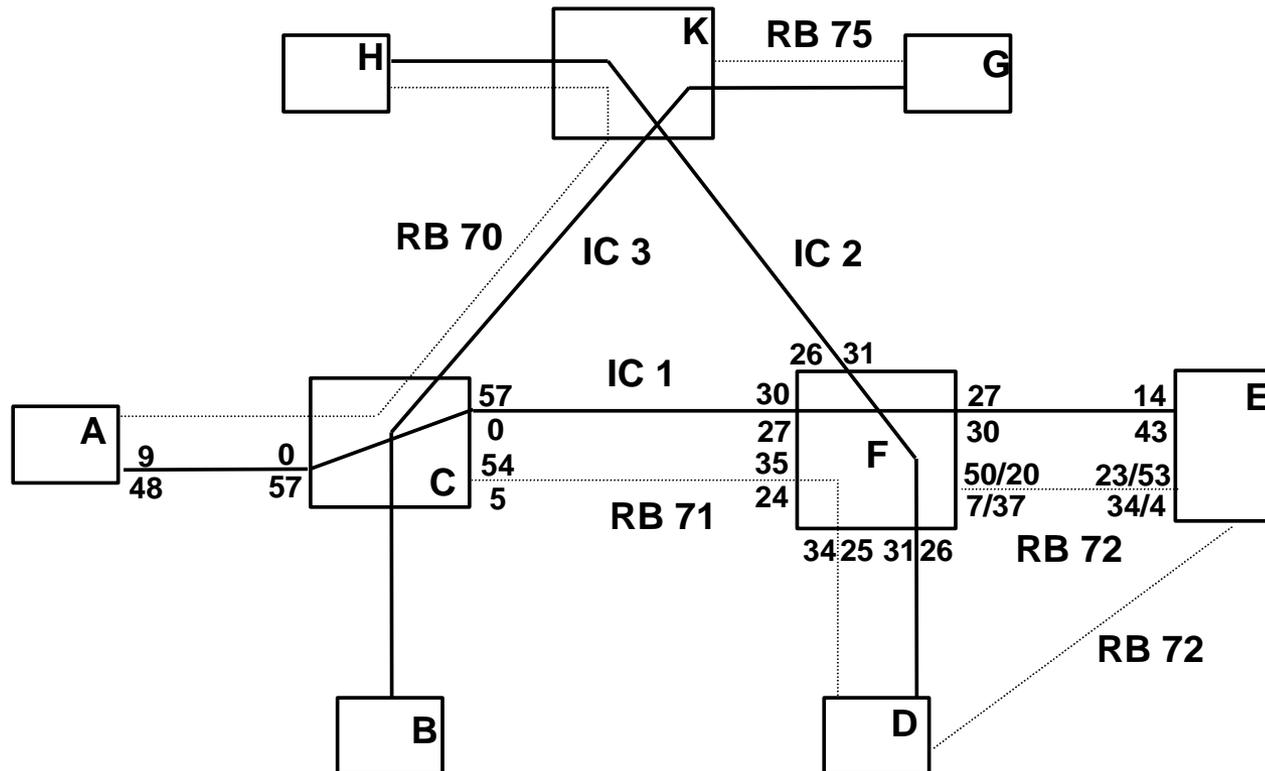
- Darstellungsraum: Linie oder Strecke
- Genauigkeit: öffentliche Fahrpläne 1 min, Dienstfahrpläne 0,1 ... 0,5 ... 1,0 min

Bildfahrplan:



- Darstellungsraum: Strecke
- Symmetriezeit S : gleichbleibender Zeitpunkt innerhalb aller Taktperioden, zu dem sich die Züge aller Linien in Richtung und Gegenrichtung treffen.
2-h-Takt : kurz vor min 0, 1-h-Takt : kurz vor min 0 und 30, 30-min-Takt: kurz vor min 0, 15, 30 und 45

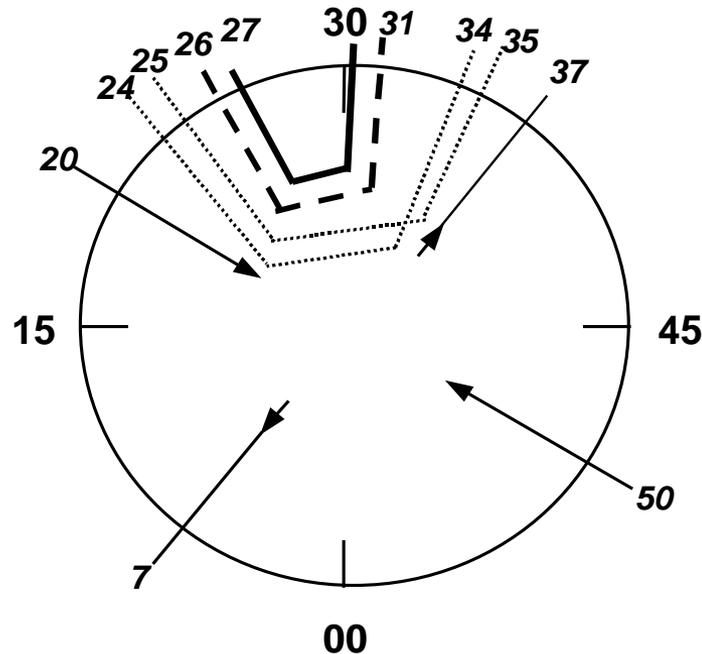
Netzgrafik (nur für starre Fahrpläne):



- Darstellungsraum: Netz
- Darstellungsform: Knoten des Grafen: Netzknoten
Kanten des Grafen: Verkehrsverbindungen
Zeiten: Ankunfts- und Abfahrtszeiten in den Knoten repräsentativ für eine Taktperiode

Knotenspinne (nur für starre Fahrpläne):

Beispiel für Knoten F

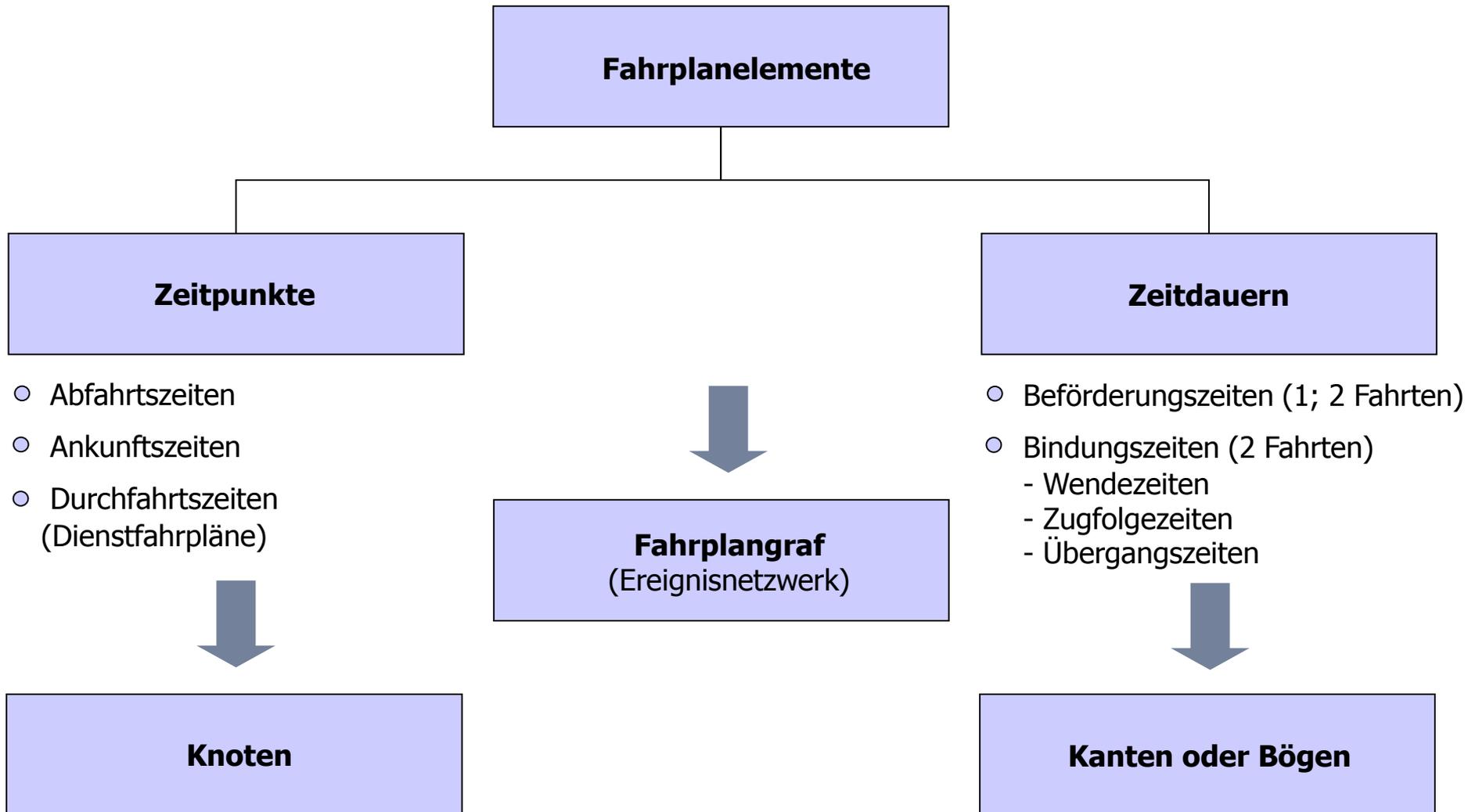


- IC 1** (beide Richtungen)
($t_T = 60 \text{ min}$)
- - - IC 2** (beide Richtungen)
($t_T = 60 \text{ min}$)
- RB 71**
($t_T = 60 \text{ min}$)
- RB 72**
($t_T = 30 \text{ min}$)

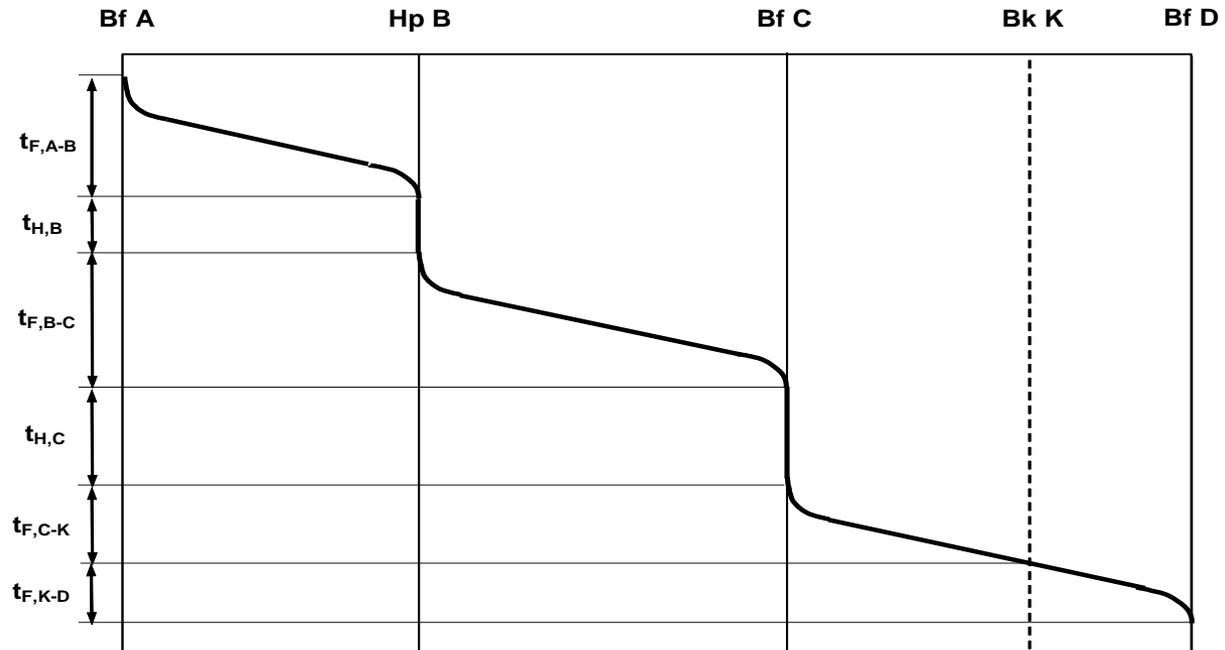
- Darstellungsraum: Knoten

- Darstellungsform: Kreisdiagramm

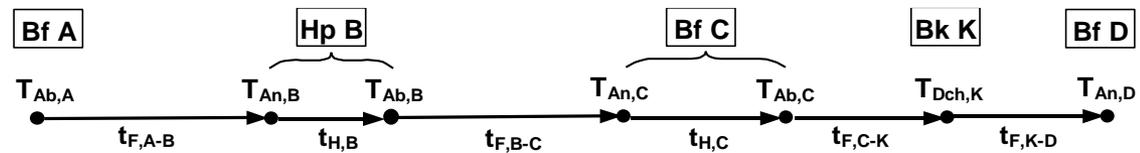
Zeiten: Ankunfts- und Abfahrtszeiten in den Knoten repräsentativ für eine Taktperiode



Bildfahrplan:



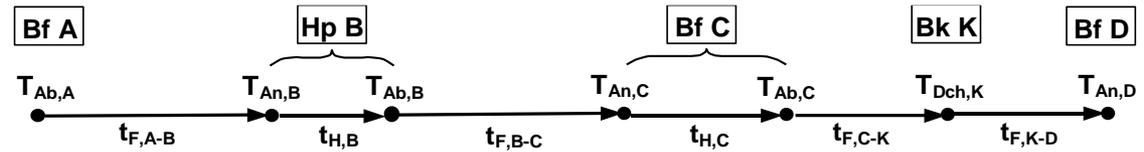
Fahrplanelemente:



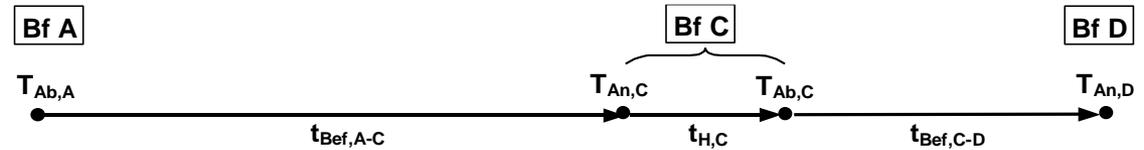
- Zeitpunkte: Abfahrt T_{ab} , Ankunft T_{an} , Durchfahrt T_{Dch}
- Zeitdauern: Beförderungszeit t_{Befr} (Fahrzeit t_F Haltezeit t_H)

Aggregationsmöglichkeiten einer Fahrt:

Ausgangspunkt:



a) mit einer Zwischenstation:



b) ohne Zwischenstationen:



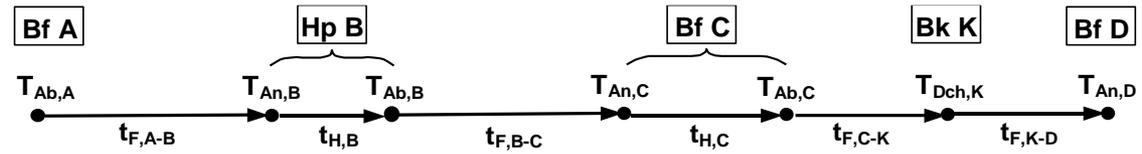
c) mit Stationsabfahrten:



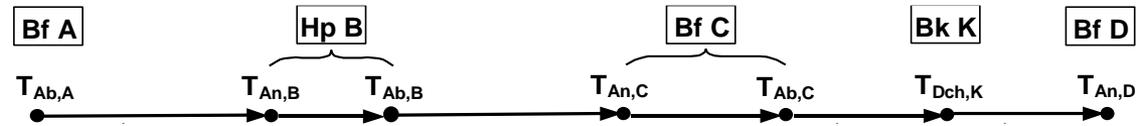
$$\begin{aligned}
 \text{a) } t_{Bef,A-C} &= t_{F,A-B} + t_{H,B} + t_{F,B-C} & t_{Bef,C-D} &= t_{F,C-K} + t_{F,K-D} \\
 \text{b) } t_{Bef,A-D} &= t_{F,A-B} + t_{H,B} + t_{F,B-C} + t_{H,C} + t_{F,C-K} + t_{F,K-D} \\
 \text{c) } t_{Bef,A-B} &= t_{F,A-B} + t_{H,B} & t_{Bef,B-C} &= t_{F,B-C} + t_{H,C} & t_{Bef,C-D} &= t_{F,C-K} + t_{F,K-D}
 \end{aligned}$$

mathematisch vollständige Beschreibung einer Fahrt:

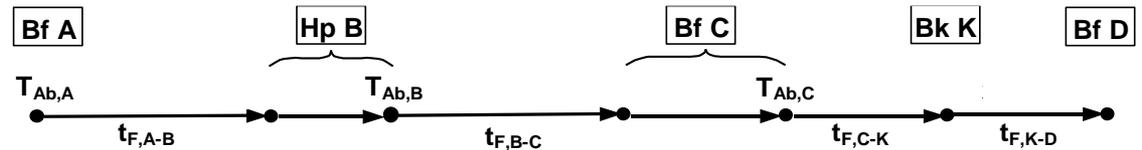
Ausgangspunkt:



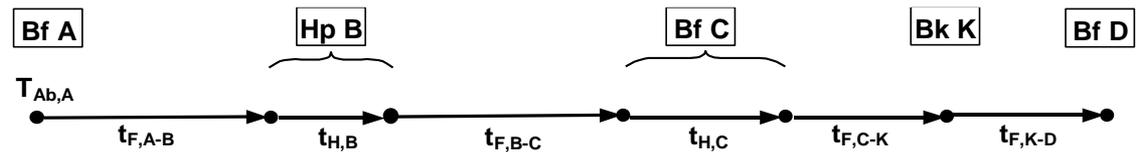
a) Angabe aller Zeitpunkte T:



b) Ersatz von i Zeitpunkten T durch i Zeitdauern t:



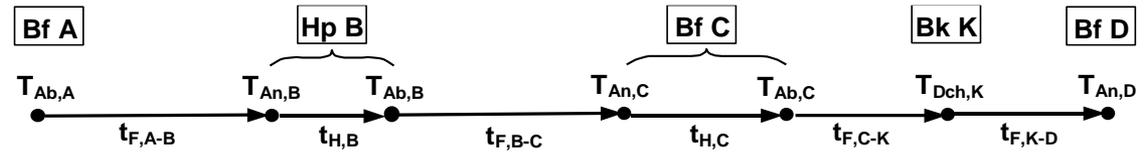
c) Angabe aller Zeitdauern t und eines Zeitpunktes T:



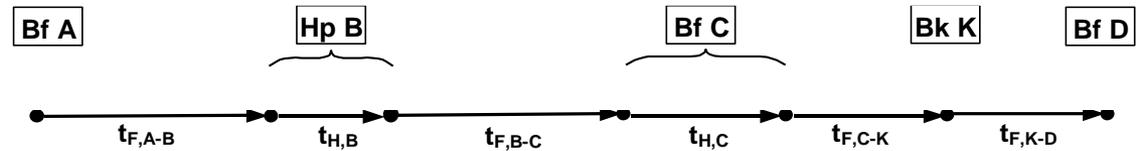
	Zahl der Zeitpunkte	Zahl der Zeitdauern
a)	n_{Knoten}	-
b)	$n_{\text{Knoten}} - i$	i
c)	1	$n_{\text{Knoten}} - 1$

Beschreibung der inneren Fahrplanstruktur einer Fahrt:

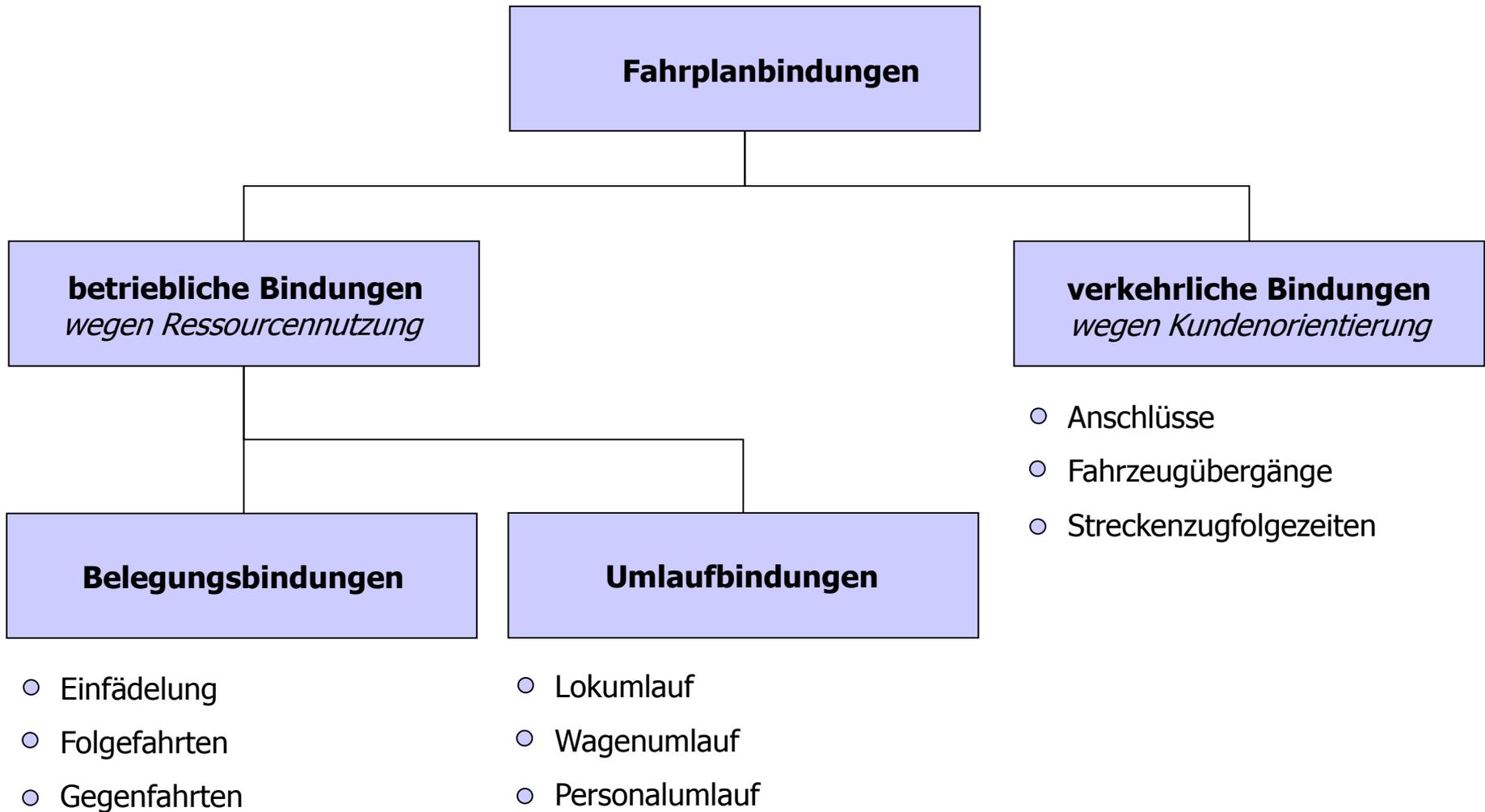
Ausgangspunkt:



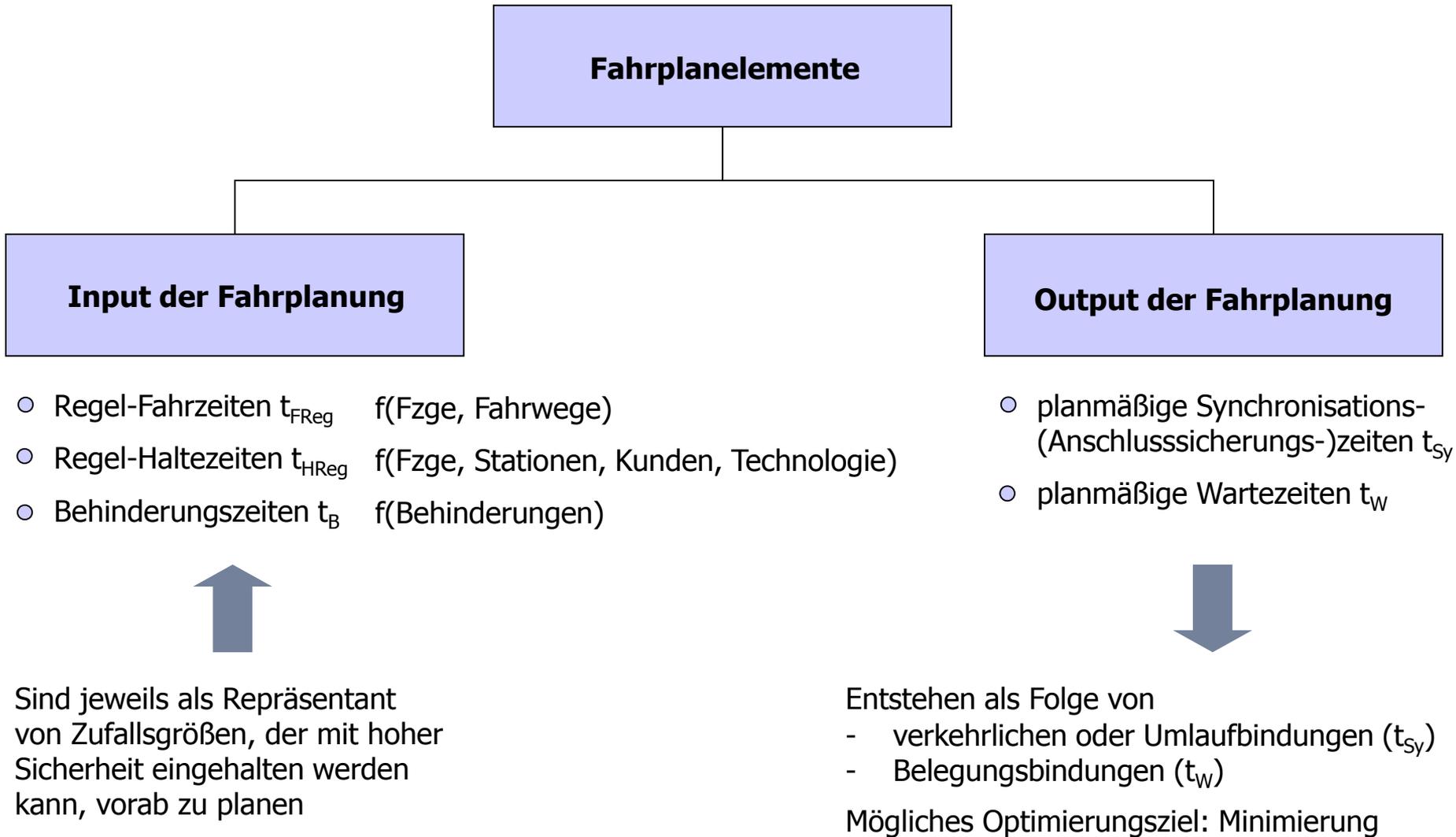
Angabe aller Zeitdauern t:



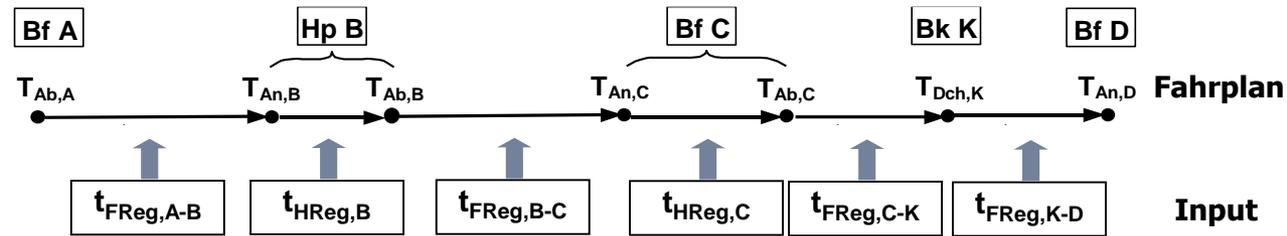
- Die zeitliche Lage ist nicht definiert, der Fahrplan der Fahrt besitzt deshalb 1 äußeren Freiheitsgrad.



