

# Netze und Leistungsfähigkeit

KW Axhausen

IVT

ETH

Zürich

Frühlingssemester 2019

 Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme  
Institute for Transport Planning and Systems

**ETH**

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich  
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

# Thema: Autonome Fahrzeuge

---

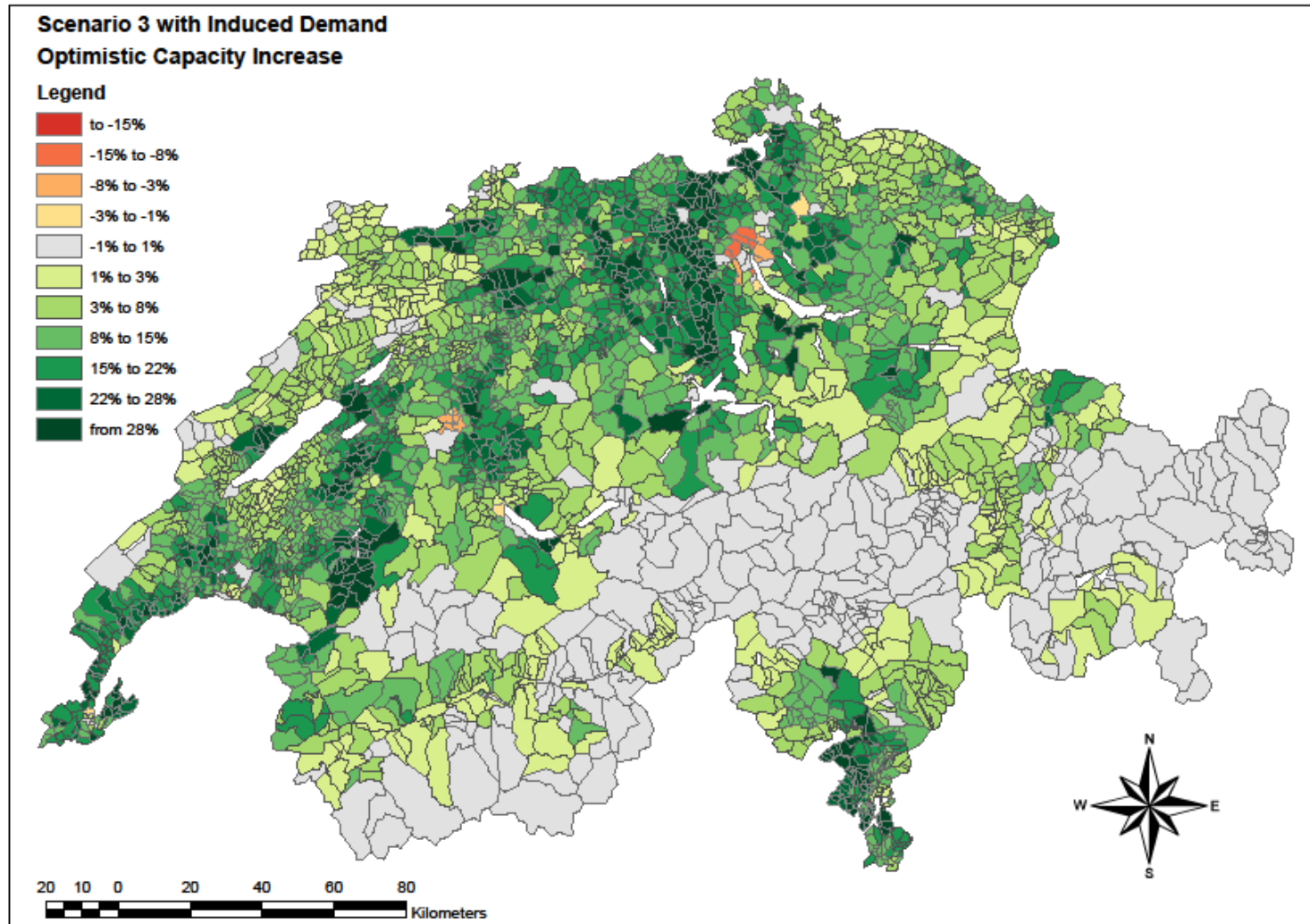
- Steigung der Kapazität
  - Abhängig von der Marktdurchdringung
  - Mehre Fahrspuren
  - Kleinere Abstände zwischen Fahrzeugen
  - Weniger Unfälle – unerwartete Verzögerungen
  - V2X Kommunikation – Grüne wellen etc.
  
- Veränderungen in der Nachfrage
  - Fahrzeuge werden in der Lage sein, allein zu fahren – Mehr Nachfrage
  - Autos werden selber parken
    - Mehr lokale Nachfrage
    - Weniger Nachfrage von parkplatzsuchverkehr
  - Intelligente Routenwahl

# Erreichbarkeit und Autonome Fahrzeuge

---

- Induzierter Verkehr
- Änderungen im Modalsplit
- Dazu bräuchte es erneute iterative Rechnungen gemäss 4-Stufen-Ansatz
- Leistungsfähigkeit als zentrale Grösse heutiges Thema

# Einfluss von Avs auf Erreichbarkeit



# Heute

---

- Netze und Angebote
- Begriff der Leistungsfähigkeit
- Netzhierarchie
- Wartesysteme
- Eingriff ins Verkehrssystem, Downs Thompson Paradox

# Netzelemente und Angebotselemente

---

# Netz und Angebot

---

## Netz:

- Bauwerk aus Strecken und Knoten
- Betriebliche Regelungen für die Nutzer
- Technologie der Nutzung

## Angebot:

- Dienstleistungen auf dem Netz aus Linien (Kursen) zwischen ausgewählten Zugangsstellen
- Komfort im Fahrzeug
- Preise für die Nutzung

# IV und ÖV

---

## Individualverkehr (IV):

- Eigennutzung der Netze mit oder ohne eigenes Fahrzeug
- Unter Mitnahme Anderer, aber ohne kommerzielles Interesse

## Öffentlicher Verkehr (ÖV):

- Dienstleistungsangebot zur Beförderung Dritter



# Netz: Strecken

---

## Bauliche Eigenschaften:

- Trassierung (Länge, Steigung, Kurvigkeit, Radien)
- Ausbau (Breite, Spuren, Oberfläche, Überhöhung, Lichtraumprofil)
- Sichtverhältnisse und Überholmöglichkeiten
- Mögliche maximale Geschwindigkeit

## Betriebliche Regelungen:

- Zulässige minimale und maximale Geschwindigkeiten
- Abstandsregelungen (Signalisierung)
- Art und Anzahl zugelassener Überholmöglichkeiten
- Zulässige Fahrzeuge

Leistungsfähigkeit (Einheiten/Stunde)

# Netz: Knoten

---

## Bauliche Eigenschaften:

- Mögliche Bewegungen (Ströme) zwischen Strecken
- Anzahl Konfliktpunkte sich kreuzender Ströme
- Bauliche Ausbildung (Spuren, Sicht, Radien etc.)

## Betriebliche Regelungen:

- Zulässige Bewegungen
- Regelung des Kreuzens
- Verteilung der Kreuzungsmöglichkeiten zwischen den Strömen (Zeit und Raum)

Leistungsfähigkeit für jeden Strom (Einheiten/Stunde)

# Angebot: Zugangsstellen

---

## Bauliche Eigenschaften:

- Ausprägung (z.B. Haltestellenlänge, Quailänge, Länge der Piste)
- Ausstattung und Zusatzdienstleistungen
- Eignung für verschiedene Fahrzeuge

## Geometrie:

- Anzahl jeder Art von Zugangsstelle
- Räumliche Verteilung

## Betriebliche Regelungen:

- Zulassung für verschiedene Fahrzeugtypen
- Verteilung der Zugangszeiten

# Angebot: Linien (Kurse)

---

Verknüpfung mehrerer Zugangstellen:

- Reihenfolge der Zugangsstellen
- Häufigkeit
- Regelmässigkeit
- Betriebszeiten
- Geschwindigkeit
- Qualität der Verknüpfung mit anderen Linien

Ausstattung:

- Fahrzeugtyp und -grösse
- Zusatzdienstleistungen
- Komfort

# Beispiele für Arten von Strecken und Knoten

---

## Strecken:

- Wege
- Strasse
- Eisenbahnen
- Seilbahnen
- Wasserstrassen und Kanäle
- Luftstrasse

## Knoten:

- Parkieranlagen
- Bahnhöfe und Haltestellen
- Häfen
- Flughäfen

# Beispiele für Angebote

---

- Eigennutzung (mit eigenem Gerät)
- Mietwagen, car sharing
- Taxi
- Buslinien
- Strassen- und Eisenbahnenlinien
- Fluglinien
- Schifffahrtslinien

# Regelungen für Infrastruktur und Dienstleistungen

---

## Technische Infrastruktur: Bauwerk

- Besitz und dessen Recht
- Normen für den Bau
- Betriebsregeln und deren Recht
- Organisation für den Betrieb und Unterhalt und deren Recht
- Finanzierung, deren Organisation und Recht

## Dienstleistungen: Nutzungsangebote

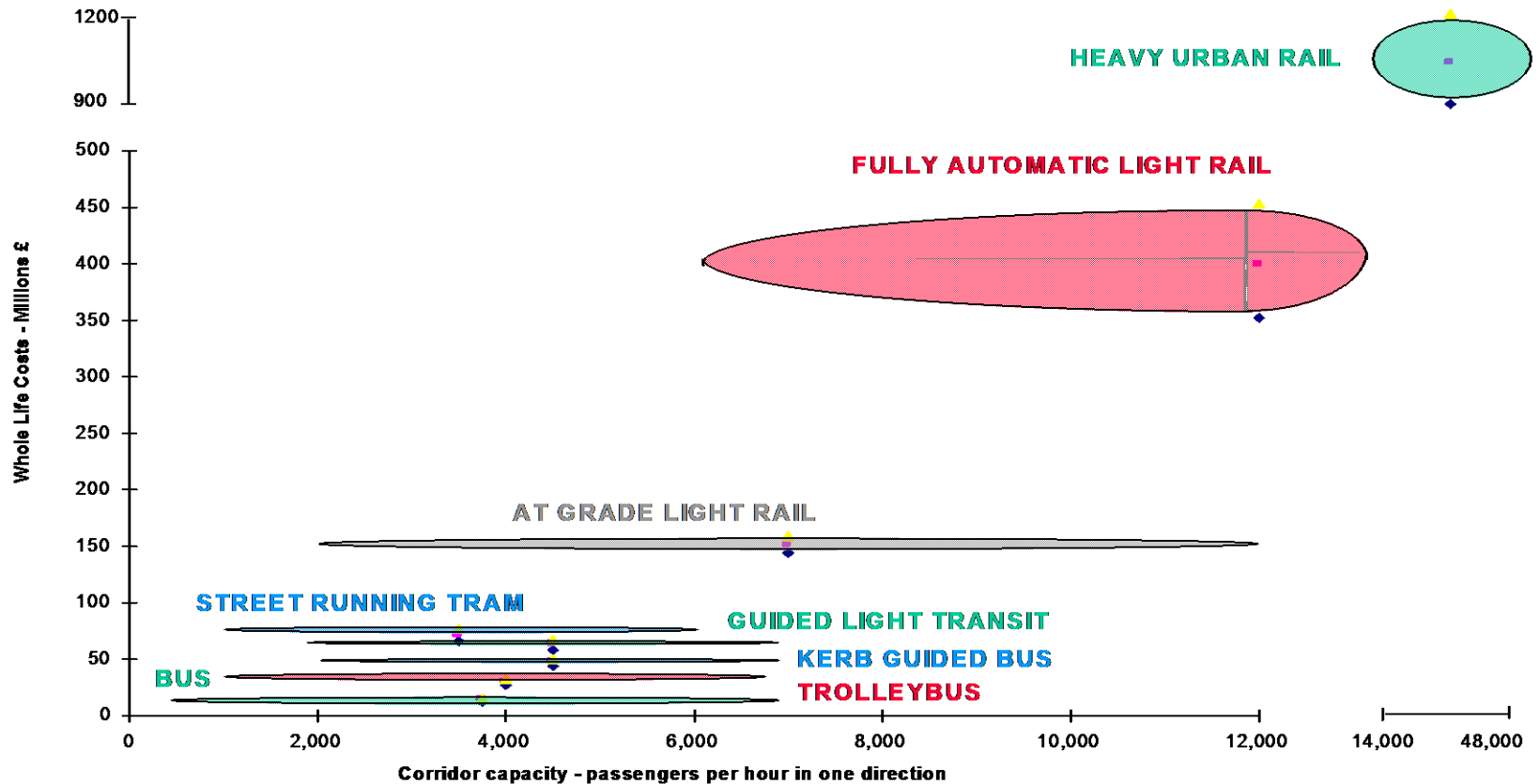
- Besitz und dessen Recht
- Produktionsmittel und Personal
- Planung und Steuerung
- Finanzierung, deren Organisation und Recht
- Regeln für den Gebrauch und deren Recht

