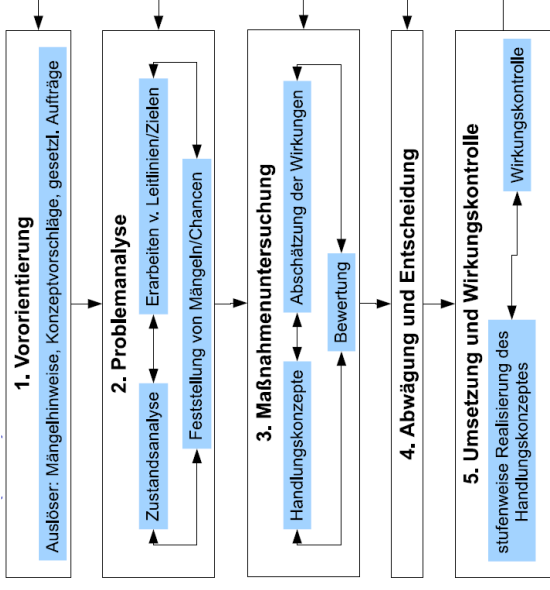


Vier-Stufen-Verfahren

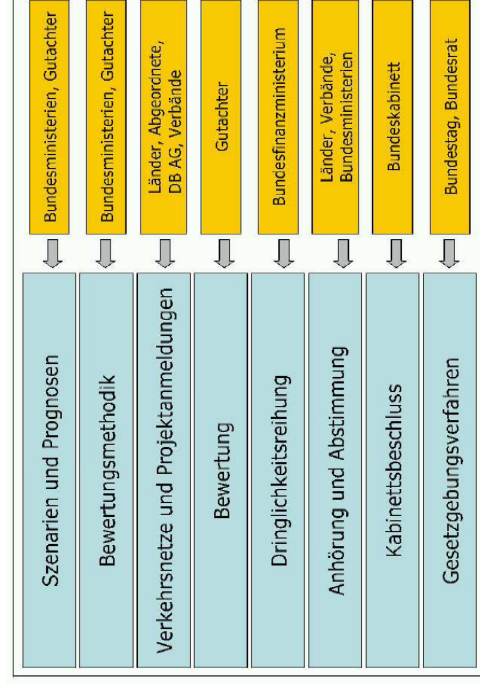
Kai Nagel

nagel@vsp.tu-berlin.de

Planungsprozess (Wdh.)



Bundesverkehrswegeplan



Einleitung

Aber wie macht man das?

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 "Analyse und Bewertung"
- Längerer Einblick in "Modellierung und Simulation"
 - – 4-Stufen-Prozess ("state of practice")
 - – Multi-agenten-Simulation (Zukunft)

5

Bewertungsmaß: Fahrleistung

In der Vergangenheit (und USA) oft: Fahrleistung (vehicle miles traveled, VMT).

System ist dann gut, wenn möglichst viele km gefahren werden.

Idee dahinter: Maß für die technische Leistung des Systems.
Konsequenz allerdings:



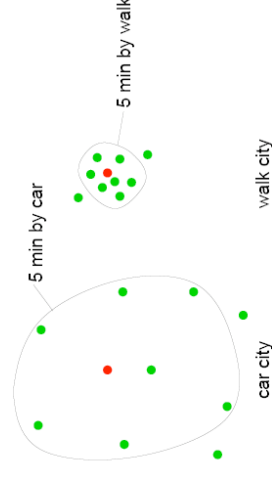
Die selbe Raumüberwindung erzeugt mehr FZ-km, wenn sie als schnellerUmweg (Autobahn) realisiert wird.

Resultiert in (zu) viel Straßenbau ...

7

Bewertungsmaß: Erreichbarkeit

Z.B.: Anzahl (sinnvoller) Ziele, die innerhalb von 10 min mit beliebigem Verkehrsmittel erreicht werden können.



In beiden Fällen kann die gleiche Anzahl von Zielen innerhalb von 5min erreicht werden. Was ist nun besser?
(Bzgl. Kriterium Erreichbarkeit sind beide Lösungen gleich gut.)

6

Verkehrssystemanalyse

8

Bewertungsmaß: "Nutzen"

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 i.a. negativ; positiver Nutzen entsteht durch Kompensation am Zielort.