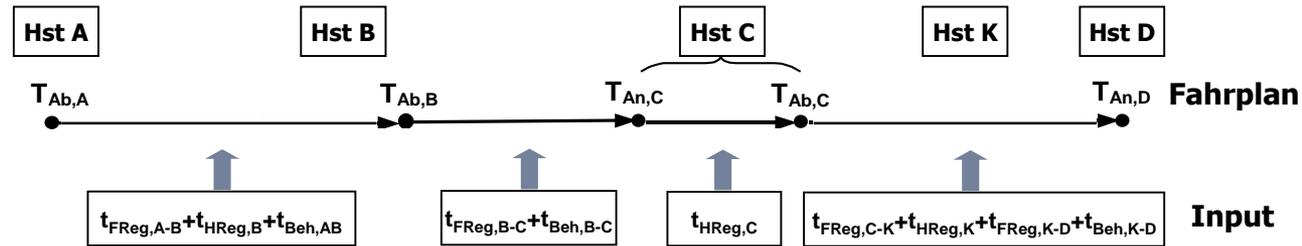
- 4. Fahrplanung**
- 4.1. Einführung**
 - 4.1.1. Einordnung in die Betriebsplanung
 - 4.1.2. Definition und Einteilung von Fahrplänen
 - 4.1.3. Fahrplanformen
 - 4.1.4. Darstellungsformen
 - 4.1.5. Fahrplanelemente
 - 4.1.6. Fahrplanverknüpfungen
- 4.2. Fahrplanelemente einer Fahrt**
 - 4.2.1 In- und Output der Fahrplanung
 - 4.2.2 Übliche Eingangsgrößen
- 4.3. Fahrplanverknüpfungen zwischen den Fahrten**
 - 4.3.1 Fahrzeug- und Personalübergänge
 - 4.3.2 Übliche Eingangsgrößen
- 4.4. Gesetzmäßigkeiten von Fahrplänen**
 - 4.4.1 Struktur des Fahrplangrafen
 - 4.4.2 Fahrplangrafen bei Taktfahrplänen
 - 4.4.3 Ansätze für die Fahrplanung



nichtöffentlicher Fahrweg:



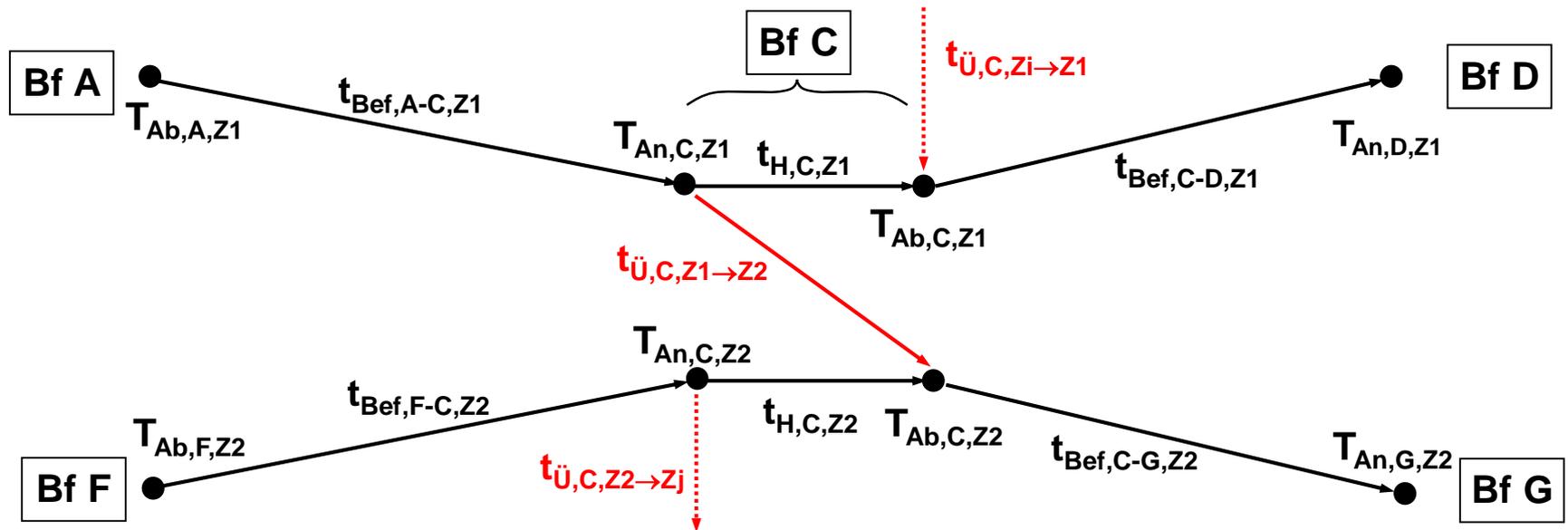
öffentlicher Verkehrsraum:



Quelle:
 Bär. M.:
 Umdruck Sys 4.-
 2011

- 4. Fahrplanung**
- 4.1. Einführung**
 - 4.1.1. Einordnung in die Betriebsplanung
 - 4.1.2. Definition und Einteilung von Fahrplänen
 - 4.1.3. Fahrplanformen
 - 4.1.4. Darstellungsformen
 - 4.1.5. Fahrplanelemente
 - 4.1.6. Fahrplanverknüpfungen
- 4.2. Fahrplanelemente einer Fahrt**
 - 4.2.1 In- und Output der Fahrplanung
 - 4.2.2 Übliche Eingangsgrößen
- 4.3. Fahrplanverknüpfungen zwischen den Fahrten**
 - 4.3.1 Fahrzeug- und Personalübergänge
 - 4.3.2 Kurzzeitige Zugfolgezeitverdichtung
 - 4.3.3 Behinderung von Gegenfahrten
 - 4.3.4 Anschlüsse
 - 4.3.5 Zugfolge
- 4.4. Gesetzmäßigkeiten von Fahrplänen**
 - 4.4.1 Struktur des Fahrplangrafen
 - 4.4.2 Fahrplangrafen bei Taktfahrplänen
 - 4.4.3 Ansätze für die Fahrplanung

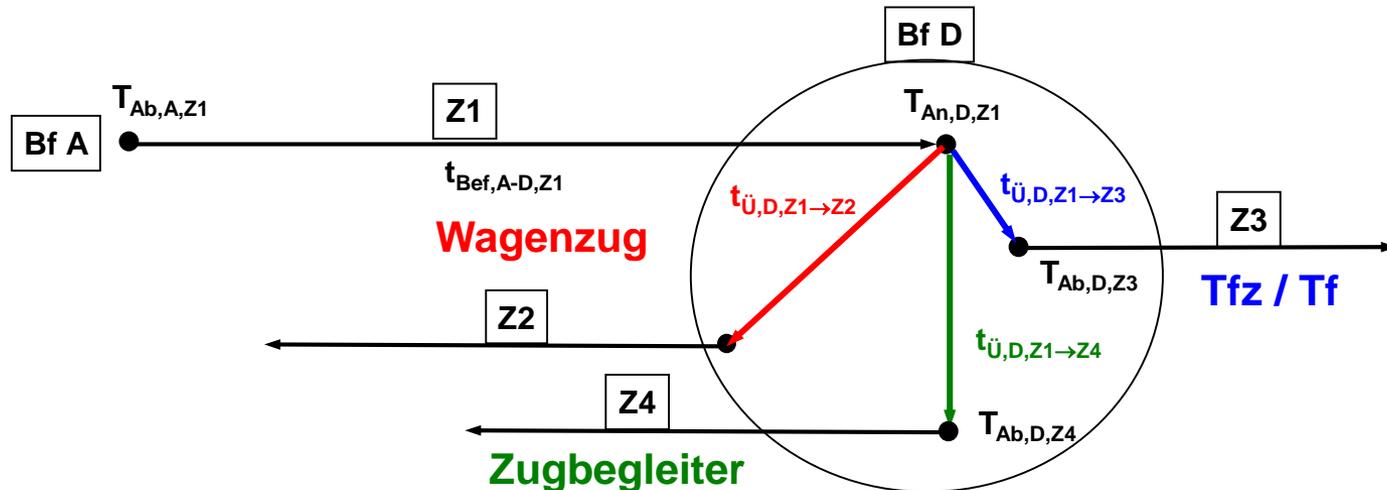
Übergänge einzelner Ressourcen:



- Übergang ausgewählter Ressourcen von Z1 auf Z2 in C
- Umlaufbindungen zwischen Z1 und Z2
- Umlaufverknüpfungen zwischen jeweils zwei Fahrten

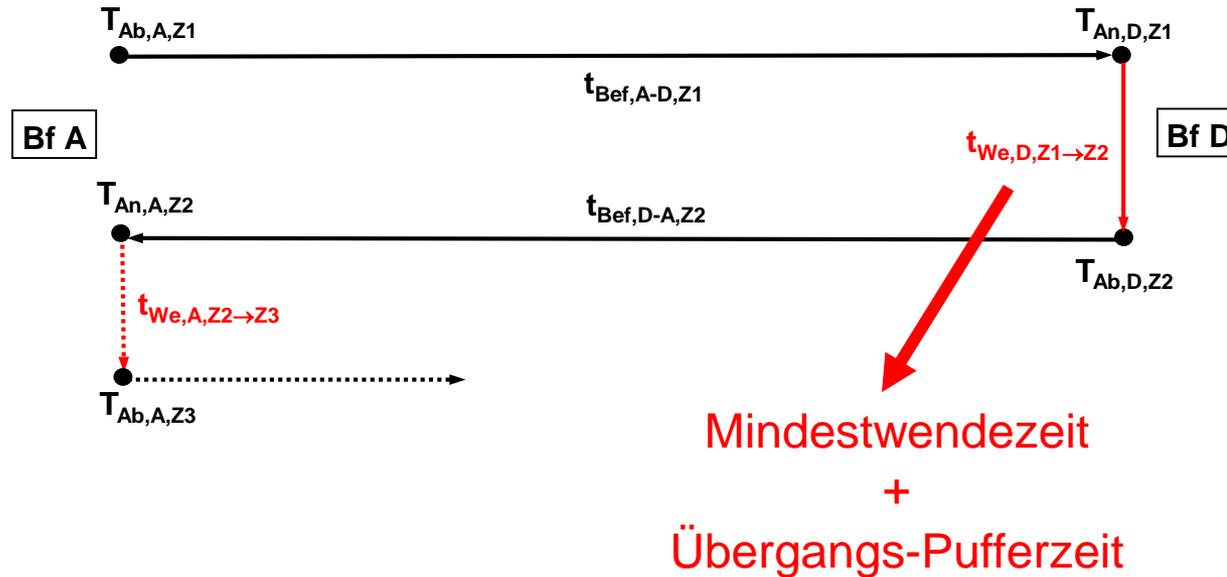
Quelle:
 Bär. M.:
 Umdruck Sys 4.-
 2011

Übergänge mehrerer Ressourcen:



- Übergang je einer Ressource von Z1 auf Z2, Z3 und Z4 in D
- Umlaufbindungen mit unterschiedlichen Übergangszeiten zwischen Z1 sowie Z2, Z3 und Z4
- Umlaufverknüpfungen zwischen insgesamt vier Fahrten mit
 - unterschiedlichen Zeiten für notwendige Prozesse (Zugfertigstellung, Rangieren, Reinigen und Auffüllen)
 - unterschiedlichen Übergangspufferzeiten
 - unterschiedlichen rechtlichen Anforderungen

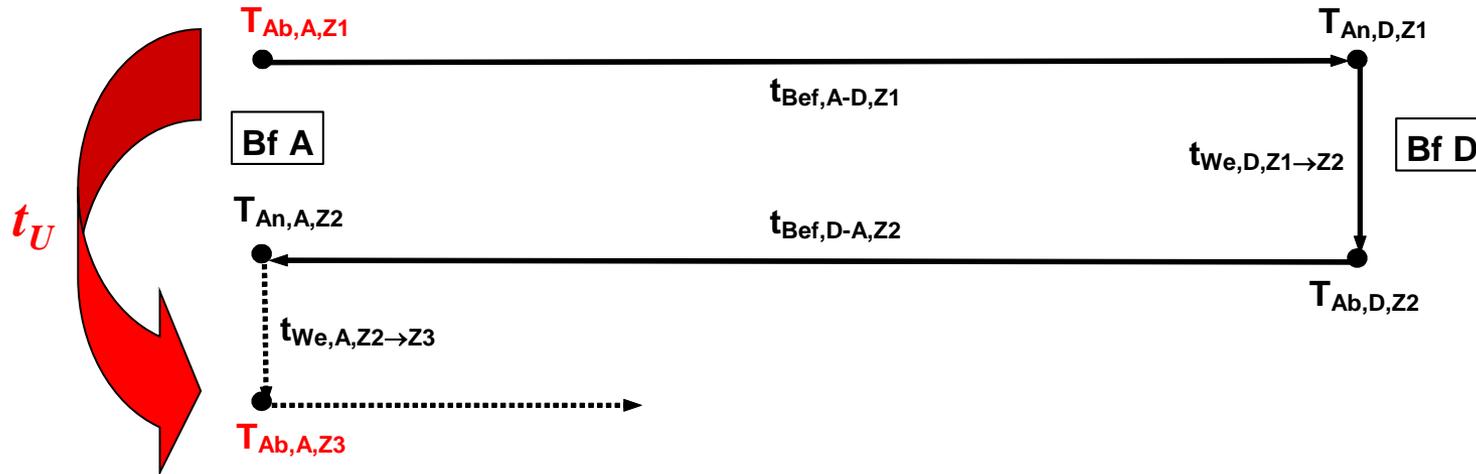
Gemeinsame Übergänge aller Ressourcen:



- gemeinsamer Übergang aller Ressourcen von Z1 auf Z2 in D
- Umlaufbindungen ausschließlich zwischen Z1 und Z2
- Umlaufverknüpfungen zwischen einer Fahrt und ihrer Gegenfahrt als
 - Wenden oder
 - Kehren

Quelle:
 Bär. M.:
 Umdruck Sys 4.-
 2011

Umlaufzeit t_U :



$$t_U = T_{Ab,A,Z3} - T_{Ab,A,Z1} = t_{Bef,A-D} + t_{We,D} + t_{Bef,D-A} + t_{We,A}$$

$$t_U = t_{Bef,U} + t_{We,U}$$

$t_{Bef,U}$	[min]	Beförderungszeit im Umlauf (also Hin- und Rückrichtung)
t_U	[min]	Umlaufzeit eines Zuges
$t_{We,U}$	[min]	Wendezeit im Umlauf

Quelle:
Bär. M.:
Umdruck Sys 4.-
2011

Ziele der Fahrplanoptimierung:

- a) Einhalten der jeweiligen Mindestwendezeit (inkl. Pufferzeit)

$$t_{We, Z1 \rightarrow Z2, plm} \geq t_{We, Z1 \rightarrow Z2, min}$$

- b) Minimieren der Differenzen zwischen planmäßigen Wendezeiten und Mindestwendezeiten

$$\sum_{\forall We(Zi \rightarrow Zj)} (t_{We, Zi \rightarrow Zj, plm} - t_{We, Zi \rightarrow Zj, min}) \rightarrow \text{Min}$$

- c) Minimieren der nach Ressourcen gewichteten Differenzen zwischen planmäßigen und Mindestwendezeiten

$$\sum_{\forall We(Zi \rightarrow Zj)} c_{We(Zi \rightarrow Zj)} \cdot (t_{We, Zi \rightarrow Zj, plm} - t_{We, Zi \rightarrow Zj, min}) \rightarrow \text{Min}$$

$\sum_{\forall We(Zi \rightarrow Zj)} \dots$ = Summe über alle Wendezeiten zwischen beliebigen Zügen Z_i und Z_j

$c_{We(Zi \rightarrow Zj)}$ = Gewichtung des Überganges von Zug Z_i nach Zug Z_j

Maßgebende Umlaufzeit:

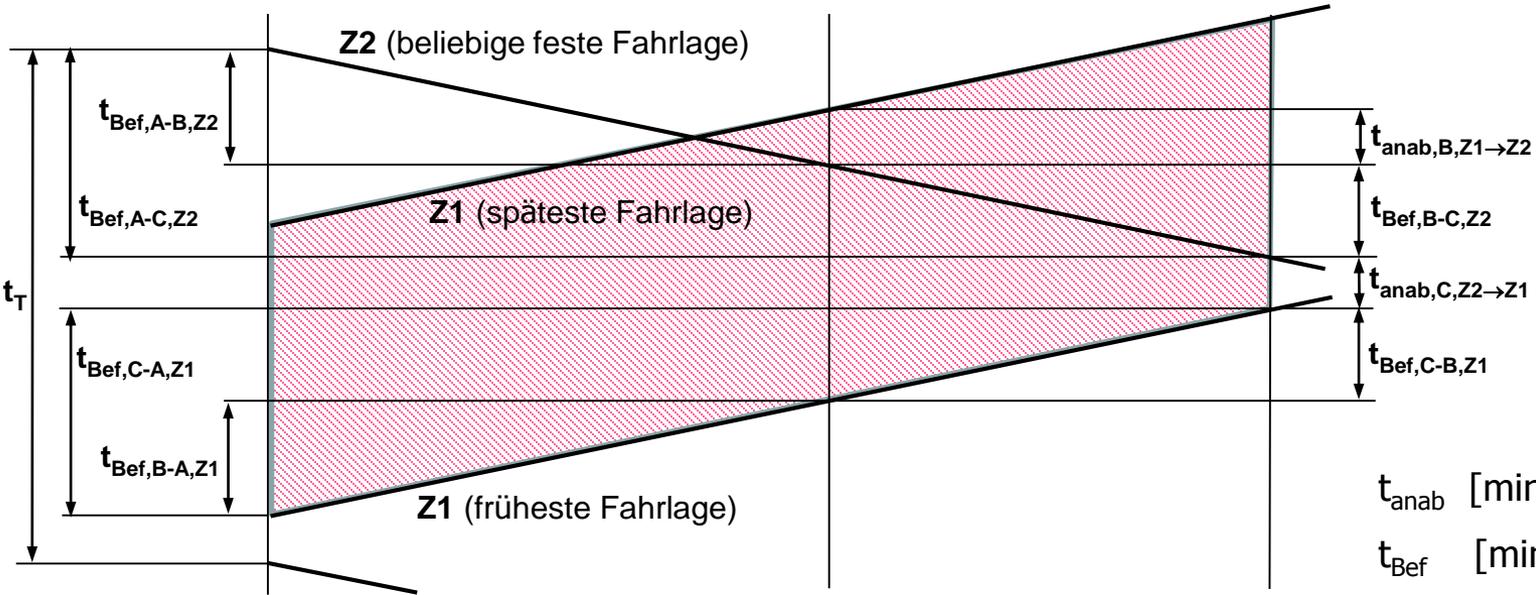
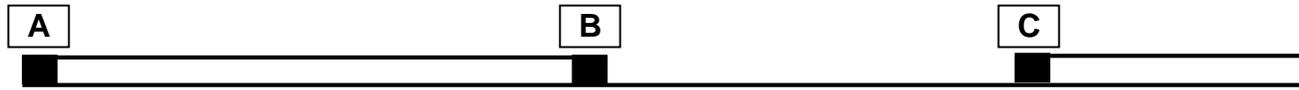
$$t_{U, \text{maßg}, V} = t_{U, \text{min}} \quad \text{falls } (t_{U, \text{min}} - t_{\text{Int}, V}) : t_{T1} \text{ ganzzahlig}$$

$$t_{U, \text{maßg}, V} = t_{\text{Int}, V} + t_{T1} \cdot (\text{Int}((t_{U, \text{min}} - t_{\text{Int}, V}) : t_{T1}) + 1) \quad \text{sonst}$$

Notwendige Zahl der Züge:

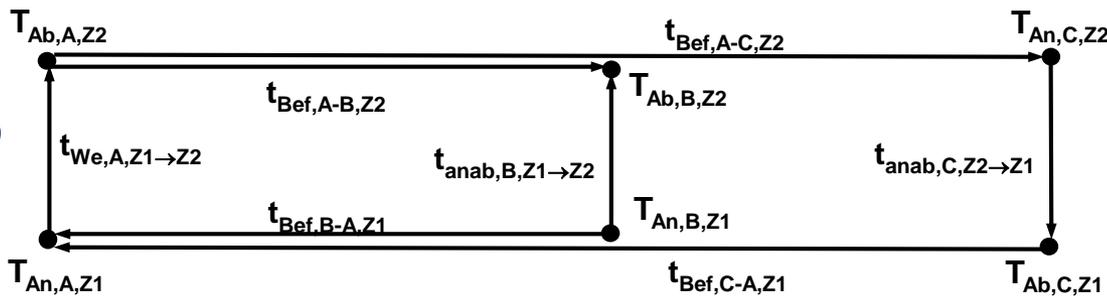
$$N = \frac{t_{\text{Int}, V}}{t_{T2}} + \frac{t_{U, \text{maßg}, V} - t_{\text{Int}, V}}{t_{T1}}$$

- $t_{U, \text{maßg}, V}$ = maßgebende Umlaufzeit bei kurzzeitigen Zugfolgezeitverdichtungen
- $t_{\text{Int}, V}$ = Zeitdauer des Intervalls der Zugfolgezeitverdichtung
- t_{T1} = Taktzeit außerhalb des Intervalls der Zugfolgezeitverdichtung
- $\text{Int}(x)$ = ganzzahliger Anteil von x (für $x \geq 0$)
- t_{T2} = Taktzeit während des Intervalls der Zugfolgezeitverdichtung
- $t_{U, \text{min}}$ = Mindestumlaufzeit



t_{anab} [min] Kreuzungszeit

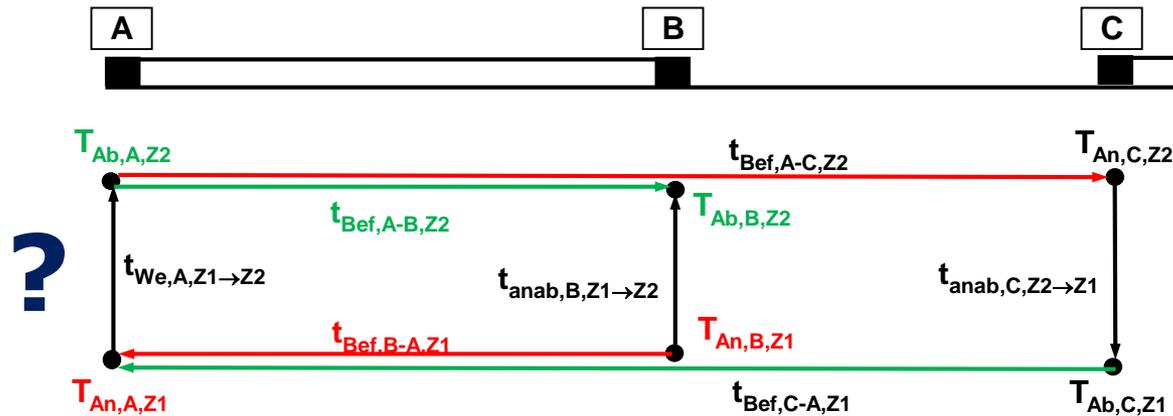
t_{Bef} [min] Beförderungszeit



$$t_{anab} = t_{anab, \min} + t_{Puffer}$$

Quelle:
Bär. M.:
Umdruck Sys 4.-
2011

Späteste Fahrlage Z1 (vor Z2 in B):



$$T_{Ab,B,Z2} \geq T_{An,B,Z1} + t_{anab,B,Z1 \rightarrow Z2} \quad \text{mit} \quad T_{Ab,B,Z2} = T_{Ab,A,Z2} + t_{Bef,A-B,Z2} \quad \text{und} \quad T_{An,B,Z1} = T_{An,A,Z1} - t_{Bef,B-A,Z1}$$

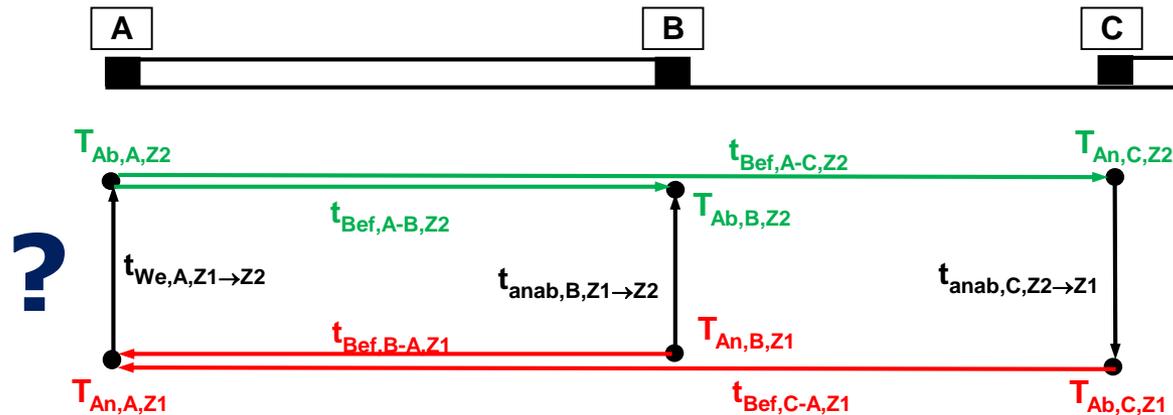
$$T_{Ab,A,Z2} + t_{Bef,A-B,Z2} \geq T_{An,A,Z1} - t_{Bef,B-A,Z1} + t_{anab,B,Z1 \rightarrow Z2, \min} + t_{Puffer,Z1 \rightarrow Z2}$$

$$T_{Ab,A,Z2} = T_{An,A,Z1} + t_{We,A,Z1 \rightarrow Z2} - n * t_T$$

$$t_{We,A,Z1 \rightarrow Z2} \geq n * t_T + t_{anab,B,Z1 \rightarrow Z2, \min} + t_{Puffer,Z1 \rightarrow Z2} - t_{Bef,A-B,Z2} - t_{Bef,B-A,Z1}$$

$$t_{We,A,Z1 \rightarrow Z2, \text{unzul}} < n * t_T + t_{anab,B,Z1 \rightarrow Z2, \min} + t_{Puffer,Z1 \rightarrow Z2} - t_{Bef,A-B,Z2} - t_{Bef,B-A,Z1}$$

Früheste Fahrlage Z1 (nach Z2 in C):



$$T_{An,C,Z2} + t_{anab,C,Z2 \rightarrow Z1} \leq T_{Ab,C,Z1} \quad \text{mit} \quad T_{An,C,Z2} = T_{Ab,A,Z2} + t_{Bef,A-C,Z2} \quad \text{und} \quad T_{Ab,C,Z1} = T_{An,A,Z1} - t_{Bef,C-A,Z1}$$

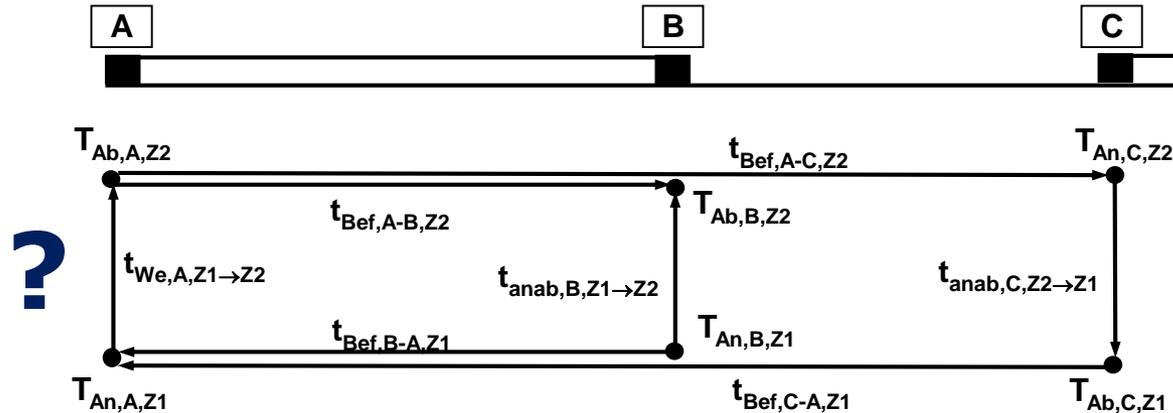
$$T_{Ab,A,Z2} + t_{Bef,A-C,Z2} + t_{anab,C,Z2 \rightarrow Z1, \min} + t_{Puffer,Z2 \rightarrow Z1} \leq T_{An,A,Z1} - t_{Bef,C-A,Z1}$$

$$T_{Ab,A,Z2} = T_{An,A,Z1} + t_{We,A,Z1 \rightarrow Z2} - n * t_T$$

$$t_{We,A,Z1 \rightarrow Z2} \leq n * t_T - t_{Bef,A-C,Z2} - t_{Bef,C-A,Z1} - t_{anab,C,Z2 \rightarrow Z1, \min} - t_{Puffer,Z2 \rightarrow Z1}$$

$$t_{We,A,Z1 \rightarrow Z2, \text{unzul}} > n * t_T - t_{Bef,A-C,Z2} - t_{Bef,C-A,Z1} - t_{anab,C,Z2 \rightarrow Z1, \min} - t_{Puffer,Z2 \rightarrow Z1}$$

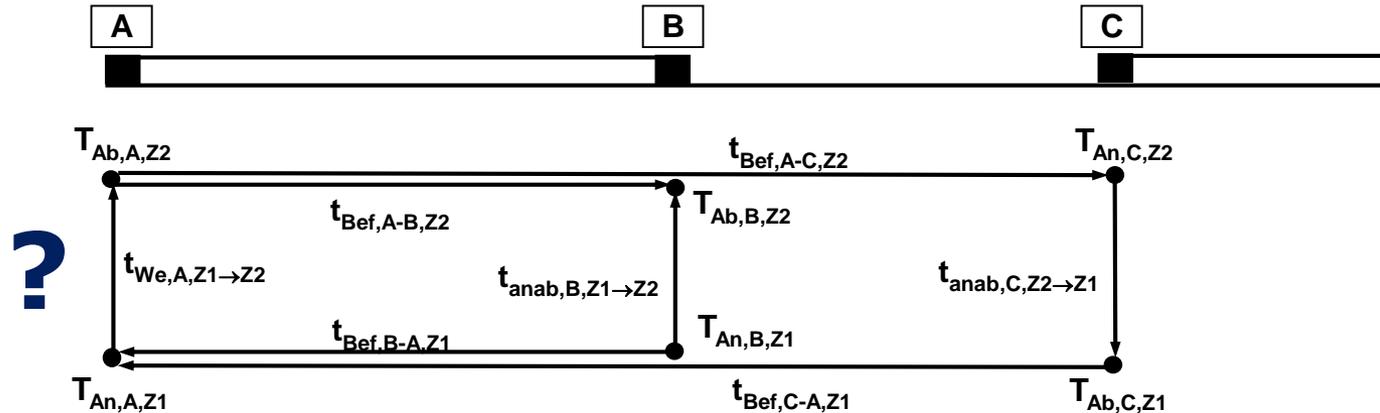
Unzulässige Wendezeit in A:



$$n \cdot t_T - t_{Bef,A-C,Z2} - t_{Bef,C-A,Z1} - t_{anab,C,Z2 \rightarrow Z1,min} - t_{Puffer,Z2 \rightarrow Z1} < t_{We,A,Z1 \rightarrow Z2,unzul} < n \cdot t_T + t_{anab,B,Z1 \rightarrow Z2,min} + t_{Puffer,Z1 \rightarrow Z2} - t_{Bef,A-B,Z2} - t_{Bef,B-A,Z1}$$

n	[-]	natürliche Zahl
$t_{Bef,A-B,Z2}$	[min]	endet mit der Abfahrt in B, schließt einen evtl. Halt in B mit ein
$t_{Bef,B-A,Z1}$	[min]	beginnt mit der Ankunft in B, schließt einen evtl. Halt in B mit ein