# Leistungsfähigkeit

---



# Leistungsfähigkeiten und Kosten: Städtischer ÖV



Infrastruktur- und Betriebskosten über 20 Jahre (25%, 50% und 75% Percentil; Ansätze für UK; Diskontsatz von 8% (Ashmore und Harris, 2000))

# Leistungsfähigkeit (Einrichtungsfahrbahnen)

---

## Definition (HBS):

Die grösste Anzahl von Verkehrselementen eines Stromes, die je Zeiteinheit bei gegebenen Weg- und Verkehrsbedingungen den für die Funktionsfähigkeiten der Anlage entscheidenden Querschnitt passieren kann.

# Leistungsfähigkeit (Strecken, Knoten, Netze)

---

## Definition:

Die Kombinationen der Verkehrsstärken der Ströme, die die Anlage durchqueren, bei denen die generalisierten sozialen Grenzkosten der Nutzer einen festgelegten Grenzwert nicht überschreiten.

# Bemessungsleistungsfähigkeit (1)

---

Definition für Strecken, Knoten, Netze:

Die Kombinationen der Verkehrsstärken der Ströme, die die Anlage durchqueren, bei denen die (mittleren) generalisierten sozialen (Grenz)-Kosten der Nutzer einen festgelegten Grenzwert nicht überschreiten werden.

Der Grenzwert<sub>Bemessungsleistungsfähigkeit</sub> ist kleiner als der für die Leistungsfähigkeit.

# Bemessungsleistungsfähigkeit (2)

---

Definition für Strecken, Knoten, Netze:

Die Kombinationen der Verkehrsstärken der Ströme, die die Anlage durchqueren, bei denen die gesetzlich festgelegten Grenzwerte für Luft, Lärm, soziale Belastungen nicht überschritten werden.

# Bemessungsleistungsfähigkeit (3)

---

Definition für Strecken, Knoten, Netze:

Die Kombinationen der Verkehrsstärken der Ströme, die die Anlage durchqueren, bei denen ein festgelegter Reservekapazitätsfaktor  $\mu$  vorhanden ist, d.h.

$\mu$  \* Bemessungsleistungsfähigkeit = Leistungsfähigkeit

$\mu$  dient der Abdeckung der Variation in der Nachfrage, respektive der Leistungsfähigkeit

# Bemessungsbelastung: praktisch

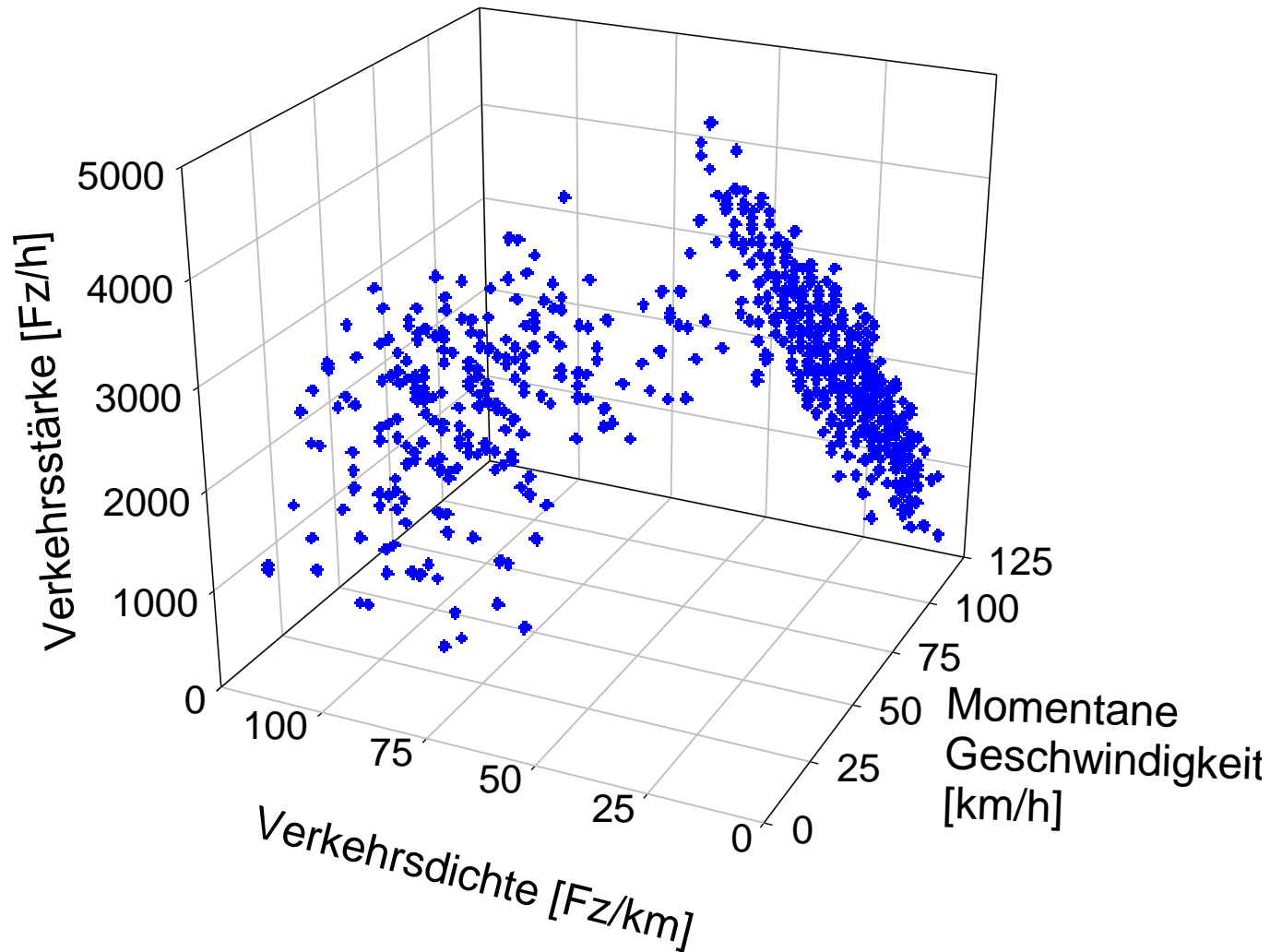
---

Relevante (prognostizierte) Verkehrsmenge oder Verkehrsleistung für eine Infrastruktur oder Dienstleistung

Traditionell keine Konsistenzprüfung zwischen  $q$  und  $k$ , sondern Vorgabe eines Qualitätsniveaus bei gegebenem  $q$   
(*Predict and provide* - Nachfrageorientierte Planung)

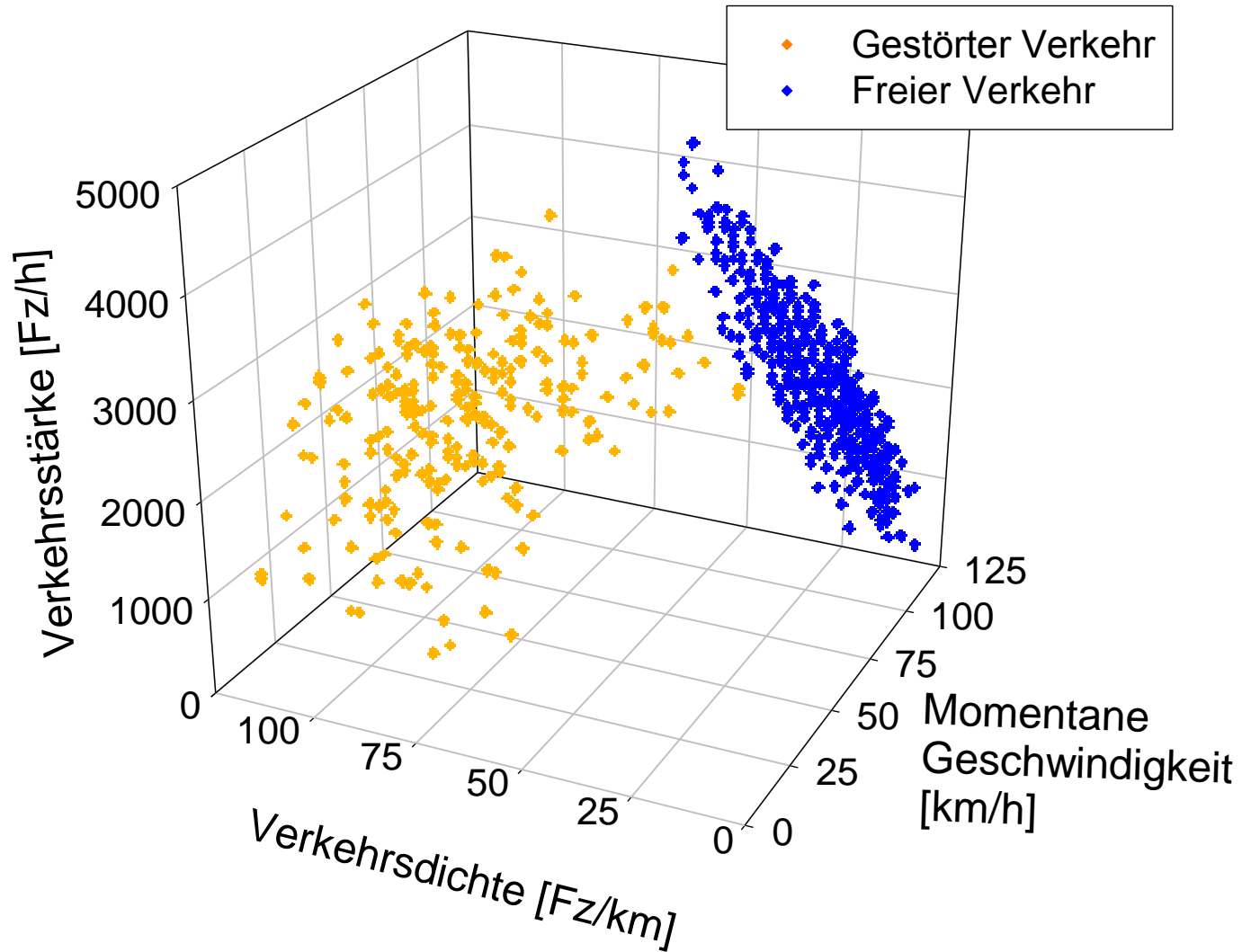
- 30. Stunde (Umrechnung der mittleren Belastungen)
- Spitzenstunde
- Vierfache Spitzenviertelstunde (Lichtsignalanlage)

