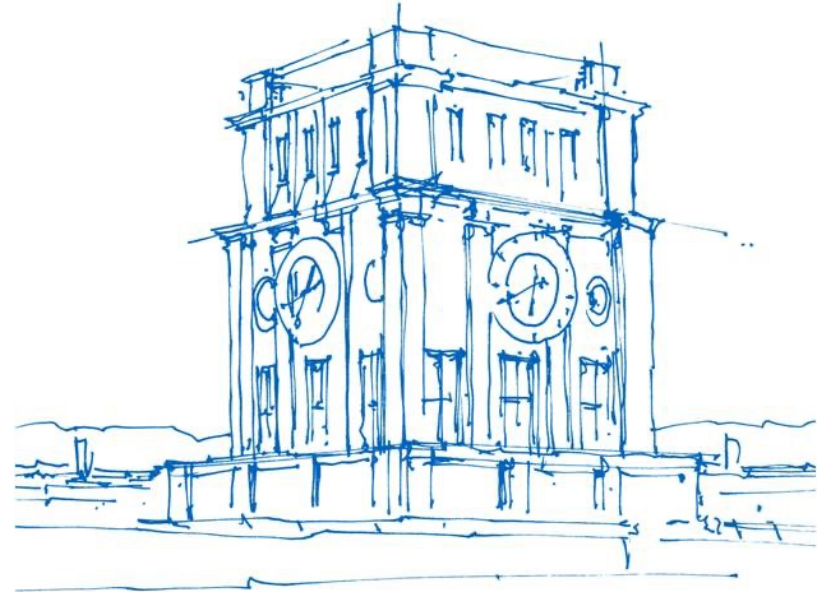


Multimodalen Verkehrsnetze: Kapazität und Erreichbarkeit

Allister Loder

Magliaso, 9. September 2024



Uhrenturm der TUM

Vorstellung

Zur Person

- MSc Energy Science and Technology (2015)
- Doktorat am IVT, ETH (2019)
- Experte für Mobilitätsdaten bei den SBB (2020)
- Postdoc (2021-2023)
- Professor für Mobilitätspolitik (seit Oktober 2023)
- DFG Emmy Noether Nachwuchsgruppe (seit Januar 2024)



Professur für Mobility Policy

Forschungsschwerpunkte

- ÖV-Tarfinnovationen, Pricing
- Transformation der städtische Verkehrssysteme
- Empirische Datenerhebung und Auswertung (Tracking, Survey)

Strukturelle Verortung

- «Brückenbauer» zwischen Sozial- und Ingenieurwissenschaften
- Teil des Münchner Mobilitätsforschungscluster

Gruppe

- 6 Doktorand:innen + 1 externe Doktorand:in
- Drei Drittmittelförderprojekte (DFG, BMBF)

Programm

Bis 12:00	Referat
14:00-14:30	Fortsetzung Referat und Vorstellung Kreativaufgabe
14:30-15:30	Bearbeitungsphase I
16:00-17:15	Bearbeitungsphase II
17:15-18:00	Vorstellung der Arbeitsergebnisse

Urbanes Verkehrssystem

Multimodal

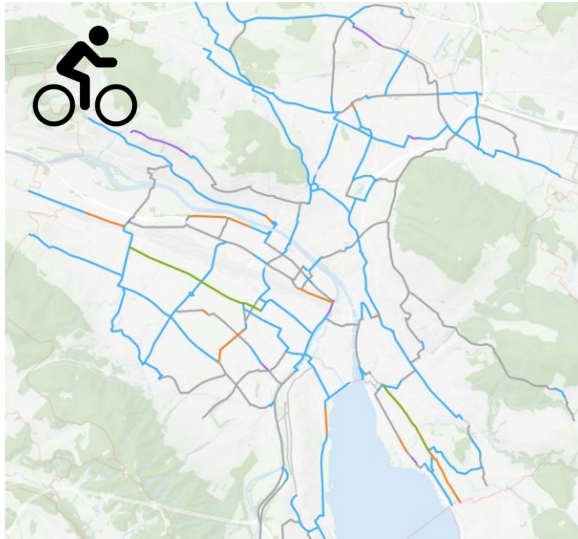


<https://www.stadtwerke-muenster.de/blog/wp-content/uploads/Nachdenken-Ensemble-Blog.jpg>

Verkehrsmittel mit unterschiedlichen....

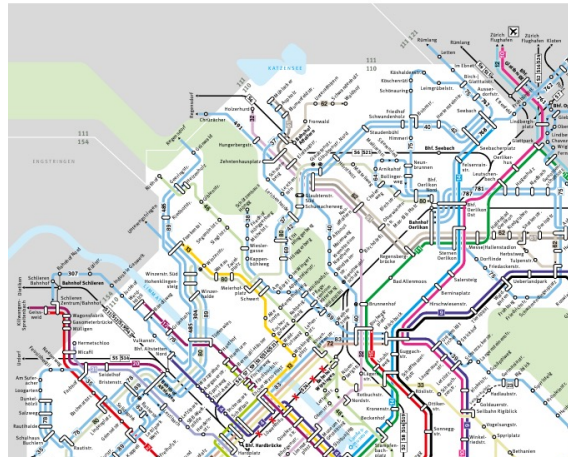
- Verkehrsangebot
- Geschwindigkeiten
- Raumanforderungen
- Betriebs- und Zugangskosten

Verkehrsangebot

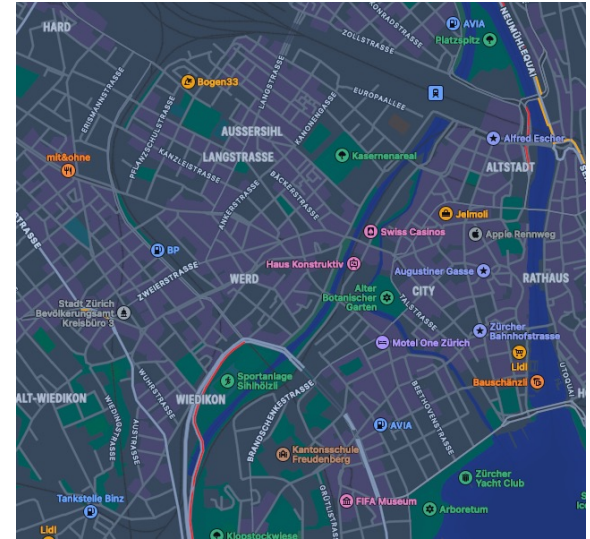


<https://www.stadt-zuerich.ch/site/velo/de/index/die-velovorzugsrouten.html>

 ZVV Stadt Zürich | Zurich City



ZVV Netzplan Stadt Zürich (2024)



Screenshot Apple Maps (2024)

