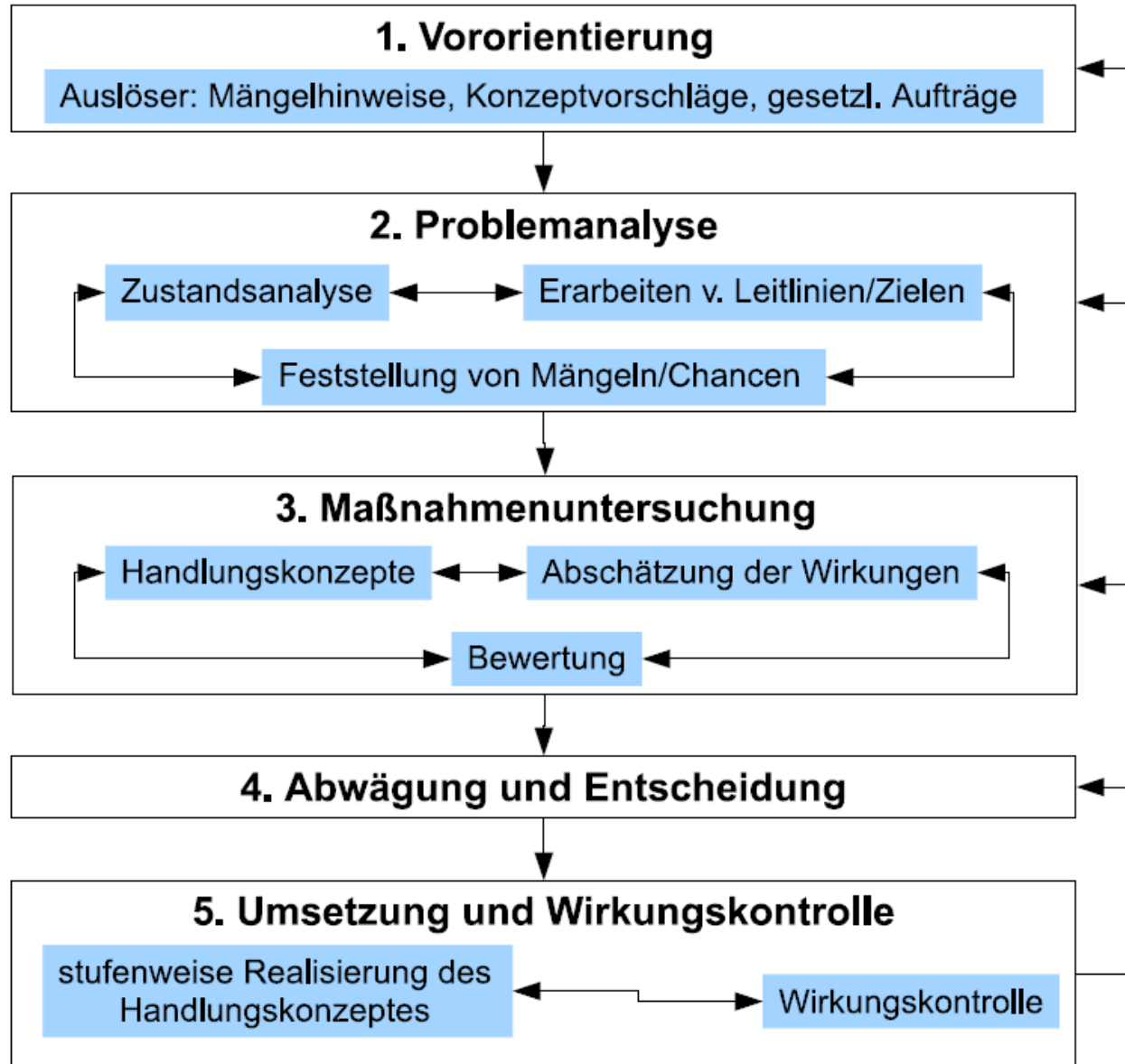


# Vier-Stufen-Verfahren

Kai Nagel

[nagel@vsp.tu-berlin.de](mailto:nagel@vsp.tu-berlin.de)

# Einleitung





## Trenne so weit wie möglich:

1. (Verkehrs-)Zustand (ohne Maßnahme, mit Maßnahme)
  - → Grundlagen der Modellierung und Simulation im Verkehr im WiSe
2. Analyse und Bewertung
  - → Verkehrssystemanalyse im SoSe

## Hier:

Kurzer Einblick in "Bewertung von Verkehrsmaßnahmen"

Längerer Einblick in "Modellierung und Simulation"

- 4-Stufen-Prozess ("state of practice")
- Multi-agenten-Simulation (Zukunft)

# Bewertung von Verkehrsmaßnahmen

**Nutzen:** Im Verkehrsbereich oft so etwas wie

$$U = -\beta_t t - \beta_m m - \beta_n n - \dots$$

mit:  $t$  = travel time,  $m$  = (monetary) price,  $n$  = noise, ...

Z.B.  $\beta_t = 6/h$ ,  $\beta_m = 1/Eu$ . Damit: 1h genauso viel wert wie 6Eu (**value of time, VoT**).

Nutzen von Verkehr selber meist negativ (wie oben); positiver Nutzen entsteht durch Kompensation am Zielort.

Wenn man die Nutzenfunktion hat, dann wie folgt:

Betrachte System ohne eine Maßnahme (Null-Fall, Vergl.-Fall).

Betrachte System mit Maßnahme (Maßnahmen-Fall, Plan-Fall).

Vergleiche Nutzen-Gewinne der Maßnahme mit Kosten der Maßnahme.

