

Professur für Bahnverkehr, öffentlicher Stadt- und Regionalverkehr Technische Universität Dresden Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“, Institut für Bahnsysteme und Öffentlichen Verkehr	<b>Betriebsprozesse und Betriebsplanung im ÖV (VI-308-1, VI-621-1)</b> <b>Betriebsprozesse und Betriebsplanung im ÖPV (VI-510)</b> <b>Betriebsplanung im ÖV (BSI-25)</b>	<b>Umdruck 3</b> Wintersemester 2015/16
		Doz. Dr.-Ing. habil. Bär

### 3 Linienplanung

#### 3.1 Grundlagen

- 3.1.1 Gegenstand
- 3.1.2 Zielkriterien und Randbedingungen
- 3.1.3 Begriffe und Einteilungen

#### 3.2 Anpassung an das Verkehrsaufkommen

- 3.2.1 Basisgrößen
- 3.2.2 Reagieren auf zeitliche Verkehrsschwankungen
- 3.2.3 Reagieren auf örtliche Verkehrsschwankungen

#### 3.3 Verfahren zur Linienplanung

- 3.3.1 Übersicht
- 3.3.2 Beispiel 1 - Linienplanung aus Kundensicht / Basislinienverfahren
- 3.3.3 Beispiel 2 - Linienplanung aus betriebswirtschaftlicher Sicht / Endknoten-zuordnungsverfahren

### Literaturhinweise

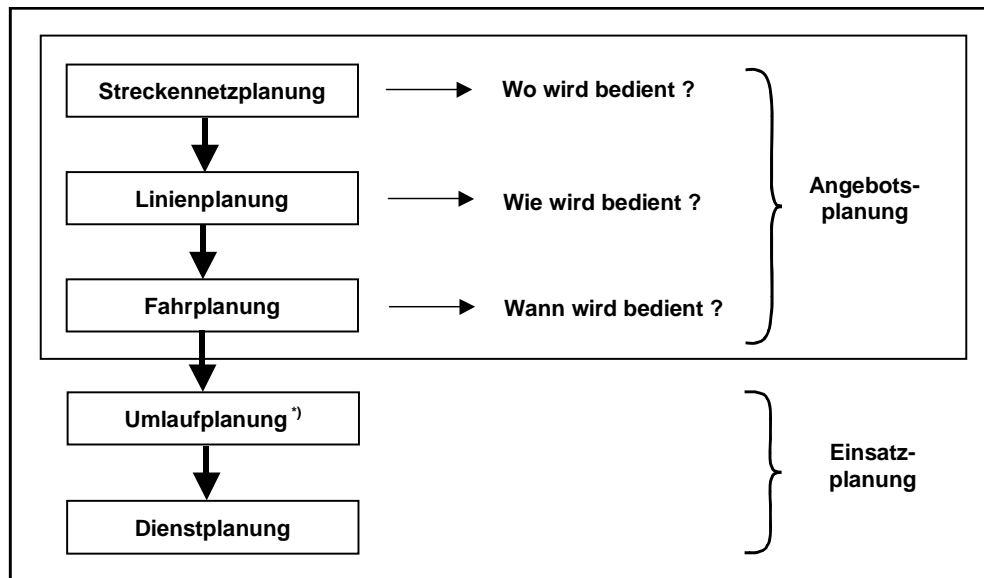
- [BOR 08] Borndörfer, R.; Neumann, M. u.a.: Angebotsplanung im Öffentlichen Nahverkehr. Tagungsmaterial „Heureka'08“ Stuttgart 2008 (mit Literaturverzeichnis zur Linienplanung)
- [BOR 11] Borndörfer, R. u.a.: Linienoptimierung – reif für die Praxis. Tagungsmaterial „Heureka'11“ Stuttgart 2011
- [BOR 12] Borndörfer, R. u.a.: Optimierung des Liniennetzes 2010 in Potsdam. Der Nahverkehr 2012, H. 4, S. 34-39
- [BUS 98] Bussieck, M.: Optimal Lines in Public Rail Transport. Dissertation TU Braunschweig 1998
- [DIE 78] Dienst, H.: Linienplanung im spurgeführten Personenfernverkehr mit Hilfe eines heuristischen Verfahrens. Dissertation TU Braunschweig, Schriftenreihe IVEV, Band 18, 1978
- [FGSV 10] FGSV: Empfehlungen für Planung und Betrieb des Öffentlichen Personennahverkehrs. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen Köln 2010
- [KLIE 11] Klier, M.J.: Simultane Linienoptimierung und Nachfrageprognose im Öffentlichen Personennahverkehr. Dissertation TU Dresden 2011
- [LIE 08] Liebchen, C.: Linien-, Fahrplan-, Umlauf- und Dienstplanoptimierung: Wie weit können diese bereits integriert werden? Tagungsmaterial „Heureka'08“ Stuttgart 2008
- [MÜL 67] Müller, K.-H.: Ein mathematisches Modell für die Bestimmung von Endknoten-Zuordnungen in Nahverkehrsnetzen. Dissertation Bergakademie Freiberg 1967
- [KIR 02] Kirchhoff, P.: Städtische Verkehrsplanung – Konzepte, Verfahren, Maßnahmen. B.G. Teubner Verlagsgesellschaft Stuttgart / Leipzig 2001
- [LINOP] Nachtigall, K.: Linienplanung mit LINOP (Flyer zum Programmsystem LINOP) TU Dresden, Professur für Verkehrsströmungslehre
- [OLT 94] Oltrogge, C.: Linienplanung für mehrstufige Bedienungssysteme im öffentlichen Personenverkehr. Dissertation TU Braunschweig, Schriftenreihe IVEV, Band 50 1994
- [REI 12] Reinhardt, W.: Öffentlicher Personennahverkehr. Vieweg+Teubner Springer Fachmedien Wiesbaden 2012
- [RITT 09] Rittner, M.; Nachtigall, K.: Simultane Liniennetz- und Taktfahrplanoptimierung. Der Eisenbahningenieur 2009, H. 6, S. 6-10
- [RITT 11] Rittner, M.; Nachtigall, K. u.a.: Anwendung der Liniennetzoptimierungssoftware LINOP für die Dresdner Verkehrsbetriebe AG. In: Verkehr und Technik H. 11/2011, S. 308-310
- [RÜG 86] Rüger, S.: Transporttechnologie Städtischer öffentlicher Personenverkehr, 3. Auflage. Transpress Verlag für Verkehrswesen Berlin 1986
- [SAA 10] ÖPNV-Plan 2010-2015/2025. Ministerium für Landesentwicklung und Verkehr Sachsen-Anhalt
- [SON 77] Sonntag, H.: Linienplanung im öffentlichen Personennahverkehr. Dissertation TU Berlin 1977
- [VDV 92] VDV: Linienoptimierung. VDV-Schrift 10/92, 1992
- [WEG 74] Wegel, H.: Fahrplangestaltung für taktbetriebene Nahverkehrsnetze. Dissertation TU Braunschweig, Schriftenreihe IVEV, Band 8. 1974

### 3.1 Grundlagen

VERTIEFENDE LITERATUR: [KIR 02], [RÜG 86], [VDV 92], [BOR 08], [LIE 08], [KLIE 11]

#### 3.1.1 Gegenstand

Einordnung der Linienplanung in die Betriebsplanung (Bild 3.1):



*\*) auch Wagenlaufplanung, Fahrzeugeinsatzplanung, Personaleinsatzplanung*

Linienplanung setzt voraus, dass die Bedienung des Streckennetzes durch „regelmäßige Verkehrsverbindungen zwischen bestimmten Ausgangs- und Endpunkten, auf denen Fahrgäste an bestimmten Haltestellen ein- und aussteigen können“<sup>1</sup>, erfolgt.

Setzt man für „regelmäßig“ eine Bedienungshäufigkeit von > 1 Fahrt je Tag an, kann der Linienverkehr als typische Bedienungsform des ÖPV gelten

- im Stadtverkehr,
- weitgehend im Regional- und Fernverkehr mit Bussen und
- seit der Einführung von Taktfahrplänen auch weitgehend im Eisenbahnverkehr.

Aus der vorzusehenden regelmäßigen Bedienung bestimmter Verkehrsverbindungen resultiert die Planungsaufgabe, diese Verkehrsverbindungen günstig im Interesse der Fahrgäste und der Betreiber festzulegen, d.h. **Gegenstand der Linienplanung** sind im Wesentlichen:

- das Bestimmen günstiger Linienverläufe (Ausgangs- und Endpunkte, Halte) für die einzelnen Linien,
- das Abstimmen der Linien in einem Liniennetz,
- das Bestimmen der Form und Häufigkeit der Bedienung,
- bei mehrstufigen Verkehrssystemen: der Systemsplit.

Die o.a. drei Stufen der Angebotsplanung sind eng miteinander verzahnt, die Linienplanung stellt dabei die mittlere Komponente dar. Daraus resultieren große Interdependenzen zu den benachbarten Planungsstufen, ganz besonders aber zur Fahrplanung und auch zu den nachgelagerten Stufen der Einsatzplanung. Ideal wäre sicherlich ein Gesamtmodell, in dem die in den einzelnen Planungsstufen beeinflussbaren, sich teilweise zuwiderlaufenden Zielsetzungen unter Berücksichtigung aller Wechselwirkungen insgesamt optimiert werden könnten. Dieses Herangehen schied früher aufgrund der Komplexität aus Praktikabilitätsgründen aus. Die jüngste Entwicklung des Operations Research lässt aber für die Zukunft zunehmend Werkzeuge für eine integrierte Planung erwarten (vgl. [LIE 08], [RITT 09]). In der Praxis bewährt sich bisher eine interaktive Herangehensweise zwischen den Planungsstufen. Bei räumlich und umfänglich begrenzten Planungsaufgaben ist z.T. schon eine gemeinsame Bearbeitung mehrerer Planungsstufen möglich, z.B. Fahr- und Umlaufplanung im Regionalverkehr.

Aus didaktischen Gründen werden die Streckennetzplanung, die Linienplanung und die Fahrplanung hier weiterhin separat eingeführt.

<sup>1</sup> sinngemäß aus dem Personenbeförderungsgesetz § 42 „Linienverkehr mit Kraftfahrzeugen“

Ein Liniennetz sollte aus Gründen der Kundenakzeptanz nicht im selben häufigen Rhythmus wie der Fahrplan (dieser i.d.R. jährlich) verändert werden. Dennoch gibt es eine Reihe von Gründen, die eine Veränderung eines Liniennetzes erfordern können. Oft wird dies jedoch nicht zu einer völlig neuen Liniennetzbildung, sondern nur zu einer Veränderung, Ergänzung oder Streichung einiger Linien führen.