# Beispiel: Freie Strecke - Zweispurige Autobahn (D)

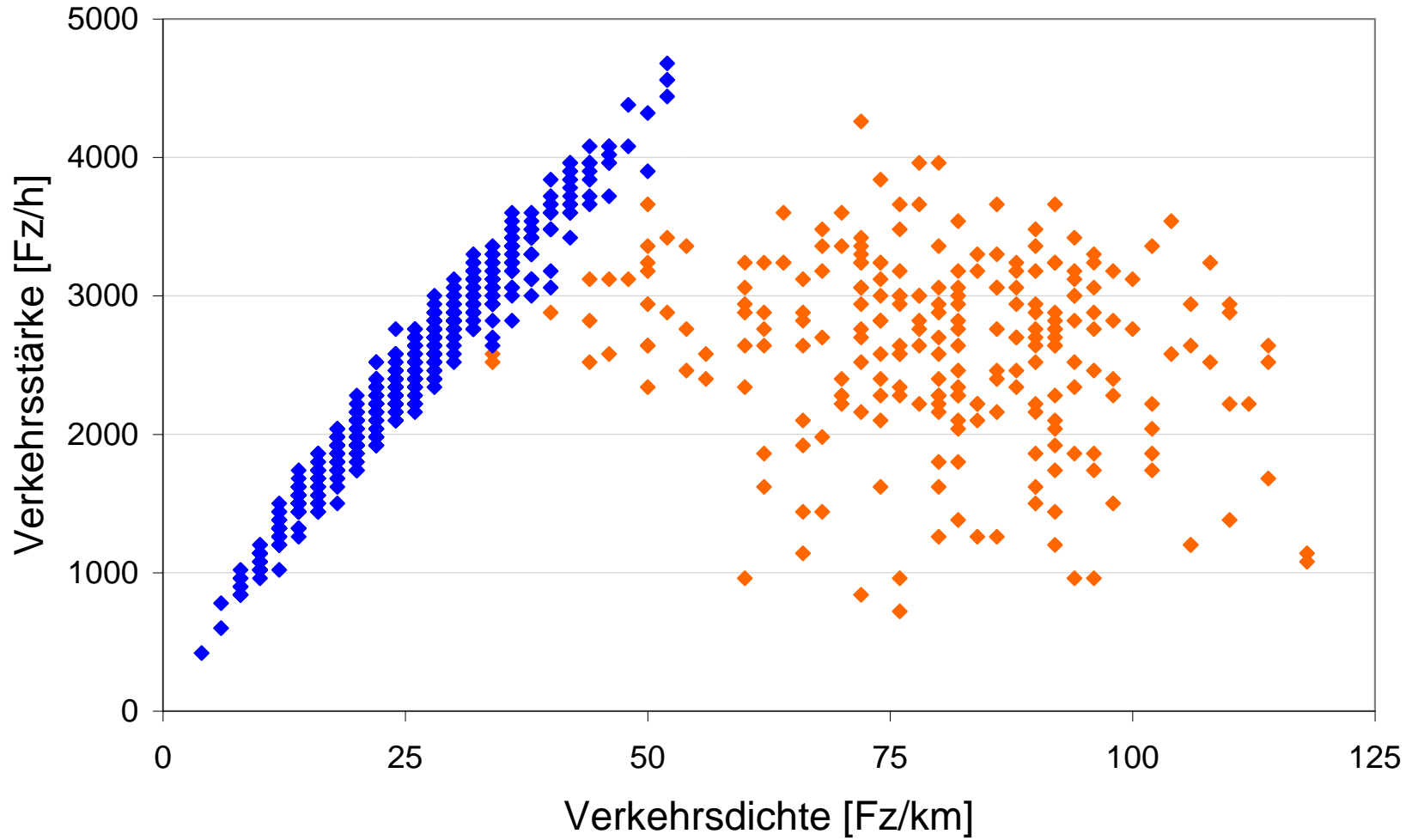




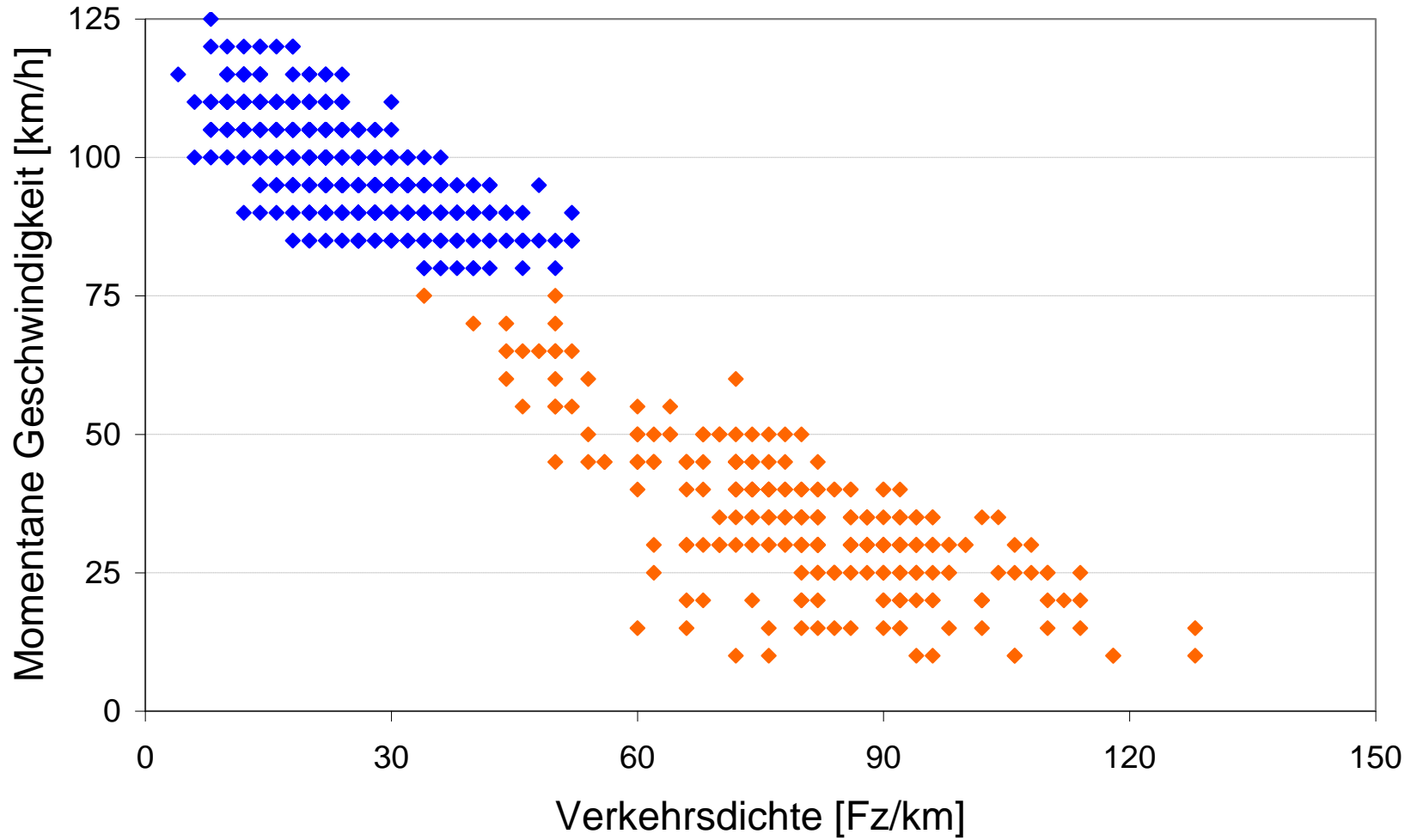
# Beispiel: Freie Strecke



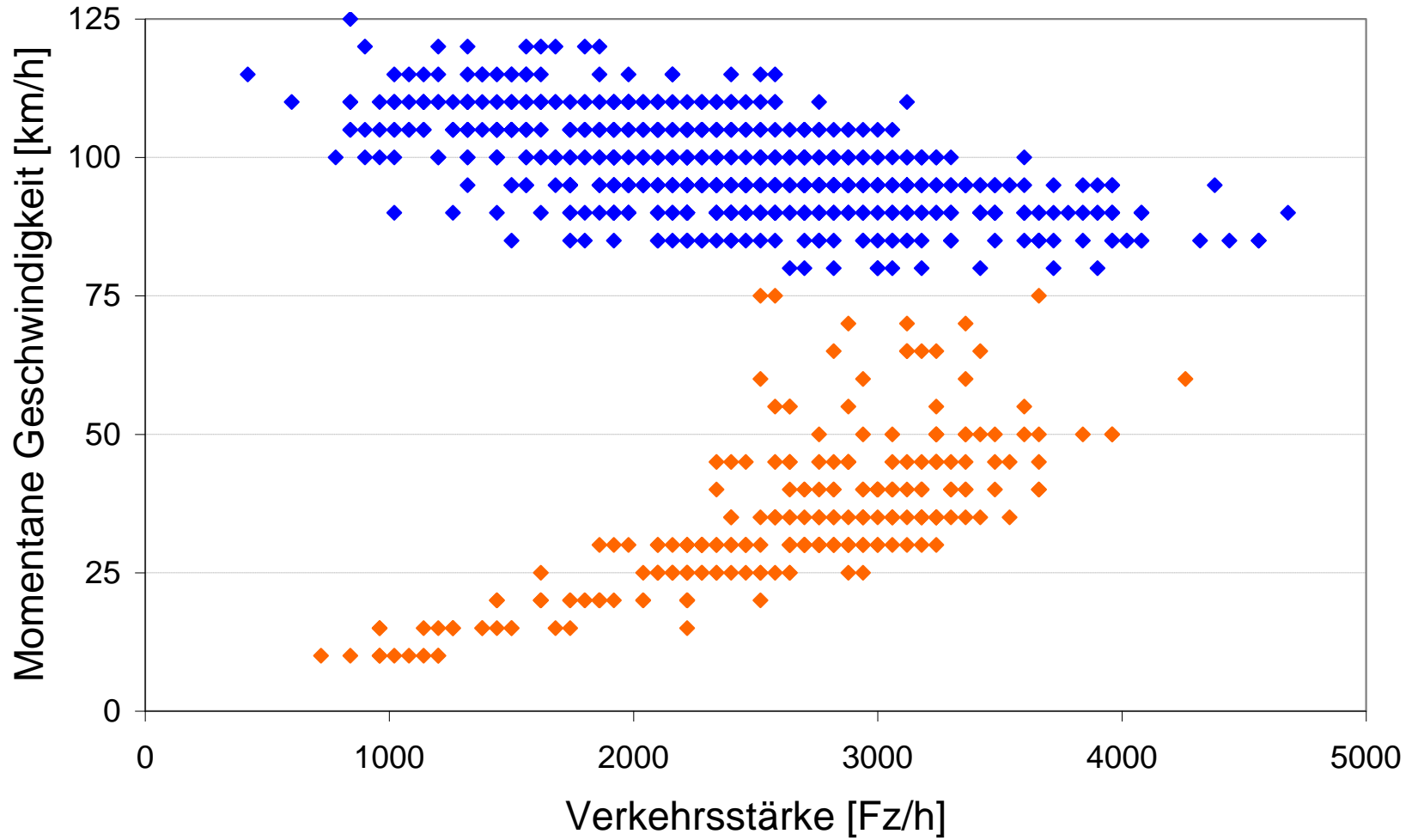
# Beispiel: Freie Strecke - Fundamentaldiagramm (k, q)