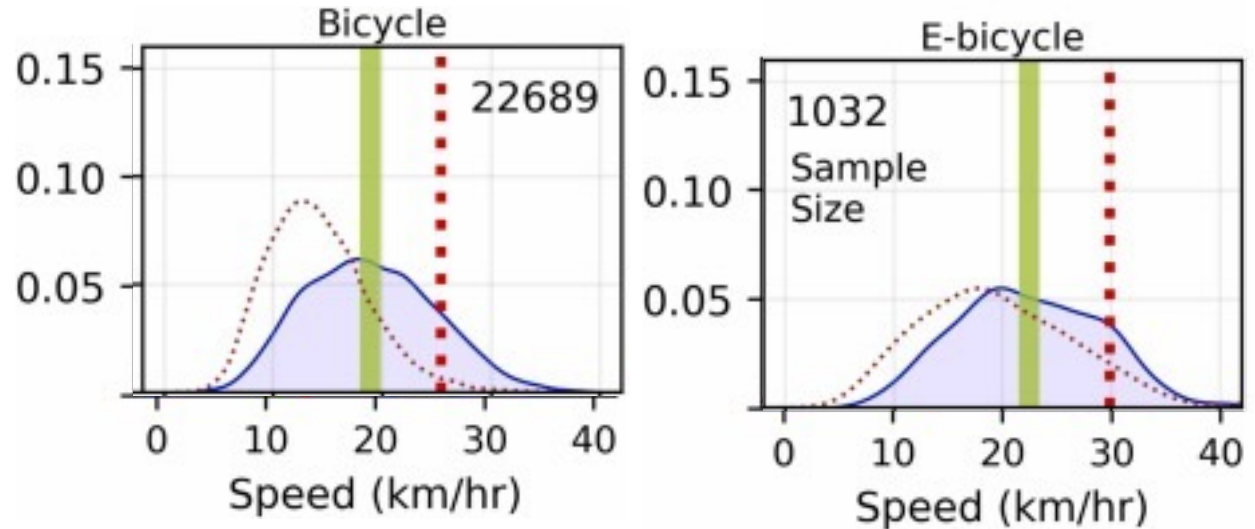
Geschwindigkeitsunterschiede Auto-Velo



Traffic Index

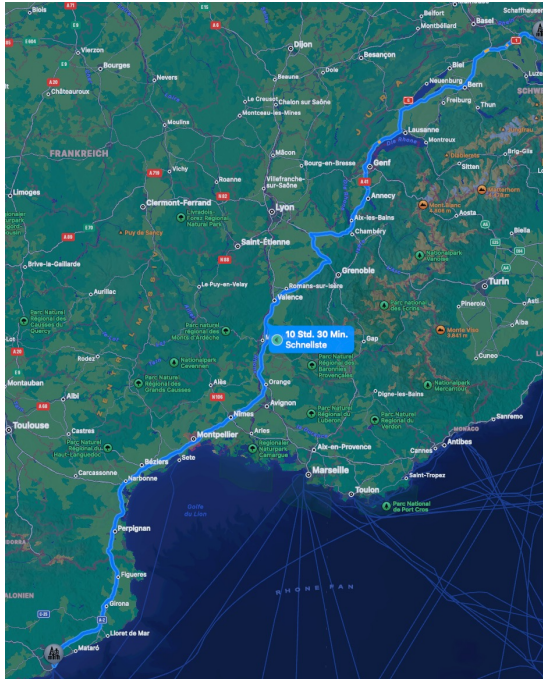
	Sun	Mon	Tue	Wed	Thu
12:00 AM	29 km/h	32 km/h	31 km/h	31 km/h	31 km/h
	32 km/h	35 km/h	34 km/h	35 km/h	34 km/h
02:00 AM	33 km/h	35 km/h	34 km/h	34 km/h	34 km/h
	34 km/h	36 km/h	36 km/h	36 km/h	35 km/h
04:00 AM	34 km/h	38 km/h	37 km/h	37 km/h	37 km/h
	33 km/h	38 km/h	38 km/h	38 km/h	37 km/h
06:00 AM	34 km/h	29 km/h	28 km/h	28 km/h	29 km/h
	36 km/h	23 km/h	22 km/h	22 km/h	23 km/h
08:00 AM	36 km/h	22 km/h	20 km/h	22 km/h	21 km/h
	33 km/h	25 km/h	23 km/h	24 km/h	24 km/h
10:00 AM	32 km/h	26 km/h	25 km/h	25 km/h	25 km/h
	30 km/h	27 km/h	25 km/h	25 km/h	25 km/h
12:00 PM	30 km/h	27 km/h	26 km/h	25 km/h	26 km/h
	29 km/h	27 km/h	25 km/h	25 km/h	26 km/h
02:00 PM	28 km/h	26 km/h	25 km/h	24 km/h	25 km/h
	27 km/h	26 km/h	25 km/h	23 km/h	24 km/h
04:00 PM	26 km/h	23 km/h	21 km/h	21 km/h	21 km/h
	25 km/h	22 km/h	20 km/h	20 km/h	20 km/h
06:00 PM	26 km/h	25 km/h	22 km/h	22 km/h	22 km/h
	28 km/h	28 km/h	27 km/h	27 km/h	26 km/h
08:00 PM	30 km/h	29 km/h	29 km/h	29 km/h	29 km/h

TomTom Durchschnittliche Geschwindigkeiten in Zürich 2023



Hassanpour, A., & Bigazzi, A. (2024). Operating speed distributions in off-street cycling facilities by vehicle type and motorization. *Journal of Cycling and Micromobility Research*, 2, 100021.

Konnektivität



Screenshot Apple Maps (2024)

Zürich HB → Barcelona Sants

Mo. 09.09.2024, 10 h 30 min

09:04 ————— 19:34

ⓘ Nicht auf SBB.ch erhältlich.
 Diese Verbindung ist leider nicht auf SBB.ch
 kaufbar.
[Weitere Informationen](#)



Kaufen

Screenshot SBB (2024)

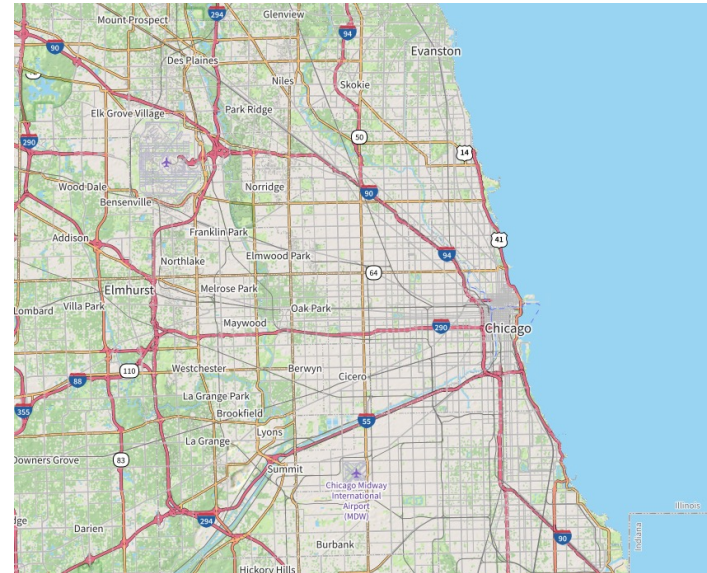


Google StreetView (2022)

Hierarchien



Screenshot <https://map.geo.admin.ch/>, vom Nationalstraßennetz (2024)



Screenshot OpenStreetMap (2024)

Begrenzte und umkämpfte Ressourcen

- Infrastruktur ist limitiert in Raum **und** Zeit
- Ressource kann nicht doppelt genutzt werden
- Verkehrsfläche konkurriert mit anderen Nutzungen (Wohnen, Erholung)
- Urban-Heat-Island Effekt

Optimierung Fahrten \neq Optimierung Verkehrsfluss



Source: Central Zürich (CC BY-SA 2.5 / A. Bossi via Wikimedia Commons)

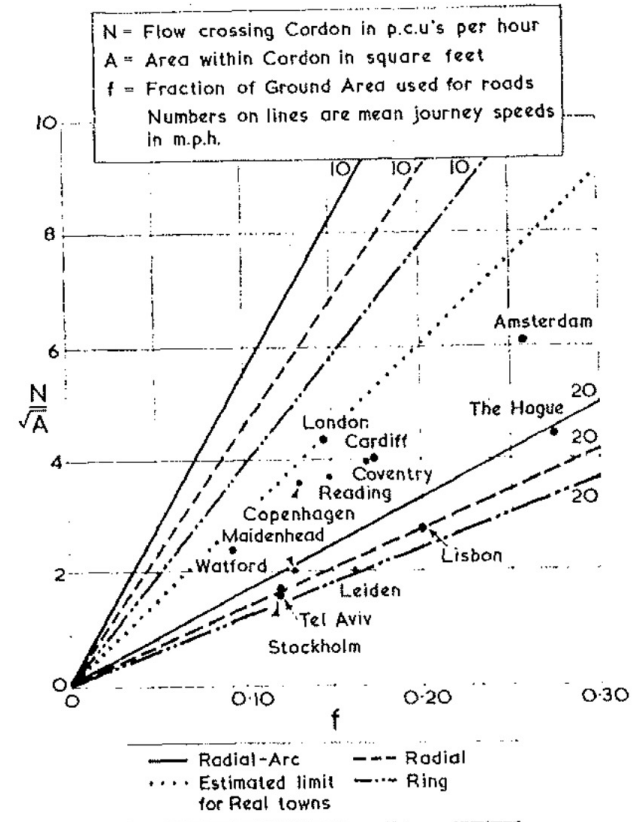
Netzwerkkapazitäten

Smeed (1966)

Wie viele Fahrzeuge können «usefully» in eine Stadt hineinfahren?

Die Forschungsarbeit stammt aus der Zeit der

- Massenmotorisierung
- ersten Verkehrsprobleme
- Begründung der Verkehrswissenschaft



Smeed, R. J. (1966). Road capacity of city centers. *Traffic Engineering and Control*, 8(7), 455–458.

Der erste analytische Ansatz

$$N = (109 - 0.0024v^3)f \sqrt{A}$$

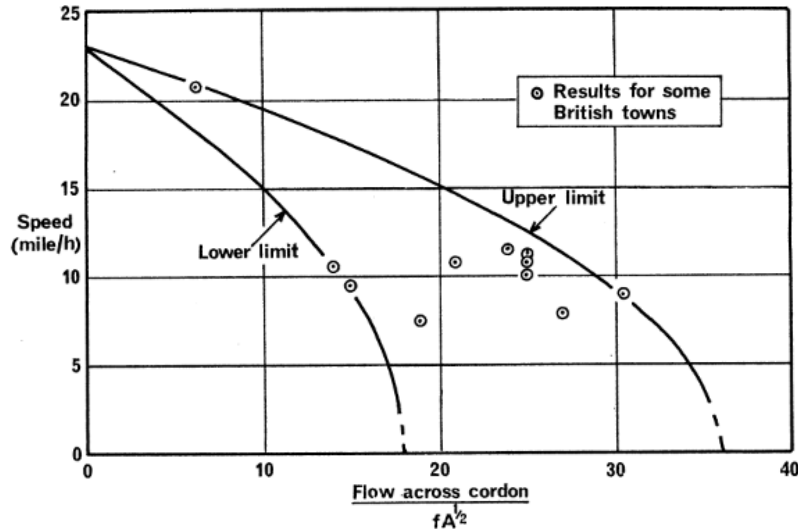
N	Anzahl an einfahrenden Fahrzeugen
v	Angestrebte Geschwindigkeit der Fahrzeuge
f	Flächenanteil Verkehrsfläche
A	Fläche

Warum \sqrt{A} ?