Gründe für eine Liniennetzoptimierung	
externe	unternehmens- bzw. aufgabenträgerinterne
<ul style="list-style-type: none"> <li>• veränderte Verkehrsströme in Umfang und Relation, z.B. infolge Bevölkerungsentwicklung, Stadtentwicklung, Wirtschaftsansiedlungen</li> <li>• Veränderungen im nutzbaren Streckennetz, z.B. Straßenbau, verkehrsberuhigte Zonen</li> <li>• Veränderungen im Angebot von Anschlussverkehrsmitteln</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Veränderte Kooperation der Verkehrsmittel, z.B. Abbau von Parallelverkehr</li> <li>• Verbesserung der Wirtschaftlichkeit des Fahrzeug- und Personaleinsatzes</li> <li>• Verbesserung der Angebotsqualität</li> <li>• Neu auszuschreibende Verkehre</li> </ul>

### 3.1.2 Zielkriterien und Randbedingungen

Zielkriterien		
	aus Kundensicht	aus Betreibersicht
<i>allgemeine</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reisezeit</li> <li>• Fahrpreis</li> <li>• Komfort</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• niedrige Kosten</li> <li>• hohe Erlöse</li> </ul>
durch die Linienplanung beeinflussbare	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bedienungshäufigkeit in den Kundenrelationen</li> <li>• Direktfahrmöglichkeiten vs. Umsteigezwang</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bedienungshäufigkeit der Linien</li> <li>• Anzahl und Länge der Linien</li> <li>• Fahrzeug- und Personalbedarf</li> </ul>

+

Randbedingungen		
infrastrukturelle	fahrzeugseitige	betriebliche

#### Randbedingungen

Die Lösungsmöglichkeiten in der Linienplanung werden i.allg. durch betriebliche Randbedingungen beeinflusst bzw. beschränkt, die nicht oder nur langfristig änderbar sind.

	Beispiele für Randbedingungen	Gründe
Anlagen	nur ausgewählte Punkte des Streckennetzes als Linienendpunkte zugelassen, z.T. nicht aus allen Richtungen	notwendige Infrastruktur zum Wenden
	nur ausgewählte auf einen Knoten zulau-fende Streckenabschnitte lassen sich durch durchgehende Linien verbinden	infrastrukturell begrenzte Fahrmöglich-keiten an Verzweigungen des Strecken-netzes
	minimal zulässige Zugfolgezeiten auf Streckenabschnitten, in Knoten bzw. Linienendpunkten	begrenzte Kapazität der vorhandenen Anlagen
Fahrzeuge	begrenzte Platzkapazität der Züge	begrenzte Kapazität und Zugbildungs-fähigkeit der Fahrzeuge; maximal zulässige Zuglängen
	begrenzte Platzkapazität der Züge auf bestimmten Streckenabschnitten	begrenzte Nutzlängen der Haltestellen bzw. von Kreuzungsgleisen
		Ausbauzustand und Linienführung von Straßen
Anlagen + Fahrzeuge	maximale Linienlänge (i.d.R. als unscharfe Größe)	fahrzeugtechnische Probleme (Ergänzung Betriebsstoffe u.ä.); Verspätungsanfälligkeit
Sonstige	Lage der Betriebshöfe	minimale Leerfahrten bei ausgewogener Auslastung der Betriebshöfe

### 3.1.3 Begriffe und Einteilungen

#### Linienformen

Mit dem Begriff der Linienform werden Linien hinsichtlich ihrer Lage innerhalb des betrachteten, insbesondere **monozentrischen Verkehrsraumes** und ihrer geometrischen Form unterschieden:

- Radiallinie:** beginnt am Rand und endet im bzw. unmittelbar am Zentrum des Verkehrsraumes
- Durchmesserlinie:** beginnt und endet am Rand des Verkehrsraumes und durchquert bzw. tangiert unmittelbar dessen Zentrum; entsteht durch Zusammenfügen von zwei Radiallinien
- Tangentiallinie:** berührt das Zentrum des Verkehrsraumes nicht, sondern erschließt tangentiale Verkehrsbedürfnisse im Verkehrsraum
- Zubringerlinie:** schließt ein Gebiet an eine oder mehrere Linien anderer Formen an, die aus technischen oder wirtschaftlichen Gründen nicht bis dorthin geführt werden
- Ringlinie:** entsteht durch Zusammenfügen mehrerer Radial-, Tangential- oder Zubringerlinien zu einer geschlossenen Linie

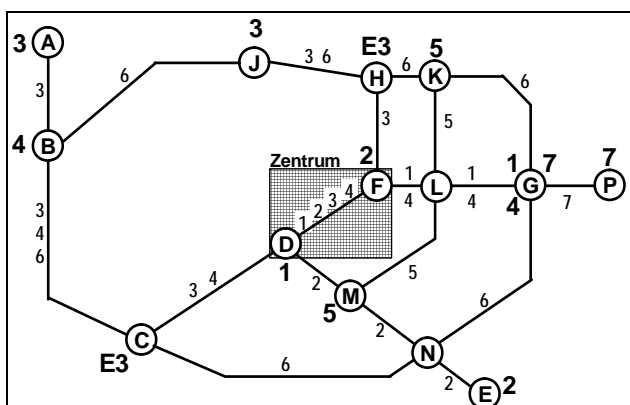
#### Linienarten (üblich vornehmlich im Stadtverkehr)

Mit dem Begriff der Linienart werden Linien hinsichtlich ihrer Einsatzzeit unterschieden:

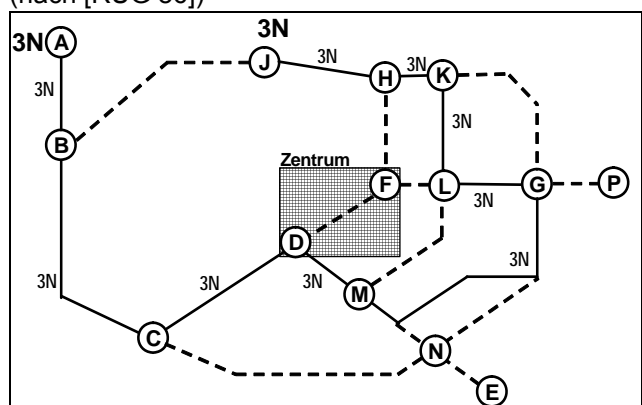
- Stammlinie:** verkehrt während der gesamten Betriebszeit innerhalb des Liniennetzes
- Tageslinie:** verkehrt nur tagsüber, beginnt 4 ... 6 Uhr, endet bei kurzer Einsatzzeit 17 ... 20 Uhr, bei langer Einsatzzeit 22 ... 24 Uhr
- Ergänzungslinie:** verkehrt nur in Zeitabschnitten besonders hoher Belastung, entweder generell in der Hauptverkehrszeit (hier ggf. als **Berufsverkehrslinie** bezeichnet) oder auch bei besonderen Ereignissen (dann z.B. als **Veranstaltungs-** oder **Sonderlinie** bezeichnet); sie hat einen eigenen Linienverlauf und eine eigene Bezeichnung
- Einsatzlinie:** sie folgt in ihrer Linienführung einer Stamm-, Tages- oder Ergänzungslinie, verkehrt jedoch i. Allg. nicht über deren gesamte Linienlänge; sie wird in Zeiten und Abschnitten besonders hoher Belastung eingesetzt; ihre Bezeichnung wird meistens von der Bezeichnung der Linie, die sie verstärkt, abgeleitet.
- Nachtlinie:** verkehrt vom Einsatzen (lange Einsatzzeit) der Tageslinien bis zum Einsatzbeginn der Tageslinien

Stamm- und Tageslinien werden nach [VDV 92] auch als **Grundlinien** bezeichnet. Darüber hinaus ist auch der Begriff der Verstärkungslinien gebräuchlich, allerdings in differierender Bedeutung. [RÜG 86] verwendet ihn synonym für die Ergänzungslinie, während der Begriff in [VDV 92] als Synonym für die Einsatzlinie definiert wird.

**Bild 3.2: Beispielnetz als Stadtverkehrsnetz**  
(nach [RÜG 86])



**Bild 3.3: Beispiel für eine Nachtverkehrsnetz**  
mit nur einer Nachtlinie 3N, als modifizierte Linie 3  
(nach [RÜG 86])



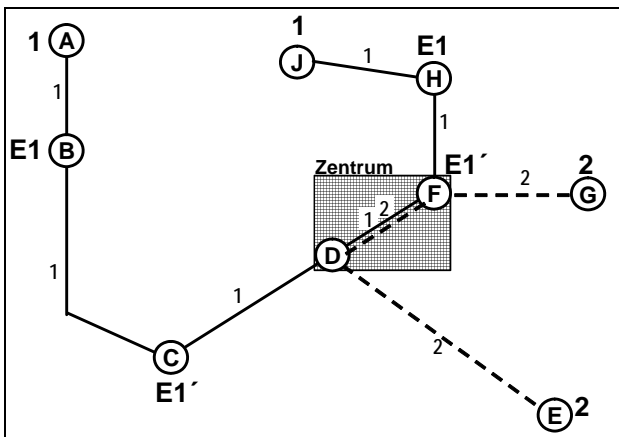
## Netztypen (in Bezug auf die Vernetzung vornehmlich von Radial- und Durchmesserlinien)

Während für die Führung von Tangential-, Ring- und Zubringerlinien auf der Basis des Streckennetzes und der Verkehrsströme meist wenig Gestaltungsspielraum bleibt, bestehen für Radial- und Durchmesserlinien zwei deutlich unterscheidbare Prinzipien ihrer Kombination. Mit dem Begriff des Netztypes wird unterschieden, in welchem Maße dabei eine Verbindung verschiedener Achsen des Streckennetzes mit durchgehenden Linien hergestellt wird oder nicht:

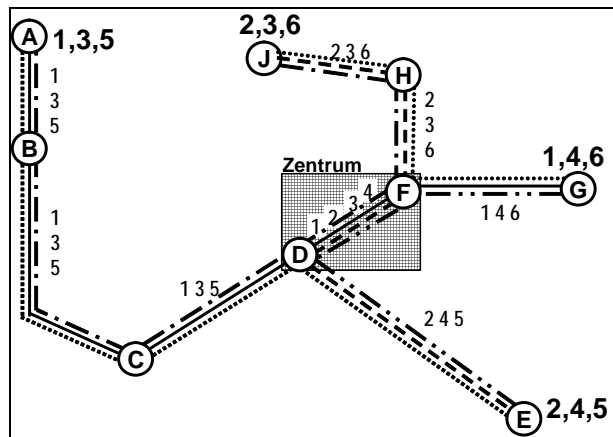
**Achsennetz:** Ziel ist es, die Achsen weitgehend nur durch eine Linie (oder Liniengruppe mit Einsatzlinien) zu bedienen. Ausnahmen betreffen nur Abschnitte, auf denen sich infolge der Struktur des Streckennetzes mehrere Achsen überlagern. Dies tritt praktisch oft im Zentrum bzw. in Zentrumsnähe auf.