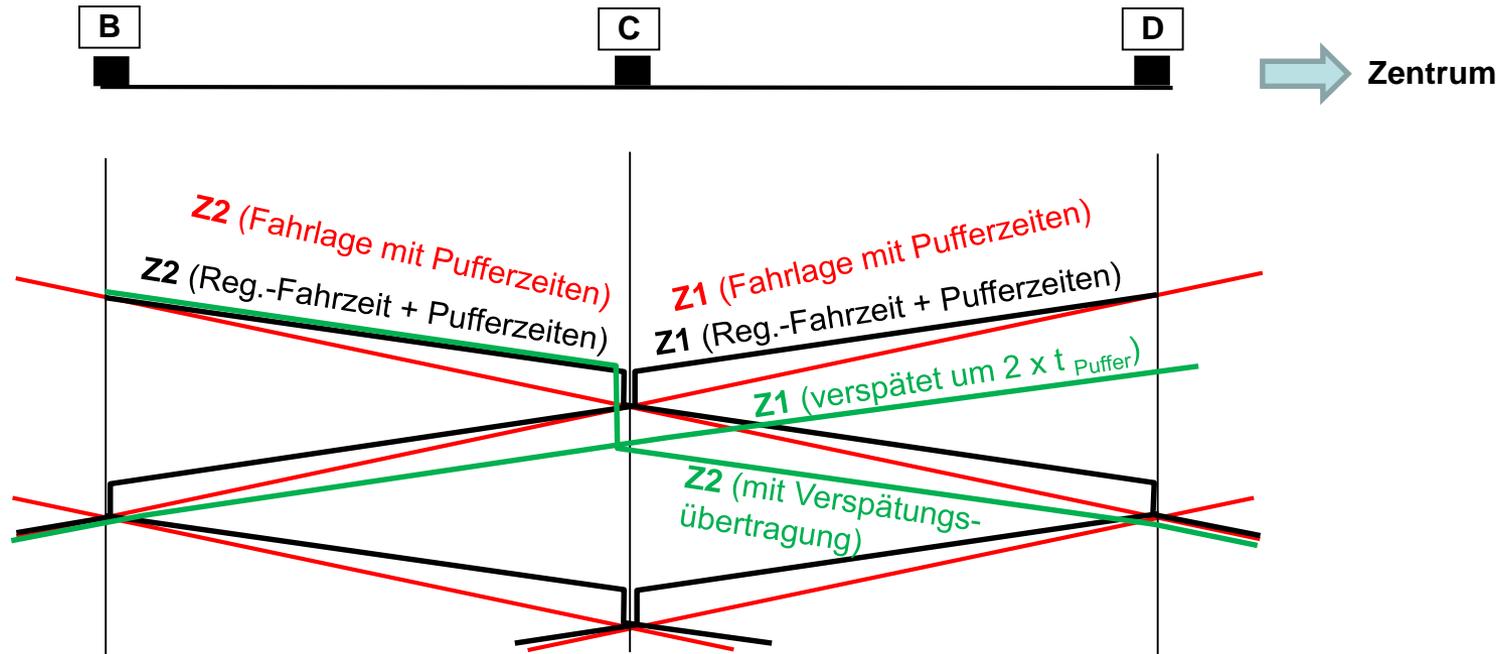
Unzulässige Wendezeit in A:



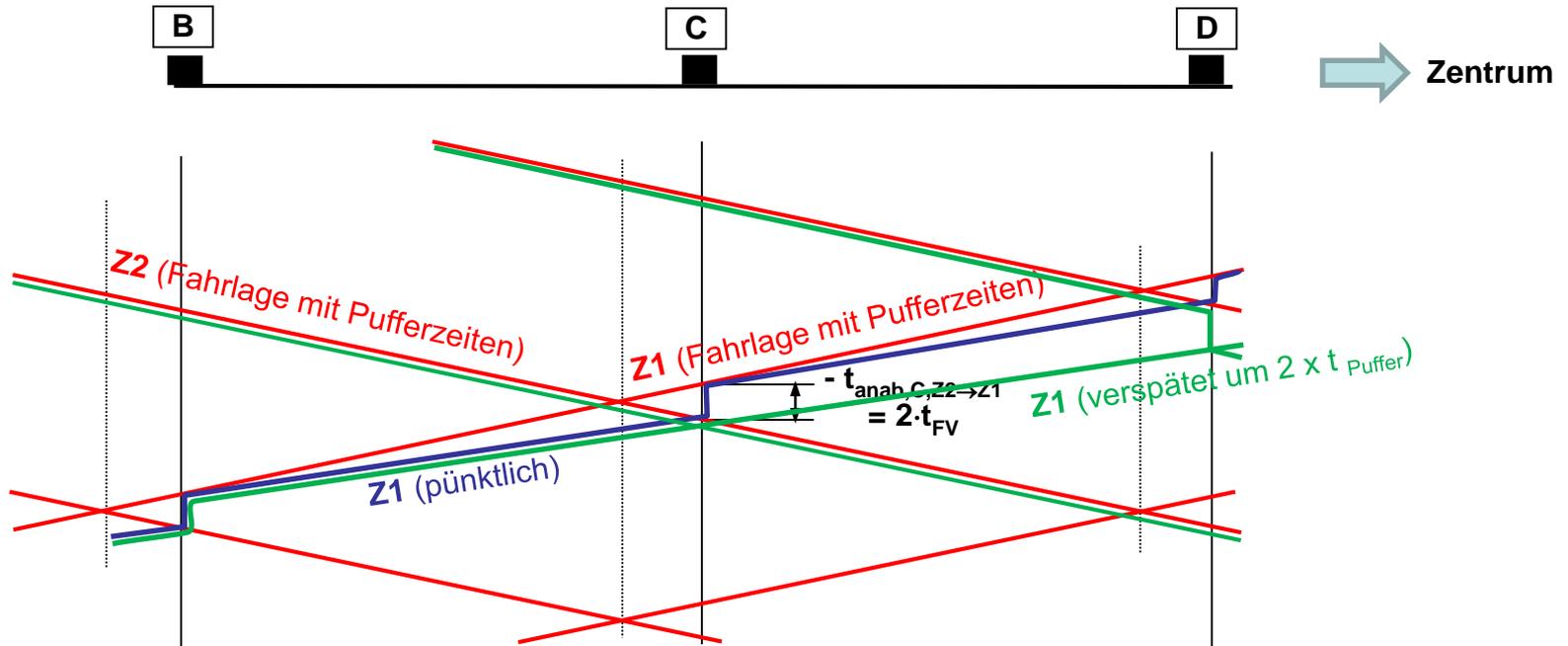
$$-t_{\text{Bef,A-C,Z2}} - t_{\text{Bef,C-A,Z1}} - t_{\text{anab,C,Z2} \rightarrow \text{Z1,min}} - t_{\text{Puffer,Z2} \rightarrow \text{Z1}} < t_{\text{We,A,Z1} \rightarrow \text{Z2,unzul}} < t_{\text{anab,B,Z1} \rightarrow \text{Z2,min}} + t_{\text{Puffer,Z1} \rightarrow \text{Z2}} - t_{\text{Bef,A-B,Z2}} - t_{\text{Bef,B-A,Z1}} \pmod{t_T}$$

- n [-] natürliche Zahl
- $t_{\text{Bef,A-B,Z2}}$ [min] endet mit der Abfahrt in B, schließt einen evtl. Halt in B mit ein
- $t_{\text{Bef,B-A,Z1}}$ [min] beginnt mit der Ankunft in B, schließt einen evtl. Halt in B mit ein

Vereinfachungen im Stadtverkehr ohne verschobene Kreuzung:



Vereinfachungen im Stadtverkehr mit verschobener Kreuzung:

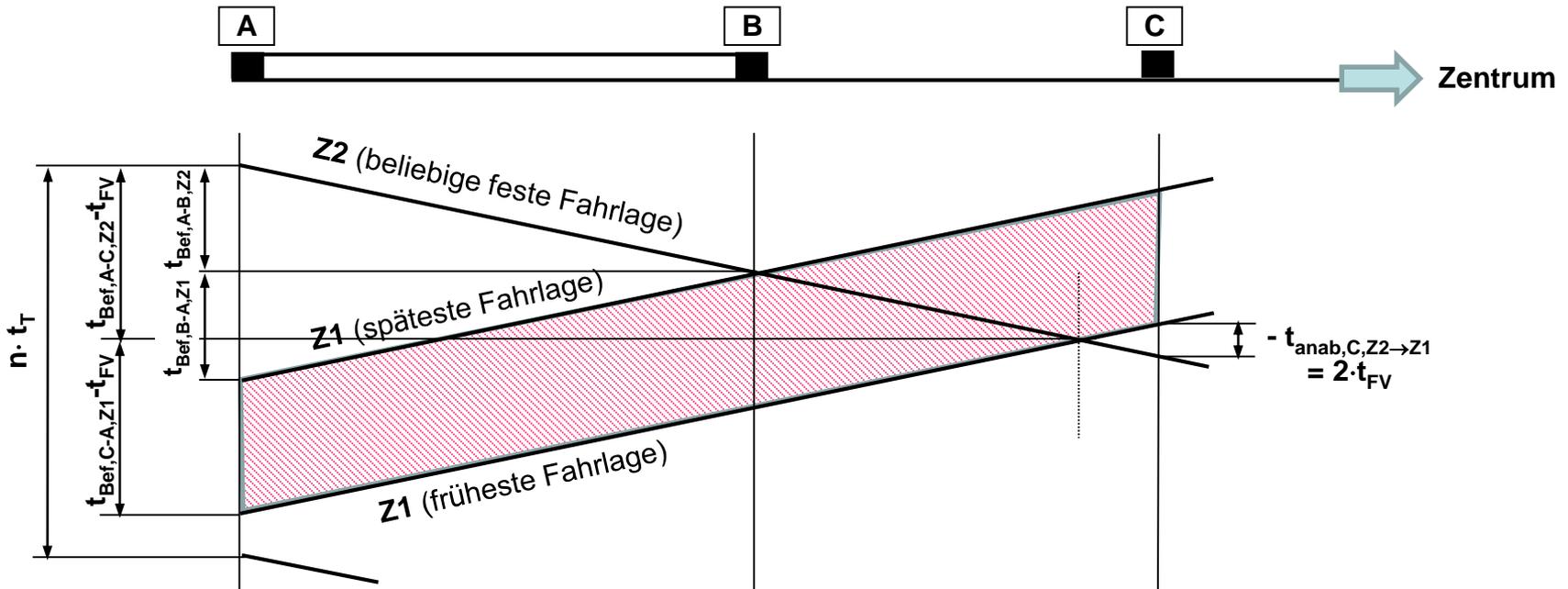


Verfahren zur Dämpfung der Verspätungsübertragung:

- Pufferzeiten
- verschobene Kreuzung $t_{\text{FV}} \sim 0,5$ $t_{\text{Puffer}} \sim 0,5$ min
- verlegte Kreuzung

Im Eisenbahnbetrieb ist eine verschobene Kreuzung nicht zulässig.

Vereinfachungen im Stadtverkehr mit verschobener Kreuzung:



$$-t_{\text{Bef},A-C,Z2} - t_{\text{Bef},C-A,Z1} + 2 t_{\text{FV}} < t_{\text{We},A,Z1 \rightarrow Z2,\text{unzul}} < -t_{\text{Bef},A-B,Z2} - t_{\text{Bef},B-A,Z1} \pmod{t_T}$$

- t_{FV} [min] Fahrzeitverschiebung einer Kreuzung in landwärtiger Richtung
- t_{Bef} [min] Beförderungszeit
- $t_{\text{We},\text{unzul}}$ [min] unzulässige Wendezeit

Definitionen

1 → Was ist ein Anschluss?

... eine (vorgesehene) Möglichkeit zur Weiterbeförderung

- 
- Ausgewiesen und garantiert
 - Ausgewiesen aber nicht garantiert
 - Nicht ausgewiesen
 - Spontan entstehend

2 → Was ist Anschlusssicherung?

... das Organisieren des Zustandekommens dieser
Möglichkeit

Erfordnis

1

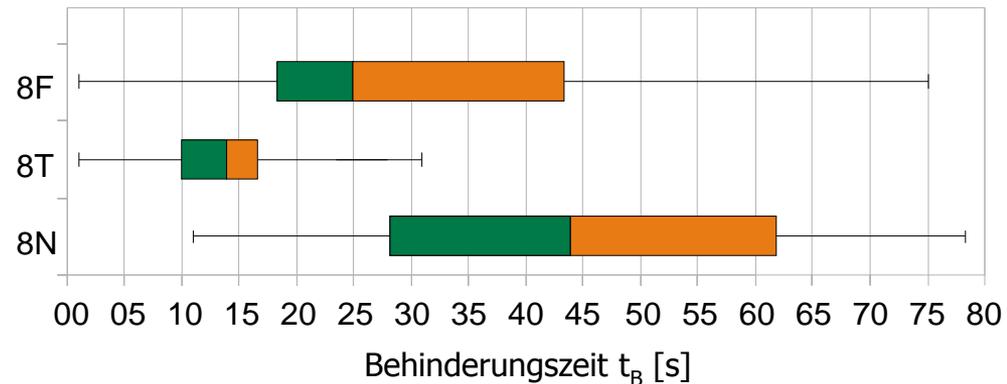
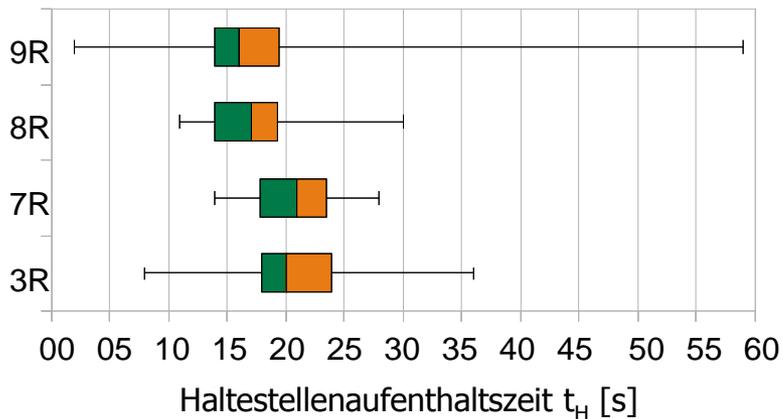
Warum Anschlüsse?

... maximale örtliche und zeitliche Verfügbarkeit des ÖV trotz Kostendruck

2

Warum Sicherung?