Z.B.:

Zeitgewinn von 10min bei 3000 Personen/Tag = 500h/Tag.

|                                      |                                   | bei VoT von 6Eu/h                             |
|--------------------------------------|-----------------------------------|---|
| pro Jahr                             | $300 * 500h$<br>$= 150'000h$      | $6Eu/h * 150'000h$<br>$= \mathbf{900'000Eu}$  |
| auf 30 Jahre<br>(Projekthaltbarkeit) | $30 * 150'000h$<br>$= 4'500'000h$ | $30 * 900'000Eu$<br>$= \mathbf{27'000'000Eu}$ |



# Nutzen (Forts.): Diskontierung

Genau genommen muss man Kosten und Nutzen diskontieren. Das kann man sich in einfachen Fällen vorstellen wie eine Kreditfinanzierung über die Laufzeit.

<http://www.zinsen-berechnen.de/kreditrechner.php>

|   |   |
|---|---|
| <b>Kreditbetrag:</b>                                | ▶ 13.835.205,92 Euro                              |
| <b>Bearbeitungsgebühr:</b>                          | keine   |
| <b>Zinssatz:</b>                                    | <input type="text" value="5,00"/> % p.a. nominale |
| <b>Rückzahlungsrate:</b>                            | <input type="text" value="900.000,00"/> Euro      |
| <b>Ratenintervall:</b>                              | <input type="text" value="jährlich"/>             |
| <b>Laufzeit:</b>                                    | <input type="text" value="30"/> Jahre             |
| <input type="checkbox"/> <b>Tilgungsfreie Zeit:</b> | keine   |
| <b>Restschuld:</b>                                  | <input type="text" value="0,00"/> Euro            |
| <input type="button" value="Berechnen"/>            |   |

|                                  |                    |
|----------------------------------|--------------------|
| Der errechnete Kreditbetrag ist: | 13.835.205,92 Euro |
| Zinsen und Gebühren gesamt:      | 13.164.794,09 Euro |
| Gesamtaufwand:                   | 27.000.000,01 Euro |

→ Wenn man jedes Jahr entsprechend dem jährlichen Nutzen zurückzahlt, dann darf man nicht mehr als knapp 14'000'000 Eu investieren.

## Hauptproblem der KNA:

Man muss jeglichen Nutzen auf Geldeinheiten umrechnen muss (Monetarisierung). Sonst kann man nicht mit Baukosten vergleichen.

## “Value of Time” ...

... lässt sich (vielleicht wider Erwarten) eigentlich ganz gut bestimmen, ist aber (a) einkommensabhängig, und (b) abhängig vom Zweck einer Reise (privat, pendeln, beruflich).

## Umrechnung von Emissionen (einschl. Lärm), Sicherheit, ...

... ist deutlich problematischer.

***Lebensqualität ist nicht einfach monetarisierbar.***

# 4-Stufen-Prozess, Übersicht

Oben wurde erwähnt:

- Nullfall = Vergleichsfall sowie
- Planfall = Maßnahmenfall.

Noch weiter oben erwähnt: Man braucht für jeden der beiden Fälle eine Vorhersage des Verkehrs.

"Stand der Technik" dafür: 4-Stufen-Prozess.

(4-step-process; 4-stage-process)

1. **Verkehrserzeugung** (trip generation)

Quellen/Senken.  $O_i, D_j$

2. **Zielwahl** (Verkehrsverteilung; trip distribution)

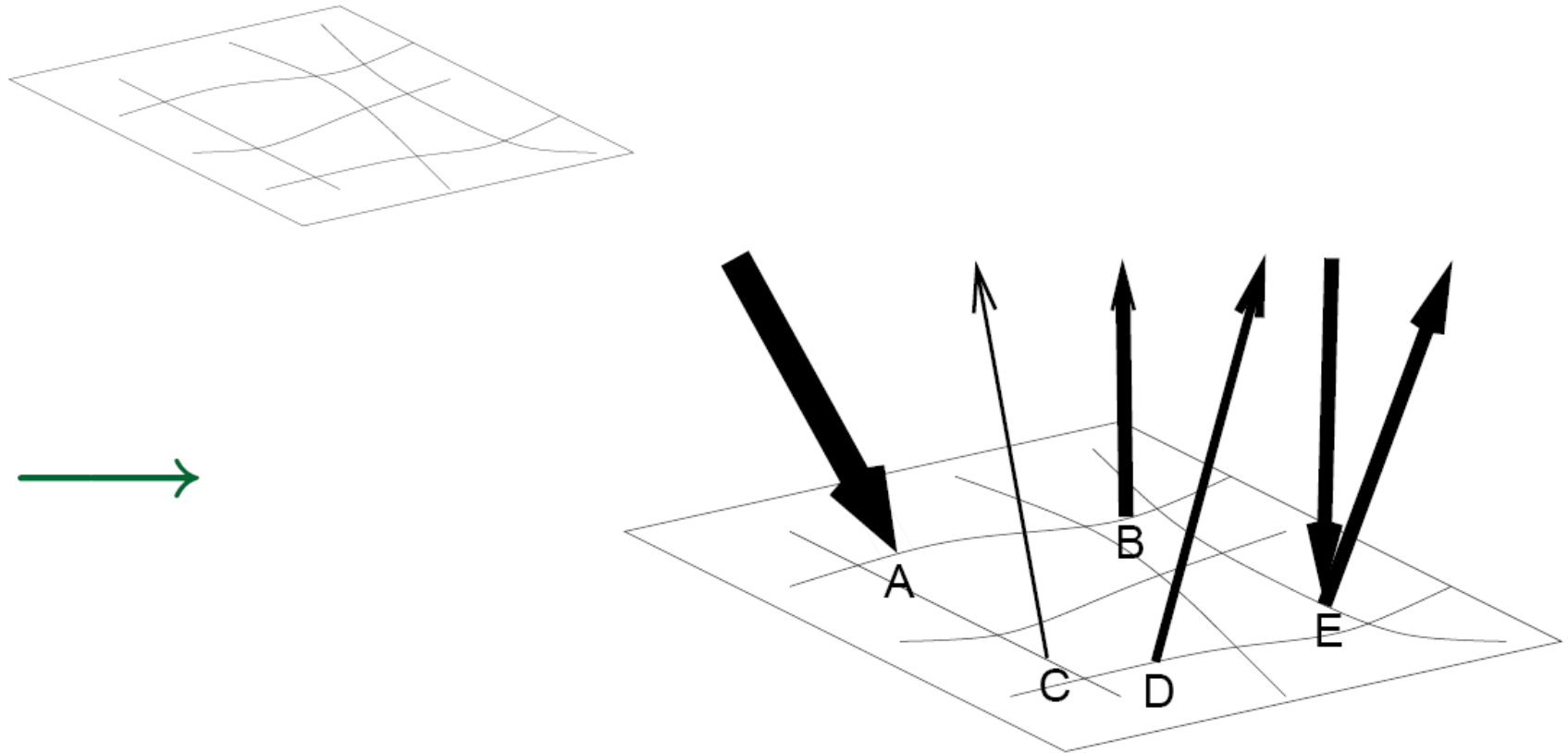
Zuordnung von Quellen zu Senken.  $T_{ij}$