**Verästelungsnetz:** Ziel ist es, zwischen sehr vielen Streckenabschnitten untereinander Direktverbindungen anzubieten.

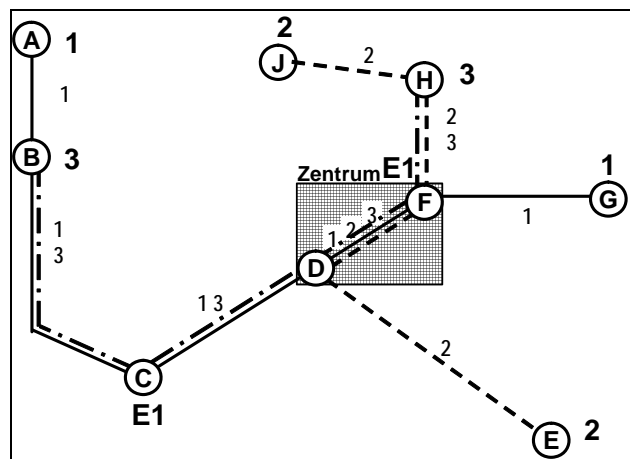
**Bild 3.4: Beispiel Achsennetz** (nach [RÜG 86])



**Bild 3.5: Beispiel Verästelungsnetz** (nach [RÜG 86])



**Bild 3.6: Kompromiss aus Verästelungs- und Achsennetz (sog. Bedarfsliniennetz)** (Bsp. [RÜG 86])



## 3.2 Anpassung an das Verkehrsaufkommen

VERTIEFENDE LITERATUR: [RÜG 86], [KIR 02]

### 3.2.1 Basisgrößen

Eine wesentliche Basisgröße des Angebotes im ÖV stellt die **Bedienungshäufigkeit f** bzw. ihr Reziprokwert, die **mittlere Zugfolgezeit**, dar. Dabei ist heutzutage in der Mehrzahl der Fälle eine Bedienung im Takt anzustreben, d.h. konstante Zugfolgezeiten, auch als **Taktzeit** bzw. **Taktperiode** bezeichnet (s.a. Kapitel 4).

$$f = 1/\bar{t}_{zf} \quad (3.1a)$$

$$\bar{t}_T = \bar{t}_{zf} \quad \text{mit } t_{zf} = \text{const.} \quad (3.1b)$$

Die notwendige Bedienungshäufigkeit wird von zwei Komponenten der Verkehrsnachfrage bestimmt:

Verkehrsnachfrage:	Menge	+	Zeitpunkt
↓	↓		↓
Bedienung:	mengengerecht	+	zeitgerecht
↓	↓		↓
<b>Bedienungshäufigkeit:</b>	<b>a) nach notwendigem Platzangebot</b>	+	<b>b) nach kundengerechter Zugfolgezeit</b>

#### zu a) Notwendiges Platzangebot

Die Bedienungshäufigkeit muss erstens danach bemessen werden, dass unter Beachtung des **Platzangebotes P** der eingesetzten Fahrzeuge und des **maximal anzusetzenden Platzausnutzungsgrades**  $\gamma_{\max}$  die Verkehrsnachfrage Q mengenmäßig abgedeckt werden kann.

$$f_P = Q / (\gamma_{\max} * P) \quad (3.2)$$

Dabei ist i.d.R. zu unterscheiden, ob und in welcher Größenordnung in den Fahrzeugen Stehplätze mit zum Ansatz gebracht werden (können). Tendenziell gilt, je kürzer die Beförderungsweite, je eher sind Stehplätze als zumutbar anzusehen, so dass insbesondere im Stadtverkehr und teilweise im Regionalverkehr Stehplätze mit zum Ansatz gebracht werden. Folgende Empfehlungen werden in [FGSV 10] in Form einer Sitzplatzverfügbarkeit  $V_{Si}$  bzw. Stehflächenverfügbarkeit  $V_{St}$  gegeben:

QS	> 3 km		≤ 3 km	
	$V_{Si}$ [Sitzplatz / Fg.]	$V_{St}$ [m <sup>2</sup> /stehender Fg.]	$V_{Si}$ [Sitzplatz / Fg.]	$V_{St}$ [m <sup>2</sup> /stehender Fg.]
A	≥ 1,75	---	≥ 1,33	---
B	≥ 1,33	---	≥ 1,00	---
C	≥ 1,00	---	0	≥ 0,25
D	0	≥ 0,25	0	≥ 0,20
E	0	≥ 0,20	0	≥ 0,15
F	0	< 0,20	0	< 0,15

In [FGSV 10] werden die ÖPNV-Angebote hinsichtlich verschiedener Kriterien generell in 6 Qualitätsstufen (QS) eingeteilt, wobei A i.d.R. für sehr gute Qualität steht, was sich in den Stufen bis F bis zu sehr geringer Qualität verschlechtert.

$$V_{Si} = \begin{cases} P_{Si} / n_{Fg} & \text{falls } P_{Si} \geq n_{Fg} \\ 0 & \text{falls } P_{Si} < n_{Fg} \end{cases} \quad \text{nach [FGSV 10]} \quad (3.2a)$$

$$V_{St} = A_{St} / (n_{Fg} - P_{Si}) \quad \text{falls } P_{Si} < n_{Fg} \quad (3.2b)$$

**Legende:**  $V_{Si}$ : Sitzplatzverfügbarkeit;  $P_{Si}$ : Anzahl Sitzplätze;  $n_{Fg}$ : Anzahl Fahrgäste (Fg.)  
 $V_{St}$ : Stehflächenverfügbarkeit;  $A_{St}$ : Stehfläche im Fahrzeug

Der Platzausnutzungsgrad ist einerseits ein weiterer Qualitätsaspekt, andererseits aber auch ein wichtiger Aspekt zum Reagieren auf unregelmäßige Schwankungen des Fahrgastaufkommens. Je stärker diese Schwankungen angenommen werden müssen, desto kleiner sollte der Platzausnutzungsgrad angesetzt werden.

Soll das Platzangebot nach Sitzplätzen bemessen werden,

- muss der Platzausnutzungsgrad klein angesetzt werden, wenn Stehplätze überhaupt nicht verfügbar bzw. zugelassen sind,
- darf der Platzausnutzungsgrad höher angesetzt werden, wenn eine Überlastung durch Stehplätze ausgeglichen werden kann.

Werden Stehplätze in der Bemessung berücksichtigt (wie im Stadtverkehr üblich), hängt der anzusetzende Platzausnutzungsgrad eng mit der angesetzten Stehfläche je stehendem Fahrgast zusammen. Je geringer diese Stehfläche angesetzt wird, desto eher kommt es zu einer nicht ausgleichbaren Überlastung der Fahrt, deshalb bedingt dies einen niedrigen Platzausnutzungsgrad. Üblich ist die Begrenzung auf 65% in der HVZ bei 0,25 m<sup>2</sup> Stehfläche je stehendem Fahrgast.

Zu beachten ist, dass die ermittelte Bedienungshäufigkeit auf den zu bedienenden Netzelementen des Streckennetzes auch fahrbar sein muss. Ist dies nicht der Fall, muss über Fahrzeuge bzw. andere Verkehrsmittel mit höherem Platzangebot je Zug nachgedacht werden.

#### zu b) Kundengerechte Zugfolgezeit

Die Werte für die maximale, als kundengerecht angesehene Zugfolgezeit sind in der Praxis sehr differenziert. Ihre Größenordnung kann theoretisch aus Erwägungen abgeleitet werden, möglichst keine Nachfrager wegen nicht zeitgerechter Bedienung zu verlieren. In der Praxis wird aber gerade diese Größe sehr stark durch verkehrspolitische und wirtschaftliche Zwänge beeinflusst.

$$f_{Ku} = 1 / t_{zf,max} \quad (3.3)$$

Auch bezüglich der Zugfolge- bzw. Taktzeit gibt [FGSV 10] einige Empfehlungen:

Gemeindeklasse	Taktzeiten innerhalb von Gemeinden in der NVZ [min]		
	Verdichtungsraum	Verstädterter Raum	Ländlicher Raum
Oberzentrum	5 – 15	15	--
Mittelzentrum	15 – 30	30 – 60	30 – 60
Unterzentrum	30 – 60	30 – 60	60
Gemeinde	≥ 60	≤ 60	≤ 60

Verkehrsmittel	Taktzeiten im Verdichtungsraum in der NVZ [min]		
	Zentrum	Dicht bebauter Außenbereich	Weitläufig bebauter Außenbereich
Bus	15	30	60
Straßenbahn	10	15	20
U-Bahn	7,5	10	-
S-Bahn	10	20	20-60

Im **Stadtverkehr (Großstadt-City)** kann die maximale, für zumutbar angesehene Zugfolgezeit im Tagesverkehr aus der Bedingung abgeleitet werden, dass ein Fahrgast, der einen Zug gerade verfehlt hat, trotz Warten auf den nächsten Zug nicht später ankommt, als wenn er laufen würde:

$$t_{zf,max} + t_{Bef} \leq t_G \quad (3.3a)$$

$$t_{zf,max} \leq l_G / v_G - l_{Bef} / v_{Bef} \quad (3.3b)$$

$t_{zf,max}$  = maximal zumutbare Zugfolgezeit

$f_{Ku}$  = minimale kundengerechte Bedienungshäufigkeit

$t_{Bef}$  ;  $t_G$  = Beförderungszeit ; Gehzeit

$l_{Bef}$  ;  $l_G$  = Beförderungsweg ; Gehweg (kann oft, aber nicht immer gleichgesetzt werden)

$v_{Bef}$  ;  $v_G$  = Beförderungsgeschwindigkeit ; Gehgeschwindigkeit

Im **Regional- und Fernverkehr** wird die anzusetzende Zugfolgezeit mehr und mehr durch die Vertaktung der Linien und Systeme in einem Integralen Taktfahrplan bestimmt. Diese Angebotsform setzt voraus, dass sich die Zugfolgezeiten weitgehend an einer einheitlichen Taktzeit orientieren (vgl. auch Kapitel 4), d.h.

- in den meisten Fällen die anzusetzende Zugfolgezeit der Taktzeit des Taktnetzes entspricht,
- in speziellen Fällen die anzusetzende Zugfolgezeit einem Teiler der Taktzeit entspricht.

Das Anpassen an eine differenzierte Verkehrsnachfrage innerhalb des Netzes muss dann durch ein differenziertes Platzangebot der Fahrzeuge erfolgen.

## Zusammenfassung

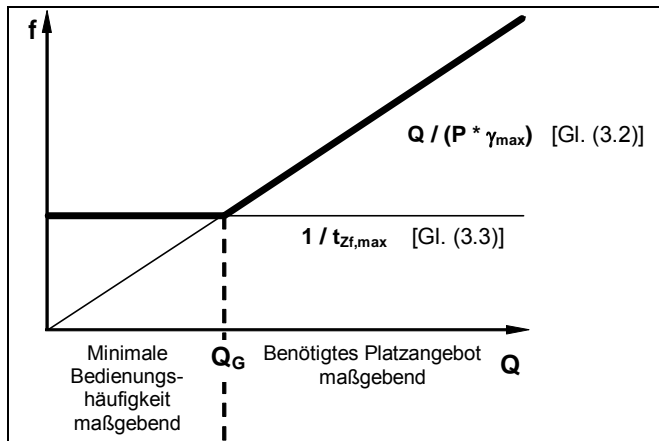
Es ist stets die Bedienungshäufigkeit nach a) bzw. b) vorzusehen, die den jeweils höheren Wert aufweist.

$$f = \text{Max}\{f_P; f_{Ku}\} \quad (3.1c)$$

Der Übergang zwischen beiden Bereichen a) und b) liegt an der **Grenzverkehrsstromstärke  $Q_G$**  (ermittelbar durch Gleichsetzen von  $f_P$  bzw.  $f_{Ku}$ ):

$$Q_G = \gamma_{\max} * P * f_{Ku} \quad (3.1d)$$

Bild 3.7:



### 3.2.2 Reagieren auf zeitliche Verkehrsschwankungen

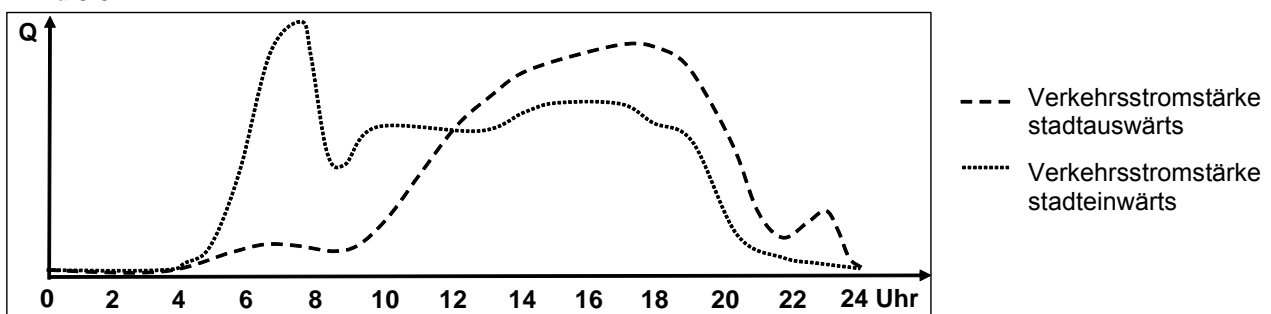
Regelmäßige Schwankungen		
innerhalb	Beispiele für Ursachen	Beispiele für verkehrliche Wirkungen
des Jahres	<ul style="list-style-type: none"> <li>Jahreszeiten (Witterung, Tagesdauer)</li> <li>Ferienzeiten, Festtage</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Verlagerung von Verkehrspotentialen vom MIV im Sommer zum ÖPV im Winter</li> <li>Absinken berufsbedingter Verkehre und Ausbleiben ausbildungsbedingter Verkehre sowie Anwachsen urlaubs- und freizeitbedingter Verkehre in den Ferien</li> </ul>
der Woche	<ul style="list-style-type: none"> <li>Wechsel von Arbeitstagen und arbeitsfreien Tagen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>berufs- und ausbildungsbedingte Verkehre weitgehend montags bis freitags</li> <li>Fernberufs- und Ausbildungsverkehr in Wochenendrandlagen</li> <li>freizeitbedingte Verkehre verstärkt am Wochenende</li> </ul>
des Tages	Täglicher Lebensrhythmus mit <ul style="list-style-type: none"> <li>Arbeits- und Schulbeginn /-ende</li> <li>Geschäftszeiten</li> <li>Nachtruhe</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>berufs- und ausbildungsbedingte Verkehre zu Arbeits- und Schulbeginn /-ende</li> <li>Einkaufs- und Geschäftsverkehr zu Geschäftszeiten</li> <li>nachts bedeutend weniger Verkehr</li> </ul>

**Regelmäßige Schwankungen** sind hinsichtlich ihres zeitlichen Ablaufs und ihrer Höhe prinzipiell prognostizierbar und können damit bei der Planung des Verkehrsangebotes berücksichtigt werden.

Typische Darstellungsform: **Ganglinien**

**Beispiel für eine Tagesganglinie im öffentlichen Stadtverkehr** (radialer Verkehr außerhalb des Stadtzentrums):

Bild 3.8





## Maßnahmen zum Ausgleich regelmäßiger zeitlicher Schwankungen

a) zeitliches Anpassen des Platzangebotes der einzelnen Züge und/oder

b) zeitliches Anpassen der Bedienungshäufigkeit

- Zu a)
- unterschiedliche Fahrzeuge zu unterschiedlichen Zeiten einsetzen, sofern vorhanden  
z.B. - Busse verschiedener Längen  
- lokbespannter Zug → Triebwagen
  - Zugzusammensetzung ändern,  
z.B. - an lokbespannten Zügen bzw. Strab mit Beiwagen Wagen zu- bzw. absetzen  
- Triebwagenzüge /Strab ein- bzw. mehrteilig fahren
  - mit höherem Platzausnutzungsgrad rechnen bei kurzzeitigen starken Spitzen  
(insbes. in nur kurzen hoch belasteten Abschnitten)
- Zu b)
- unterschiedliche Bedienungshäufigkeit im Fahrplan zu unterschiedlichen Tageszeiten und Wochentagen vorsehen  
→ Änderungen der Taktzeit der Linien innerhalb des Tages problematisch, insbesondere während der Übergangszeit; im Fernverkehr mit langen Beförderungszeiten unrealistisch  
z.B. im Stadtverkehr häufig unterschiedliche Taktzeiten in HVZ, NVZ und SVZ
  - unterschiedliche Periodenfahrpläne für unterschiedliche jahreszeitliche Anforderungen (Sommerfahrplan, Winterfahrplan, Ferienfahrplan)  
→ im Regional- und Fernverkehr bei ITF problematisch, da bei Änderung von Taktzeiten das System des ITF nicht mehr (vollständig) funktioniert  
z.B. in Stadtverkehrssystemen üblich besondere Ferienfahrpläne (auch Dresden), besonderer Sommerfahrplan mit Taktverdichtungen z.B. auch bei Usedomer Bäderbahn UBB
  - kurzzeitige Taktverdichtungen (im Stadtverkehr) ggf. ohne Mehraufwand an Fahrzeugen (und Personalen) möglich, falls die Zeitdauer der Belastungsspitze kurz ist und taktbedingte Reserven in den Wendezeiten nutzbar sind (vgl. Kap. 4)

Daten für ein Beispiel zu b): Probleme des Taktwechsels (Ausführung in der Vorlesung)

Linie mit wichtigen Anschlüssen an zwei Knoten:

Knoten A Minuten	NVZ 15'-Takt	Knoten B Minuten
01/16/31/46	Ansch	02/17/32/47
→ 05/20/35/50	→	03/18/33/48 →
← 02/17/32/47	← $t_{\text{Bef}} = 43 \text{ min}$	04/19/34/49 ←
06/21/36/51	Ansch	05/20/35/50

Knoten A Minuten	SVZ 20'-Takt	Knoten B Minuten
04/24/44	Ansch	03/23/43
→ 05/25/45	→	08/28/48 →
← 07/27/47	← $t_{\text{Bef}} = 43 \text{ min}$	04/24/44 ←
08/28/48	Ansch	09/29/49

Unregelmäßige Schwankungen	
Beispiele für Ursachen	Beispiele für verkehrliche Wirkungen
• besondere Wetterlagen	• besonders am Wochenende bestimmte Ausflugsverkehre wetterabhängig • Teilweise Umstieg von Zweiradfahrern bei schlechtem Wetter sowie von Autofahrern bei Schnee und Eis auf den ÖV
• Großveranstaltungen	• starke Verkehrsströme vor Beginn zum Veranstaltungsort und nach Ende vom Veranstaltungsort

Signifikant veränderte Verkehrsstromstärken im Zusammenhang mit unregelmäßigen Schwankungen können

- 1) den Verkehrsunternehmen vorher bekannt sein (z.B. Anmeldung von Großveranstaltungen) od.
- 2) unerwartet auftreten.

zu 1): Man kann im Rahmen der kurzfristigen Einsatzplanung ggf. noch darauf reagieren.

zu 2): Man kann i.d.R. nur im Rahmen der operativen Reserven darauf reagieren.

**Mögliche Maßnahmen:** begrenzte Teilmenge der bereits bei regelmäßigen Schwankungen aufgeführten Maßnahmen, insbesondere aus Komponente a) Anpassen des Platzangebotes, nur sehr begrenzt aus Komponente b).

Verringern sich die Verkehrsströme im Rahmen unregelmäßiger Schwankungen signifikant, sind i.Allg. nur solche Maßnahmen möglich, die nicht das veröffentlichte Angebot reduzieren.

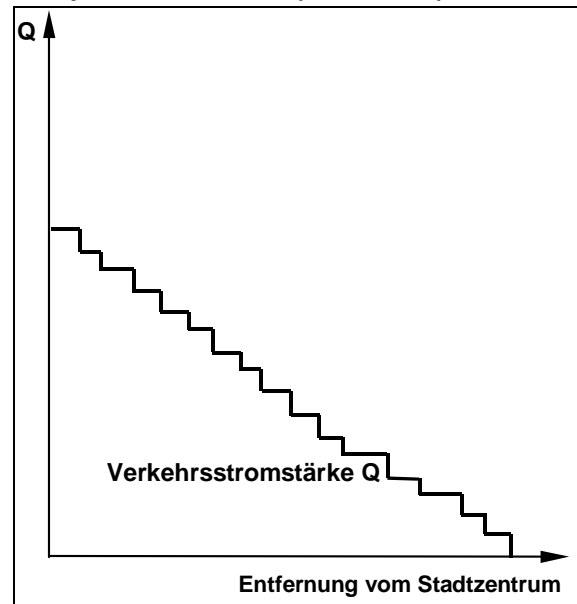
### 3.2.3 Reagieren auf örtliche Verkehrsschwankungen

Örtliche Schwankungen der Verkehrsnachfrage ergeben sich aus der örtlichen Differenziertheit der verkehrs-erzeugenden Einflussfaktoren (insbes. Siedlungs- und Wirtschaftsstruktur). Bezogen auf jeden betrachteten Verkehrsraum (Stadtgebiet, Landkreis, Land, ...) existieren i.d.R.

- einerseits Räume mit hohem Verkehrsaufkommen (Zentren) sowie
- andererseits Räume außerhalb der Zentren mit geringem Verkehrsaufkommen.

Insbesondere Linien, die durch Räume beider Charakteristiken führen, erfahren innerhalb des Linienvverlaufs oft recht unterschiedliche Verkehrsbelastungen.

Beispiel Stadtverkehr (Radiallinie) – Bild 3.9:



⇒ **Maßnahmen:**

- örtliches Anpassen des Platzangebotes der einzelnen Züge und/oder**
- örtliches Anpassen der Bedienungshäufigkeit**

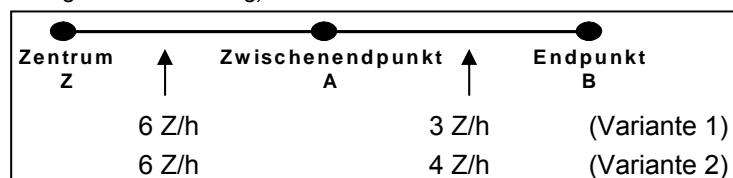
- Zu a) • Zugzusammensetzung im Linienvverlauf ändern  
 z.B. - *lokbesspannte Züge bzw. Strab mit Beiwagen: Wagen zu- bzw. absetzen (i.d.R. zu aufwändig)*  
 - *Triebwagenzüge /Strab abschnittsweise ein- bzw. mehrteilig fahren (ggf. mit Flügeln)*
- Bei kurzen Abschnitten mit Spitzenbelegung mit höherem Platzausnutzungsgrad rechnen  
 z.B. *innerhalb des Stadtzentrums*

- Zu b) • Einen Teil der Fahrten an Zwischenendpunkten enden lassen.  
*Probleme dabei:*
- *Auch nach dem Zwischenendpunkt muss eine maximale, kundengerechte Zugfolgezeit eingehalten werden.*
  - *Ist die Bedienungsfrequenz nach dem Zwischenendpunkt nicht ganzzahlig zu teilen, ergeben sich auf mindestens einem Linienteil ungleichmäßige Zugfolgezeiten.*
  - *Bei gleichmäßigen Zugfolgezeiten ergeben sich auf dem zentrumsnahen Linienteil ungleichmäßige Belastungen, da nur ein Teil der Züge zusätzlich das Verkehrsaufkommen des äußeren Linienteils aufnimmt.*

⇒ Maßnahme nur bei sehr langen Linien und großen Belastungsunterschieden anwenden!

