

Gernot Liedtke

Optimale Netzbewirtschaftung durch Knappheitspreissignale und resultierende Langfristanreize



Wissen für Morgen



Agenda

-
- Soziale Grenzkosten im Verkehr
 - (Stau-)Kostenfunktionen und optimale Knappheitsgebühr
 - Bepreisungslösungen für unterschiedlich dimensionierte Infrastruktur
 - Schlussfolgerungen und Alternativen
-



Stau in Verkehrsnetzen



Stau:

- Führt zu Ressourcenverlusten
- Ineffiziente Nutzung der Infrastruktur

Internalisierung:

- Kosten, die anderen entstehen, fühlbar machen
- Zusätzlich: Umweltexternalitäten

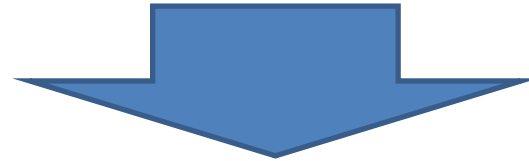
Beispiele:

- Stockholm, London („congestion charge“)
- Bologna, Mailand („ecopass“)
- Maut (in D nur schwere Lkw)



Soziale Grenzkosten als Bepreisungsprinzip in der Verkehrspolitik

- Internalisierung externer Effekte (Pigou, 1920)



- Kurzfristige Soziale Grenzkosten (EU Weißbuch, 1998)
- Straßengüterverkehr: Anlastung von Luftverschmutzung, Lärm und externen Staukosten (Richtlinie 2011/76/EU)
- Eisenbahn: Knappheitsaufschlag (Richtlinie 2001/14/EG)



Agenda

- Soziale Grenzkosten im Verkehr
 - (Stau-)Kostenfunktionen und optimale Knappheitsgebühr
 - Bepreisungslösungen für unterschiedlich dimensionierte Infrastruktur
 - Schlussfolgerungen und Alternativen
-



Fahrzeit und individuelle Nutzerkosten

Fahrzeit:

$$z = \frac{L}{V_0} \cdot \left(1 + \theta \left(\frac{n}{C} \right)^\beta \right)$$

Streckenlänge

Zahl der Nutzer pro Zeiteinheit

Parameter $\theta > 0$
 $\beta \geq 1$

Maximalgeschwindigkeit
(Wunschgeschwindigkeit)

Kapazität

Fahrzeitkosten:

$$t = VoT \cdot z$$

Value of Time

Individuelle Nutzerkosten:

$$p = t(n, C) + c$$

Nutzergebühr („charge“)



Kurzfristige soziale Kosten und Grenzkosten

soziale Kosten:

$$\begin{aligned} SK &= n \cdot p + K(C, n) - n \cdot c \\ &= n \cdot t(C, n) + K(C, n) \end{aligned}$$