3. **Verkehrsmittelwahl** (modal split)

Absplittung der Fahrten, die kein Auto verwenden

4. **Umlegung** ((route) assignment)

Routen für Fahrten mit dem Auto



**Resultat:**

Quellen/Senken von Fahrten

Vektoren der Quellen/Senken:

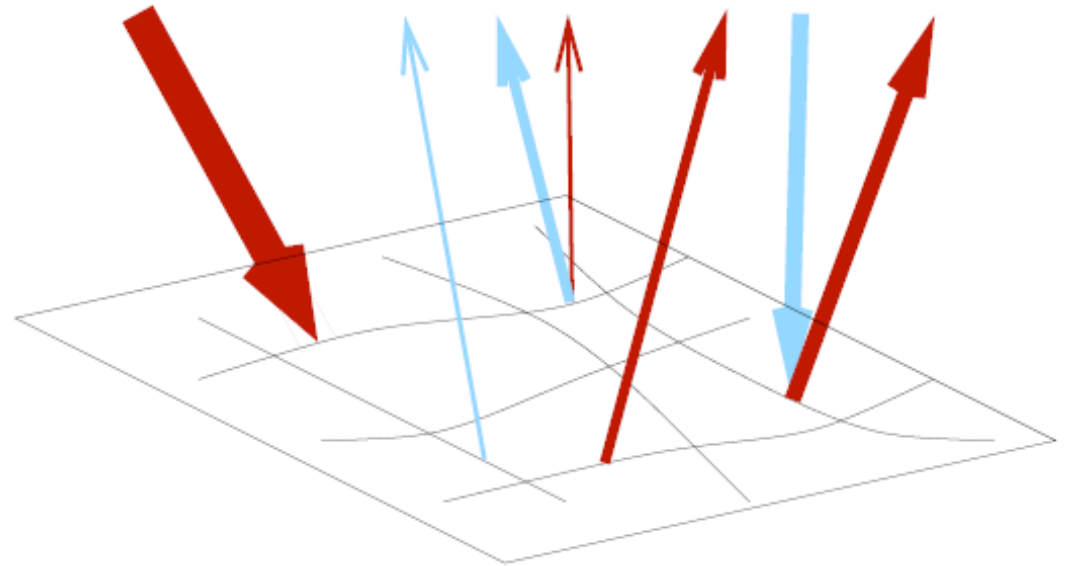
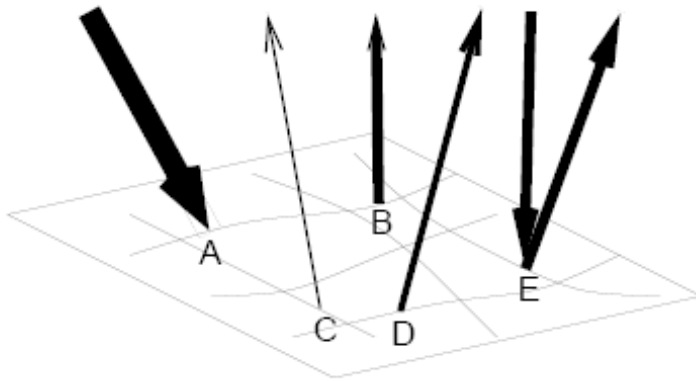
$$O = [6, 0, 0, 0, 3] \quad D = [0, 3, 1, 2, 3] \quad (2)$$

Als Randeinträge einer Matrix (wird gleich klar, warum das Sinn macht)

| $N_{dp}$ \ $N_{ar}$ | A: 0 | B: 3 | C: 1 | D: 2 | E: 3 |
|---------------------|------|------|------|------|------|
| A: 6                |      |      |      |      |      |
| B: 0                |      |      |      |      |      |
| C: 0                |      |      |      |      |      |
| D: 0                |      |      |      |      |      |
| E: 3                |      |      |      |      |      |

(3)





**Resultat:**

Fahrten nach Start- und Zielort

| $N_{dp}$ \ $N_{ar}$ | A: 0 | B: 3 | C: 1 | D: 2 | E: 3 |
|---------------------|------|------|------|------|------|
| A: 6                | 0    | 1    | 0    | 2    | 3    |
| B: 0                | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| C: 0                | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| D: 0                | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| E: 3                | 0    | 2    | 1    | 0    | 0    |

Der "innere" Teil (innerhalb der Doppellinien) ist die Start-Ziel-Matrix (origin destination matrix, OD matrix).

Absplittung derjenigen Fahrten, die nicht das Auto nehmen.