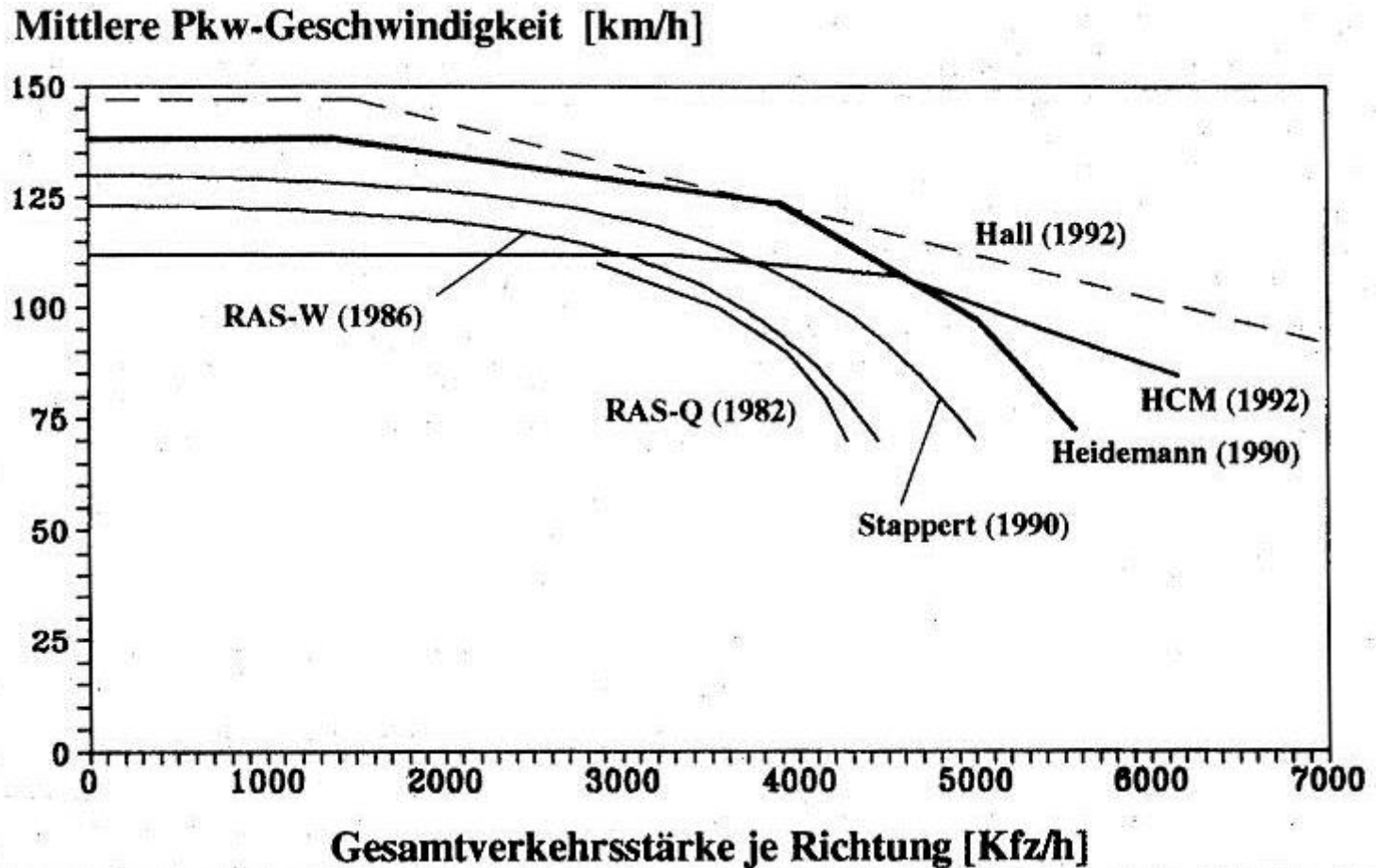
# Beispiel: Freie Strecke - k-v-Diagramm



# Beispiel: Freie Strecke - q-v-Diagramm

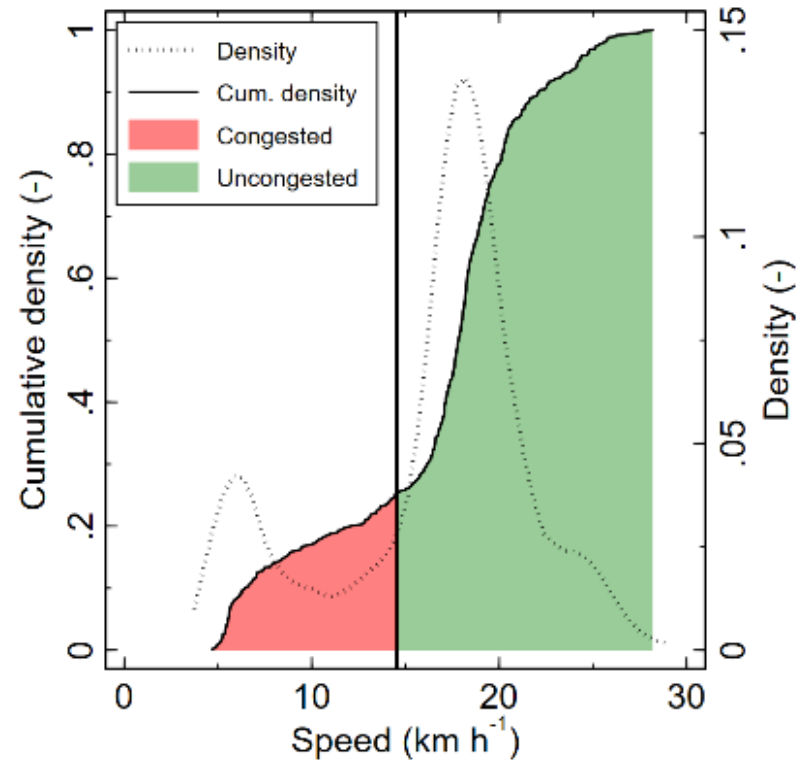
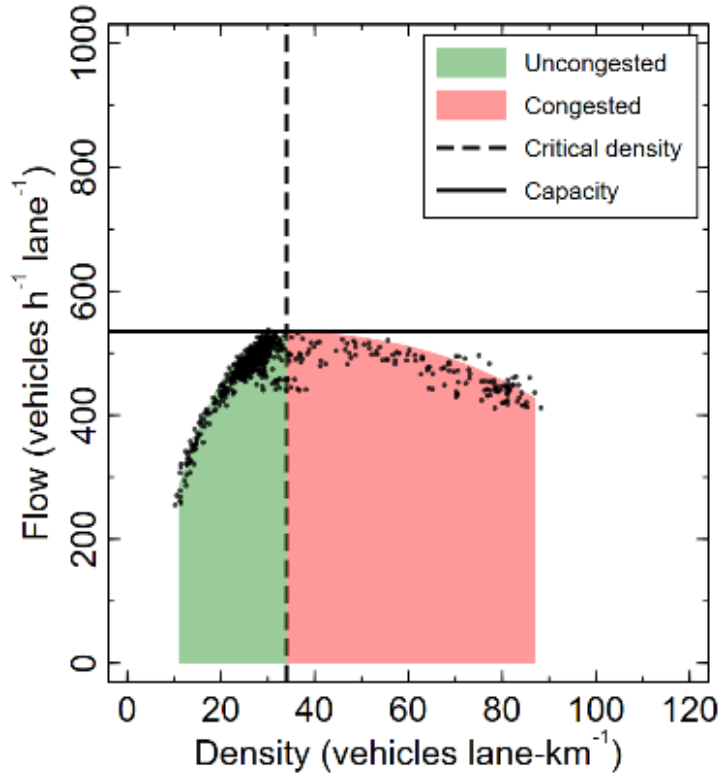


# Einfluss der Technologie



q,v-Diagramme für deutsche dreispurige Autobahnen

# Ganze Netze: MFD der Zürcher Innenstadt



# Struktur der Netze

---

# Hierarchie: Definition der Funktionen (SN 640 040b)

---

Erschliessen: Gewährleisten der Zugänglichkeit einzelner Grundstücke und Gebäude

Sammeln: Zusammenfassen einzelner Transportwünsche in besiedelten Gebieten

Verbinden: Verbinden einzelner Siedlungen, Ortsteile und anderer verkehrserzeugender Anlagen

Durchleiten: Durchleiten von Verkehrsanteilen ohne Bezug zu einer Siedlung durch Anbieten von Umfahrungsmöglichkeiten



# Hierarchie: Funktional

<b>Schweiz</b>	<b>Deutschland</b>	<b>UK</b>	<b>USA</b>
Hochleistungsstrassen	Fernstrassen	Trunk road (Classified)	Major arterial
Hauptverkehrsstrassen	Schnellverkehrsstrasse		
Verbindungsstrassen	Hauptverkehrsstrassen		
	Hauptsammelstrassen	Primary distributor	Minor arterial
		District distributor	
Sammelstrassen	Sammelstrassen	Local distributor	Collector street
Erschliessungsstrassen	Anliegerstrassen	Access road	Local street
SN 640 040b	RAS-N		AASTHO