Implikationen

- Es können nicht unendlich Fahrzeuge verkehren
- Netzstruktur ist nicht so einflussreich wie die gesamte Fläche
- Erhöhung der Zielgeschwindigkeit von 10 auf 20mph reduziert N auf 1/3

Was sind typische Geschwindigkeiten?

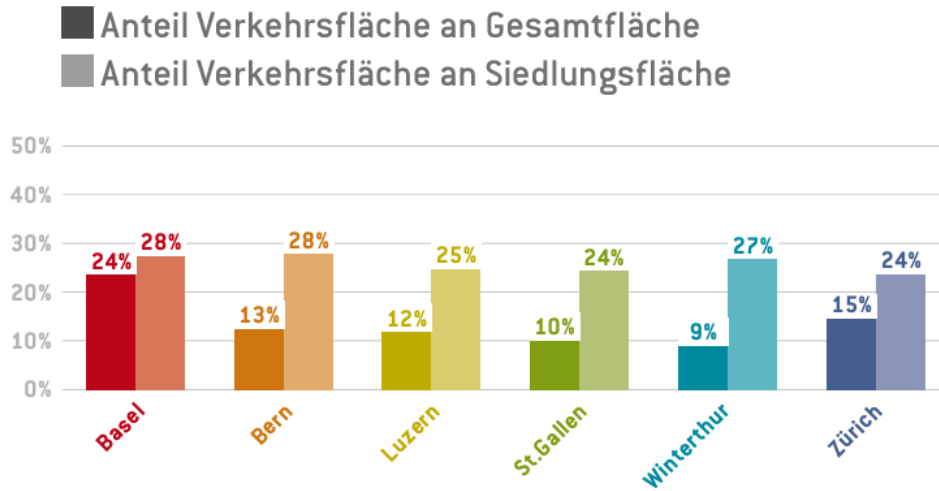


Smeed, R. J. Traffic studies and urban congestion. *J. Transp. Econ. Policy* 2, 33–70 (1968).

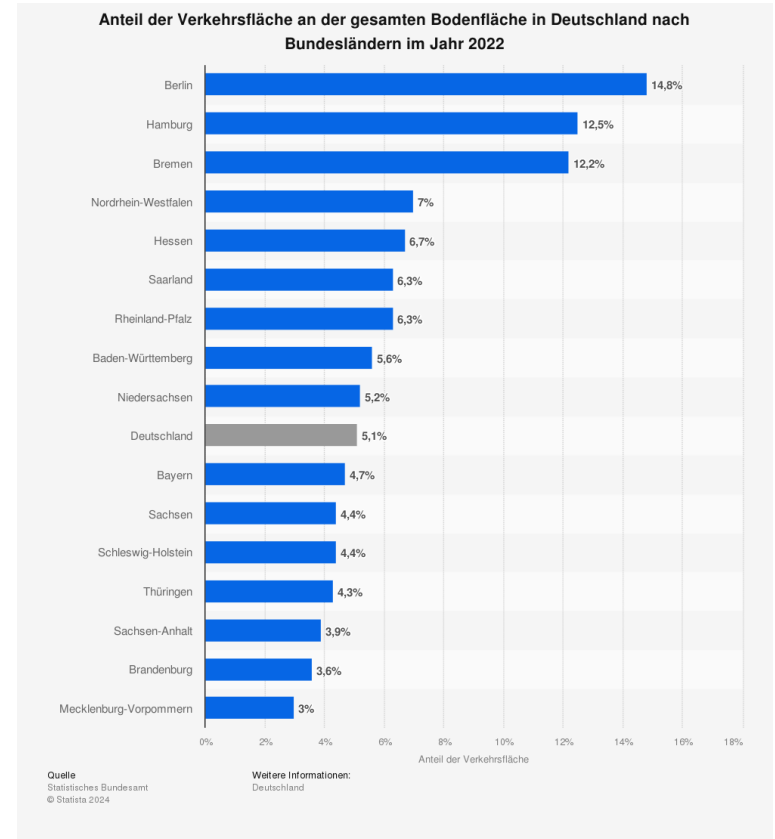
Downs-Thomson Paradox

Die Autogeschwindigkeit folgt aus der äquivalenten Tür-zu-Tür Geschwindigkeit des öffentlichen Verkehrs.

Anteil Verkehrsfläche



Städtevergleich Mobilität (2012) https://skm-cvm.ch/cmsfiles/130124_stadtevergleich_mobilitat_1_1.pdf



Messung der Netzwerkkapazität

Kenngrößen

- Anzahl an Fahrzeugen im Netz N (Fzg.)
- Netzlänge L (km)
- Produktion Π (Fzg.-km/h)
- Geschwindigkeit $v = \frac{\Pi}{N}$: diese Geschwindigkeit enthält Fahr- und Standzeiten an Ampeln etc.
- Oft werden N und Π durch die Netzlänge normiert
 - $q = \frac{\Pi}{L}$ (durchschnittlicher Verkehrsfluss)
 - $k = \frac{N}{L}$ (durchschnittliche Verkehrsdichte)

Netzwerkkapazität $C = \max(\Pi)$

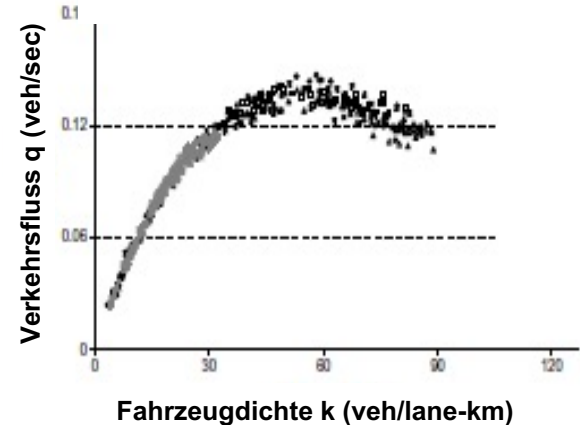
Reisendenperspektive

- Durchschnittliche Weglänge \bar{l}
- Beendete Reisen (trip ends) $e = \frac{\Pi}{\bar{l}}$

Maximum von Π ?

Makroskopische Fundamentaldiagramm (MFD)

- Konkaver Zusammenhang zwischen N bzw. k und Π bzw. q
- Existiert für ganze städtische Netze
- Analytisch herleitbar
- Zusammenhang ist einzigartig für jede Stadt



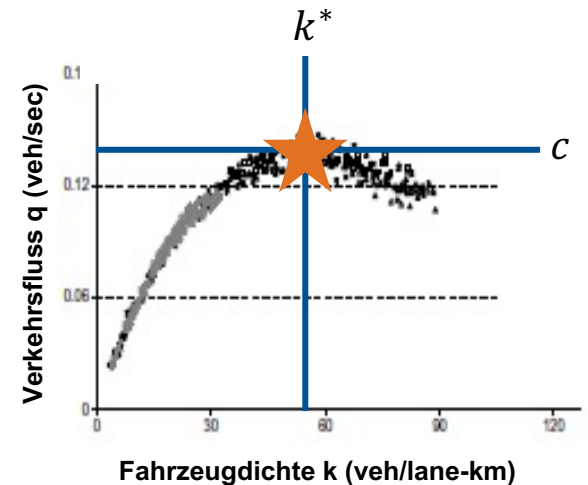
Geroliminis, N. & Daganzo, C. F. Existence of urban-scale macroscopic fundamental diagrams: Some experimental findings. *Transp. Res. Part B Methodol.* 42, 759–770 (2008)..