(Traditionell: Auto vs Rest :-)



# Eine Methode zur Verkehrserzeugung

1. Klassifiziere Haushalte entsprechend von Attributen.  
Z.B.: Anzahl Personen, monatl. Einkommen, Anzahl Autos.
2. Korreliere (mittlere) Anzahl von Fahrten pro Haushalt pro Tag mit den Attributen.  
Z.B.:
$$n_{trips} = \alpha n_{persons} + \beta I + \gamma n_{cars} .$$
 $\alpha, \beta, \gamma$  müssen über Befragungen und statistische Methoden geschätzt werden (Regressions-Analyse).
3. Summiere für jede Zone die Fahrten der darin befindlichen Haushalte.

Ähnlich für Senken (Arbeitsplätze; Einkaufsmöglichkeiten; Freizeitmöglichkeiten).

Arbeitsplätze, Einkaufsmöglichkeiten, Freizeitmöglichkeiten können auch Quellen sein.

# Eine Methode zur Zielwahl



Relativ generisch

$$T_{ij} \propto O_i D_j f(c_{ij})$$

mit:

- $T_{ij}$ : Anzahl Fahrten von Zone  $i$  nach Zone  $j$
- $O_j$ : Anzahl Fahrten, die in  $i$  starten
- $D_j$ : Anzahl Fahrten, die in  $j$  enden ( $\approx$  Attraktivität der Zone)
- $c_{ij}$ : “Kosten” (z.B. in Minuten) der Fahrt von  $i$  nach  $j$
- $f(c)$ : Funktion, mit der Reisende auf die Kosten reagieren

Ein mögliches  $f(c)$ :

$$f(c) = \frac{1}{d^2}$$

mit

- $d$ : Distanz

In diesem Modell werden also lange Fahrten überproportional ( $d^2$ ) vermieden

Wird auch **Gravitationsmodell** genannt (weil analog Gravitationsgesetz  $m_1 m_2 / r^2$ )

# Eine Methode zur Verkehrsmittelwahl

Utility (Nutzen) mit Ansatz

$$U_{car} = -|\beta_{Tc}| T_{car} - |\beta_M| M_{car}$$

$$U_{bus} = -|\beta_{Tb}| T_{bus} - |\beta_M| M_{bus}$$

Wahrscheinlichkeit für Auto/Bus dann

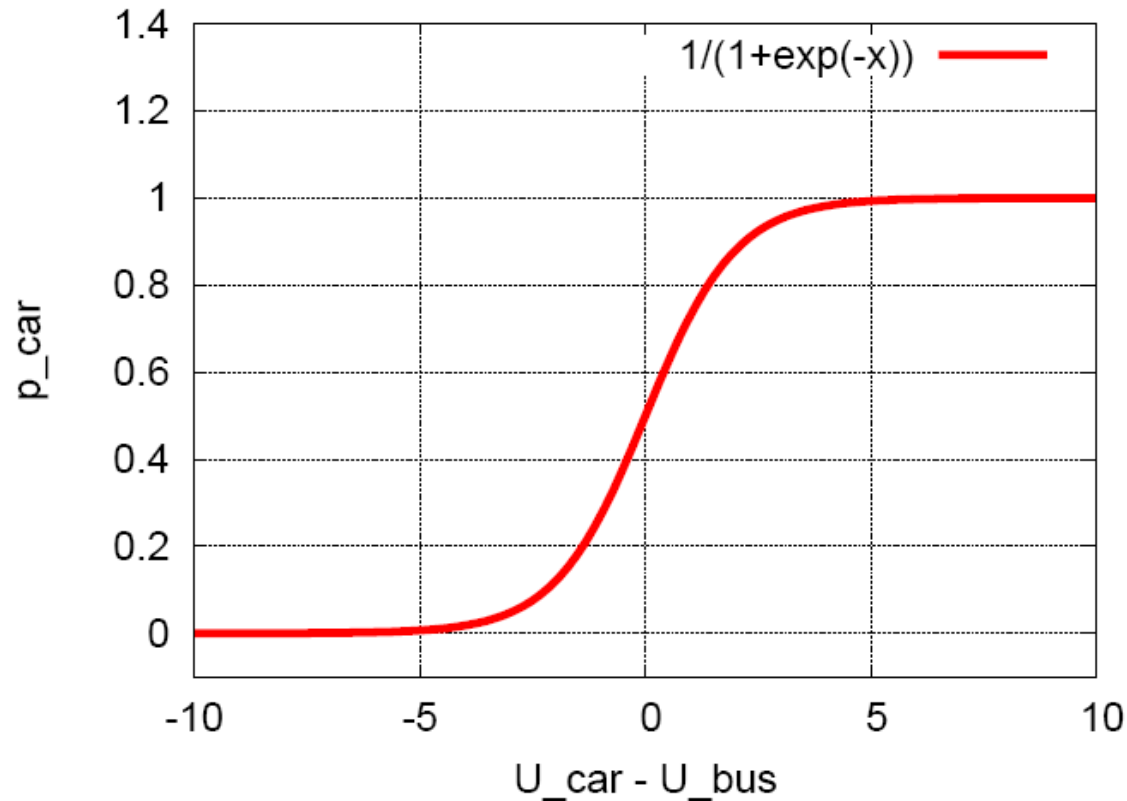
$$p_{car} = \frac{e^{U_{car}}}{e^{U_{car}} + e^{U_{bus}}} \quad p_{bus} = \frac{e^{U_{bus}}}{e^{U_{car}} + e^{U_{bus}}}$$

Bem:

- Nenner kann man erstmal ignorieren (Normierung).
- Zähler besagt: Je höher Nutzen, desto höher Wahrscheinlichkeit.
- $e^{\dots}$  macht vor allem: Aus potentiell negativen Nutzen-Werten werden positive Wahrscheinlichkeiten.