# Dichten und Kosten der Strassentypen

---

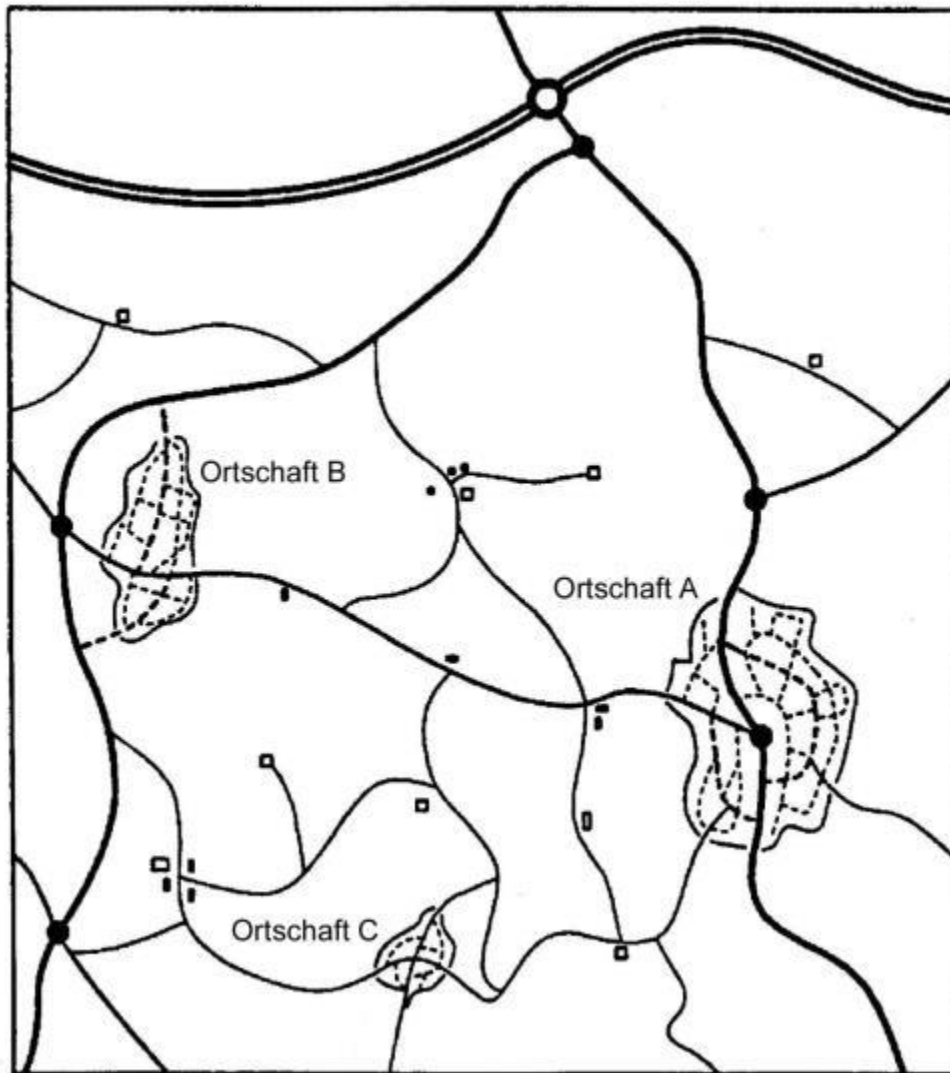
Typ	Kreuzungs- abstand [km]	Dichte [km/km <sup>2</sup> ]	Geschätztes Verhältnis der Gesamtkosten []
Erschliessung	0.30	6.66	1.00
Verteiler	1.00	2.00	1.21
Hauptverkehr	3.00	0.66	1.30
Stadtautobahn	10.0	0.20	1.53
Autobahn	30.0	0.07	1.65

Kosten einschliesslich der jeweils höchsten Kategorie (Van Nes and van der Zijp, 2000)

# Hierarchie: Räumlicher Zusammenhang (SN 640 040b)

Aufgaben und Funktionen	Bedeutung im Strassennetz				
	Nationale	Regionale	Zwischen-örtliche	Örtliche	Quartier-interne
Durchleiten	<b>HLS</b>	HLS, HVS			
Verbinden	HLS, HVS	<b>HVS</b> , VS	<b>VS</b> , HVS	SS	
Sammeln			HVS, VS	<b>SS</b>	ES
Erschliessen			VS	SS	<b>ES</b>
Aufenthalt					<b>ES</b>
Freizeit und Spiel					ES
<b>Erwünscht</b>					
Existiert, aber unerwünscht					

# Räumliche Verteilung: Schweiz, SN 640 040b



## Legende

-  Hochleistungsstrasse
-  Hauptverkehrsstrasse
-  Verbindungsstrasse mit regionaler Bedeutung
-  Verbindungsstrasse mit zwischenörtlicher Bedeutung
-  Sammelstrasse
-  Erschliessungsstrasse
-  Weiler/Einzelhof

# Hierarchie: Ausbaustandards

---

Anforderungen an:

- Zugang (Anbaufreiheit; Zufahrten)
  - Kreuzungsfreiheit
  - Richtungstrennung
  - Steigungen
  - Sicht
  - Spurbreite und Anzahl
  - Zugelassene Verkehrsarten
- 
- Autobahnen: HLS mit baulicher Richtungstrennung

# Ausbaustandards in Deutschland

	Deutschland		
	Autobahn	Landstrasse	Quartierstrasse
Zugang (Anbauf., Zufahrt)	mind. 600m	frei	frei
Kreuzungsfreiheit	ja	nein	nein
Richtungstrennung	ja	nein, ausser gefährlich	nein
Steigung (Max.)	3%	6,5%	8%
Sicht	-	135-150m	47m
Spurbreite	3,5-3,75m	3,25-3,5m	2,25m (flexibel)
Spuranzahl	je 2	je 1	1
Verkehrsarten	PKW, LKW	allg.	allg. (inkl. Fussgänger)
Typ. Kapazität (Fz/h)	3700	1105	verschieden
Quelle	HBS	RAL	RASt

# Ausbaustandards in den USA

	USA		
	Autobahn	Landstrasse	Quartierstrasse
Zugang (Anbauf., Zufahrt)	mind. 457m Strecke	frei	frei
Kreuzungsfreiheit	ja	nein	nein
Richtungstrennung	ja	nein	nein
Steigung (Max.)	3 (4)%	7%	11%
Sicht	285m	105-130m	35m
Spurbreite	3,6m	3,3-4,8m	3-4,8m
Spuranzahl	je 2	je 1	je 1
Verkehrsarten	PKW, LKW (Bus)	allgemein	allgemein
Typ. Kapazität (Fz/h)	4000	?	?
Quelle	HCM/ PGDHS	PGDHS	PGDHS

# Ausbaustandards in der Schweiz

	Schweiz		
	Autobahn	Landstrasse	Quartierstrasse
Zugang (Anbauf., Zufahrt)	mind. 500m Strecke	Knoten	frei
Kreuzungsfreiheit	ja	nein	nein
Richtungstrennung	ja	nein	nein
Steigung (Max.)	2%	8%	12%
Sicht	190m	90m	38m
Spurbreite	5m inkl. Standst.	3,4-3,7m	2,6m
Spuranzahl	je 2	je 1	je 1
Verkehrsarten	PKW, LKW (max. 5% angestrebt)	allg. (Velo separat)	allg. (inkl. Fussg.)
Typ. Kapazität (Fz/h)	3800-4000	1025-1100	?
Quelle	VSS	VSS	VSS



# Hierarchie: Beispiele für Angebotsqualität

---

## Städtischer ÖV:

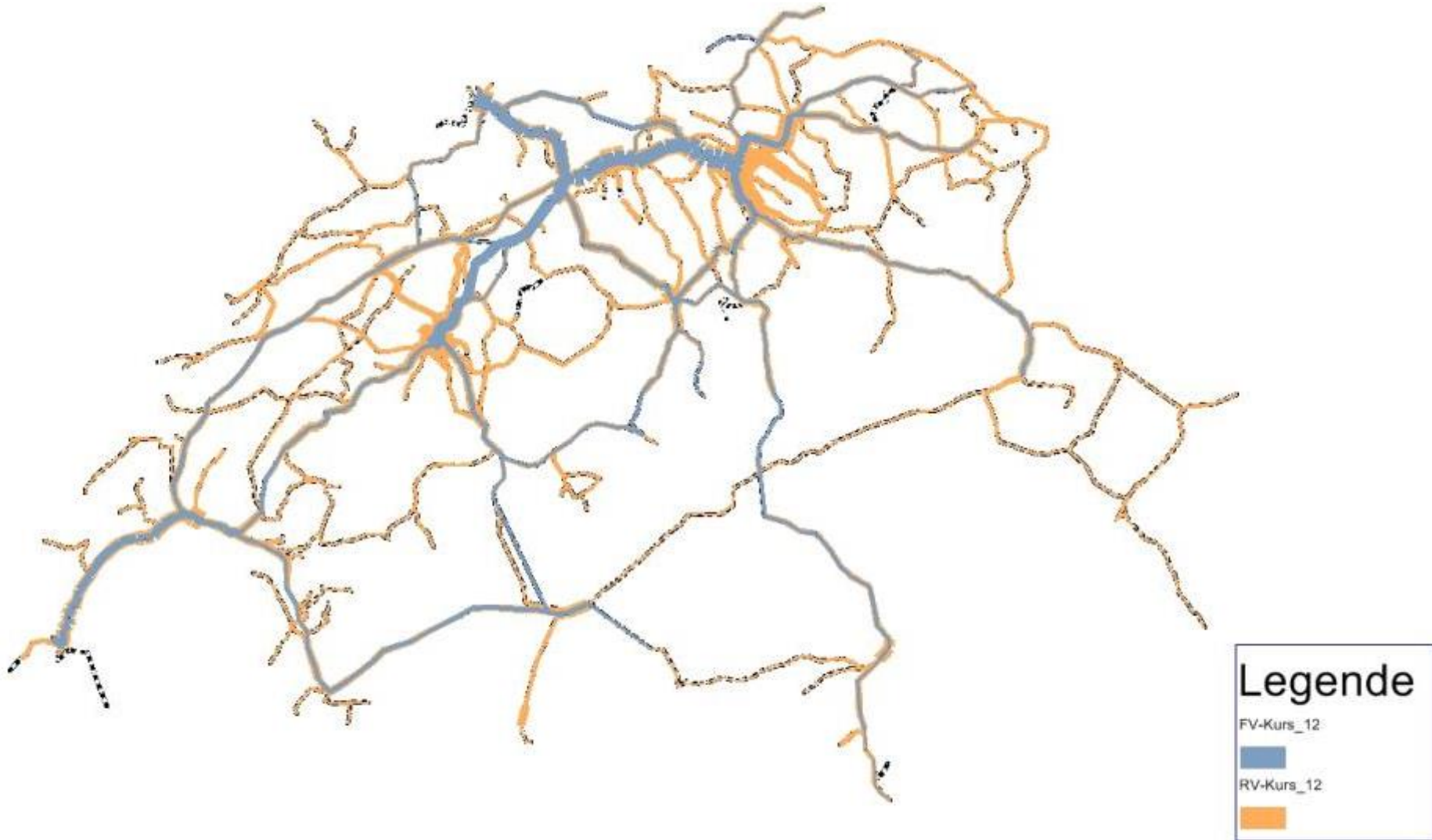
- Nachbarschaftslinien
- (Normale) Linien
- Express