Kritischer Punkt

- Verkehrszustand bei dem die Kapazität (C bzw. c) erreicht wird (maximaler Durchsatz, Π bzw. durch. Verkehrsfluss)
- Kritische Geschwindigkeit ($v^* = c/k^*$), typischerweise zwischen 15 und 20km/h in Städten
- Bei $k > k^*$ befindet sich das Netz im Stau, d.h. nur langsamer fahren muss nicht immer Stau bedeuten

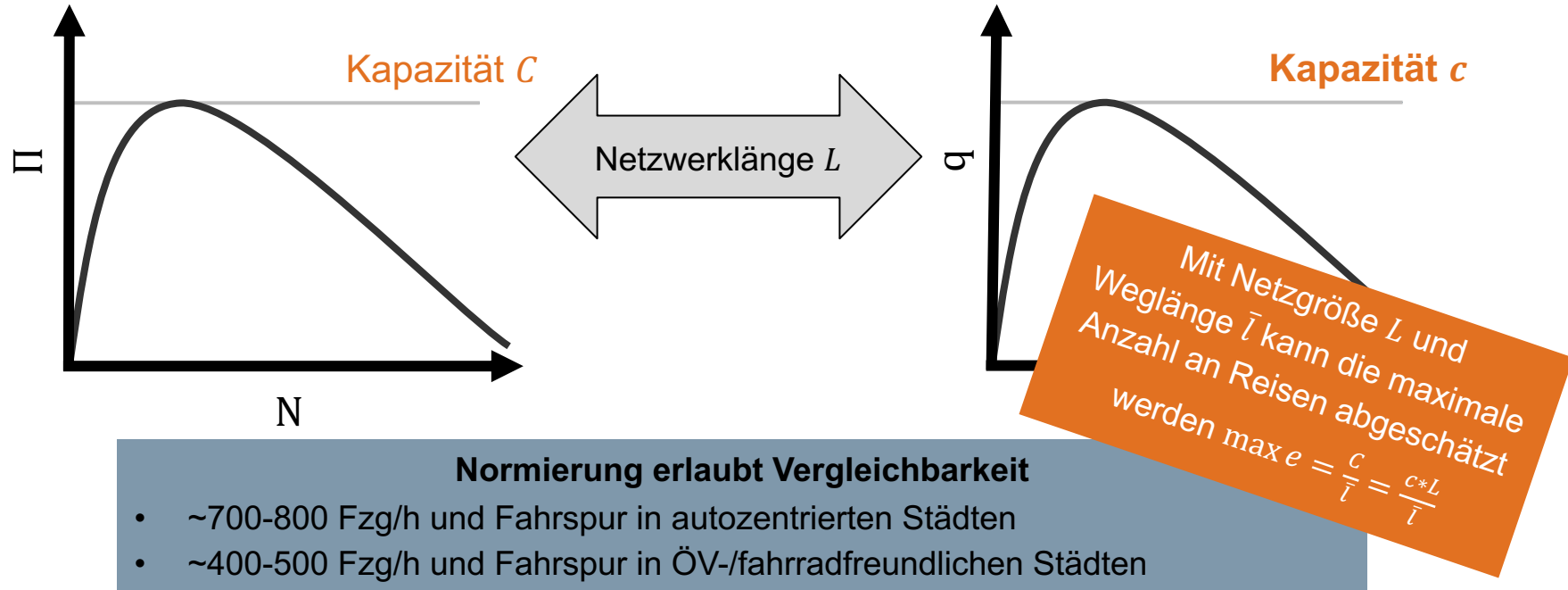
Ansatzpunkt für Maßnahmen

- Steuerung (Perimeter-Control wie z.B. in Zürich)
- Pricing (MIV Preise so hoch, dass genau k^* bzw. N^* erreicht wird)
- ÖV-Angebot (Zielgeschwindigkeit ÖV, um Verlagerung attraktiv zu machen)



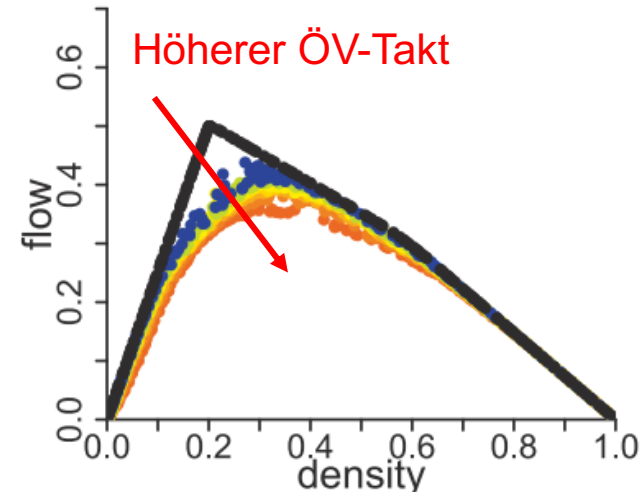
Geroliminis, N. & Daganzo, C. F. Existence of urban-scale macroscopic fundamental diagrams: Some experimental findings. *Transp. Res. Part B Methodol.* 42, 759–770 (2008).

Form des MFD verändert sich durch die Normierung nicht



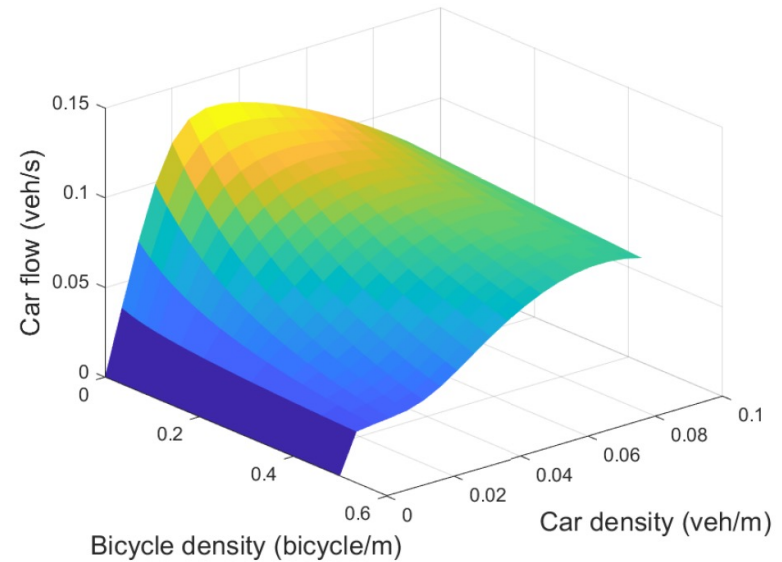
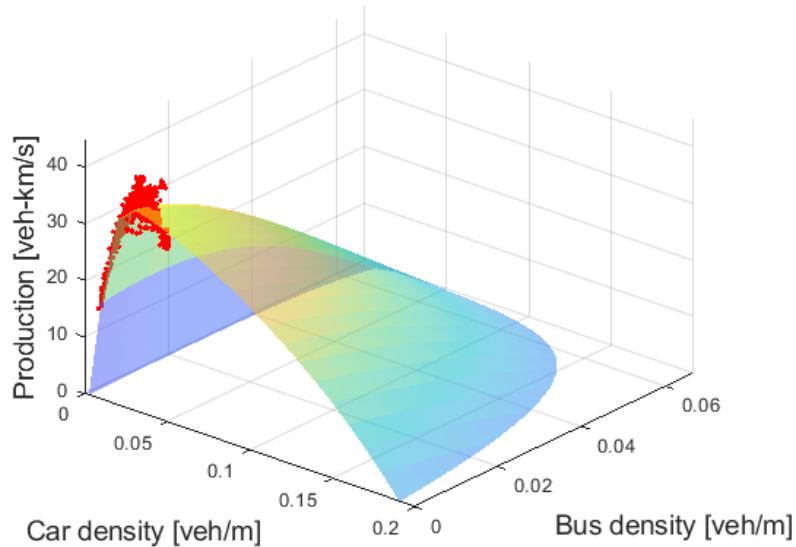
Einflussfaktoren auf die MFD Form

- Netzgröße und -form
- Präsenz anderer Verkehrsmittel
- Geschwindigkeitslimit
- Lichtsignalsteuerung
- Fahrzeuggröße
- Reaktionszeiten



Castrillon, F. & Laval, J. Impact of buses on the macroscopic fundamental diagram of homogeneous arterial corridors. *Transp. B Transp. Dyn.* 6, 286–301 (2018).