... Verlässlichkeit des ÖV trotz interner oder externer Störungen

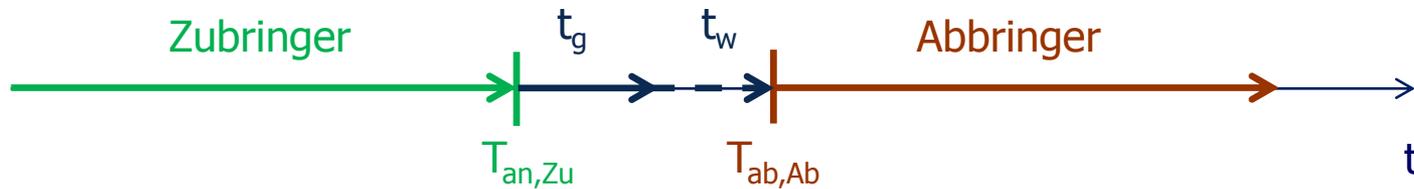


Quelle: Seyfarth, Jan

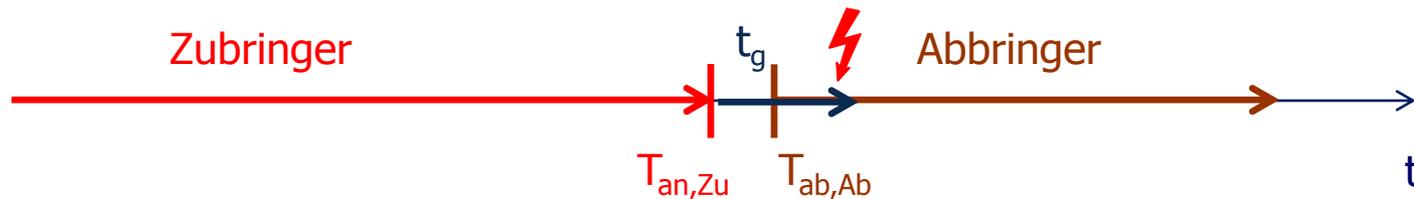
Untersuchung möglicher Zugfolgefälle auf der Nord-Süd-Verbindung in Dresden aus verkehrlicher und betrieblicher Sicht; TU Dresden, Professur für Bahnverkehr, öffentlicher Stadt- und Regionalverkehr, 2009, Studienarbeit

Möglichkeiten zur Anschlusssicherung

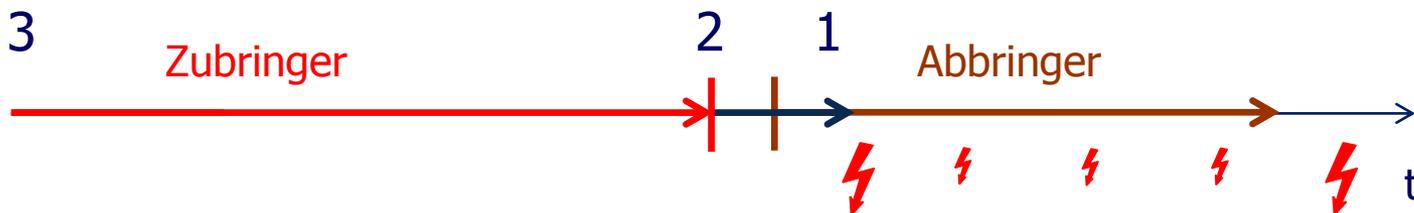
1 Planmäßiger Betrieb $T_{ab,Ab} - T_{an,Zu} \geq t_g$



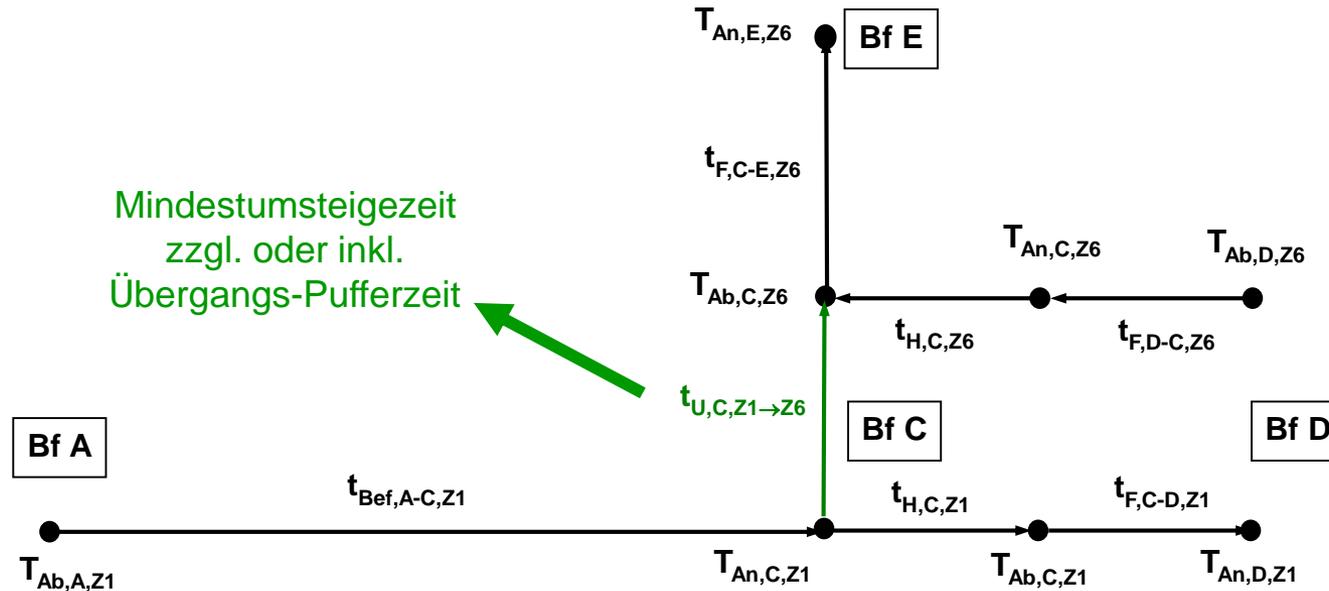
2 Gestörter Betrieb



3 Anschlusssicherung



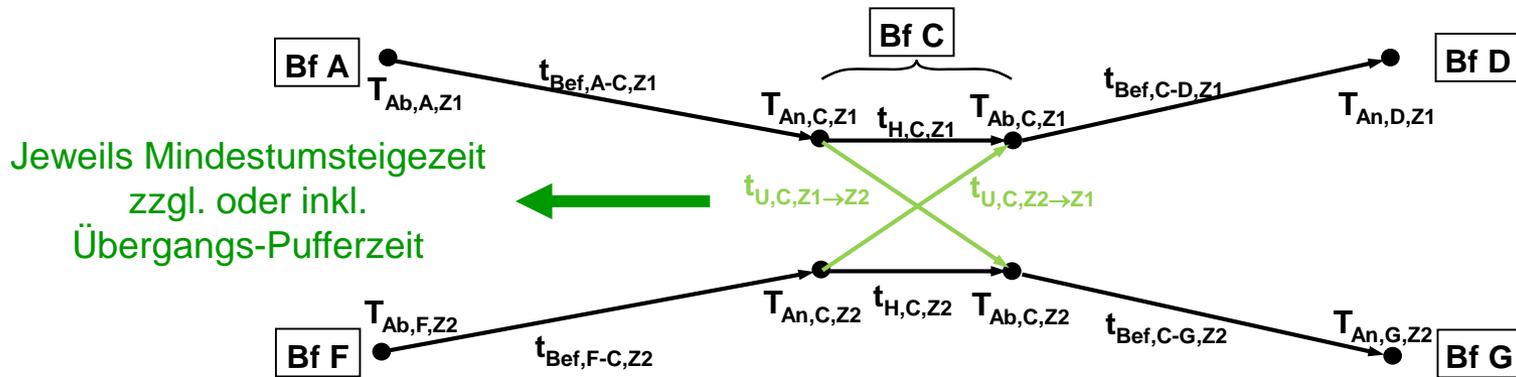
Mathematische Behandlung bei Richtungsanschlüssen:



- Übergang der Kunden analog Ressourcenübergang als Anschluss von Z1 auf Z6 in C
- Ziele sind kurze Umsteigezeit und hohe Zuverlässigkeit
- Umsteigezeit ergibt sich aus
 - Mindestumsteigezeit + Umsteigepufferzeit oder
 - nur Mindestumsteigezeit

Quelle:
 Bär. M.:
 Umdruck Sys 4.-
 2011

Mathematische Behandlung bei wechselseitigen Anschlüssen:



- Übergang der Kunden analog Ressourcenübergang als Anschluss von Z1 auf Z2 und umgekehrt in C
- Ziele sind jeweils kurze Umsteigezeit und hohe Zuverlässigkeit
- Synchronisationszeiten in der Regel erforderlich

Quelle:
 Bär. M.:
 Umdruck Sys 4.-
 2011

Ziele der Fahrplanoptimierung:**- Bezug Umsteigezeiten**

- a) Einhalten der jeweiligen Mindestumsteigezeit (inkl. Umsteigepufferzeit)

$$t_{U, Z1 \rightarrow Z2, plm} \geq t_{U, Z1 \rightarrow Z2, min}$$

- b) Einhalten der jeweiligen Mindestumsteigezeit (inkl. Umsteigepufferzeit) sowie eines kundenorientierten Maximums gleichermaßen

$$t_{U, Z1 \rightarrow Z2, min} \leq t_{U, Z1 \rightarrow Z2, plm} \leq t_{U, Z1 \rightarrow Z2, max}$$

Ziele der Fahrplanoptimierung:
- Bezug Wartezeiten beim Umsteigen

a) Minimieren der Wartezeiten über alle Umsteiger

$$\sum_{\forall U (Z_i \rightarrow Z_j)} t_{WU, Z_i \rightarrow Z_j, plm} = \sum_{\forall U (Z_i \rightarrow Z_j)} (t_{U, Z_i \rightarrow Z_j, plm} - t_{U, Z_i \rightarrow Z_j, min}) \rightarrow \text{Min}$$

b) Minimieren der gewichteten Wartezeiten über alle Umsteiger

$$\sum_{\forall U (Z_i \rightarrow Z_j)} c_{U, (Z_i \rightarrow Z_j)} \cdot t_{WU, Z_i \rightarrow Z_j, plm}$$

$$= \sum_{\forall U (Z_i \rightarrow Z_j)} c_{U, (Z_i \rightarrow Z_j)} \cdot (t_{U, Z_i \rightarrow Z_j, plm} - t_{U, Z_i \rightarrow Z_j, min}) \rightarrow \text{Min}$$

$\sum_{\forall U (Z_i \rightarrow Z_j)} \dots$	[-]	Summe über alle Umsteigebeziehungen zwischen beliebigen Zügen Z_i und Z_j
$c_{U(Z_i \rightarrow Z_j)}$	[-]	Gewicht der Umsteigeverbindung von Zug Z_i nach Zug Z_j

Ziele der Fahrplanoptimierung:

- Bezug Synchronisationszeiten

a) Einhalten einer maximalen Synchronisationszeit für alle Halte

$$t_{\text{Sy, Zj, plm}} = (t_{\text{H, Zj, plm}} - t_{\text{H, Zj, min}})^* \leq t_{\text{Sy, Zj, max}}$$

b) Minimieren der Synchronisationszeiten über alle Anschlüsse

$$\sum_{\forall H, Zj} t_{\text{Sy, Zj, plm}} \rightarrow \text{Min}$$

c) Minimieren der gewichteten Synchronisationszeiten über alle Anschlüsse

$$\sum_{\forall H, Zj} c_{\text{H, Zj}} \cdot t_{\text{Sy, Zj, plm}} \rightarrow \text{Min}$$

$\sum_{\forall H, Zj} \dots$ [min] Summe über alle Haltezeiten der Züge Zj

$c_{\text{H, Zj}}$ [-] Gewicht der durchgehenden Verbindung von Zug Zj bei Halt H

* nur der aus Anschlüssen resultierende Anteil der Differenz

Zugfolgebedingte Verknüpfungen

Belegungsbindungen

- Folge- und Gegenfahrten auf Strecken bei Fahren im Raumabstand
- Zugfolge in Fahrstraßenknoten
- Zugfolge an Zugangsstellen



Abbildung der Verknüpfung erfolgt in einem maßgebenden Knoten des gemeinsamen Belegungsabschnittes für jeweils zwei Fahrten

verkehrliche Bindungen

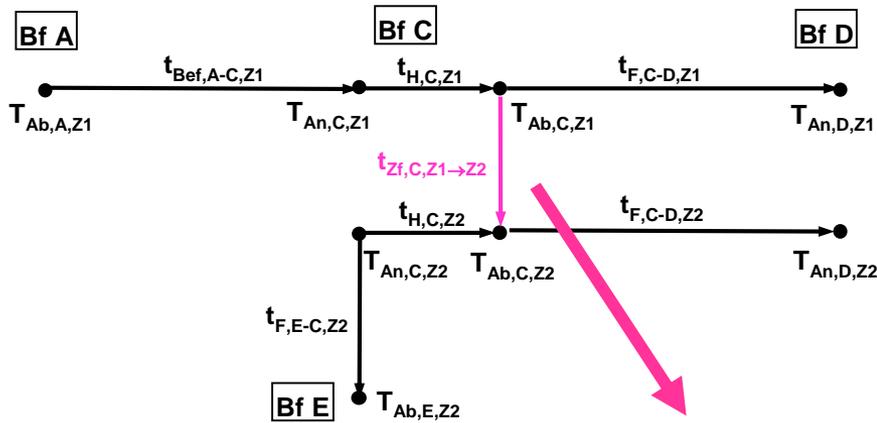
- gewünschte Zugfolge auf gemeinsamer Strecke



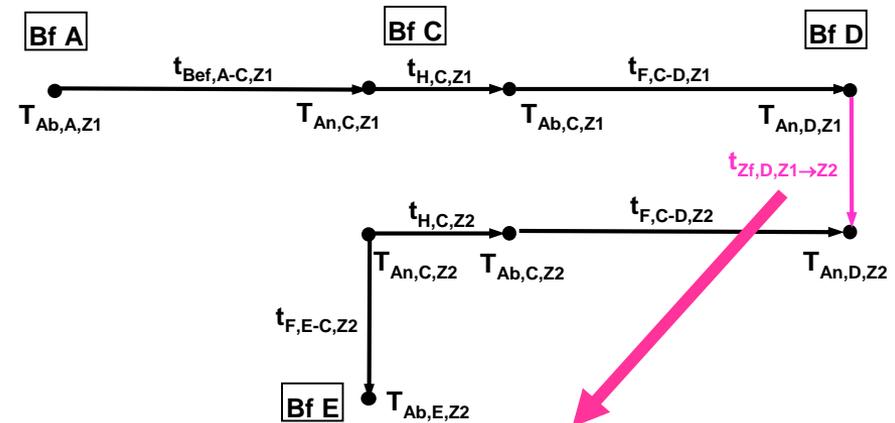
Abbildung der Verknüpfungen

im ersten gemeinsamen Knoten

im letzten gemeinsamen Knoten



Vorsprungszeit



Nachfolgezeit

Ziele der Fahrplanoptimierung:
- Bezug Wartezeiten der Züge

a) Minimieren der zugfolgebedingten Wartezeiten

$$\sum_{\forall H, Z_j} t_{W, Z_j, plm} \rightarrow \text{Min}$$

b) Minimieren der gewichteten zugfolgebedingten Wartezeiten

$$\sum_{\forall H, Z_j} c_{H, Z_j} \cdot t_{W, Z_j, plm} \rightarrow \text{Min}$$

mit $t_{W, Z_j, plm} = t_{H, Z_j, plm} - t_{H, Z_j, Reg} - t_{Sy, Z_j, plm}$

$\sum_{\forall H, Z_j} \dots$	[min]	Summe über alle Haltezeiten der Züge Z_j
$t_{H, Z_j, plm}$	[min]	planmäßige Haltezeit des Zuges Z_j
$t_{H, Z_j, Reg}$	[min]	Regelhaltezeit des Zuges Z_j
$t_{Sy, Z_j, plm}$	[min]	planmäßige Synchronisationszeit des Zuges Z_j (tritt nicht zwingend auf)
c_{H, Z_j}	[-]	Gewicht des Halts H des Zuges Z_j