## Eisenbahn:

- S-Bahn
- Regionale Verkehre (Nahverkehr)
- Interregio
- Intercity (RX, IC, ICN)
- Hochgeschwindigkeitsverkehre (ICE, TGV)

# Angebotsqualität: Zugfahrten/Werks tag (2012)

---



# Wartesysteme

---

Verkehrssysteme und ihre Elemente können als Wartesysteme betrachtet werden. Diese bestehen aus:

- Schalter(n), an denen bedient wird
- Zufluss, zum Schalter
- Warteflächen/Stauraum

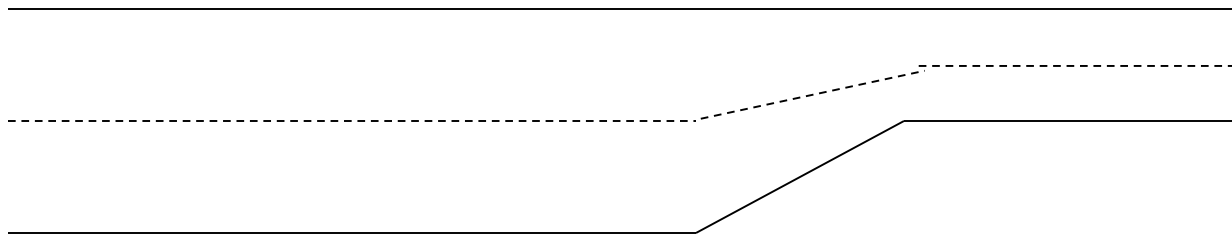
Beispiele:

- Lichtsignalanlagen
- „Blöcke“ bei Eisenbahnen
- „Rechts vor Links“

# Wartessysteme: Beispiel

---

Eine Strasse, die sich temporär von zwei auf eine Spur verengt.



Anzahl der angekommenen Fahrzeug:  $Q(t)$

Zufluss  $q$  [Fz/h] mit Zuflussrate:

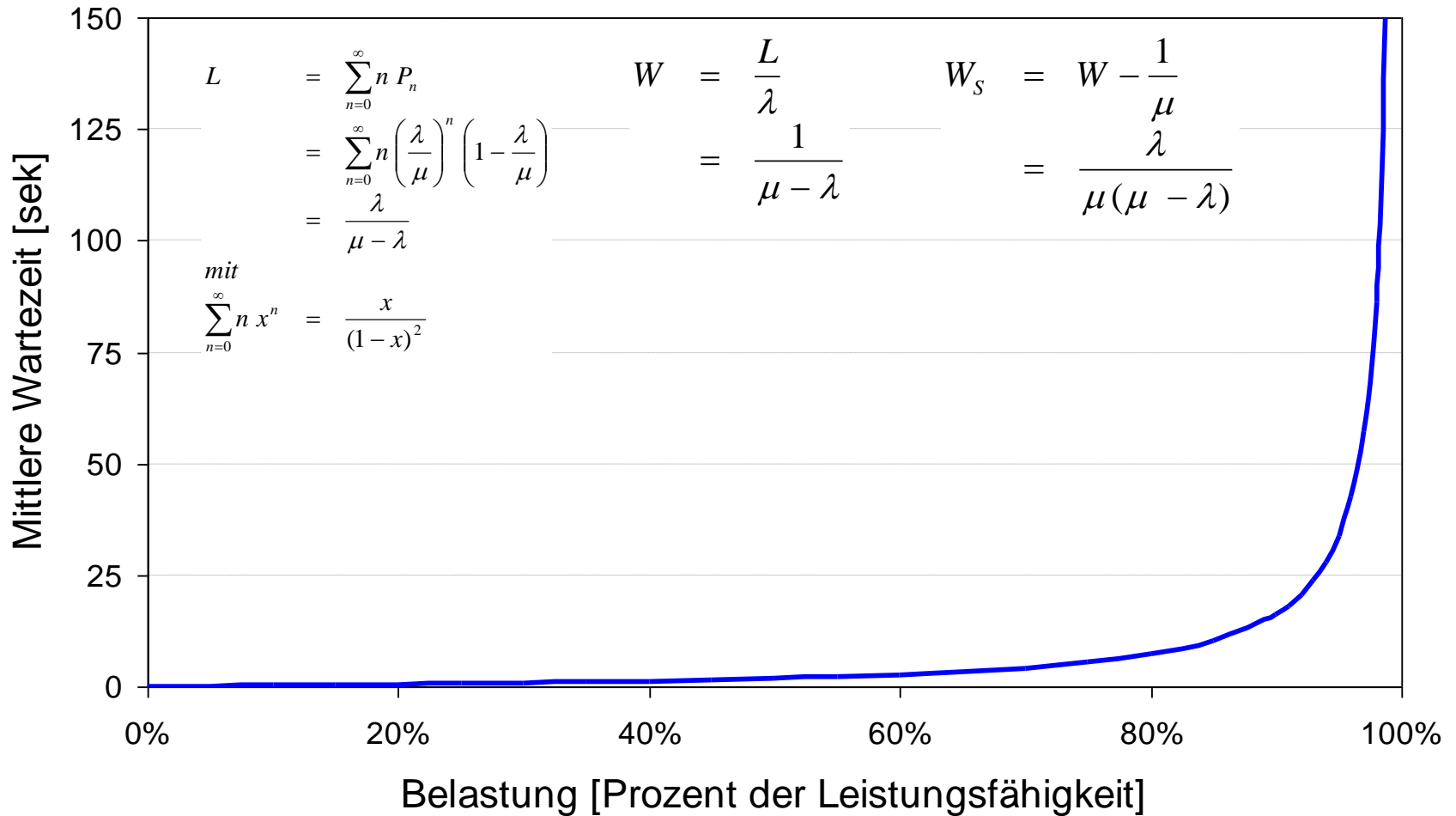
$$\lambda = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{Q(t)}{t}$$

Anzahl der abgefertigten Fahrzeuge:  $A(t)$

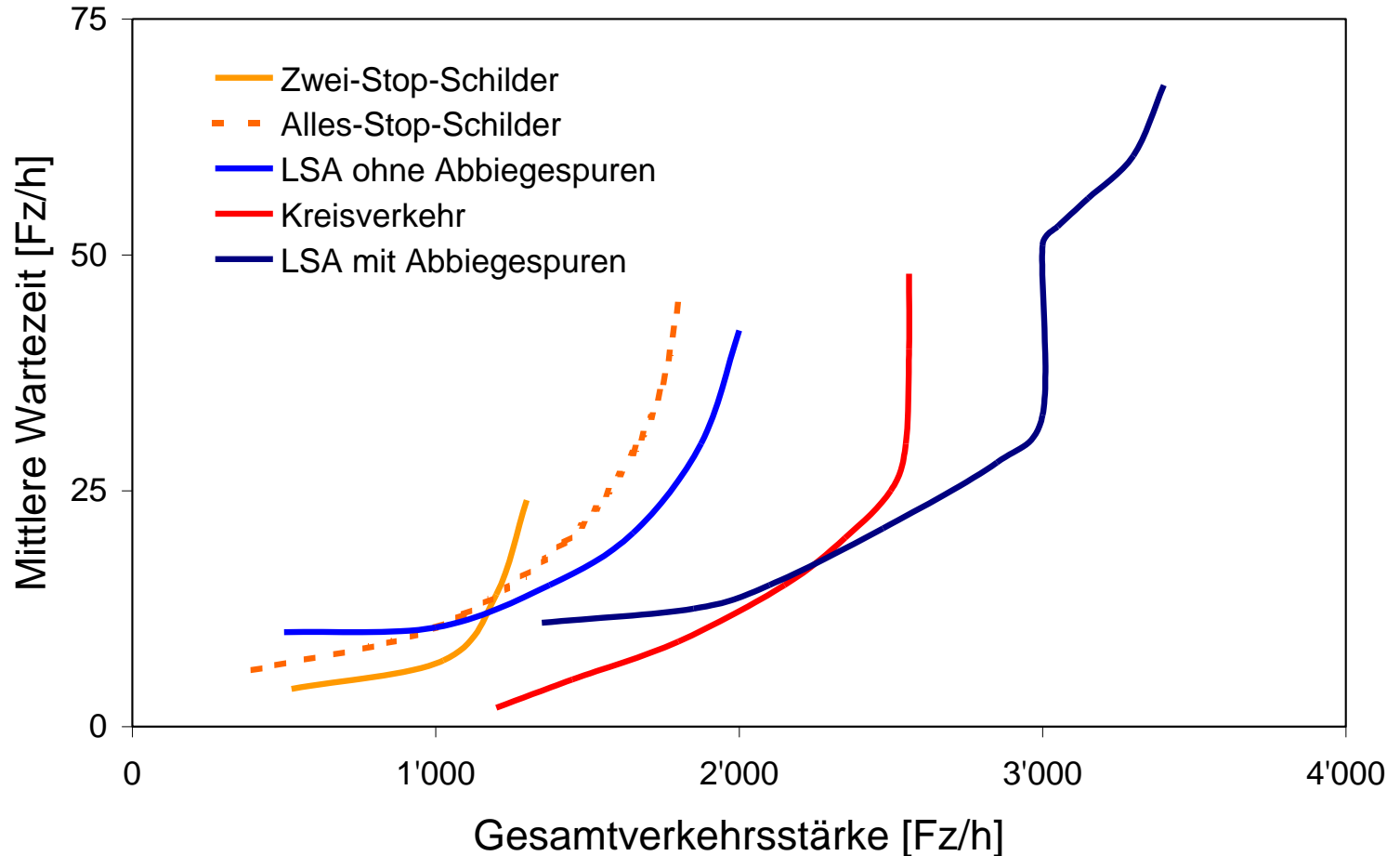
Leistungsfähigkeit  $L$  [Fz/h] mit Bedienrate:

$$\mu = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{A(t)}{t}$$

# Wartezeiten als Funktion der Auslastung



# Warteschlangen: Einfluss der Technologie



Knotenpunktformen unter amerikanischen Bedingungen unter bestimmten Annahmen zur Verteilung der Belastung; einspurig

# Verallgemeinerung

---

Es gibt in Verkehrssystemen immer Konkurrenz, um Positionen in Raum-Zeit, d.h. implizit Schalter und Schlangen:

- LSA, Steuerungssysteme im Öffentlichen Verkehr, insbesondere Schiene und Luft
- Parkplätze und Haltestellen
- Platz in den Fahrzeugen des ÖV
- Überholgelegenheiten, Einbiegemöglichkeiten, Abbiegegelegenheiten
- Platz für die zurückzulegende Strecke bei gleichbleibender Geschwindigkeit

⇒ „slots“ in Raum-Zeit für die geplante Route

, deshalb...