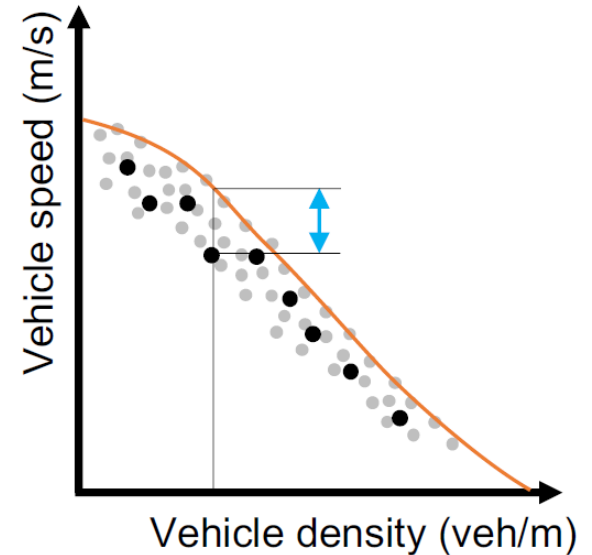
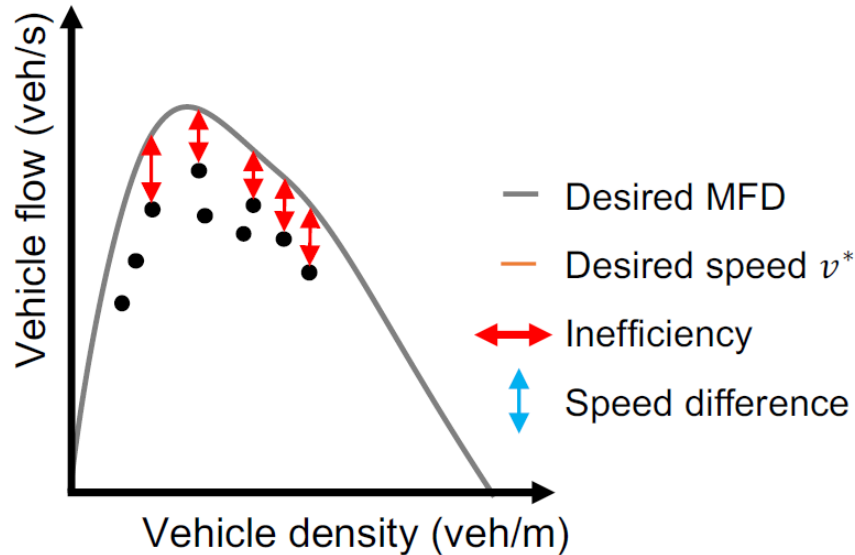
ÖV-Betrieb und Fahrradverkehr



Loder, A. et al. Capturing network properties with a functional form for the three-dimensional macroscopic fundamental diagram. *Transp. Res. Part B Methodol.* 129, 1–19 (2019).

Loder, A. et al. (2021). How Many Cars in the City Are Too Many? Towards Finding the Optimal Modal Split for a Multi-Modal Urban Road Network. *Frontiers in Future Transportation*, 2, 665006.

Kein perfekter Zusammenhang: Scatter?

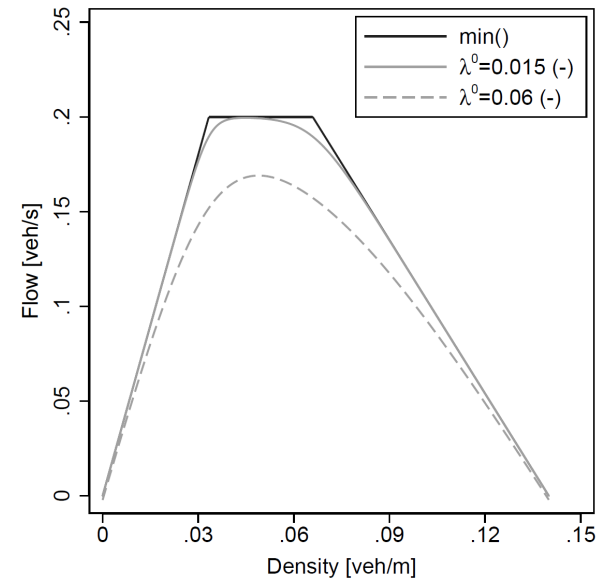


Messung der Effizienz im MFD

Einführung von λ als Parameter zum Messen des Abstands zum upper/desired MFD (Ambühl et al., 2020)

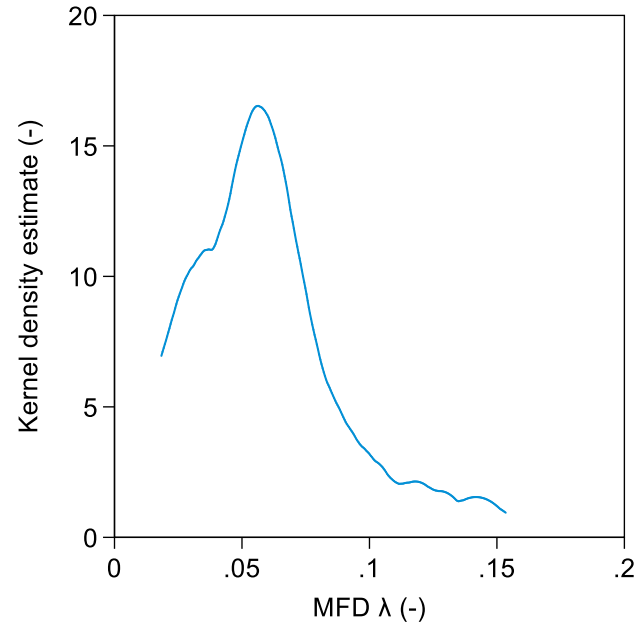
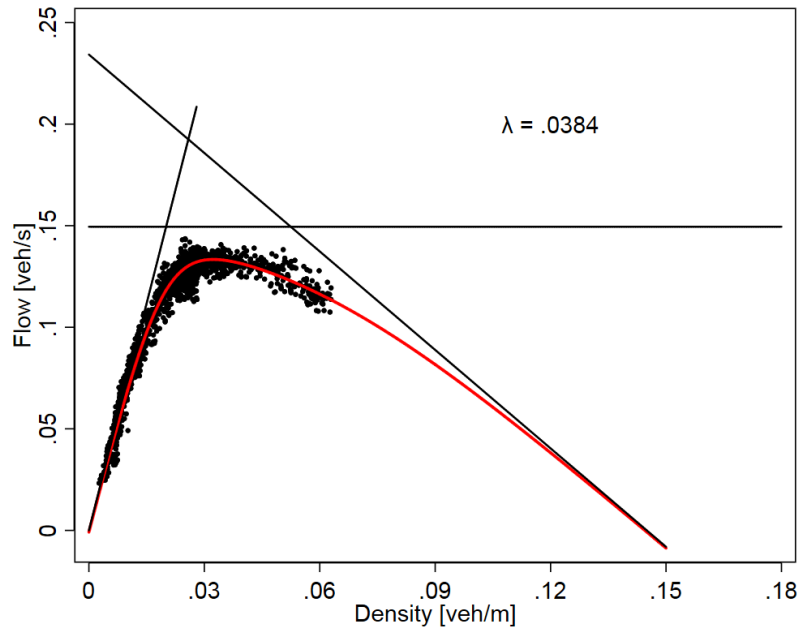
- λ unabhängig von Netzstruktur Informationen teilen
- Je kleiner λ , desto mehr effizient ist die Kapazität genutzt

$$q(k) = -\lambda \log \left(\exp \left(-\frac{u_f k}{\lambda} \right) + \exp \left(-\frac{Q}{\lambda} \right) + \exp \left(-\frac{w(\kappa - k)}{\lambda} \right) \right)$$



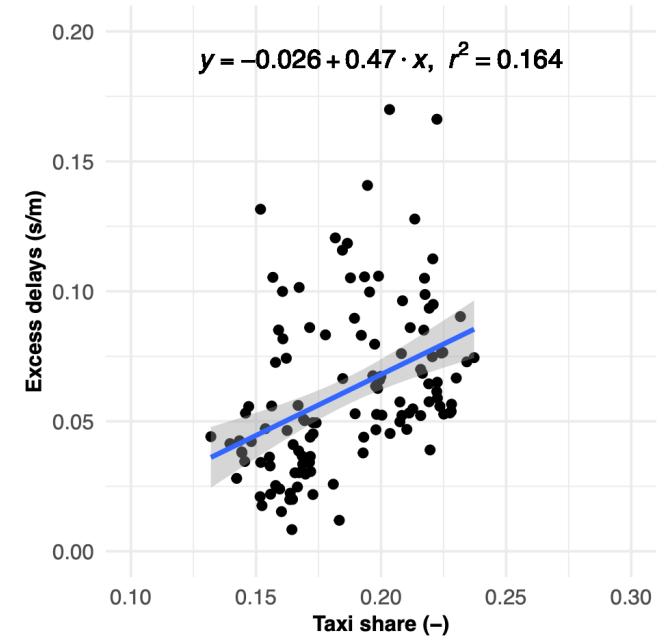
Ambühl, L., Loder, A., Bliemer, M. C. J., Menendez, M., & Axhausen, K. W. (2020). A functional form with a physical meaning for the macroscopic fundamental diagram. *Transportation Research Part B: Methodological*, 137, 119–132.