Daten für ein Beispiel zu b) (Ausführung in der Vorlesung)

Betrachtete radiale Achse:



Notwendige Bedienungshäufigkeit:

### 3.3 Verfahren zur Linienplanung

WEITERFÜHRENDE LITERATUR: [BUS 98], [DIE 78], [MOT 83], [MÜL 67], [OLT 94], [WEG 74]

#### 3.3.1 Übersicht

Die Linienplanung erfolgt auf der Grundlage folgender *graphentheoretischen Beschreibung* des ausgewählten Streckennetzes:

- Verzweigungsstellen und zugelassene Linienendpunkte bilden die *Knoten* des Graphen.
- Strecken zwischen den genannten Knoten bilden die *Kanten* (es wird in der Regel mit *ungerichteten Graphen* gearbeitet, da die Linien in Richtung und Gegenrichtung i. Allg. übereinstimmen sollen).

Aufgabe der (einstufigen) Linienplanung ist es, unter Beachtung der Randbedingungen zulässige Linien zu erzeugen und aus diesen entsprechend der Zielfunktion und der Randbedingungen die beste Auswahl und Kombination als Liniennetz zu generieren.

Das Problem der Linienplanung ist theoretisch durch vollständige Enumeration lösbar, d.h.

- Erzeugung aller potentiellen Linien
- Erzeugung aller potentiellen Liniennetze und Bewertung jedes Netzes
- Vergleich aller Bewertungen, Auswahl des günstigsten Netzes.

Praktisch ist das Problem auf diesem Wege jedoch aufgrund seiner kombinatorischen Vielfalt (NP vollständiges Problem) kaum lösbar, denn

- bei  $p$  potentiellen Linienendknoten existieren  $n_L = \binom{p}{2}$  potentielle Linien über Bestwege  
(lässt man alternative Linienwege zu, vervielfacht sich die Anzahl potentieller Linien noch)
- aus diesen  $n_L$  Linien ergeben sich  $n_N = 2^{n_L} - 1$  Liniennetze mit 1 bis  $n_L$  Linien.

*Beispiel: Bereits bei einem Netz mit 7 zulässigen Linienendknoten ergeben sich z.B. 21 potentielle Linien und daraus etwa 2,1 Millionen Netzvarianten.*

Aufgrund der Struktur der teilweise widersprüchlichen Zielsetzungen und Bewertungen (inkl. ihrer Vielfalt und z.T. Unschärfe) ist es jedoch auch sehr schwierig das Problem der Liniennetzplanung auf dem Weg einer mathematischen Polyoptimierung lösen.

Der generelle Ansatz der Verfahren zur Liniennetzplanung besteht deshalb meist darin, die kombinatorische Vielfalt des Problems einzuschränken. Dies kann auf zwei Arten (bzw. beide Arten kombiniert) erfolgen:

- Erstens: Einschränkung der potentiellen Lösungsmenge vor ihrer Erzeugung (sog. Prä-Prozess), z.B. *einschränkende Randbedingungen bzw. manuelle Vorauswahl potentieller Linien*
- Zweitens: Einschränkung der potentiellen Lösungsmenge während ihrer Untersuchung, *verschiedene Ansätze des OR, z.B. vorzeitiger Abbruch Branch-and-Bound-Algorithmus.*

Die Zielsetzungen werden dabei i.d.R. umgesetzt in **ein ausgewähltes Zielkriterium**, nach dem optimiert wird, und **Randbedingungen in Form von Schranken**, die für die übrigen Zielsetzungen stehen.

#### Beispiele für Verfahren der Linienplanung

Verfahren	Prinzip	Vereinfachungen
<b>Basislinien-verfahren</b>	Ausgangspunkt: Bestimmung zu berücksichtigender Teillinien (Basislinien). Konstruktion des Liniennetzes durch Verknüpfung (und ggf. auch Aufbruch von Verknüpfungen) der Basislinien	heuristische Regeln zu Verknüpfung bzw. Aufbruch von Basislinien
<b>Endknoten-zuordnungs-verfahren</b>	Ausgangspunkt: Vorauswahl einer begrenzten Menge potentieller Endknoten und ggf. Linien zwischen diesen Endknoten. Mathematische Optimierung; bei genügend einschränkender Vorauswahl auch mit exakten Verfahren	Vorauswahl von Endknoten und ggf. Linien
<b>Netzverfahren</b>	Ausgangspunkt: beliebige Linien und Linienkombinationen (unter Berücksichtigung praktisch relevanter Einschränkungen) zugelassen. Mathematische Optimierung: i.d.R. Näherungsverfahren	je nach mathematischem Näherungsverfahren

Im Folgenden werden beispielhaft zwei einfache Verfahren des ersten und zweiten Verfahrenstyps vorgestellt, die auch in den Übungen gefestigt werden.

In den Modulen „Erweiterte Verkehrssystemtheorie des Landverkehrs“ bzw. „Erweiterte Verkehrssystemtheorie“ werden weitere Linienplanungsverfahren, insbes. aus der Gruppe der Netzverfahren, vertieft behandelt.

### 3.3.2 Beispiel 1 - Linienplanung aus Kundensicht / Basislinienverfahren

Das entscheidende kundenwirksame Ergebnis der Linienplanung ist die Anzahl der notwendigen Umsteigevorgänge je Reise im ÖV. Deshalb stehen im Mittelpunkt der Linienplanungsverfahren aus Kundensicht Zielkriterien, die aus dieser Größe abgeleitet sind:

- **Maximierung der Anzahl Direktfahrer im Netz** oder
- **Minimierung der Anzahl Umsteigevorgänge im Netz**

Beide Kriterien wirken in die gleiche Richtung, gehen aber in ihren Ergebnissen keinesfalls völlig konform. Durch Verfahren mit Maximierung der Direktfahrer werden lange Linien über Bestwege bevorzugt ohne Rücksicht auf die Anzahl der Umsteigevorgänge für Reisende, die nicht auf durchgängigen Linien direkt fahren können. Verfahren mit Minimierung der Umsteigevorgänge bevorzugen knotenorientiert günstige Verknüpfungen von Teillinien, so dass sogar Linien über Umwege entstehen können, die Direktfahrerpotential verschenken. Dadurch reduziert sich aber gegenüber den erstgenannten Verfahren tendenziell der Anteil Reisender, die mehrfach umsteigen müssen.

#### Beispiel eines Verfahrens

Verfahrenstyp: **Basislinienverfahren**

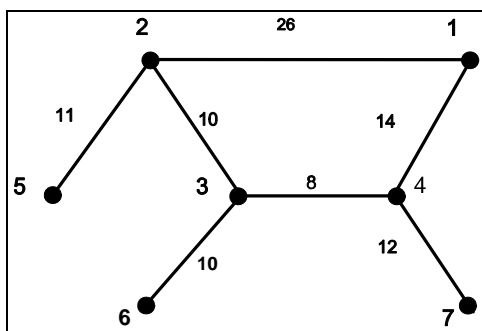
Zielkriterium: **Minimale Anzahl Umsteigevorgänge im Netz**

Randbedingungen: **Genau eine Linie je Kante** (Diese praktisch oft nicht relevante Bedingung wurde hier aus Gründen der Einfachheit der Demonstration gewählt)

**Verkehrsumlegung über Bestwege (hier fahrzeitkürzeste Wege)**

#### Daten zum Vorlesungs-Beispiel:

Netz mit Kantenbewertung (z.B. Fahrzeiten) und mittlere Aufkommenswerte (z.B. Reisende je Taktperiode):



Q <sub>ij</sub>	nach j						
von i	1	2	3	4	5	6	7
1	-	50	47	31	39	16	38
2	46	-	7	23	5	24	4
3	41	10	-	30	9	35	13
4	32	22	40	-	14	19	40
5	44	4	7	13	-	17	22
6	14	28	30	22	20	-	28
7	38	3	11	33	27	30	-

Bild 3.10

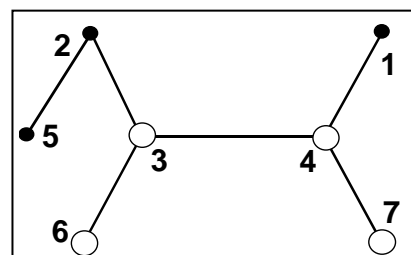
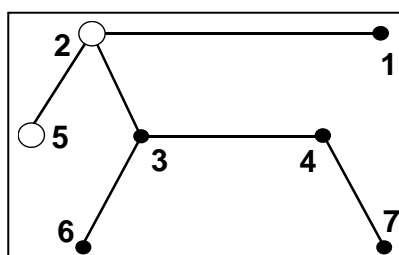
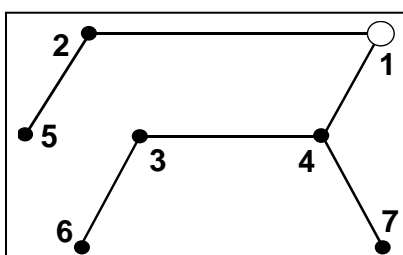
#### Schritt 1: Ermittlung der fahrzeitkürzesten Wege (Bestwege)

Mittels eines (beliebigen) Verfahrens zur Ermittlung von Bestwegen in Graphen werden die fahrzeitkürzesten Wege für alle Relationen im Netz ermittelt.

**Beispiel: Ergebnisse des Schrittes 1 (Bestwege) in Form von Wegekarten – Bilder 3.11 a-c:**

Wegekarten = Gerüst des Netzgraphen (Baumstruktur) -> eindeutige Wege im Netz;

Wegekarte gilt jeweils für O-Knoten als Start bzw. Ziel der Wege



## Schritt 2: Ermittlung und Bewertung aller Basislinien

Basislinien sind Linien über genau zwei Kanten mit einem Zwischenknoten. Sie existieren um alle Knoten, die mit mehr als einer Kante inzident sind. Basislinien um Knoten, die nicht Zwischenknoten mindestens eines Bestweges sind, werden aus der Betrachtung herausgelassen. Für jeden Knoten werden aus allen Kombinationen jeweils zweier inzidenter Kanten, sofern sie nicht aus praktischen Gründen auszuschließen sind, Basislinien BL gebildet.