Obige Wahrscheinlichkeit lässt sich umformen

$$p_{car} = \frac{1}{1 + e^{U_{bus} - U_{car}}} = \frac{1}{1 + e^{-(U_{car} - U_{bus})}}$$



## Eigenschaften:

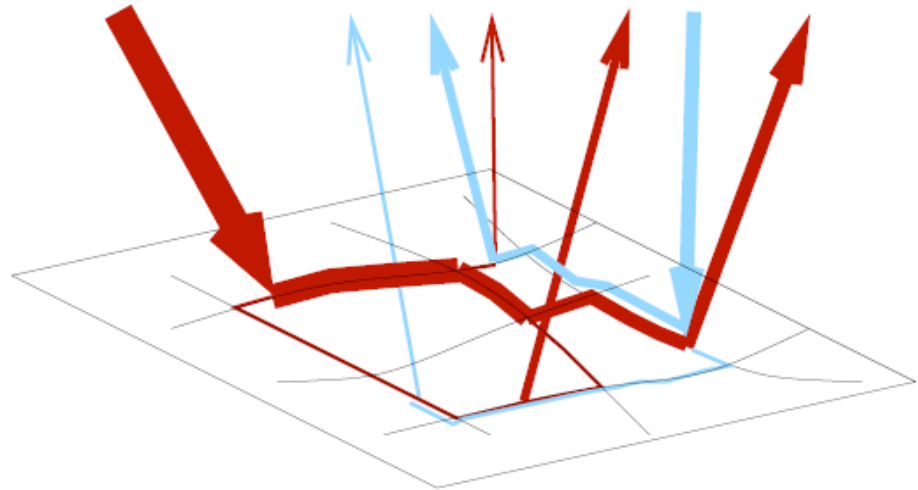
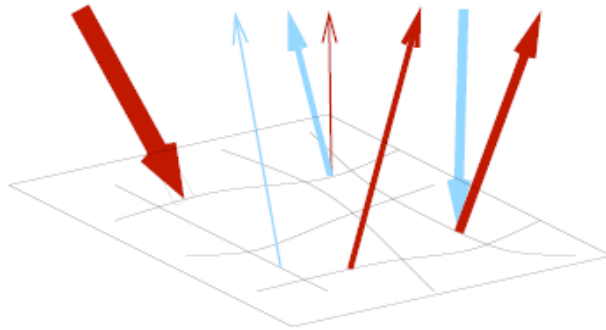
- $p_{car} = 1/2$  (unentschieden), wenn Nutzen beider Optionen gleich
- $p_{car} \rightarrow 1$ , wenn Nutzen von Auto sehr viel größer (sehr viel weniger stark negativ) als Nutzen von Bus
- $p_{car} \rightarrow 0$ , wenn umgekehrt

Diese Art von “liegender S-Kurve” ist sehr typisch für Verkehrsmittelwahl-Modelle.

Koeffizienten  $\beta_X$  müssen über Befragungen und statistische Methoden geschätzt werden.

# Eine Methode zur Umlegung

Gegeben: Start-Ziel-Flüsse von Verkehr



Resultat: Routen



Umlegung = Verfahren, welches Start-Ziel-Flüsse auf Routen "umlegt".

Normalerweise nach der Verkehrsmittelwahl. →

IV-Umlegung

ÖV-Umlegung

...

Hier: IV-Umlegung

## Wie wählt man Routen?

Erste Möglichkeit: Alle fahren die für sich "beste" Route.

"beste" → z.B. "schnellste"

## Heutzutage wichtig: Stau

Kanten werden langsamer, wenn sie mehr benutzt werden.

Wenn eine Route langsamer geworden ist als eine Alternative, dann werden Leute auf die Alternative wechseln.

## Wann stoppt dieser Wechsel?

Ein (sehr wichtiger) Ansatz: **Nash Gleichgewicht**.

***Nash GG ist erreicht, wenn kein Teilnehmer durch unilateralen Routenwechsel schneller zum Ziel kommen kann.***

(auch: **Nutzergleichgewicht, Wardrop Gleichgewicht**)

[[Tafel]]

# Statische Umlegung

## Statische Umlegung:

zeitlich konstante (stationäre) Start-Ziel-Flüsse  
damit keine Berücksichtigung zeitlicher Abläufe

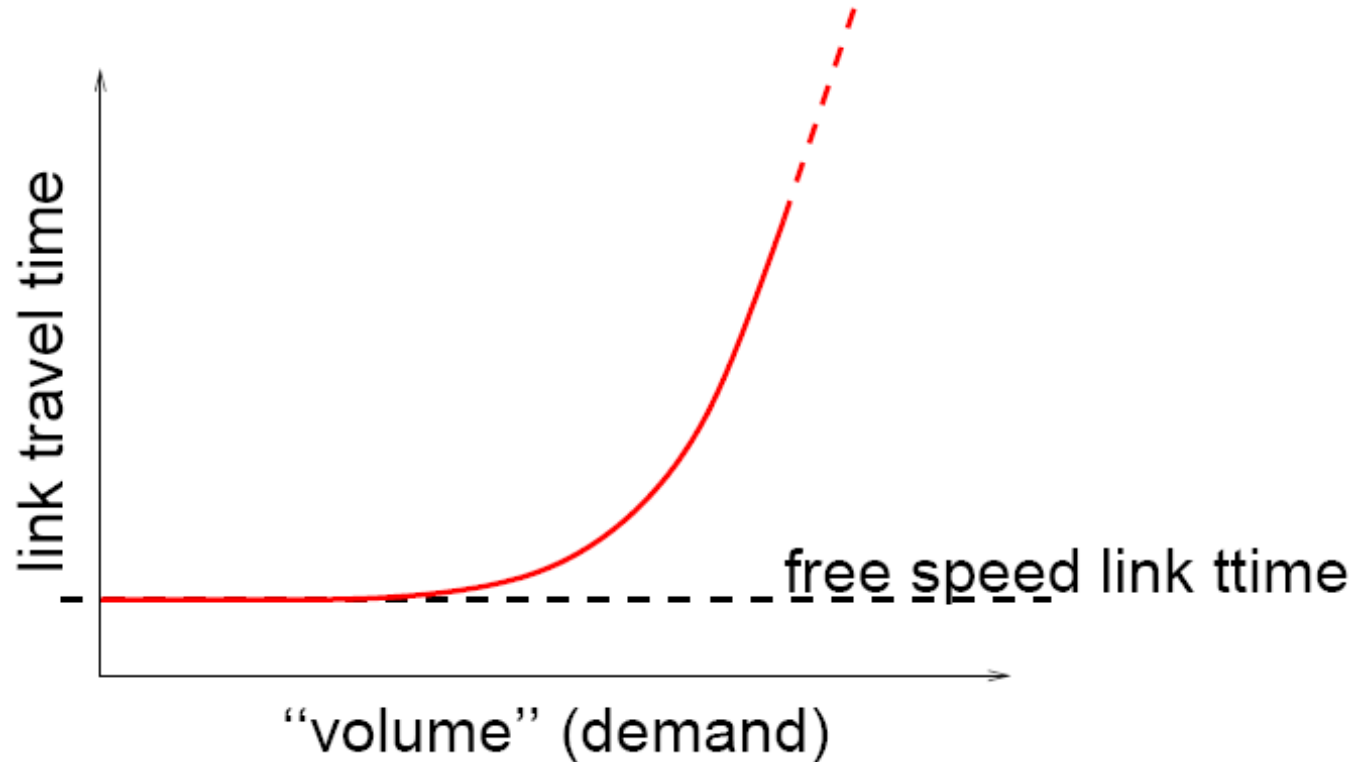
Ein wenig wie Strom in einem Netzwerk mit Widerständen