Typische Werte für λ (non scale-invariant)



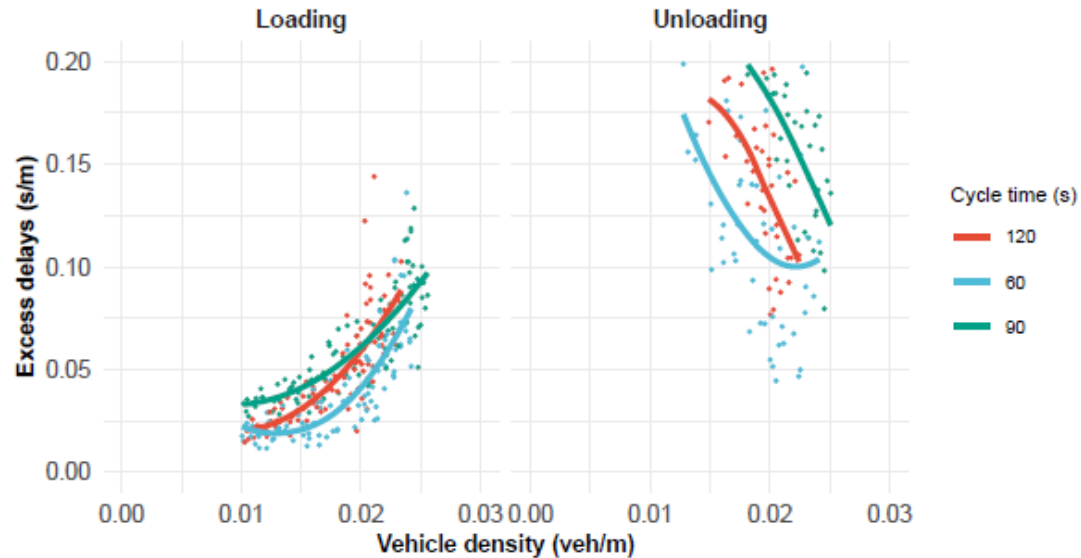
Zusätzliche Verzögerungen

- Verteilung der Fahrzeuge im Netz (Einpendeln vs. Auspendeln)
- Taxis, Lieferwagen, uber mit zusätzlichen Haltevorgängen
- Stauauflösung



Hamm, L. S., Loder, A., Tilg, G., Menendez, M., & Bogenberger, K. (2022). Network Inefficiency: Empirical Findings for Six European Cities. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2676(8), 99–111.

Lichtsignalsteuerung



Hamm, L. S., Loder, A., Tilg, G., Menendez, M., & Bogenberger, K. (2022). Network Inefficiency: Empirical Findings for Six European Cities. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2676(8), 99–111.

Zusammenfassung und Implikationen

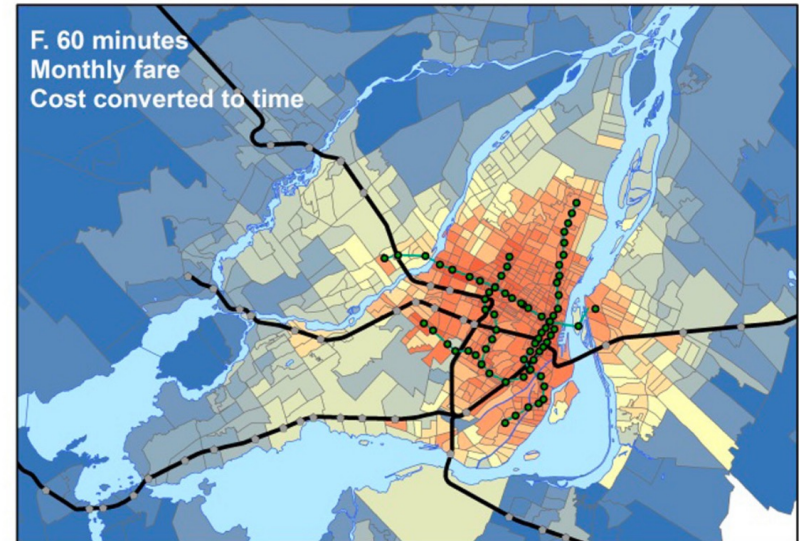
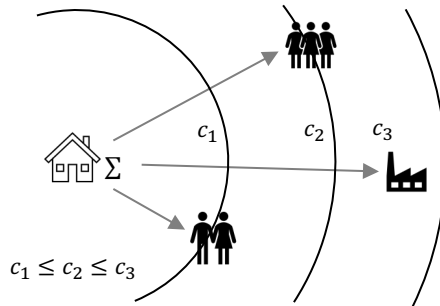
- Die Kapazität eines Netzes ist begrenzt
- Kapazitäten bestimmen Geschwindigkeiten
- Kritische Geschwindigkeiten $\sim 15\text{-}20\text{km/h}$ (d.h. in der Nähe des E-Bikes)
- Multimodale Interaktionen und Flächenaufteilung beeinflussen Leistungsfähigkeit
- Netzausbau kaum noch möglich (kaum vorhanden, NIMBY) und \sqrt{A} -Effekt

Optimierung des Durchsatzes im Netz an Reisen, nicht Fahrzeugen: mehr Reisen geht nur über (teure) Verkehrsinfrastruktur oder flächeneffiziente modale Verlagerung (E-Bike City).

Erreichbarkeit

El-Geneidy et al. (2016)

- Erreichbarkeit misst die Interaktion aus Raumnutzung und Verkehrssystem
- Wie viel kann ich in einer Stunde / mit 10€ erreichen?



El-Geneidy, A. et al. (2016). The cost of equity: Assessing transit accessibility and social disparity using total travel cost. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 91, 302–316.

Zentrale Größe in der Verkehrsplanung

- Erreichbarkeit $\sim f(\text{Gelegenheiten, Geschwindigkeit})$
- Erreichbarkeit \sim Produktivität, Bildung von Social Capital
- Erreichbarkeit, i.e., geringere Kosten, um Dinge zu erleben / erledigen
 - ~ Autobesitz
 - ~ Zersiedelung
 - ~ Homeoffice
 - ~ Erhöhter Verkehrsnachfrage

Erreichbarkeitsziele

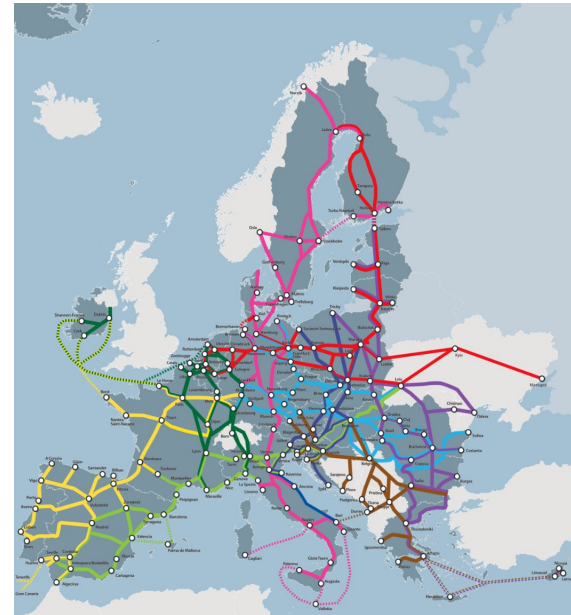
Tabelle 1: Zielgrößen für die Erreichbarkeit zentraler Orte von den Wohnstandorten

zentraler Ort	Reisezeit in Minuten	
	mit dem Pkw	im öffentlichen Personenverkehr
Grundzentren	≤ 20	≤ 30
Mittelzentren	≤ 30	≤ 45
Oberzentren	≤ 60	≤ 90

Tabelle 2: Zielgrößen für die Erreichbarkeit zentraler Orte von benachbarten zentralen Orten gleicher Zentralitätsstufe

zentraler Ort	Reisezeit in Minuten zum nächsten Nachbarn	
	mit dem Pkw	im öffentlichen Personenverkehr
Grundzentren	≤ 25	≤ 40
Mittelzentren	≤ 45	≤ 65
Oberzentren	≤ 120	≤ 150
Metropolregionen	≤ 180	≤ 180

Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen (FGSV). (2008). *Richtlinien für integrierte Netzgestaltung*.



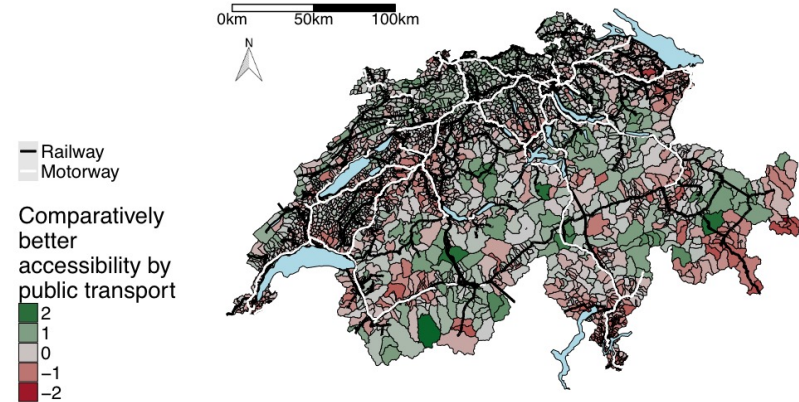
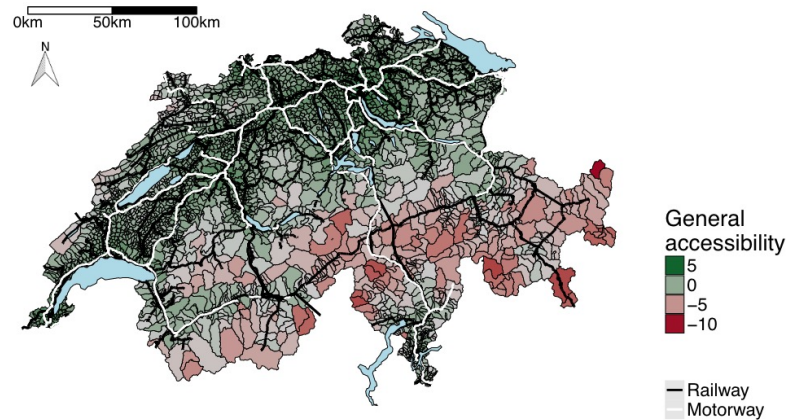
Trans-European Transport Network