---

Erwarten wir, dass die mittleren generalisierten Kosten  $K(t)$

$$K(t) = f(\text{Auslastung}(t), \text{Warteschlange}(t))$$

Und, dass

*$K(t)$  überproportional mit der Auslastung wächst*

Bitte beachten, dass die

$$\text{Leistungsfähigkeit} = f(t, \text{Belastung}, \text{Warteschlange})$$



, aber...

---

Verkehrssysteme kennen nur temporäre Überlastungen, keinen permanenten Systemzusammenbruch (d.h. kein Äquivalent zum gebrochenen Damm, dem zusammengestürzten Haus)

Zustände der Selbstblockade sind denkbar (grid lock), aber praktisch noch nie aufgetreten

Überschreitungen von gesellschaftlichen Erwartungen, respektive professionellen Grenzwerten sind die – häufige - Regel

, und...

---

Das überproportionale Wachstum der generalisierten Kosten stabilisiert die Systeme durch die Schaffung von Anreizen zur Suche nach neuen Lösungen:

- Auf der Systemebene: neue Verkehrsmittel, neue Netzelemente, neue Dienstleistungen, neue Alternativen zur physischen Bewegung
- Auf der Verhaltensebene: neue Zeiten, neue Routen, neue Verkehrsmittel, neue Ziele, neue Aktivitätenmuster

# Eingriffe

---

# Beispiel: Downs-Thompson Paradox

---

Nicht mit dem Pigou-Knight-Downs paradox zu verwechseln

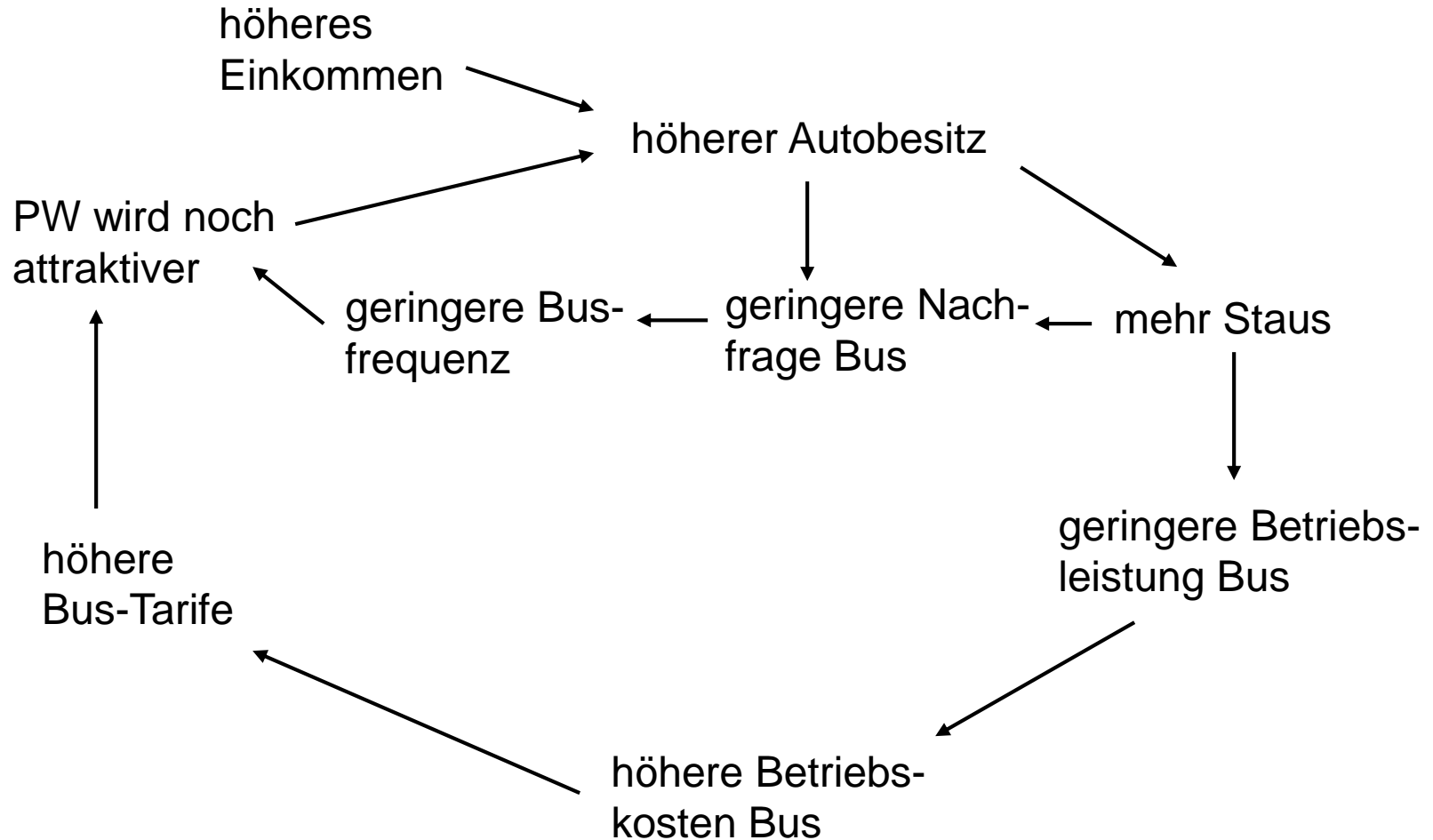
Dreifache Konvergenz:

- Im Raum
- Über die Tageszeit
- Zwischen den Verkehrsmitteln

Mögliche Wirkungskette bei den Verkehrsmitteln:

- Kostendeckungsspirale des ÖVs
  - Weniger Kunden, Weniger Einnahmen, Weniger Service, Höhere generalisierte Kosten  $\Rightarrow$  Weniger Kunden
  - Weniger Kunden, Höhere Preise  $\Rightarrow$  Weniger Kunden

# Downs-Thompson Paradox: Wirkungskette ÖV und IV





# Downs' Paradox: Arbitrage jeglicher Differenzen

---

Situation:

- Zwei Strecken zwischen A und B
- Spitzenstunde mit 5 Intervallen
- Gleiche Parameter;  $t(akt) = t_0 \cdot \left(1 + \alpha \left(\frac{q}{K}\right)^\beta\right)$

Nutzen =  $\beta_1$  \* Fahrtzeit +  $\beta_2$  \* Zu früh +  $\beta_3$  \* Zu Spät

Es ergeben sich:

- Gleiche Belastungen
- Gleiche Nutzen

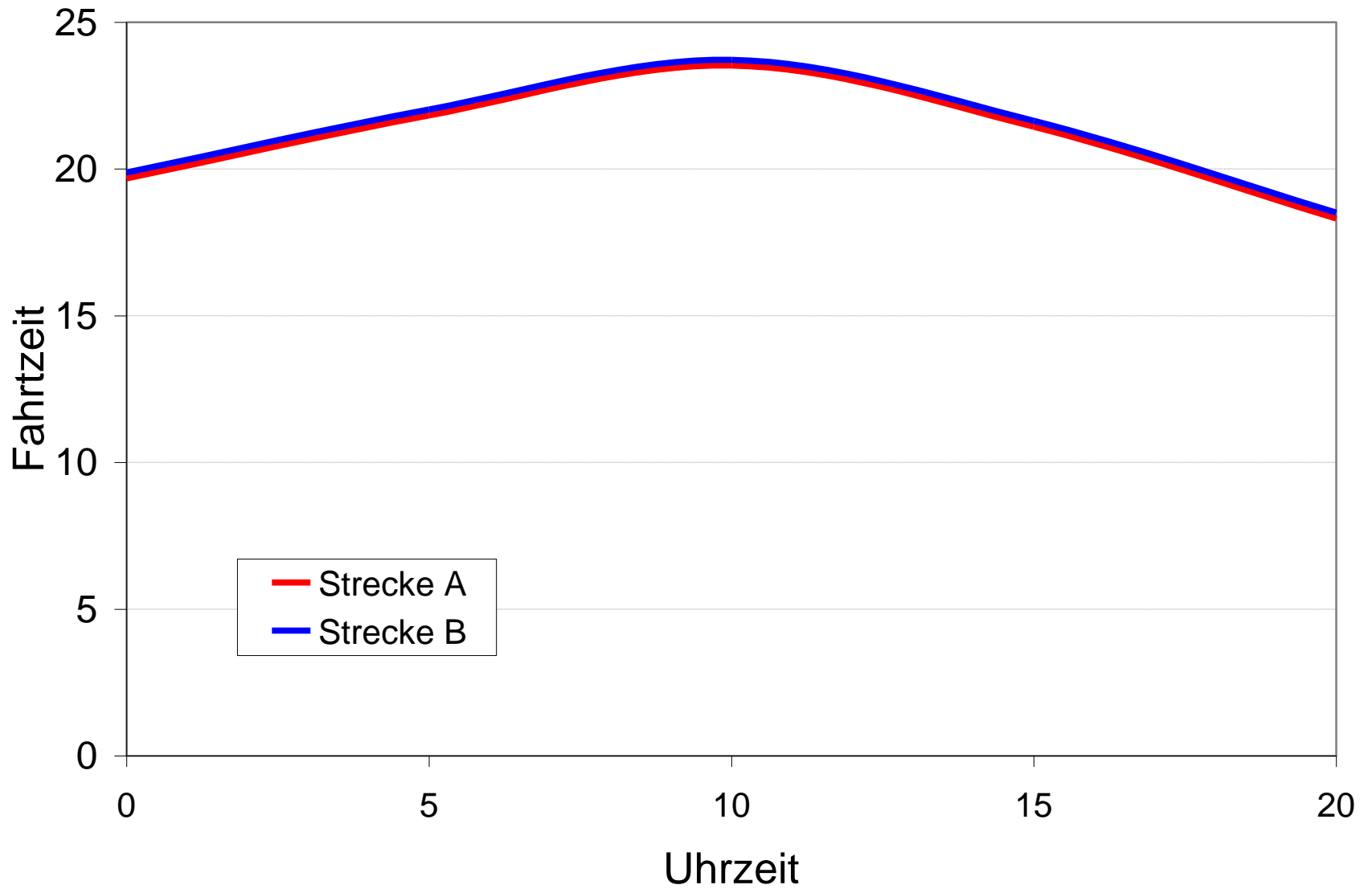
# Downs' Paradox

	Parameter	Uhrzeit	Menge	Fahrtzeit	Zeitnutzen	Differenzen
Route A						
t(0)	<b>17</b>	<b>0</b>	100	17.0	-11.20	636.12
alpha	<b>0.7</b>	<b>5</b>	100	17.0	-10.45	
beta	<b>5</b>	<b>10</b>	100	17.0	-9.70	Mittelwert
Leistungsfähigkeit	<b>700</b>	<b>15</b>	100	17.0	-8.95	-10.12
		<b>20</b>	100	17.0	-10.30	
Route B						
						Interval
t(0)	<b>17</b>	0	100	17.0	-11.20	-10.07
alpha	<b>0.7</b>	5	100	17.0	-10.45	-10.17
beta	<b>5</b>	10	100	17.0	-9.70	
Leistungsfähigkeit	<b>700</b>	15	100	17.0	-8.95	Intervalgrösse
		20	100	17.0	-10.30	<b>0.005</b>
Gesamtnachfrage	<b>5500</b>			Ankunft	<b>35</b>	
Nebenbedingung Gesamtnachfrage			1000	Zufrüh	<b>-0.15</b>	
				Zuspät	<b>-0.9</b>	
				Fahrtzeit	<b>-0.5</b>	