9

Kosten-Nutzen-Analyse (KNA)

Wenn die Nutzenfunktion erst einmal hat, dann ist es einfach(er):

- Betrachte System ohne eine Maßnahme (Null-Fall).
- Betrachte System mit einer Maßnahme (Maßnahmen-Fall, Plan-Fall).
- Betrachte die Nutzen-Gewinne durch die Maßnahme.
- Vergleiche diese Nutzen-Gewinne mit den Kosten der Maßnahme.

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

		bei VoT von 6Eu/h
pro Jahr	300 * 500h = 150'000h	6Eu/h * 150'000h = 900'000Eu
auf 30 Jahre (Projekthaltbarkeit)	30 * 150'000h = 4'500'000h	30 * 900'000Eu = 27'000'000Eu

10

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>

The screenshot shows a web form for calculating interest. The 'Kennendaten' section includes:

- Kreditbetrag: 10.000.000,00 Euro
- Bearbeitungsgebühr: keine
- Zinssatz: 5,00 % p.a. nominal
- Rückzahlungsrate: 650.514,35 Euro
- Ratenintervall: jährlich
- Laufzeit: 30 Jahre
- Tilgungsfreie Zeit: keine
- Restschuld: 0,00 Euro

 The 'Ergebnis' section shows: 'Die erforderliche regelmäßige Rate beträgt: 650.514,35 Euro (jährlich)'. A 'Berechnen' button is visible at the bottom.

Diskontierung, Forts.

Der jährliche monetarisierte Nutzen (900'000Eu) ist also größer als die jährlichen Zahlungen (650'514,35 Eu).

Natürlich ist es in der Realität breiter:

- Weitere Nutzen neben Zeitgewinnen (z.B. Lärm = negativer Nutzen).
- Weitere Kosten neben Baukosten (z.B. Wartungskosten).

12

Einige Probleme der KNA

Hauptproblem der KNA ist, dass man 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.

13

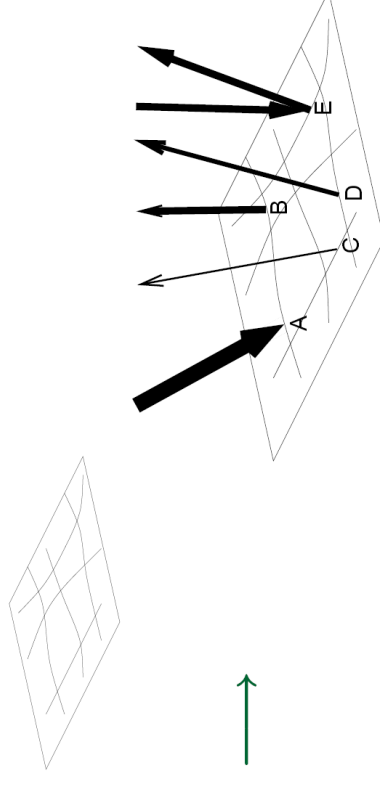
4-Stufen-Prozess, Übersicht

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

1. **Verkehrserzeugung (trip generation)**.
Quellen/Senken. O_i, D_j .
2. **Zielwahl (Verkehrsverteilung; trip distribution)**. Zuordnung von Quellen und Senken. T_{ij} .
3. **Verkehrsmittelwahl (modal split)**. Absplittung der Fahrten. die kein Auto verwenden.
4. **Umlegung ((route) assignment)**. Routen für die Fahrten mit Auto.

15

Verkehrserzeugung (trip generation)



Resultat: Quellen/Senken von Fahrten.

14

16

4-Stufen-Prozess, Übersicht

Verkehrserzeugung, Forts.

Vektoren der Quellen/Senken:

$$\underline{Q} = [6, 0, 0, 0, 3] \quad \underline{D} = [0, 3, 1, 2, 3] \quad (2)$$

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)

17

Zielwahl, Forts.

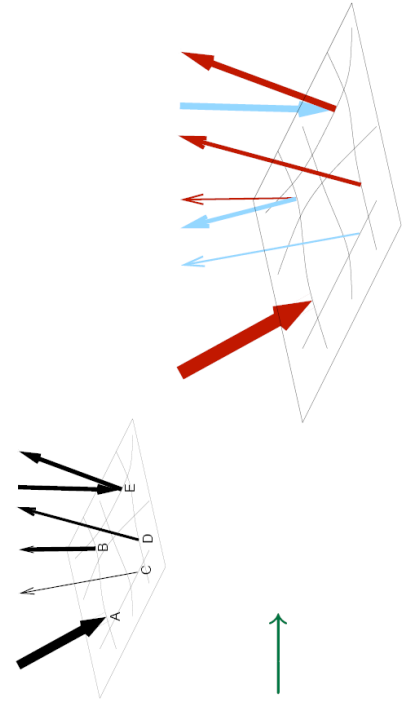
N_{dp}	N_{ar}	A: 0	B: 3	C: 1	D: 2	E: 3
A: 6		0	1	0	2	3
B: 0		0	0	0	0	0
C: 0		0	0	0	0	0
D: 0		0	0	0	0	0
E: 3		0	2	1	0	0