Erreichbarkeitsziele in der Raumordnung

Im Gesamttraum der Bundesrepublik Deutschland und in seinen Teilräumen sind **ausgeglichene soziale, infrastrukturelle, wirtschaftliche, ökologische und kulturelle Verhältnisse anzustreben**. Dabei ist die nachhaltige Daseinsvorsorge zu sichern, nachhaltiges Wirtschaftswachstum und Innovation sind zu unterstützen, Entwicklungspotenziale sind zu sichern und Ressourcen nachhaltig zu schützen. Diese Aufgaben sind gleichermaßen in Ballungsräumen wie in ländlichen Räumen, in strukturschwachen wie in strukturstarken Regionen zu erfüllen. Demographischen, wirtschaftlichen, sozialen sowie anderen strukturverändernden Herausforderungen ist Rechnung zu tragen, auch im Hinblick auf den Rückgang und den Zuwachs von Bevölkerung und Arbeitsplätzen; regionale Entwicklungskonzepte und Bedarfsprognosen der Landes- und Regionalplanung sind einzubeziehen. **Auf einen Ausgleich räumlicher und struktureller Ungleichgewichte zwischen den Regionen ist hinzuwirken**. Die Gestaltungsmöglichkeiten der Raumnutzung sind langfristig offenzuhalten.

Raumordnungsgesetz (ROG) §2

Erreichbarkeit in der Schweiz I



Loder, A., & Axhausen, K. W. (2018). Mobility tools and use: Accessibility's role in Switzerland. *Journal of Transport and Land Use*, 11(1), 367–385.

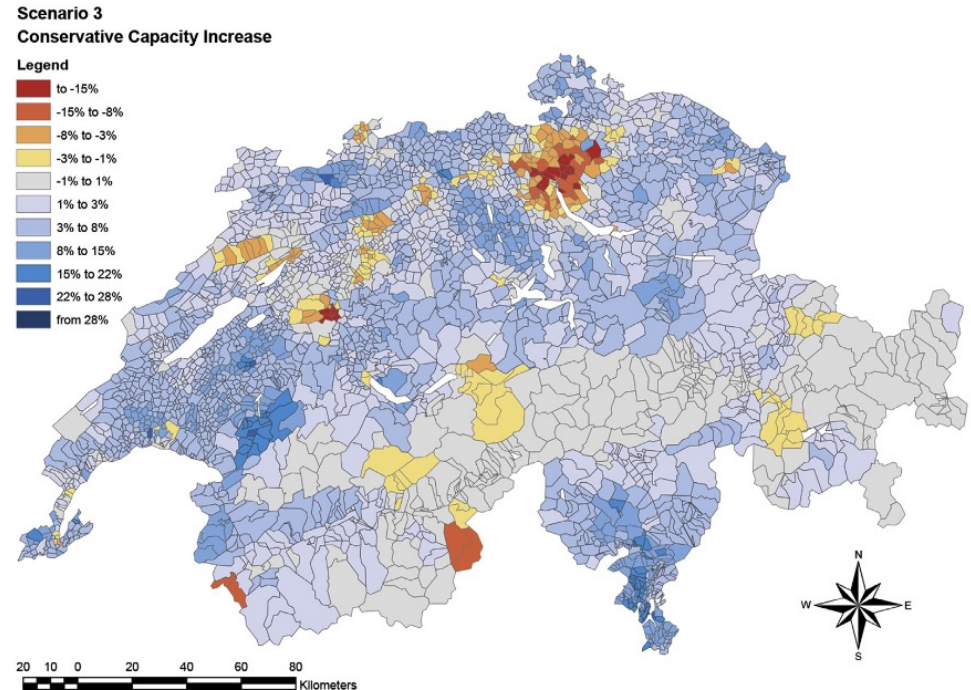
Erreichbarkeit in der Schweiz II



Scherer, Milena (2004) Erreichbarkeitsveränderungen in der Schweiz: Eine kartographische Darstellung, Diplomarbeit, ETH Zürich.

Autonome Fahrzeuge?

- Verbesserung im Verkehrsfluss, **aber**
- Risiko der Verlagerung vom ÖV hin zu autonomen Fahrzeugen on-demand und **somit**
- potentielle Reduktion der Erreichbarkeiten in Kernstädten



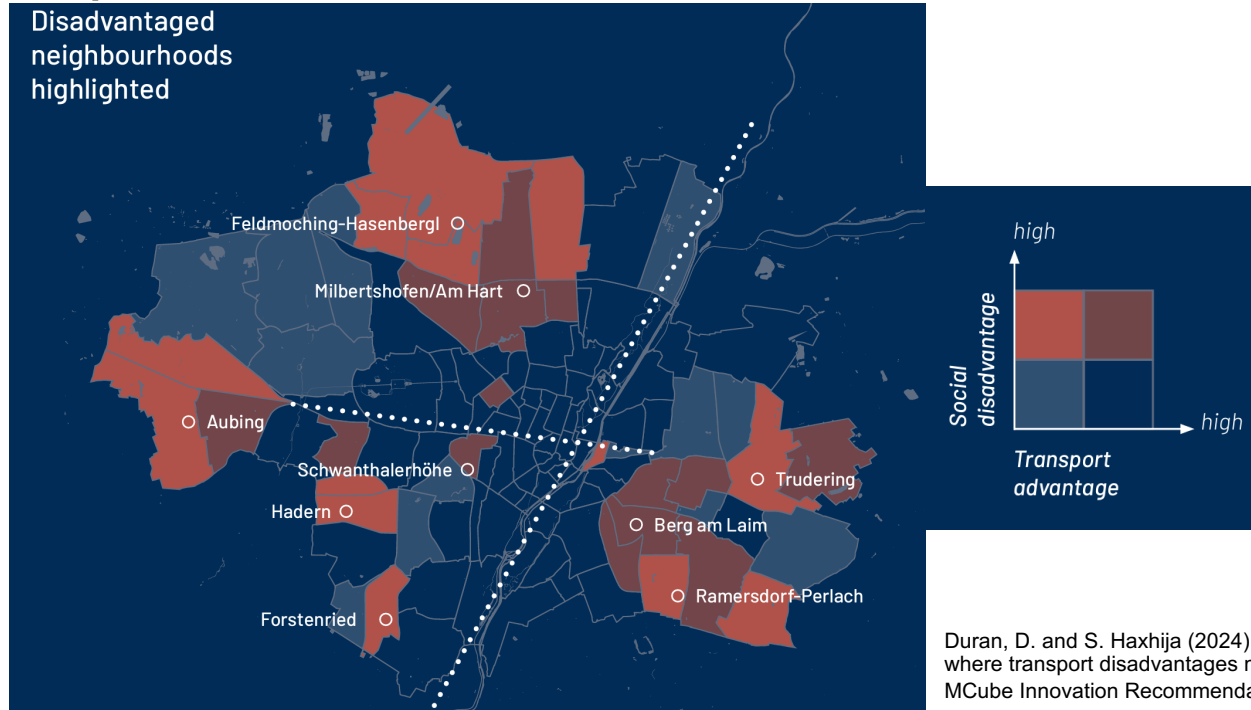
Meyer, J., Becker, H., Bösch, P. M., & Axhausen, K. W. (2017).
Autonomous vehicles: The next jump in accessibilities? *Research in Transportation Economics*, 62, 80–91.

Equity

- *Sufficientarianism*: Jeder Person sollte ein Mindestmass an Erreichbarkeit zur Verfügung stehen: **(RIN)**
- *Egalitarianism*: Unterschiede in Erreichbarkeiten können relevant werden von einer Equity-Perspektive heraus gesehen **(ROG)**
- Wer soll profitieren (wer dafür zahlen)?
 - Alle gleich?
 - Wie bei El-Geneidy et al. (2016) berichtet, benachteiligtere besseren ÖV Anschluss?

Van Wee, B. (2022). Accessibility and equity: A conceptual framework and research agenda. *Journal of Transport Geography*, 104, 103421.

Fallbeispiel München



Duran, D. and S. Haxhija (2024) A Mobility (In)Justice Atlas: Visualising where transport disadvantages meet social disadvantages in Munich. MCube Innovation Recommendation, Munich.