Je breiter, desto mehr Fluss.

Quelle: Master-Arbeit  
Wenli Gao, U Toronto

Oft:



Plausibel ...

- Kanten m. starker Nachfrage dauern länger (=werden "teurer").
- Engpässe werden "rot" angemalt (wie überlastete Stromdrähte).

... aber problematisch (siehe weiter unten).



# Emme/2 Assignment

# Umlegungsergebnat (Portland)

(Emme/2 Volume)/Capacity

0 - 0.5

0.5 - 1

1 - 1.2

>1.2

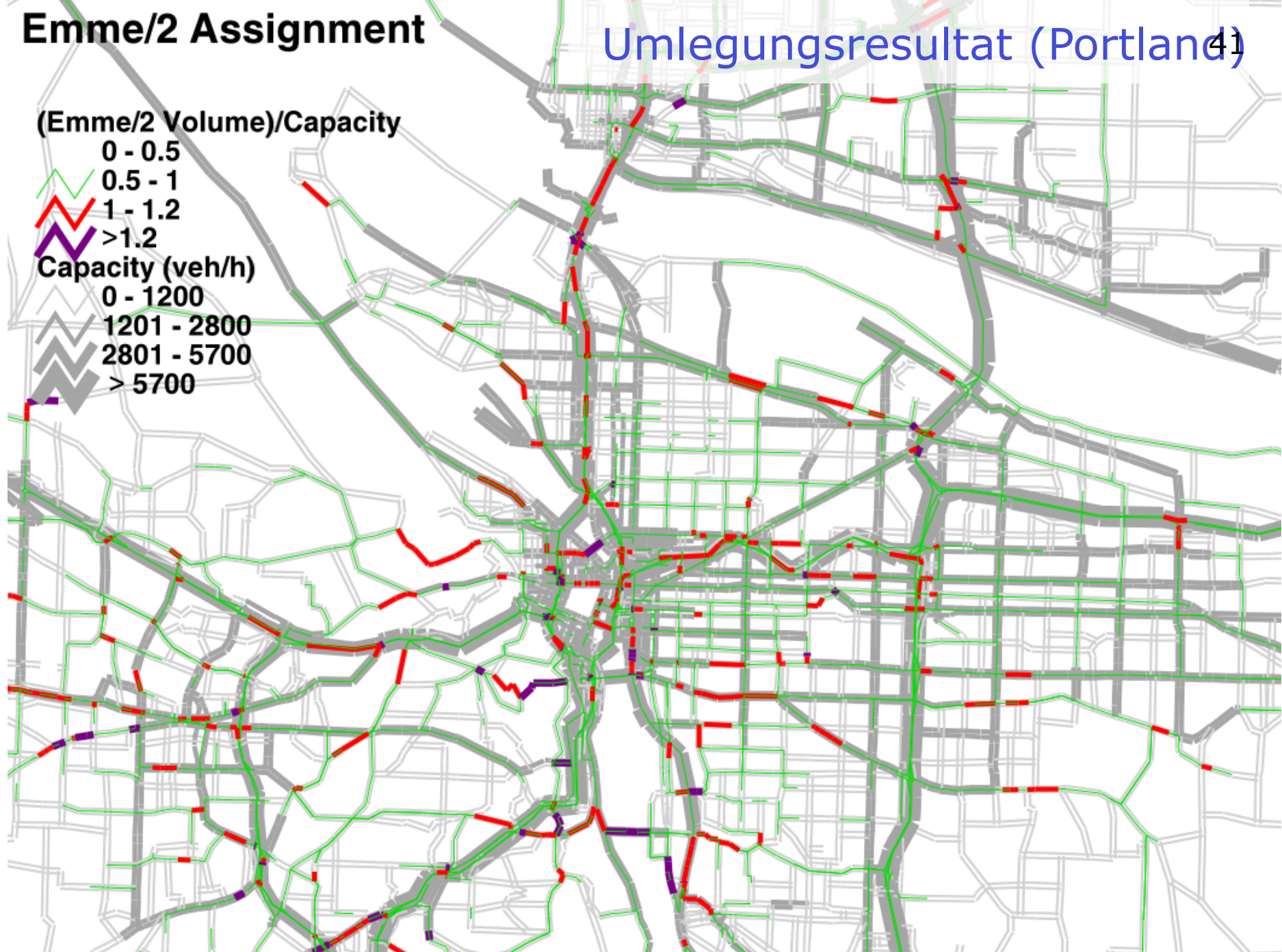
Capacity (veh/h)

0 - 1200

1201 - 2800

2801 - 5700

> 5700



Obiges Verfahren hat nützliche mathematische Eigenschaften.