(4)

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

19

3.2 Zielwahl (Verkehrsverteilung; trip distribution)



Resultat: Fahrten nach Start- und Zielort

18

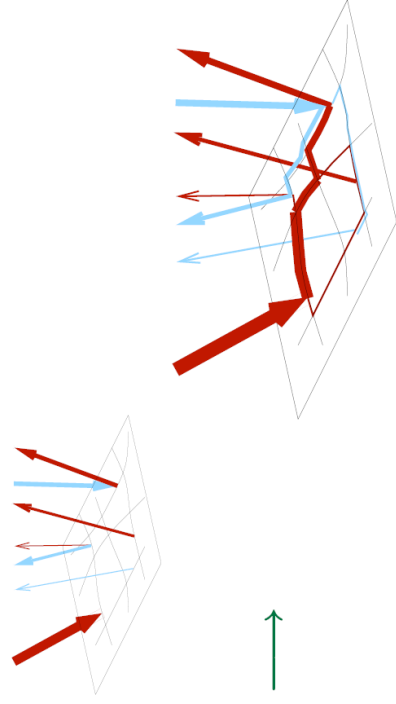
Verkehrsmittelwahl (modal split)

Absplittung derjenigen Fahrten, die nicht das Auto nehmen.

(Traditionell: Auto vs Rest :-)

20

3.4 Umlegung (assignment)



Resultat: Routen

21

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.:

$$n_{trips} = \alpha \times n_{persons} + \beta \times I + \gamma \times n_{cars} \quad (5)$$

α , β , γ müssen über Befragungen und statistische Methoden geschätzt werden.

3. Summiere für jede Zone die Fahrten der darin befindlichen Haushalte.

(Regressions-Analyse)

23

Eine Methode zur Verkehrserzeugung

Ähnlich für Senken (Arbeitsplätze, Einkaufsmöglichkeiten; Freizeitmöglichkeiten).
Arbeitsplätze, Einkaufsmöglichkeiten, Freizeitmöglichkeiten können auch Quellen sein.

22

24

Eine Methode zur Zielwahl

25

Ein mögliches $f(c_{ij})$:

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

mit:

- α : Normierungsfaktor
- d : Distanz.
In diesem Modell werden also lange Fahrten überproportional (d^2) vermieden.
- Dies wird auch **Gravitationsmodell** genannt (weil analog Gravitationsgesetz $m_1 m_2 / r^2$)

27

Eine Methode zur Zielwahl

Relativ generisch

$$T_{ij} = O_i D_j f(c_{ij}) \quad (6)$$

mit:

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

26

Eine Methode zur Verkehrsmittelwahl

28

Eine Methode zur Verkehrsmittelwahl

Utility (Nutzen) mit Ansatz

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

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

I.a. alle β_X hier negativ.

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.

29

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.

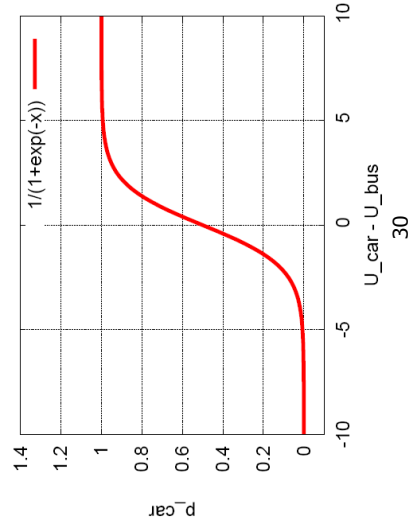
Diese Art von "liegender S-Kurve" ist sehr typisch für Verkehrsmittelwahl-Modelle.

Koeffizienten β_X müssen über Befragungen und statistische Methoden geschätzt werden.