Zusammenfassung und Implikationen

- Zentrale Größe des Verkehrssystems mit Relevanz für
 - Verkehrsverhalten
 - Volkswirtschaft
- Raum und Mobilität müssen zusammen gedacht werden
- Oft beobachten wir IV-Erreichbarkeit > ÖV-Erreichbarkeit, **aber** als Arbeitshypothese: Erreichbarkeit muss nicht notwendigerweise IV-Erreichbarkeit bedeuten
- Politische Entscheidung, wie mit Verteilungseffekten in der Erreichbarkeit umgegangen werden soll

Was passiert «am Rand» der E-Bike City?

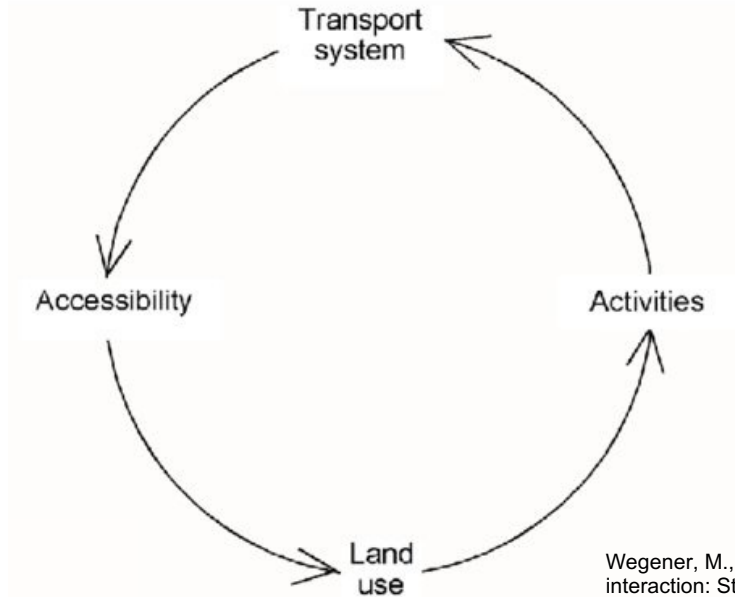
Die E-Bike City



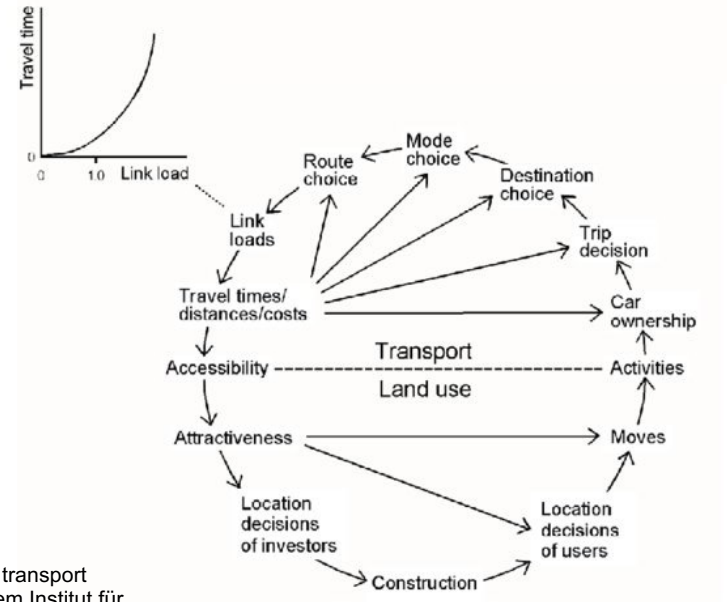
Synthese

- Unsere Städte benötigen hohe Kapazitäten für Reisen und hohe Erreichbarkeiten
- In Großstädten bietet die E-Bike City Potentiale für die Erhöhung der
 - Netzkapazitäten für Reisenden
 - Durchschnittsgeschwindigkeiten/Erreichbarkeiten
- Ausserhalb der Kernstadt
 - Raumstruktur mit geringer Dichte
 - Längere Weglängen
 - Anschluss an Hochleistungsstraßen
- **Wie sieht es also am Rande der E-Bike City aus?**

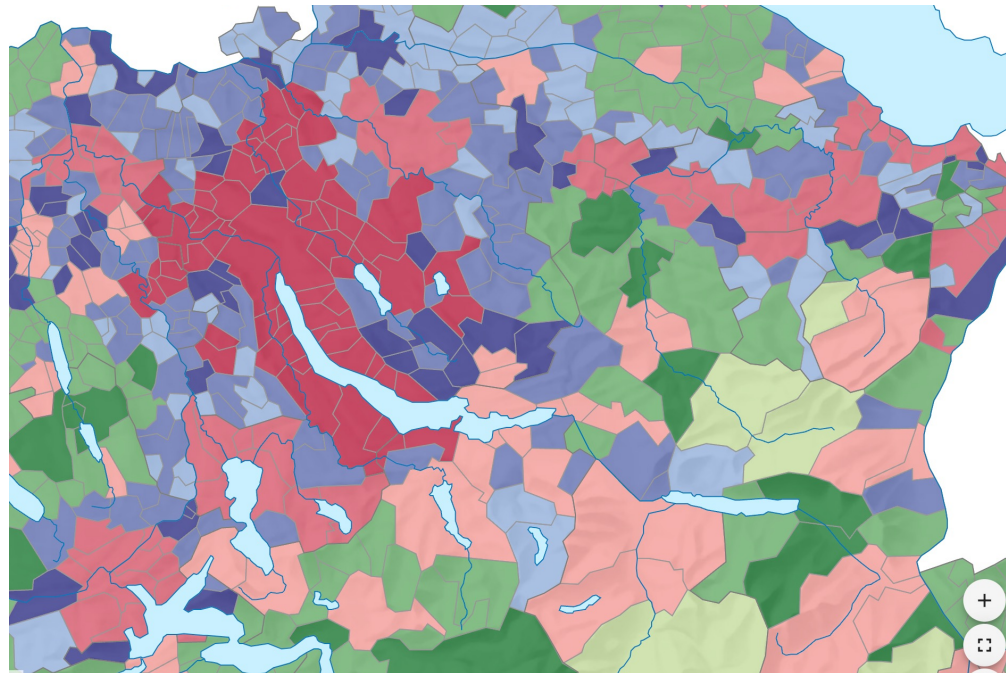
Wechselwirkungen im System



Wegener, M., & Fürst, F. (1999). Land-use transport interaction: State of the art. Berichte aus dem Institut für Raumplanung, Vol. 46. IRPUD: Dortmund.



Gemeindetypologie 2020 mit 9 Kategorien



Gemeindetypen

- Städtische Gemeinde einer grossen Agglomeration (11)
- Städtische Gemeinde einer mittelgrossen Agglomeration (12)
- Städtische Gemeinde einer kleinen oder ausserhalb einer Agglomeration (13)
- Periurbane Gemeinde hoher Dichte (21)
- Periurbane Gemeinde mittlerer Dichte (22)
- Periurbane Gemeinde geringer Dichte (23)
- Ländliche Zentrums Gemeinde (31)
- Ländliche zentral gelegene Gemeinde (32)
- Ländliche periphere Gemeinde (33)

Diese Karte wird unregelmässig aktualisiert.

Aufgabe

Beantwortung der Fragen

- Was passiert am Rande der E-Bike City?
- Wie geht die E-Bike City in andere Raumtypologien über?

Vorgehen

- Erarbeitung in Gruppen (3 Personen)
- Präsentation der Ergebnisse (pptx) ca. 10' pro Gruppe mit Zeit für Fragen

Ablauf

14:30-15:30	Bearbeitungsphase I
16:00-17:15	Bearbeitungsphase II
17:15-18:00	Vorstellung der Arbeitsergebnisse

Bearbeitungsphase I

1. Wählt eine Stadt aus der Liste.
2. Sucht euch ein Gebiet, wo die E-Bike City vermutlich endet.
3. Identifiziert Stakeholder der Region (Einwohner, Wirtschaft, etc.)
4. Erarbeitet deren Mobilitätsbedürfnisse und Mobilitätsanforderungen (Erreichbarkeit/Kapazität)
5. Identifiziert Randbedingungen (Infrastruktur, Soziale, Politik usw.) und mögliche Kompromisse

Städte

- New York City
- San Francisco
- London
- Zürich
- Basel (tri-national)
- Berlin
- München

Bearbeitungsphase II

1. Lasst euch von Städten wie Amsterdam / Kopenhagen inspirieren wie dort die Übergänge geregelt sind
2. Übersetzt die Ergebnisse in eine erste Vision, wie der Übergang aussehen kann
3. Nutzt generative KI, um überzeugende Abbildungen zu generieren (Microsoft's Copilot, ChatGPT/Dalle-3 (Open AI, <https://stablediffusionweb.com/#demo>))
4. Erstellt eine kurze Präsentation: stellt eure Stadt vor, die Anforderungen und Kompromisse und eure Vision



ChatGPT prompt „Hier ist das Bild einer Vorortstraße in San Francisco mit vielen E-Bikes.“