Insbesondere unter bestimmten Bedingungen bestimmte Aspekte der Lösung ***eindeutig***.

(Also unabh. vom Lösungsverfahren.)

Sehr hilfreich für Tests etc.

# Dynamische Umlegung

(→ Verbesserung der Umlegung)

## Statische Umlegung:

(Zeitlich) konstante Start-Ziel-Flüsse

"wie Netz mit Drähten"

Normalerweise: "Druck" so lange erhöht, bis Nachfrage auf jeden Fall durchs Netz passt.

"Glühende" Kanten sind die Engpässe.

## Dynamische Umlegung:

M.E. am einfachsten: Für jede Fahrt Startzeit, Startort, Zielort gegeben.

Nash GG weiterhin ok: Finde individuell optimale Route.

Nun neu: Kapazität reicht zur Spitzenzeit ggf. nicht aus → Rückstau

At onset of rush period:



Some time later:



Even more time later:



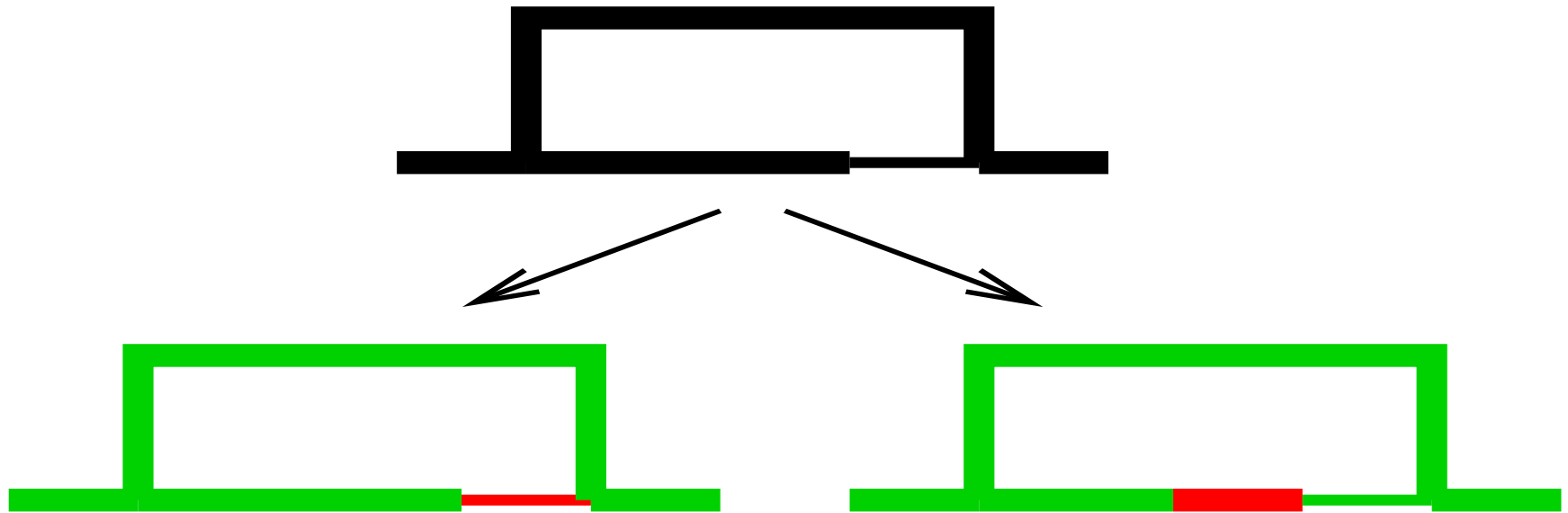
Überlastung stromaufwärts vom Engpass

Stärke der "Rotfärbung" hängt nicht nur von der Stärke Nachfrage ab, sondern auch davon, seit wie lange eine Überlastung schon besteht (zeitabhängig).

Kann abgebildet werden durch entsprechend dynamische (zeitabhängige) Simulation.

Die mathematisch schönen Eigenschaften gehen verloren.

Wird dennoch viel gemacht und viel untersucht, einfach weil es gebraucht wird.



| Statische Umlegung                          | Dynamische Umlegung (= Realität)                                    |
|---|---|
| Engpass selber ist rot angemalt.            | Stau <u>vor</u> Engpass ist rot.                                    |
| Länge "rot" = Länge <u>Engpass</u>          | Länge "rot" = Länge <u>Stau</u> = abh. von Fahrzeit auf Alternative |
| Stärke Engpass = Stärke der "Dunkelfärbung" | Stärke Engpass = nicht direkt interpretierbar (!)                   |

# Anwendungen der Umlegung



Meistens wird die Umlegung im Rahmen "größerer" Verfahren eingesetzt. Z.B. Bundesverkehrswegeplan, Gesamtverkehrsplan Berlin/Brandenburg, ...

Hier werden dann Maßnahmen oder M.bündel (z.B. Straßenbau) in die Umlegung eingebaut und die Veränderungen prognostiziert.

Typische "direkte" Ausgabe:

Belastungen, Fahrzeiten

Typische "indirekte" Ausgabe:

Emissionen (via nachgeschaltetes Emissions-Berechnungs-Modul)

Beides sind auch Input-Daten für eine nachgeschaltete Kosten-Nutzen-Analyse.