31

Obige Wahrscheinlichkeit lässt sich umformen

$$p_{car} = \frac{1}{1 + e^{\frac{U_{car} - U_{bus}}{M_{car}}}} = \frac{1}{1 + e^{-(U_{car} - U_{bus})}} \quad (10)$$



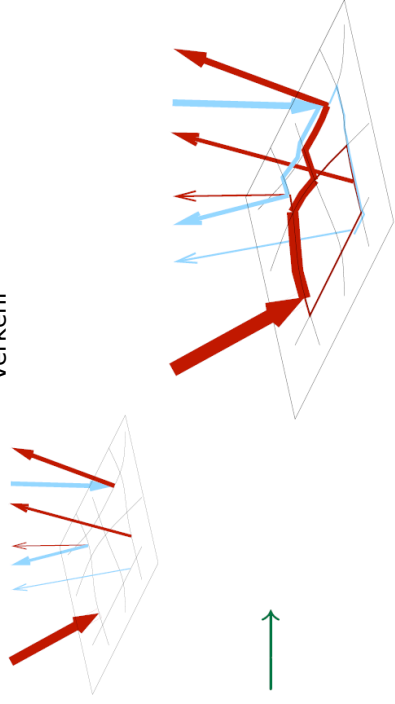
30

Eine Methode zur Umlegung

32

Umlegung

Gegeben: Start-Ziel-Flüsse von Verkehr



Resultat: Routen

33

Routenwahl

Wie wählt man Routen?

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

"beste" → z.B. "schnellste"

35

Umlegung verschiedener Verkehrsmittel

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

Normalerweise nach der Verkehrsmittelwahl. →

- IV-Umlegung
- ÖV-Umlegung
- ...

Hier: IV-Umlegung

34

Stau

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**)

36

2-Routen-Intuition

[[Tafel]]

37

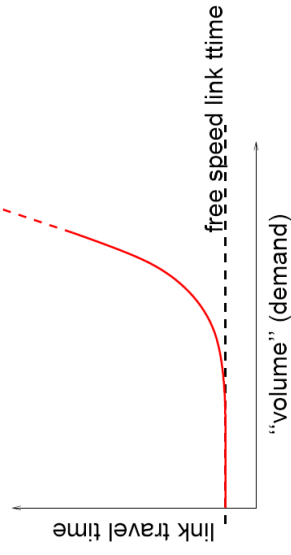
Mathematische Eigenschaften

Obiges Verfahren hat nützliche mathematische Eigenschaften.
Insbesondere unter bestimmten Bedingungen bestimmte Aspekte der Lösung eindeutig.
(Also unabh. vom Lösungsverfahren.)
Sehr hilfreich für Tests etc.

39

Staubhängigkeit der Kostenfunktion

Oft:



Plausibel ...

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

... aber problematisch (siehe weiter unten).

38

Dynamische Umlegung

40

Statische vs. dynamische 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

41

Kann abgebildet werden durch entsprechend dynamische (zeitabhängige) Simulation.

Dynamische Umlegung

Die mathematisch schönen Eigenschaften gehen verloren. Wird dennoch viel gemacht und viel untersucht, einfach weil es gebraucht wird.

43

Kostenfunktionen auf Kanten, dynamisch

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).

42

Anwendungen der Umlegung

44

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.

45

WISEVA

47

Anwendungen der Umlegung, II

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

46

WISEVA

WISEVA: 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.

48

Damit das nicht zu viele werden, gibt es auch

- X → other
- other → X
- X → X

Quellen/Senken werden 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.)

49

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).

51

Wege pro Person pro QZG (Berlin)

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

50

Zusammenfassung

52

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.

53

Formulierung als Mathematical Programming Problem

- Also gesucht: Lösung, so dass sich keine Start-Ziel-Beziehung durch (partielle) Umlagerung verbessern kann.
- Nash-GG mathematisch schlecht zu behandeln (viele Optimierungsprobleme gleichzeitig).
- Aber: Ein bestimmter, für Routen-Umlegung plausibler Fall lässt sich in ein globales Optimierungsproblem transformieren.
- Für globale Optimierungsprobleme gibt es viele Methoden. (Im Prinzip: Erste Ableitung = Null, etc. Aber constrained.)
- **Unter bestimmten Bedingungen sind bestimmte Aspekte der Lösung eindeutig.**
(Also unabh. vom Lösungsverfahren.)
Dies ist sehr hilfreich für Tests etc.

55

Reserve

54