Die Bewertung der Basislinien BL als Voraussetzung für ihre Auswahl erfolgt nach der Höhe der dem Verlauf der Basislinie folgenden Verkehrsströme  $Q(BL)$ . Wird eine Basislinie daraufhin im Schritt 3 für die Integration in das zukünftige Liniennetz ausgewählt, entfallen Umsteigevorgänge in der Größenordnung dieser Verkehrsströme.

$$Q(BL) = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^a x_{ij}(BL) \cdot Q_{ij} \quad (3.4)$$

mit

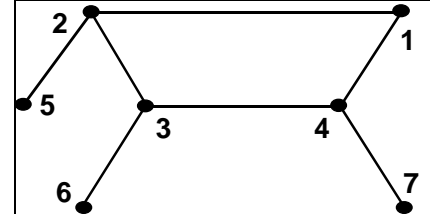
$$x_{ij}(BL) = \begin{cases} 1, & \text{falls der Bestweg von } i \text{ nach } j \\ & \text{vollständig über BL führt} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

$a$  = Anzahl Knoten im Netz

$Q(BL)$  = Verkehrsaufkommen auf Basislinie BL

$Q_{ij}$  = Verkehrsaufkommen in Relation  $i \rightarrow j$

Bild 3.12 a: Basislinien



(ergänzen in der Vorlesung)

**Hilfstafel:** Bewertung der Basislinien mit der Verkehrsstromstärke  $Q(BL)$  (ergänzen in der Vorlesung)

Knoten	2			3			4		
Basislinie	1-(2)-3	1-(2)-5	3-(2)-5	2-(3)-4	2-(3)-6	4-(3)-6	1(4)-3	1-(4)-7	3-(4)-7
Lauf $i \leftrightarrow j$									
1 - 2									
1 - 3									
1 - 4									
1 - 5									
1 - 6									
1 - 7									
2 - 3									
2 - 4				23+22					
2 - 5									
2 - 6					24+28				
2 - 7				4+3					4+3
3 - 4									
3 - 5			9+7						
3 - 6									
3 - 7									13+11
4 - 5			14+13	13+14					
4 - 6						19+22			
4 - 7									
5 - 6			20+17		17+20				
5 - 7			27+22	22+27					22+27
6 - 7						30+28			28+30
Summe		39+44	70+59	62+66	41+48	65+64	63+55	38+38	67+71
	0	83	129	128	89	129	118	76	138
Auswahl BL									

### Schritt 3: Auswahl von Basislinien

Da jede Basislinie genau zwei inzidente Kanten ihres Zwischenknotens verknüpft, entspricht die Anzahl der für den Knoten wählbaren Basislinien der Hälfte der auf den inzidenten Kanten insgesamt zulässigen Linien, auf einen ganzzahligen Wert abgerundet:

$$n_{BL}(P) = \text{Int}\left(\sum_{K=1}^{n_K(P)} n_L(K) / 2\right) \quad (3.5)$$

$n_{BL}(P)$  = Anzahl Basislinien zu Zwischenknoten P

$n_K(P)$  = Anzahl inzidenter Kanten zu P

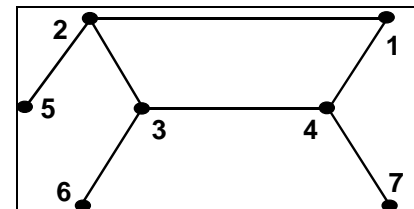
$n_L(K)$  = Anzahl zulässiger bzw. erforderlicher Linien auf Kante K (im Basis-Bsp. alle  $n_L(K) = 1$ )

$\text{Int}(x)$  = ganzzahliger Anteil von x

Ausgewählt wird für jeden Zwischenknoten die Kombination von Basislinien, die

- *erstens* auf jeder inzidenten Kante die Zahl der zulässigen Linien nicht überschreitet (zulässige Kombination) und
- *zweitens* unter allen nach erstens zulässigen Kombinationen die Kombination, bei der sich das Maximum hinsichtlich der summierten Verkehrsstromstärke auf den zugehörigen Basislinien ergibt.

Bild 3.12 b: Ausgewählte Basislinien



(ergänzen in der Vorlesung)

Der praktische Umfang dieses Teilproblems gestattet stets die Nutzung der vollständigen Enumeration.

### Schritt 4: Verknüpfung von Basislinien

Allgemein: Es erfolgt eine paarweise Verknüpfung von Basislinien, die sich jeweils auf genau einer gemeinsamen Kante überlagern (aber in gegenläufiger Richtung weiterführen). Ist eine Kante von mindestens einem Zwischenknoten aus mit mehr als einer ausgewählten Basislinie belegt, gibt es verschiedene Verknüpfungsvarianten. Die exakte Berücksichtigung der Auswirkungen bestimmter Verknüpfungsvarianten im Netz ist recht problematisch, i. Allg. wird deshalb für die Verknüpfung auf heuristische Regeln zurückgegriffen.

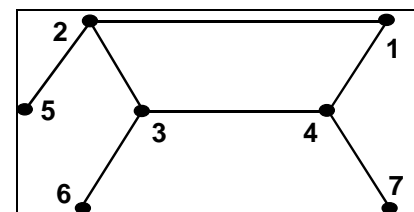
Im speziellen Fall des Basis-Beispiels: Eindeutige Verknüpfungen wegen  $n_L(K) = 1$ .

### Schritt 5: Vollständiges Liniennetz

Das vollständige Liniennetz ergibt sich aus folgenden drei Komponenten:

1. verknüpfte Basislinien
2. nicht verknüpfte, ausgewählte Basislinien
3. ggf. Kurzlinien zur Abdeckung noch nicht belegter Kanten

Bild 3.12 c: Liniennetz



(ergänzen in der Vorlesung)

### Schritt 6: Wertung der Lösung

Die Wertung erfolgt in erster Linie anhand der **Erfüllung des Zielkriteriums** und weiterer Bewertungsgroßen.

**Für das Beispiel:** (ergänzen in der Vorlesung)

Anzahl der Umsteigevorgänge:

Mittlere Anzahl Umsteigevorgänge je Reisender:

Anzahl Direktfahrer:

Anteil Direktfahrer:

## Erforderliche Gefäßgrößen:

Hilfstafel Kanten- und Linienbelegung (unvollständig zum Ergänzen in der Vorlesung)

Lauf	Stromstärke		Kantennutzung							Richtung								Gegenrichtung							
i-j	Q_ij	Q_ji								L1			L2		L3	L4	L1			L2		L3	L4		
	Hin	Rück	6-3	3-4	4-7	3-2	2-5	1-2	1-4	6-3	3-4	4-7	3-2	2-5	1-2	1-4	6-3	3-4	4-7	3-2	2-5	1-2	1-4		
1-2	50	46																							
1-3	47	41																							
1-4	31	32																							
1-5	39	44																							
1-6	16	14																							
1-7	38	38																							
2-3	7	10				-1							10							7					
2-4	23	22		1		-1					23		22					22		23					
2-5	5	4					1							5							4				
2-6	24	28	-1			-1				28			28				24			24					
2-7	4	3		1	1	-1					4	4	3					3	3	4					
3-4	30	40		1							30							40							
3-5	9	7				1	1						9	9						7	7				
3-6	35	30	-1							30							35								
3-7	13	11		1	1						13	13						11	11						
4-5	14	13		-1		1	1				13		14	14				14		13	13				
4-6	19	22	-1	-1						22	22						19	19							
4-7	40	33			1							40							33						
5-6	17	20	-1			-1	-1			20			20	20			17			17	17				
5-7	22	27		1	1	-1	-1				22	22	27	27				27	27	22	22				
6-7	28	30	1	1	1					28	28	28					30	30	30						
Summe:										142	210	145	133	114	89	132	141	229	142	117	107	90	125		
Linien-Maximum (je Richtung):												210		133	89	132			229		117	90	125		
Linien-Maximum (beide Richtungen):												229		133	90	132									

Bsp.: Forderung an die Gefäßgröße: In der Spitzen-Taktperiode wird ein um 50% über dem Mittelwert liegendes Verkehrsaufkommen erwartet. Dies soll bei einem Platzausnutzungsgrad von 80% realisiert werden.

$$\Rightarrow P = 1,50 \cdot \bar{Q} / 0,8$$

Linie	L1 (6-3-4-7)	L2 (3-2-5)	L3 (1-2)	L4 (1-4)
$\bar{Q}$	229	133	90	132
P	430	250	169	248

Fahrzeugbedarf [Plätze] insgesamt bei 30-min-Takt (unvollständig zum Ergänzen in der Vorlesung):

Linie	L1 (6-3-4-7)	L2 (3-2-5)	L3 (1-2)	L4 (1-4)	
$t_F + t_H$ (je Richtung)		21+1	26	14	[min]
$t_{U,min}$ (Sechstel-Regel)		52	60	33	[min]
$n_Z$ bei 30-min-Takt		2	2	2	[Züge]
<b>P<sub>Ges</sub> = 2624</b>		500	338	496	[Plätze]

## Nachbesserung des Liniennetzes

Mittlere Belegung der Linien-Abschnitte der Linie L1 sehr unterschiedlich (besonders hoch auf Kante 3-4)

=> ggf. zwei Linien im Abschnitt 3 - 4 vorsehen:

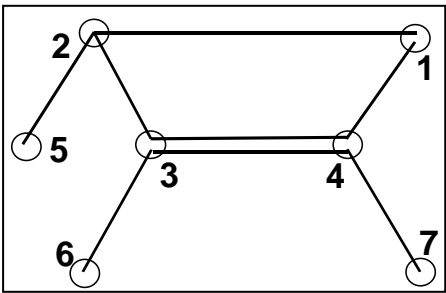
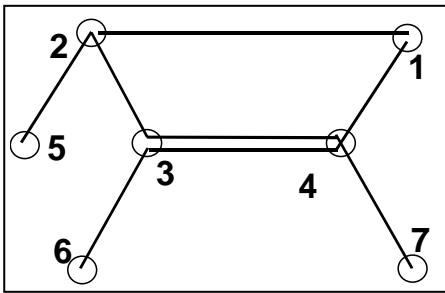
=> in der Schrittfolge Modifikationen ab Schritt 3.

Zu Schritt 3: Über Knoten 3 und 4 jeweils zwei Basislinien auswählen:

Knoten 3: BL 4-3-6 und BL 2-3-4

Knoten 4: BL 3-4-7 und BL 1-4-3

Zu Schritt 4: Auf Kante 3-4 sind jetzt zwei mal 2 Basislinien zu verknüpfen.

Variante 1	Variante 2
4-3-6 + 3-4-7 zu 6-3-4-7 u. 2-3-4 + 1-4-3 zu 2-3-4-1	4-3-6 + 1-4-3 zu 6-3-4-1 u. 2-3-4 + 3-4-7 zu 2-3-4-7
 <p><b>Bild 3.12 d</b></p>	 <p><b>Bild 3.12 e</b></p>
Bewertung an Hand der Anzahl Reisender der verknüpften Basislinien, die in 3 oder 4 dennoch einmal umsteigen müssen ( $\Delta Q$ )	
$Q_{61}+Q_{16} = 30$ $Q_{27}+Q_{57}+Q_{72}+Q_{75} = 56$ $\Delta Q = -86$	$Q_{67}+Q_{76} = 58$ $0 = 0$ $\Delta Q = -58$

Zu Schritt 5:

Präzisiertes Liniennetz nach Auswahl der **Verknüpfungsvariante 2: Linien 5-2-3-4-7, 6-3-4-1 und 1-2**

Zu Schritt 6:

Durch die Auswahl von je 2 Basislinien um die Zwischenknoten 3 und 4 fallen weitere Umsteiger weg. Diese Anzahl ist jedoch unter Beachtung der Verknüpfung in Schritt 4 wieder zu relativieren, da Relationen, die in den Knoten 3 und 4 durch Basislinien abgedeckt werden, die auf Kante 3-4 nicht verknüpft werden, in 3 oder 4 dennoch 1 x umsteigen müssen.