Man kann die Umlegung aber auch direkt als Analyse-Instrument einsetzen. Hier ein paar Beispiele:

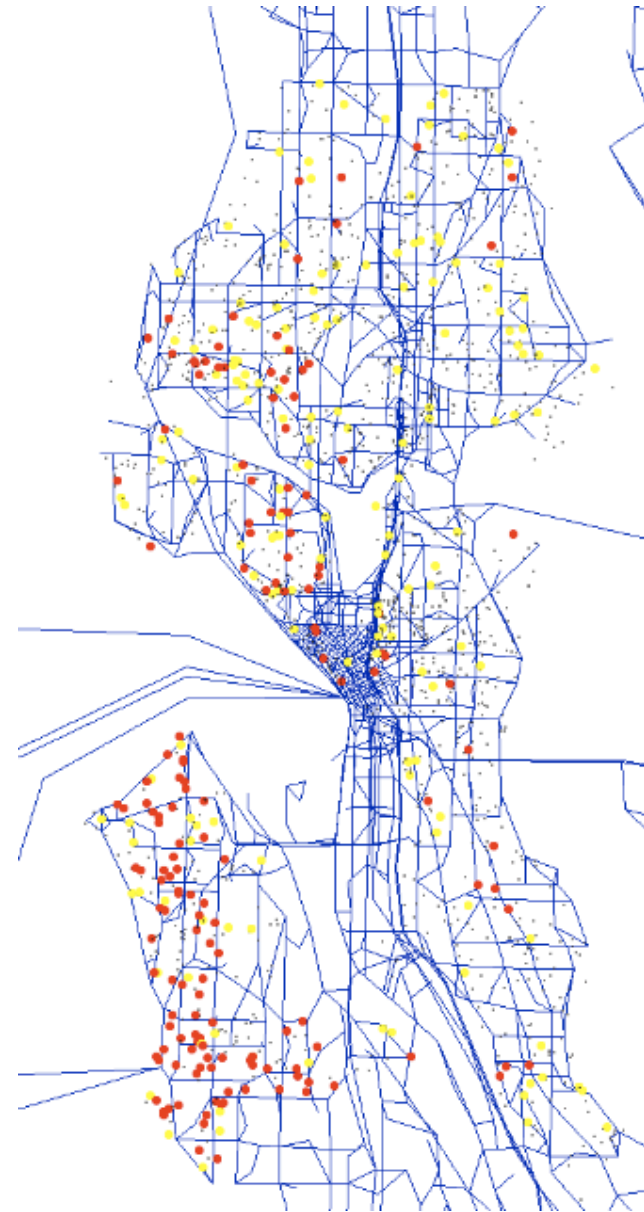
Engpassanalyse [[Brücken in Seattle]]

Routenspinnen [[wer benutzt welche Brücke?]]

betroffene Haushalte nach Maßnahme (nächste Seite)

# Top 10% affected households ...

... after bridge closure



WISEVA

## VISEVA: Software von PTV ...

... entwickelt von Lohse in Dresden.

In etwa: Die ersten drei Stufen werden nach sogenannten **Quelle-Ziel-Gruppen (QZG'n)** aufgetrennt.

### Beispiele für QZG'n:

- home → work
- home → shop
- work → shop
- work → home
- etc.

Damit das nicht zu viele werden, gibt es auch

- $X \rightarrow \text{other}$
- $\text{other} \rightarrow X$
- $X \rightarrow X$

### Quellen/Senken ...

... für jeden Aktivitäten-Typ separat berechnet (Anzahl "home" Aktivitäten pro Zone, Anzahl "work" Aktivitäten pro Zone, ...).

### Zielwahl/Verkehrsmittelwahl ...

... wird für jede QZG separat berechnet.

Damit kommt man dann auf eine Version, welche recht gut interpretierbar ist.

Derzeit Standard in Deutschland.

(USA gehen methodisch einen anderen Weg.)

|                    | <b>Trips per person</b> | <b>%</b> |
|--------------------|-------------------------|----------|
| <b>h.w</b>         | 0,231                   | 6,78     |
| <b>w.h</b>         | 0,177                   | 5,21     |
| <b>h.edu</b>       | 0,059                   | 1,74     |
| <b>edu.h</b>       | 0,050                   | 1,47     |
| <b>w.k</b>         | 0,070                   | 2,07     |
| <b>k.w</b>         | 0,059                   | 1,74     |
| <b>n.shop</b>      | 0,326                   | 9,56     |
| <b>shop.h</b>      | 0,373                   | 10,96    |
| <b>h.other</b>     | 0,776                   | 22,77    |
| <b>other.h</b>     | 0,681                   | 19,97    |
| <b>w.other</b>     | 0,088                   | 2,57     |
| <b>other.h</b>     | 0,041                   | 1,21     |
| <b>other.other</b> | 0,475                   | 13,94    |
| <b>Sum</b>         | 3,41                    | 100      |

*w.k/k.w should be h.k/k.h !!!*

Reflektiert (natürlich) das, was wir aus der MiD bereits wissen:

- Eher wenige Wege in den "typischen" Kategorien (home-work, home-education).
- Eher viele Wege in "untypischen" Kategorien (shop, other).



# Zusammenfassung

## 1. Verkehrserzeugung (trip generation).

Quellen/Senken.  $O_i, D_j$  .

Mögliches Verfahren: Regression gegen Haushalts-Attribute.

## 2. Zielwahl (Verkehrsverteilung; trip distribution).

Zuordnung von Quellen und Senken.  $T_{ij}$  .

Mögliches Verfahren: Gravitations-Modell

## 3. Verkehrsmittelwahl (modal split).

Absplittung der Fahrten, die kein Auto verwenden.

Mögliches Verfahren: Discrete choice (exponentiell in utilities)

## 4. Umlegung ((route) assignment).

Routen für die Fahrten mit Auto.

Prinzip: Nash Gleichgewicht.

Mögliches Verfahren: Mathematical Programming.

Es gibt hier ein paar mathematische Eindeutigkeitsaussagen.