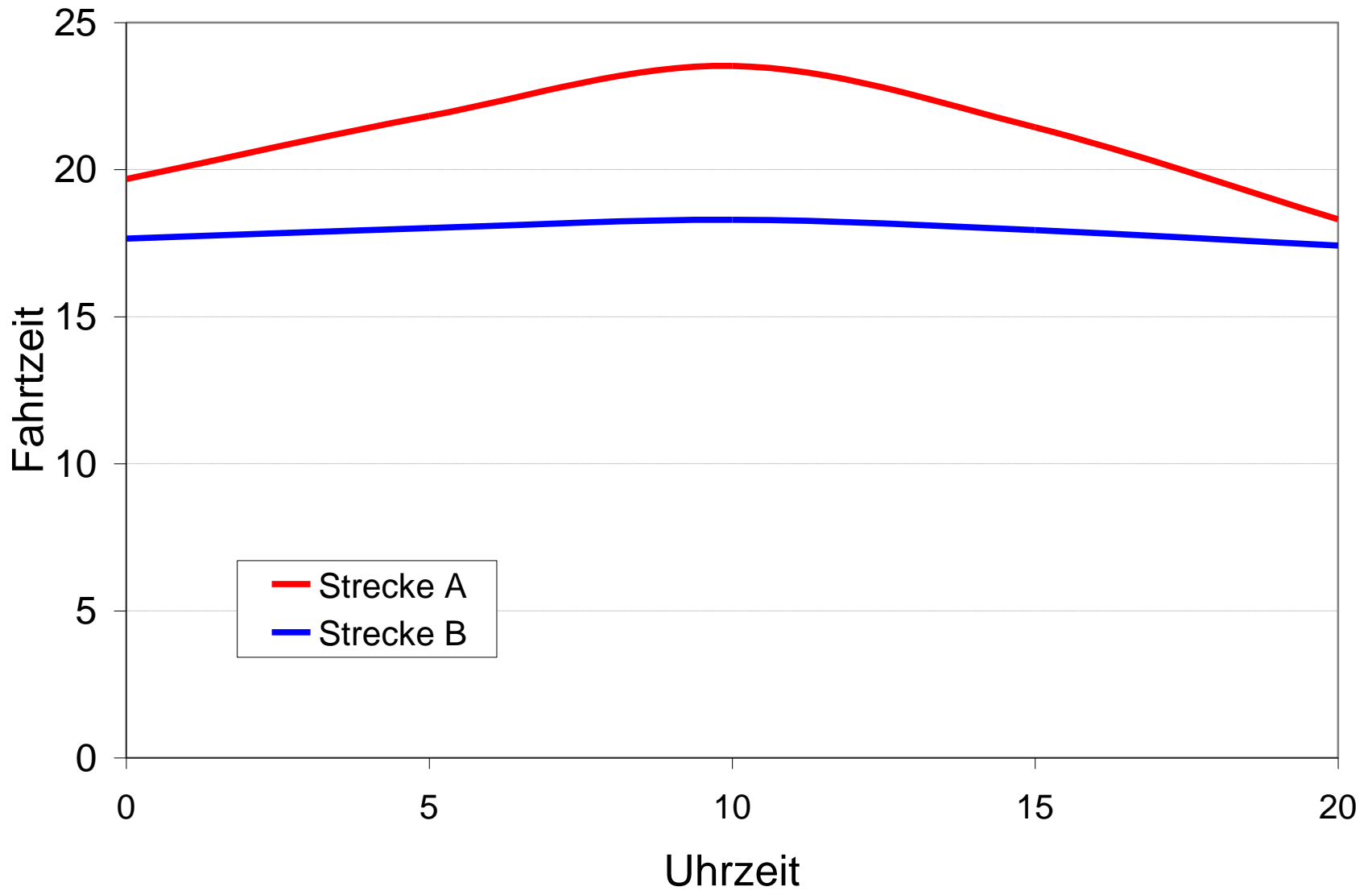


# Downs' Paradox: Ausgangslage

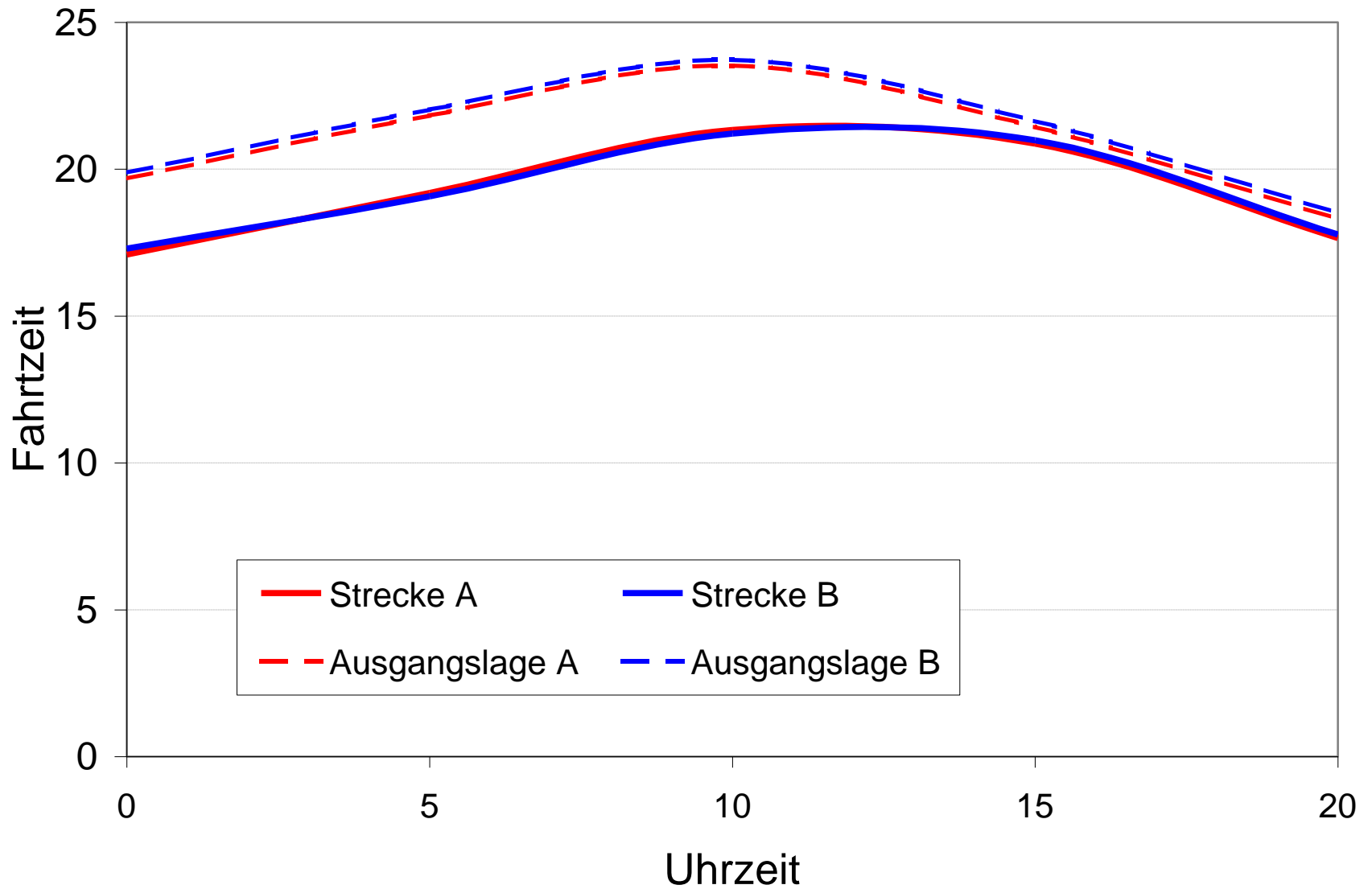
---



# Downs' Paradox: Mit weiterer Spur auf Strecke B



# Downs' Paradox: Nach Arbitrage



# Downs-Thompson & Autonome Fahrzeuge

---

- Induzierte Nachfrage
- Beispiel: Einfluss von Über/Lyft in New York (Schaller, 2017)
- AV's kann man sich vorstellen als Taxis ohne Fahrer
- Zu Beginn, Ride-sharing ersetzte Taxis
- Während 2016, Ride-sharing legt 600 Millionen Miles zurück
- Nettozuwachs in der Höhe von 31 Millionen Wege seit 2013
- Mitfahrer wechseln von ÖV und zu Fuß
- Auch: Verkaufen ihrer Autos nicht (R Clewlow & KL Laberteaux, 2016)
- Dadurch nimmt die durchschnittliche Geschwindigkeit in Manhattan 19% ab



Fortune.com

# Zusammenfassung

---

- Netz- und Angebotselemente
- Leistungsfähigkeit
- Netzte als hierarchische Strukturen
- Wartesysteme
- Downs' Paradoxon

# Literaturhinweis (Nächste Vorlesung)

---

- Schnabel / Lohse: Kapitel 9
- Ortúzar / Willumsen Kapitel 3.5

# Quellen

---

- Ashmore, D. & N. Harris (2000) Using risk analysis to determine the potential range of lifecycle costs for urban transit systems, *Transport Reviews: A Transnational Transdisciplinary Journal*, **20** (4) 403-420.
- Brilon, W., M. Großmann und H. Blanke (1994) Verfahren für die Berechnung der Leistungsfähigkeit und Qualität des Verkehrsablaufs auf Straßen, *Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik*, **669**, Bonn.
- Clewlow, R. und K. L. Laberteaux (2016) *Shared-use mobility in the United States: current adoption and potential impacts on travel behavior*, presented at Annual Meetings of the Transportation Research Board, Washington DC, January 10-14, 2016
- Ewing, R. (1997) *Transportation and Land Use Innovations: When You Can't Pave Your Way out of Congestion*, Planners Press, Chicago.
- Schaller, B. (2017) *The Growth of App-Based Ride Services and Traffic, Travel and the Future of New York City*, verfügbar an <http://schallerconsult.com/rideservices/unsustainable.pdf>, letzter Zugriff 30.01.2018
- Van Nes, R. und N.J. van der Zijpp (2000) Scale factor 3 for hierarchical road networks: A natural phenomenon?, Working paper, TRAIL Research School, TU Delft, Delft.
- VSS Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute (1994) Schweizer Norm 640 040b Projektierung, Grundlagen, Schweizerische Normen-Vereinigung, Winterthur.
- Wu, N. (2000) Verkehr auf Schnellstraßen im Fundamentaldiagramm - Ein neues Modell und seine Anwendungen, *Strassenverkehrstechnik* **40** (8), FGSV, Köln.