Erforderliche Gefäßgrößen:

Linie	5-2-3-4-7				Max Q	6-3-4-1			Max Q	1-2	Max Q
Abschnitt i-j	5-2	2-3	3-4	1-2	P	6-3	3-4	4-1	P	1-2	P
Belastung $I_{ij}$	107	117	104	145	145	142	106	125	142	89	90
Belastung $I_{ji}$	114	133	112	142	272	141	117	132	267	90	169

Fahrzeugbedarf [Plätze] insgesamt bei 30-min-Takt:

Linie	L1 (5-2-3-4-7)	L2 (6-3-4-1)	L3 (1-2)	
$t_F + t_H$ (je Richtung)	41+3	32+2	26	[min]
$t_{U,min}$ (Sechstel-Regel)	102	80	60	[min]
$n_Z$ bei 30-min-Takt	4	3	2	[Züge]
$P_{Ges} = 2227$	1088	801	338	[Plätze]

### 3.3.3 Beispiel 2 - Linienplanung aus betriebswirtschaftlicher Sicht / Endknotenzuordnungsverfahren

VERTIEFENDE LITERATUR: [RÜG 86]

Ein wesentlicher Schritt der Linienplanung, der die Kosten signifikant beeinflusst, ist die im Abschnitt 3.2.1 behandelte Festlegung der Bedienungshäufigkeit auf den einzelnen Streckenabschnitten. Auf dieser Basis kann die Linienplanung aus betriebswirtschaftlicher Sicht im Weiteren vor allem in Bezug auf die Minimierung der Anzahl notwendiger Fahrzeuge bzw. Einsatzstunden ausgerichtet werden.

#### Beispiel eines Verfahrens

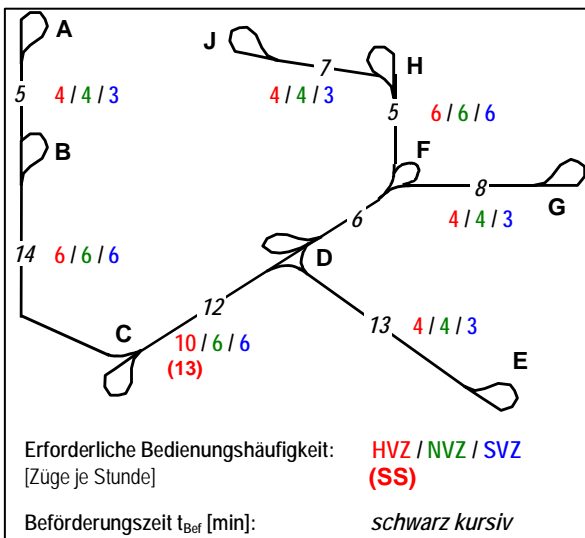
**Zielkriterium:** **Variante Z):** Minimale Anzahl Züge; **Variante E):** minimale Einsatzzeitsumme der Züge

**Randbedingungen:** Zentrumsorientiertes Netz aus Radial- und Durchmesserlinien [Stadtverkehr]; vorgegebene Endknoten (Achsen bzw. Anzahl Linien auf den radialen Achsen)



## Daten zum Beispiel (nach [RÜG 86])

### -Streckennetz - Bild 3.13:



Notwendige Bedienungshäufigkeit $f$ [ $h^{-1}$ ]				
Abschn.	Spitzenstunde	HVZ	NVZ	SVZ
AB	4	4	4	3
BC	6	6	6	6
CD	13	10	6	6
DE	4	4	4	3
FG	4	4	4	3
FH	6	6	6	6
HJ	4	4	4	3

Zentrums-Abschnitt DF wird nicht näher berücksichtigt. Es wird davon ausgegangen, dass sich durch die Überlagerung mehrerer Linien zwangsläufig ein ausreichendes Angebot ergibt.

Es existiert in F keine Gleisverbindung von G nach H und umgekehrt

### Schritt 1: Formulierung der Optimierungsaufgabe und zulässige Anfangslösung

Bedingungen für jeden vorgesehenen Endknoten  $i$  des Liniennetzes:

Die Anzahl aller von  $i$  wegführenden bzw. nach  $i$  hinführenden Linien entspricht der summierten Anzahl  $n_{End,i}$  der in  $i$  endenden (bzw. beginnenden) Linien:

$$\sum_{\forall j} x_{ij} = n_{End,i}$$

$$\sum_{\forall j} x_{ji} = n_{End,i}$$

(3.6 a/b)

mit

$$x_{ij} \text{ (bzw. } x_{ji}) \begin{cases} = 1, & \text{falls von } i \text{ nach } j \text{ (bzw. von } j \text{ nach } i) \text{ eine Linie eingerichtet wird.} \\ = 0 & \text{sonst.} \end{cases}$$

$n_{End,i}$  = Anzahl in  $i$  endender (bzw. beginnender) Linien

Werden Endpunkte im Stadtzentrum nicht explizit vorgegeben, aber optional zur Nutzung im Liniennetz vorgesehen, kann eine Radiallinie durch einen Wert  $x_{ii} = 1$  beschrieben werden.

**Wird ein Achsennetz vorgesehen**, reduziert sich die Optimierungsaufgabe auf die Zuordnung der äußeren Endknoten zur Bildung von Achsen, unabhängig davon, ob durch Einsatz- oder Verstärkungslinien weitere Zwischenendpunkte auf der Achse bedient werden. In Gleichung (3.6) steht dann für  $n_{End,i}$  stets der Wert 1 stellvertretend für „die Anzahl in  $i$  endender Achsen“. **Die Festlegung Achsennetz oder Verästelnetz ist also eine Eingangsbedingung, nachfolgend werden im Beispiel beide Fälle als „Variante A“ (Achsennetz) und „Variante B“ (angepasstes Verästelnetz = Bedarfsliniennetz) parallel betrachtet!**

Mit den Gleichungen (3.6) ist eine Transporttabelle der linearen Transportoptimierung beschrieben, die  $n_{End,i}$  als gegebene Größen sind die Zeilen- und Spaltensummen, die  $x_{ij}$  die noch unbekannten Felder der Tabelle.

Endpunkte	$i \rightarrow$				$n_{End,j}$
$j \downarrow$					
$n_{End,i}$					

$x_{ij} ?$

Jede beliebige Konfiguration von  $x_{ij}$ , die alle Bedingungen der Zeilen- und Spaltensummen erfüllt, ist eine theoretisch zulässige Lösung. Um Linien mit identischem Linienvverlauf in Richtung und Gegenrichtung zu erhalten, muss die Belegung allerdings symmetrisch zur Hauptdiagonalen erfolgen.

Praktisch kann das Belegen bestimmter Felder mit Werten ungleich Null ausgeschlossen sein, falls bestimmte Linien infrastrukturell nicht möglich oder infolge anderer Randbedingungen von vornherein unerwünscht sind (zum Verdeutlichen in den Beispielen diese Felder nicht mit „0“, sondern mit „---“, gekennzeichnet, bei Rechnungen aber mit Null zu interpretieren).

Mit einem beliebigen Eröffnungsverfahren der Transportoptimierung kann zunächst eine zulässige Lösung erzeugt werden.

## Weitere Vorgaben und Basisbetrachtungen für das Beispiel

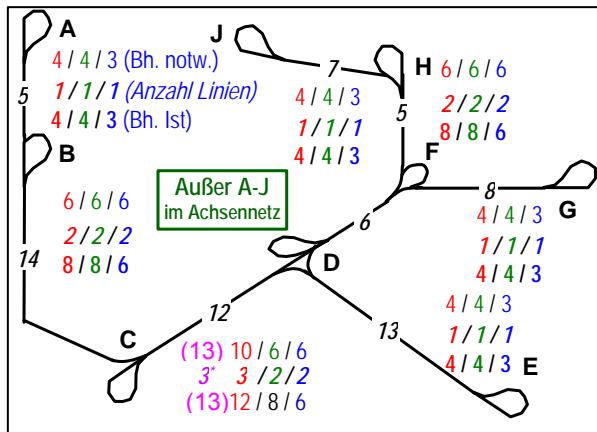
- Als Taktperioden für alle Linien werden festgelegt:

\* HVZ + NVZ:  $t_T = 15 \text{ min} \Rightarrow 4 \text{ Fahrten/h} + 1 \text{ Einsatzzug C-D in der Spitzenstunde}$

**Ausnahme:** Bei Verknüpfung A-J im Achsennetz:  $t_T = 10 \text{ min} \Rightarrow 6 \text{ F/h}$   
mit kurzzeitiger Taktverdichtung in der Spitzenstunde auf  $t_T = 9 \text{ min}$  über 45 min  
(siehe rechte Abbildung Bild 3.15)

\* SVZ:  $t_T = 20 \text{ min} \Rightarrow 3 \text{ Fahrten/h}$

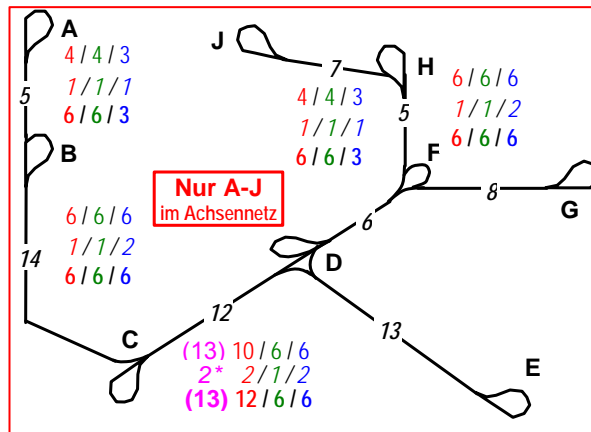
- Daraus ergeben sich folgende notwendige **Anzahlen an Linien** und **Bedienungshäufigkeiten** (Bild 3.14 / 3.15):



### Variante A

als **Achsennetz** in Anlehnung an Bild 3.4

- Als Endpunkte  $i/j$  der Achsen sollen verknüpft werden: A, E, G, J
- Durch Überlagerung der die gesamte Achse bedienenden Stammlinie durch abschnittsweise verkehrende Einsatzlinien wird die erforderliche Bedienungshäufigkeit abgedeckt. Um keine Überlagerung von Linien mit unterschiedlichen Taktzeiten (Noniuseffekt!) zuzulassen, wird dabei die notwendige Bedienungshäufigkeit auf einzelnen Abschnitten zeitweise überschritten.



### Variante B

als **Bedarfsliniennetz** in Anlehnung an Bild 3.6

- Als Endpunkte  $i/j$  von Linien sollen bedient werden: A, B, C (nur HVZ – sonst D), E, G, H, J.
- Die erforderliche Bedienungshäufigkeit kann zu allen Zeiten auf allen Abschnitten abgedeckt werden, wenn alle Endpunkte mit genau 1 Linie bedient werden, d.h.  $n_{\text{End},i} = 1$  für alle  $i$ .