Ziele der Fahrplanoptimierung:
- Bezug Zugfolge bei verkehrlichen Bindungen (Streckentakt)

a) Minimieren der Summe mittlerer Taktabweichungen auf allen Abschnitten k mit Linienüberlagerungen

$$\sum_{\forall LÜ_k} |\bar{\Delta t}_T|_k \rightarrow \text{Min} \quad \text{mit} \quad |\bar{\Delta t}_T|_k = \sum_{\forall Z_i \rightarrow Z_j; k} |t_{Zf, Z_i \rightarrow Z_j} - t_T/n|/n$$

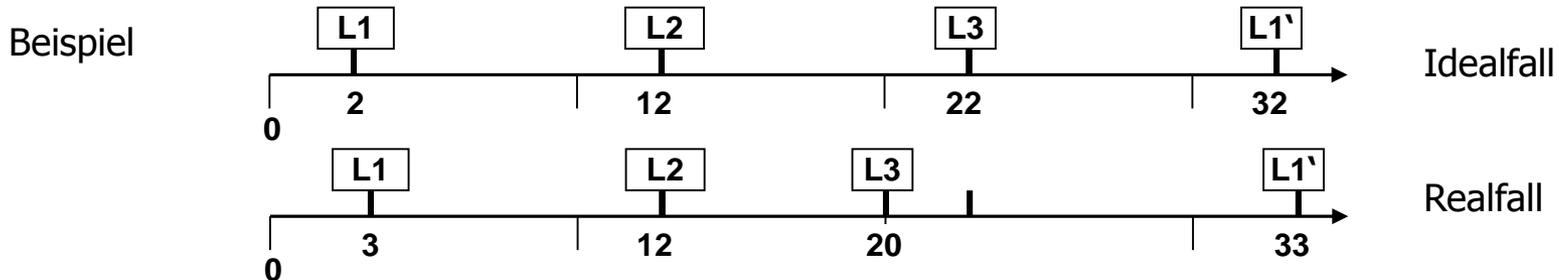
b) Minimieren der gewichteten Summe mittlerer Taktabweichungen auf allen Abschnitten k mit Linienüberlagerungen

$$\sum_{\forall LÜ_k} c_k \cdot |\bar{\Delta t}_T|_k \rightarrow \text{Min}$$

$\sum_{\forall LÜ_k} \dots$	[min]	Summe ... auf allen Abschnitten k mit Linienüberlagerungen
$ \bar{\Delta t}_T _k$	[min]	Betrag der mittleren Taktabweichung für Abschnitt k
$\sum_{\forall Z_i \rightarrow Z_j; k} \dots$	[min]	Summe ... zwischen den Zügen i und j auf allen Abschnitten k
n	[-]	Zahl der jeweils mit analoger Taktzeit t_T verkehrenden Linien
c_k	[-]	Gewichtung der Taktüberlagerung auf Abschnitt k

Ziele der Fahrplanoptimierung:

- Bezug Zugfolge bei verkehrlichen Bindungen (Streckentakt)



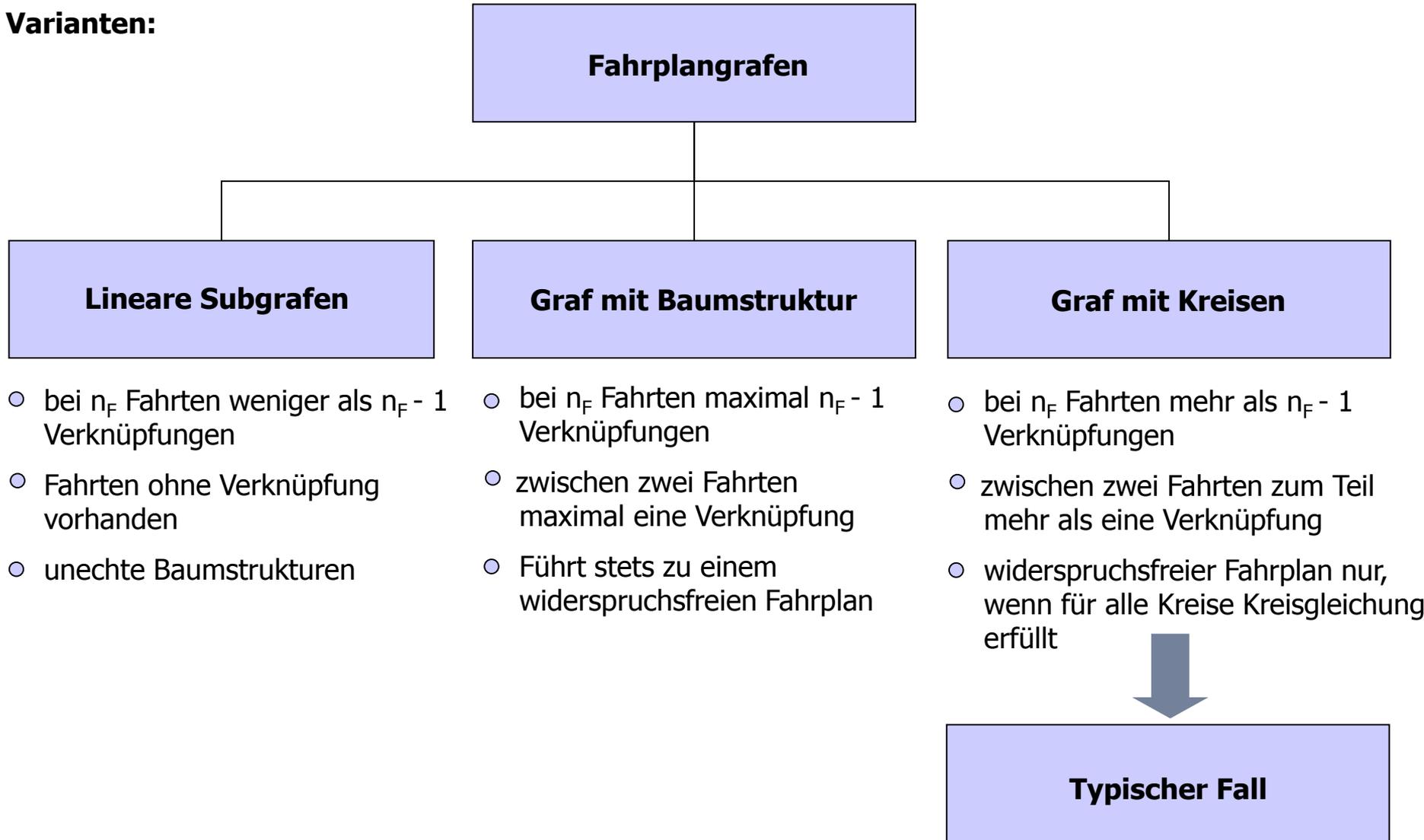
Bedingung

$$t_T/n - \Delta t_{T, Zu1} \leq t_{Zf, Zi \rightarrow Zj} \leq t_T/n + \Delta t_{T, Zu1}$$

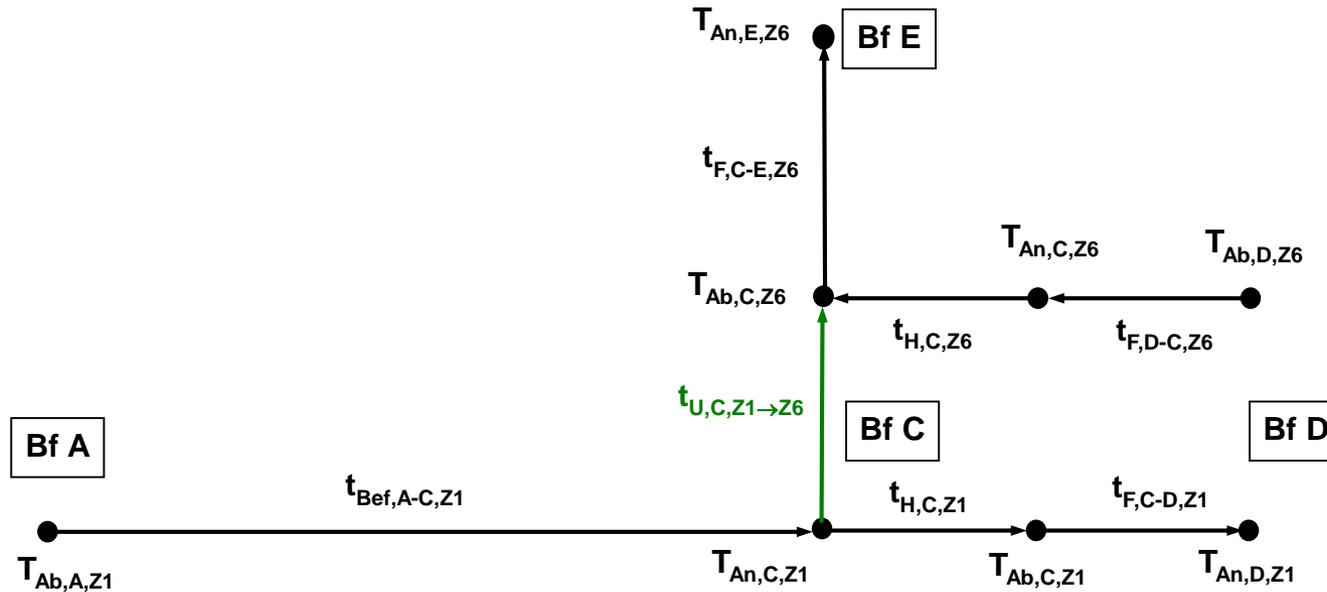
$\Delta t_{T, Zu1}$	[min]	zulässige Taktabweichung vom „idealen“ Streckentakt
t_T	[min]	analoger Taktzeit
n	[-]	Zahl der jeweils mit analoger Taktzeit t_T verkehrenden Linien
$t_{Zf, Zi \rightarrow Zj}$	[min]	Zugfolgezeit zwischen Zug i und Zug j

- 4. Fahrplanung**
 - 4.1. Einführung**
 - 4.1.1. Einordnung in die Betriebsplanung
 - 4.1.2. Definition und Einteilung von Fahrplänen
 - 4.1.3. Fahrplanformen
 - 4.1.4. Darstellungsformen
 - 4.1.5. Fahrplanelemente
 - 4.1.6. Fahrplanverknüpfungen
 - 4.2. Fahrplanelemente einer Fahrt**
 - 4.2.1 In- und Output der Fahrplanung
 - 4.2.2 Übliche Eingangsgrößen
 - 4.3. Fahrplanverknüpfungen zwischen den Fahrten**
 - 4.3.1 Fahrzeug- und Personalübergänge
 - 4.3.2 Kurzzeitige Zugfolgezeitverdichtung
 - 4.3.3 Behinderung von Gegenfahrten
 - 4.3.4 Anschlüsse
 - 4.3.5 Zugfolge
 - 4.4. Gesetzmäßigkeiten von Fahrplänen**
 - 4.4.1 Struktur des Fahrplangrafen
 - 4.4.2 Fahrplangrafen bei Taktfahrplänen
 - 4.4.3 Ansätze für die Fahrplanung

Varianten:



Fahrplangraf mit Baumstruktur:

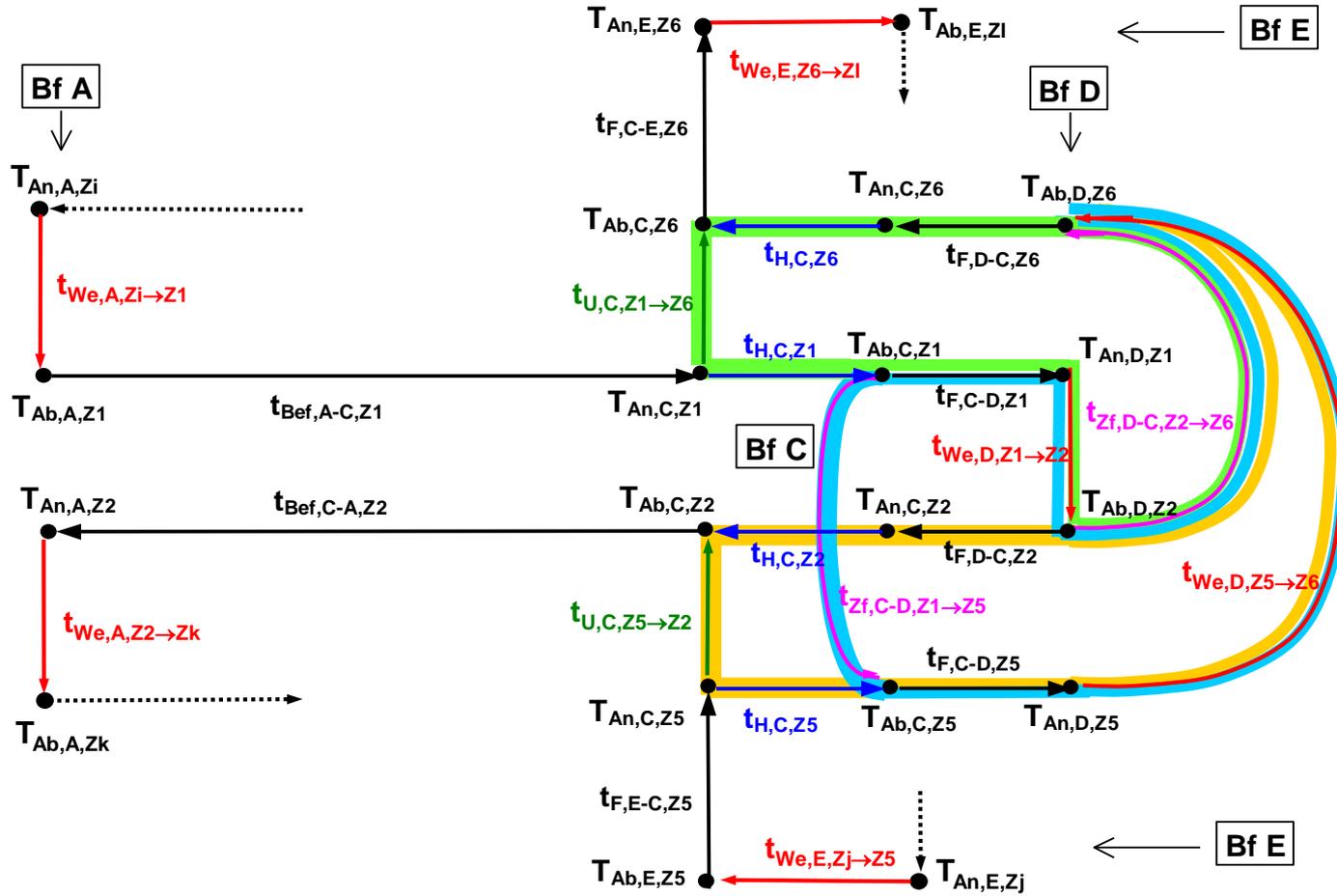


○ Beispiel:

$t_{\text{Bef,A-C,Z1}}$	= 25 min
$t_{\text{F,C-D,Z1}}$	= 12 min
$t_{\text{F,D-C,Z6}}$	= 13 min
$t_{\text{F,C-E,Z6}}$	= 15 min
$t_{\text{H,C,Z1}}$	= 1 min
$t_{\text{H,C,Z6}}$	= 1 min
$t_{\text{U,C,Z1-Z6}}$	= 5 min

Quelle:
 Bär. M.:
 Umdruck Sys 4.-
 2011

Fahrplangraf mit Kreisen:



Fahrplangraf mit Kreisen:

Zahl der Kreise:

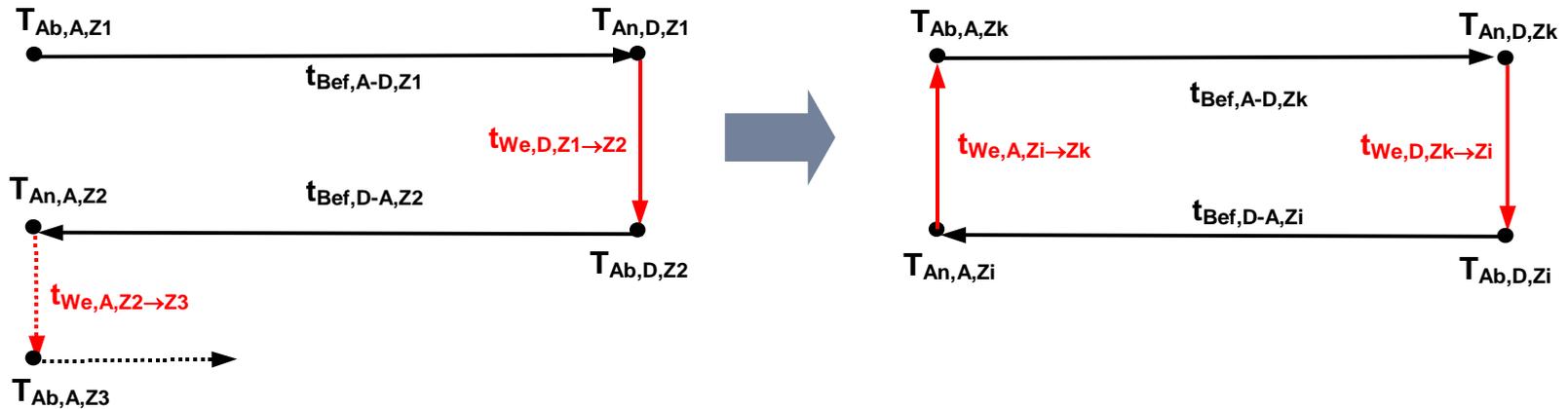
$$\mu = n_{\text{Bogen}} - n_{\text{Knoten}} + 1$$

Kreisgleichung für alle Kreise des Grafen:

$$\sum_{\forall j \in \text{Kreis}} x_j \cdot t_{\text{Bogen},j} = 0 \quad \text{mit} \quad \begin{array}{l} x_j = +1, \text{ falls Bogen in Kreisrichtung gerichtet} \\ x_j = -1, \text{ sonst} \end{array}$$

$\sum_{\forall j \in \text{Kreis}} \dots$	[-]	Summe ...
t_{Bogen}	[min]	Bogenzeit
n_{Bogen}	[-]	Zahl der Bogen
n_{Knoten}	[-]	Zahl der Knoten
μ	[-]	Zyklomatische Zahl

Übergang zum Taktfahrplan:

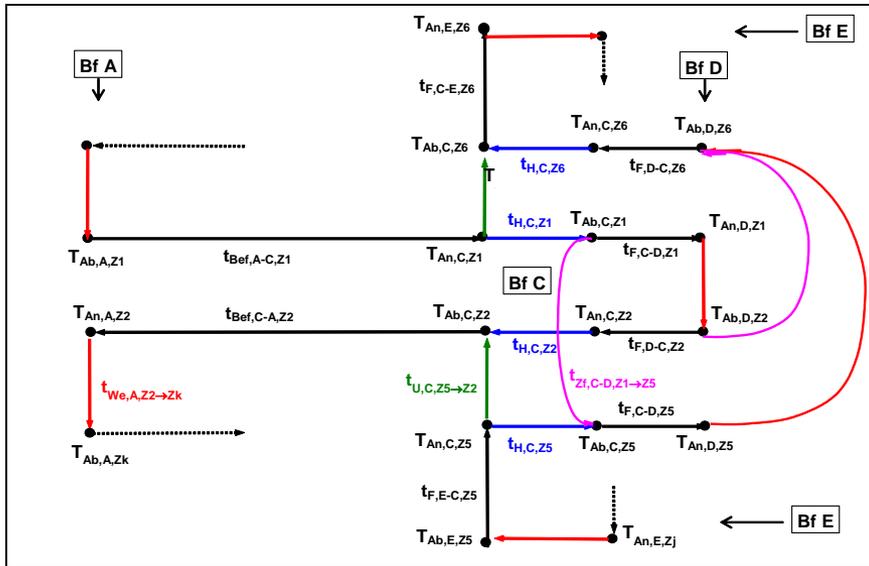


Erweitern der Definition des Fahrplangrafen:

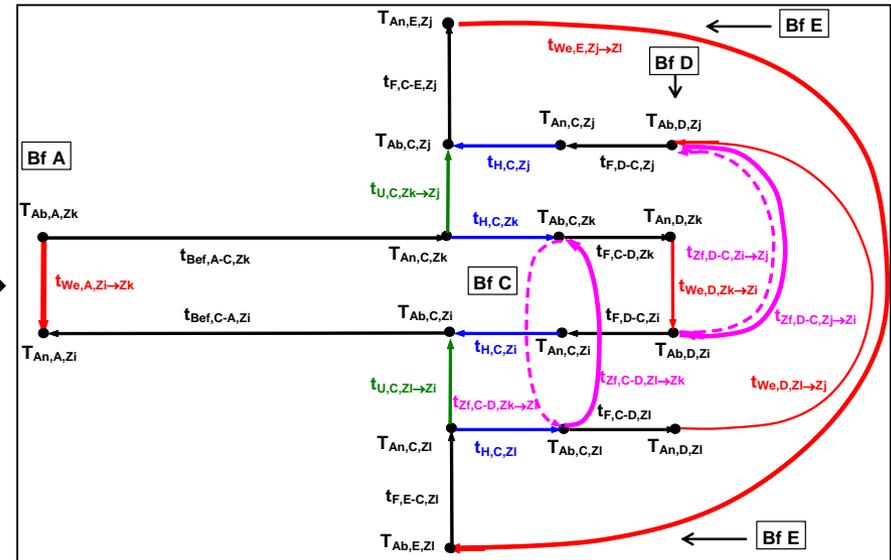
- Ein Bogen steht nicht mehr nur für einen einmaligen Beförderungsprozess oder eine Bindung, sondern für sich in jeder Taktperiode wiederholende Beförderungsprozesse oder Bindungen.
- Ein Knoten steht nicht mehr nur für einen einmaligen Zeitpunkt, sondern für einen sich in jeder Taktperiode wiederholenden Zeitpunkt.
- In der Folge entsteht eine Vielzahl zusätzlicher Kreise.

Übergang zum Taktfahrplan:

Beispiel **ohne** Taktfahrten:



Beispiel **mit** Taktfahrten:



Kreisgleichung für alle Kreise des Grafen:

$$\sum_{\forall j \in \text{Kreis}} x_j \cdot t_{\text{Bogen},j} = n \cdot t_T \quad \text{mit} \quad \begin{aligned} x_j &= +1, \text{ falls Bogen in Kreisrichtung gerichtet} \\ x_j &= -1, \text{ sonst} \end{aligned}$$

n [-] ganzzahlige Konstante

Restriktionen:

In allen Kreisstrukturen eines Taktfahrplangrafen muss folgende, prinzipiell bereits eingeführte **Kreisgleichung** erfüllt werden:

$$\sum_{k=1}^{n_{\text{Kreis}}-1} x_k \cdot t_{\text{Bogen},k \rightarrow k+1} + x_{n_{\text{Kreis}}-1} \cdot t_{\text{Bogen},n_{\text{Kreis}} \rightarrow 1} \equiv 0 \pmod{T}$$

x_k [-] Konstante für Richtung des Bogens
 $x_k = 1$, falls Bogen in Kreisrichtung gerichtet, sonst -1

Im Gegensatz zu kreisfreien Strukturen lassen sich **für alle Kreisstrukturen** innerhalb eines Fahrplangrafen die Fahrplanzeitpunkte (Knoten-Zeitpunkte) über die Bogen-Zeiten **nur dann eindeutig und widerspruchsfrei** ermitteln, wenn die Werte der Bogen-Zeiten der oben stehenden Kreisgleichung genügen.

Ziel der Fahrplanung muss es deshalb sein, für alle Zeiten, deren Bögen in Kreisstrukturen eingebunden sind, Wertekonstellationen zu planen, die die Kreisgleichung erfüllen.

Restriktionen:

Für jede Bogenzeit im Fahrplangrafen können **Randbedingungen** gelten:

$$t_{Bogen,min} \leq t_{Bogen} \leq t_{Bogen,min} + \Delta t_{Zul,Bogen}$$

Minimum $t_{Bogen,min}$:

meist kleinster betrieblich planbarer Wert (z.B. Regelfahr- oder Haltezeit, Mindestumsteigezeit)

Differenz $\Delta t_{Zul,Bogen}$:

entsteht aus einem betrieblich erwünschten Maximum oder aus der Taktperiode

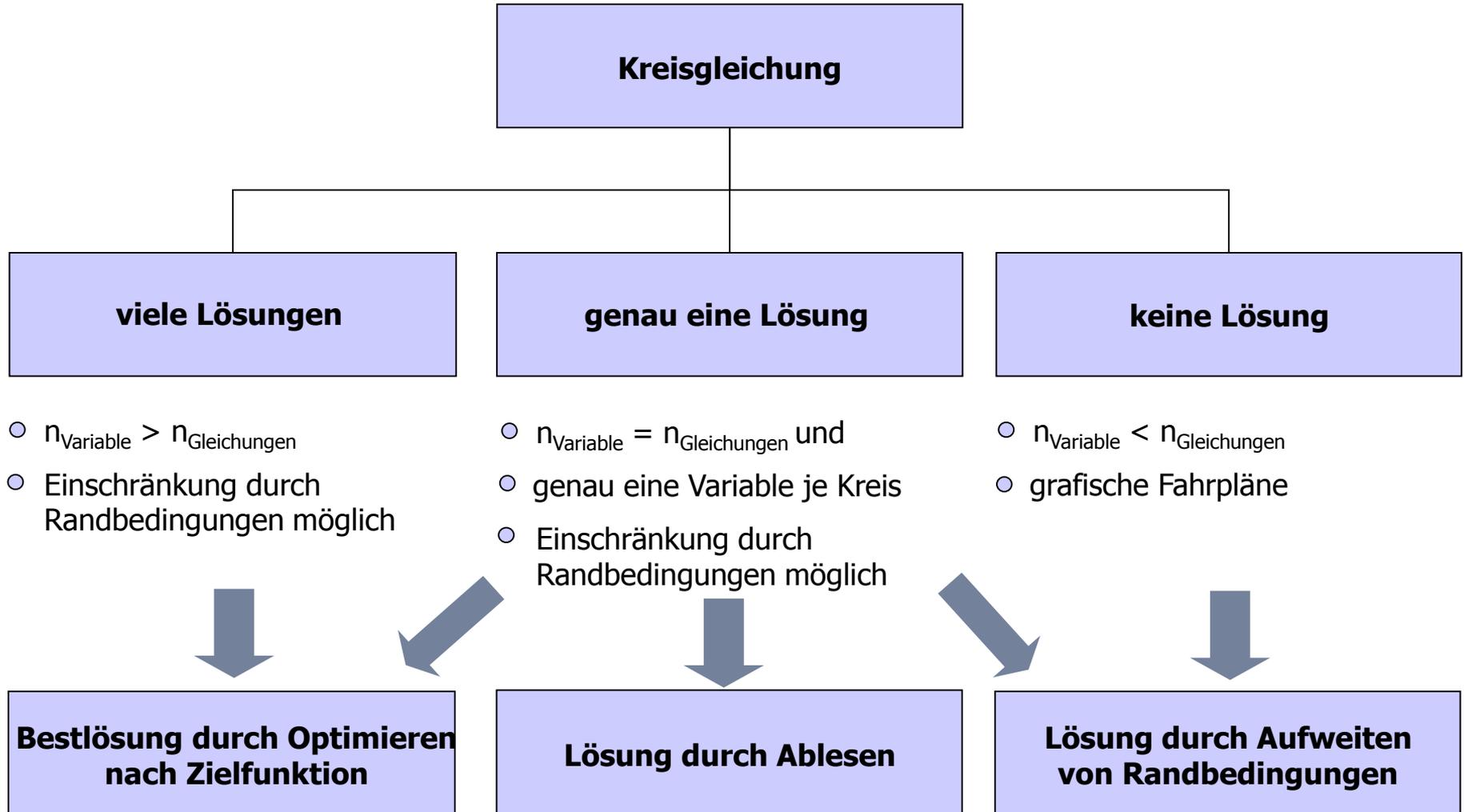
Restriktionen:

Im Allgemeinen kann maximal eine **Zielfunktion** der nachstehenden Form berücksichtigt werden:

$$\sum_{k=1}^n c_{k \rightarrow k+1} \cdot t_{\text{Bogen}, k \rightarrow k+1} \rightarrow \text{Min} \quad \text{oder} \quad \sum_{k=1}^n c_{k \rightarrow k+1} \cdot \Delta t_{\text{Zul}, \text{Bogen}, k \rightarrow k+1} \rightarrow \text{Min}$$

Erforderlichenfalls sind mehrere Ziele zu kombinieren.

Kurzfristige Lösungsmöglichkeiten:



Kurzfristige Lösungsmöglichkeiten:

Das Setzen von Randbedingungen für ausgewählte Variable und das Optimieren nach einer Zielfunktion lassen sich teilweise gegeneinander aufwiegen, wenn es sich um „weiche“ Randbedingungen handelt.

- Weiche Randbedingungen:
 - obere Schranken für Halte-, Umsteige- oder Wendezeiten
 - gewünschte Zugfolge auf gemeinsamer Strecke
- Harte Randbedingungen:
 - untere Schranken für Halte-, Umsteige- oder Wendezeiten
 - Zugfolge- und Wendezeiten, die sich aus dem Fahren im Raumabstand ergeben

Langfristige Lösungsmöglichkeiten:

Langfristige Entwicklung der Produktionsfaktoren, dass eine langfristig stabile Fahrplanstruktur entsteht.



Knotenpunktsystem

Dipl.-Ing. Steffen Dutsch
Technische Universität Dresden
Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“
Institut für Bahnsysteme und Öffentlichen Verkehr
Professur für Bahnverkehr, öffentlicher Stadt- und Regionalverkehr

Telefon: (0351) 463 36528
Telefax: (0351) 463 36529
E-Mail : Steffen.Dutsch@tu-dresden.de
Internet: www.tu-dresden.de/vkivb/p-srv/p_srv.htm