## Ermittlung der zulässigen Anfangslösungen:

j	i	A	E	G	J	$n_{\text{End},j}$
A						
E						
G						
J						
$n_{\text{End},i}$						

$n_{\text{End},i}$  bzw.  $n_{\text{End},j}$  hier Anzahl jeweils zu verknüpfender Achsen (stets gleich 1)

(Tabelle unvollständig zum Ergänzen in der Vorlesung)

j	i	A	B	C	E	G	H	J	$n_{\text{End},j}$
A		0	---	---	0	1	0	0	1
B		---	0	---	0	0	1	0	1
C		---	---	1	0	0	0	0	1*
E		0	0	0	0	0	0	1	1
G		1	0	0	0	0	---	---	1
H		0	1	0	0	---	0	---	1
J		0	0	0	1	---	---	0	1
$n_{\text{End},i}$		1	1	1*	1	1	1	1	

\* = nur in der HVZ

$n_{\text{End},i}$  bzw.  $n_{\text{End},j}$  hier Anzahl jeweils zu verknüpfender Linien

## Schritt 2: Formulierung der Zielfunktion für ein optimales Liniennetz und Ermittlung der spezifischen Aufwände $c_{ij}$ paarweise zwischen allen Endknoten $i$ und $j$ für jede zulässige Linie / Achse

Um nicht nur ein beliebiges zulässiges, sondern darunter das entsprechend eines Zielkriteriums optimale Liniennetz zu erhalten, sind die Bedingungen gemäß der Gleichungen (3.6) um eine Zielfunktion zu ergänzen. **Ziel ist es hier, den betrieblichen Gesamtaufwand (Anzahl notwendiger Fahrzeuge bzw. alternativ Einsatzzeitsumme) zu minimieren:**

$$\sum_{\forall i} \sum_{\forall j} x_{ij} \cdot c_{ij} \rightarrow \text{Min}$$

$c_{ij}$  = spezifischer Aufwand, *Beispiel:* Variante Z): Anzahl notwendige Fahrzeuge (3.7)  
Variante E): Einsatzzeitsumme

bezogen auf die Achse bzw. Linie von  $i$  nach  $j$  (nur in dieser Richtung bei  $i \neq j$  !)

## Berechnungen für die spezifischen Aufwände $c_{ij}$ der Achsen bzw. Linien:

Es werden die Beförderungszeiten  $t_{\text{Bef,U}}$  je Umlauf ermittelt und unter Berücksichtigung der daraus ermittelten minimalen Wendezeit  $t_{\text{We,U,min}}$  im Umlauf<sup>2</sup> die minimale Umlaufzeit berechnet. Die maßgebende Umlaufzeit muss nun aber durch die Taktzeit teilbar sein. Mit Gl. (3.9) wird deshalb, ausgehend von der ermittelten minimalen Umlaufzeit, der nächste durch die Taktzeit teilbare Wert ermittelt. Abgeleitet davon werden nach Gl. (3.10) die notwendige Anzahl Züge und nach Gl. (3.12) die notwendige Einsatzzeitsumme der Züge. Da diese Werte, außer bei Radiallinien, zwei Mal als Aufwände in die Zielfunktion (Gl. (3.7)) einfließen, können sie jeweils nur halb angerechnet werden (Gl. (3.11a) und (3.13a)).

$$t_U = t_{\text{Bef,U}} + t_{\text{We,U}} \quad \text{insbesondere} \quad t_{U,\min} = t_{\text{Bef,U}} + t_{\text{We,U,min}} \quad (3.8)$$

$$t_U = t_{U,\min} \quad \text{falls} \quad t_{U,\min} / t_T \text{ ganzzahlig} \quad (3.9a)$$

$$t_U = t_T \cdot (\text{Int}(t_{U,\min} : t_T) + 1) \quad \text{sonst}^* \quad (3.9b)$$

$$n_Z = t_U / t_T^* \quad (3.10)$$

$$c_{ij}(n_Z) = n_Z / 2 \quad \text{für Durchmesserlinien;} \quad c_{ij}(n_Z) = n_Z \quad \text{für Radiallinien} \quad (3.11a/b)$$

$$t_E = n_Z \cdot t_{\text{Int}} \quad (3.12)$$

$$c_{ij}(t_E) = t_E / 2 \quad \text{für Durchmesserlinien;} \quad c_{ij}(t_E) = t_E \quad \text{für Radiallinien} \quad (3.13a/b)$$

\* = Bei Taktabweichungen über Taktperioden, die kürzer als die Mindestumlaufzeit sind, gelten modifizierte Gleichungen, die in Kap. 4 behandelt werden.

Beispiele:	Zu Variante A Achse AJ im Achsennetz							Zu Variante B Linie CG im Bedarfsliniennetz				Einheit
	Spitzen- stunde		Übrige HVZ		NVZ		SVZ	Spitzen- stunde	Übrige HVZ	NVZ	SVZ	
$t_{\text{Int}}$	2		5		8		5	2	5	8	5	h
Linienendpunkte	AJ	CF	AJ	CF	AJ	AJ	BH	CG	CG	DG	DG	
$t_{\text{Bef,U}}$								52	52	28	28	min
$t_{\text{We,U,min}}$	15	8	15	8	15	15	12	10	10	6	6	min
$t_{U,\min}$								62	62	34	34	min
$t_T$	1)	1)						15	15	15	20	min
$t_U$	2)							75	75	45	40	min
$n_Z$	3)							5	5	3	2	(Züge)
								6 <sup>4)</sup>	5	3	2	(Züge)
Zu Var Z): $c_{ij}(n_Z)$								3	-	-	-	(Züge)
$t_E$								12	25	24	10	(Zug-) h
								71				(Zug-) h
zu Var E): $c_{ij}(t_E)$								35,5				(Zug-) h

(Tabelle unvollständig zum Ergänzen in der Vorlesung)

1) = nur 45 min in der Spitzenstunde, sonst  $t_T = 10$  min

2) = kleinste Zahl  $\geq t_{U,\min}$  (113'), für die bei ganzzahligem  $n$  gilt:  $t_U = 45 \text{ min} + n \cdot 10 \text{ min}$

3) = 5 Züge im 9-min-Takt und 7 Züge im 10-min-Takt (ergeben  $5 \cdot 9' + 7 \cdot 10' = 115 \text{ min}$  Umlaufzeit)

4) = inkl. 1 Einsatzzug

Variante A) Achsennetz	Variante B) Bedarfsliniennetz
Analoge Berechnungen wie für die Achse AJ müssen für <u>alle</u> als Achsen im Achsennetz möglichen Endpunkt-kombinationen vorgenommen werden.	Analoge Berechnungen wie für Linie CG müssen für <u>alle</u> als Linien im Bedarfsliniennetz möglichen Endpunkt-kombinationen vorgenommen werden.

Alle Ergebnisse  $c_{ij}(n_Z)$  hinsichtlich der Anzahl Fahrzeuge stehen in den Feldern der unter Schritt 3 dargestellten Aufwandstabellen.

<sup>2</sup> Näheres zur minimalen Wendezeit im Abschnitt 2 (Zeitelemente)

### Schritt 3: Transportoptimierung

Aus den für alle potentiellen Achsen bzw. Linien ermittelten Aufwänden  $c_{ij}$  erstellt man die **Aufwandstabelle** für die lineare Transportoptimierung. Je nach gewählter Methode und Darstellung kann dies als selbstständige Tabelle oder, wie nachfolgend, vereinigt mit der **Transporttabelle** (Spalten und -zeilen) geschehen.

#### Beispiele für das Zielkriterium Variante Z „Minimierung des Fahrzeugbedarfs“

Aufandswerte  $c_{ij}(n_z)$ :

Variante A) Achsennetz

j \ i	A	E	G	J	$n_{End,j}$
A	15	8	8		1
E	8	4	2,5	3,5	1
G	8	2,5	3	$\infty$	1
J		3,5	$\infty$	5	1
$n_{End,i}$	1	1	1	1	

(Tabelle unvollständig zum Ergänzen in der Vorlesung)

Variante B) Bedarfsliniennetz

j \ i	A	B	C	E	G	H	J	$n_{End,j}$
A	6	$\infty$	$\infty$	3,5	3,5	3,5	4	1
B	$\infty$	5	$\infty$	3,5	3,5	3	3,5	1
C	$\infty$	$\infty$	4	2,5		2,5	3	1*
E	3,5	3,5	2,5	4	2,5	2	2,5	1
G	3,5	3,5		2,5	3	$\infty$	$\infty$	1
H	3,5	3	2,5	2	$\infty$	2	$\infty$	1
J	4	3,5	3	2,5	$\infty$	$\infty$	3	1
$n_{End,i}$	1	1	1*	1	1	1	1	

\* = nur in der HVZ, sonst Zentrum (D)

Das Transportproblem ist mittels eines beliebigen Ansatzes der linearen Transportoptimierung zu lösen. Bei begrenztem Problemumfang ist eine Lösung auch mit dem **Excel®-Solver** möglich. Häufig basieren die Ansätze auf Reduktionsverfahren => nachfolgend für die Beispiele Darstellung der Ergebnistabellen nach dem letzten Reduktionsschritt.

Ergebnistabellen nach dem letzten Reduktionsschritt:

Variante A) Achsennetz

j \ i	A	E	G	J	$n_{End,j}$
A	2	0	0	0	1
E	0,5	1,5	0	0,5	1
G	0,5	0	0,5	$\infty$	1
J	0	0	$\infty$	1	1
$n_{End,i}$	1	1	1	1	

(Tabelle unvollständig zum Ergänzen in der Vorlesung)

Variante B) Bedarfsliniennetz

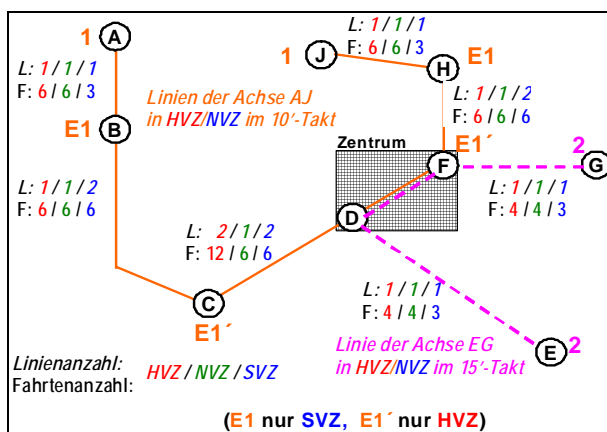
j \ i	A	B	C	E	G	H	J	$n_{End,j}$
A	1,5	$\infty$	$\infty$	0	0 <sub>1</sub>	0	0	1
B	$\infty$	1	$\infty$	0,5	0,5	0 <sub>1</sub>	0	1
C	$\infty$	$\infty$	1	0 <sub>1</sub>	0,5	0	0	1*
E	0,5	0,5	0 <sub>1</sub>	2	0,5	0	0	1
G	0 <sub>1</sub>	0	0	0	0,5	$\infty$	$\infty$	1
H	0,5	0 <sub>1</sub>	0	0	$\infty$	0	$\infty$	1
J	0,5	0	0	0	$\infty$	$\infty$	0 <sub>1</sub>	1
$n_{End,i}$	1	1	1*	1	1	1	1	

Die eingetragenen tiefgestellten 1-Werte beschreiben die Optimallösung des Transportproblems.

#### Lösungen:

##### Var. A) Achsennetz – ausgewählte Achsen:

(Ergänzung in der Vorlesung)



##### Var. B) Bedarfsliniennetz – ausgewählte Linien:

A-G, B-H, C\*-E, J-(D)-J \* = nur in der HVZ (sonst Zentrum)

gleichberechtigte Lösung: A-G, B-J, C\*-E, H-(D)-H