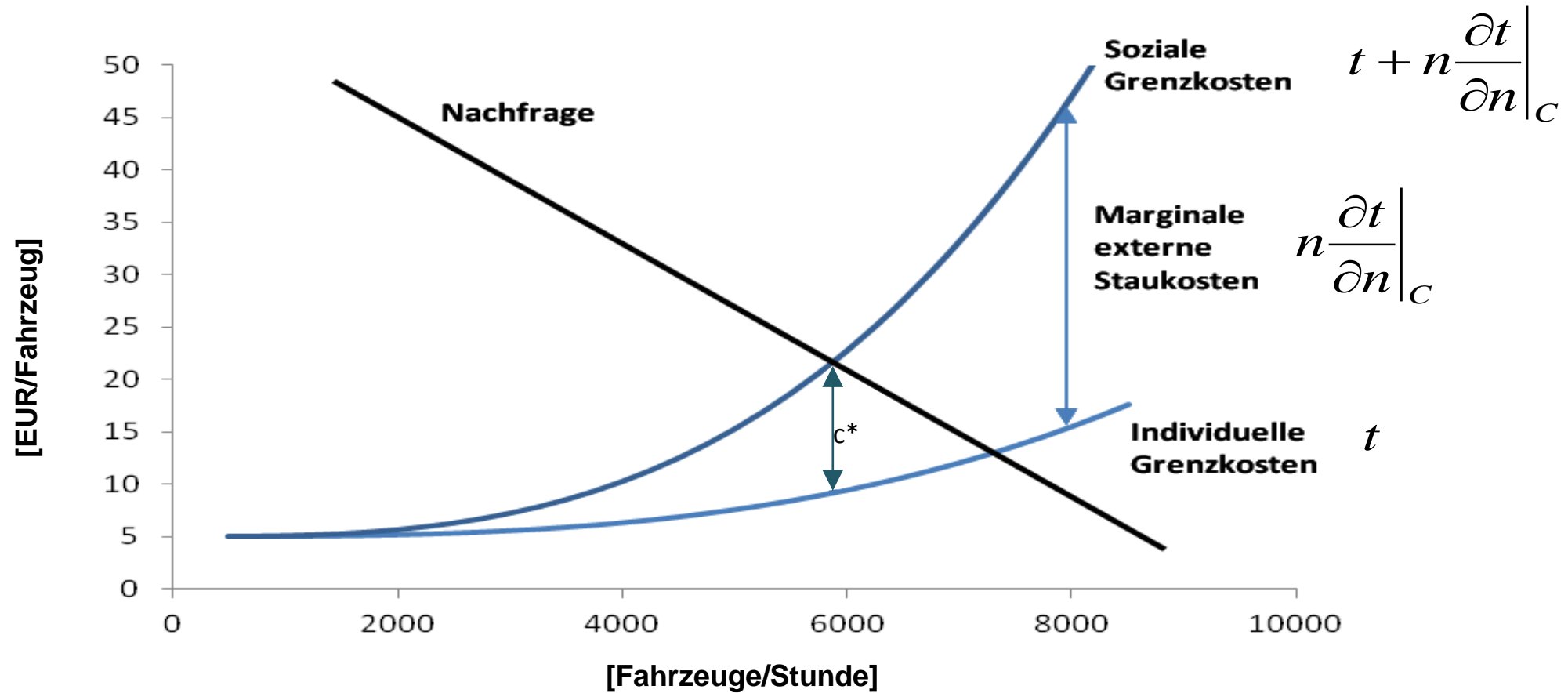
kurze Frist: $C = \text{fix}$

kurzfristige
soziale
Grenzkosten:

$$KSGK = \left. \frac{\partial SK}{\partial n} \right|_C = \underbrace{t}_{\text{individuelle Grenzkosten}} + \underbrace{n \left. \frac{\partial t}{\partial n} \right|_C}_{\text{marginale externe Staukosten}} + \underbrace{\left. \frac{\partial K}{\partial n} \right|_C}_{\substack{\text{kurzfristige} \\ \text{marginale} \\ \text{Infrastruktur-} \\ \text{kosten} \\ \approx 0}}$$



Optimale Stauegebühr c^*



Kurzfristig wohlfahrtsoptimierende Nutzergebühren einer Route mit Alternativen

Nutzerzahl
auf Route j :

$$n_j = N \frac{\exp(-\alpha \cdot p_j)}{\sum_{i=0}^l \exp(-\alpha \cdot p_i)}$$

Erwartungsnutzen:

$$EMU = \frac{1}{\alpha} \ln \left(\sum_{i=1}^l \exp(-\alpha \cdot p_i) \right)$$

Wohlfahrt:

$$W = N \cdot EMU + \sum_{i=0}^l \Pi_i = \frac{N}{\alpha} \ln \left(\sum_{i=0}^l \exp(-\alpha p_i) \right) + \sum_{i=0}^l (n_i c_i - K_i) \quad \text{mit } p_i = t_i + c_i$$

kurze Frist: $K_i = \text{fix}$ für alle i

$$\max_{c_0} W \Leftrightarrow \frac{dW}{dc_0} = 0$$

$$\Leftrightarrow c_0 = n_0 \frac{\partial t_0}{\partial n_0} + \frac{\sum_{i=1}^l \frac{n_i}{N} \cdot \left(c_i - n_i \frac{\partial t_i}{\partial n_i} \right)}{\left(1 - \frac{n_0}{N} \right)}$$

Wenn: Preissetzung auf alternativen Routen	Dann: wohlfahrtsmaximierende Preissetzung auf Route 0
Staugrenzkosten	Staugrenzkosten
> Staugrenzkosten	> Staugrenzkosten
keine	< Staugrenzkosten



Agenda

- Soziale Grenzkosten im Verkehr
 - (Stau-)Kostenfunktionen und optimale Knappheitsgebühr
 - Bepreisungslösungen für unterschiedlich dimensionierte Infrastruktur
 - Schlussfolgerungen und Alternativen
-



Langfristige Soziale Kosten und Grenzkosten

Soziale Kosten: $SK = n \cdot t(C, n) + K(C, n)$ mit : $t = T^0 \cdot (1 + \theta \cdot (n/C)^\beta)$
 wobei : $T^0 = V_0 T \cdot L / V_0$

Optimale Kapazität:: $\left. \frac{\partial SK}{\partial C} \right|_n = n \frac{\partial t(C, n)}{\partial C} + \frac{\partial K}{\partial C} = 0$

kapazitätsabhängige
Kosten ↓

Kapazitätskosten: $K(C) = F + k \cdot C$

↑
Grundkosten

$C^{opt} = n \cdot \left(\frac{T^0}{k} \theta \beta \right)^{\frac{1}{\beta+1}}$

Langfristige soziale Kosten: $LSK = n \cdot t(C^{opt}(n), n) + K(C^{opt})$

Im Beispiel: $LSK = n \cdot T^0 \cdot \underbrace{\left(1 + \theta \left(\frac{k}{T^0 \cdot \theta \beta} \right)^{\frac{\beta}{\beta+1}} \right)}_{\text{individuelle Grenzkosten } \tilde{t}} + F + n \cdot \underbrace{k \left(\frac{T^0 \cdot \theta \beta}{k} \right)^{\frac{1}{\beta+1}}}_{\text{Betreibergrenzkosten } \tilde{k}} = F + n \cdot \tilde{t} + n \cdot \tilde{k}$



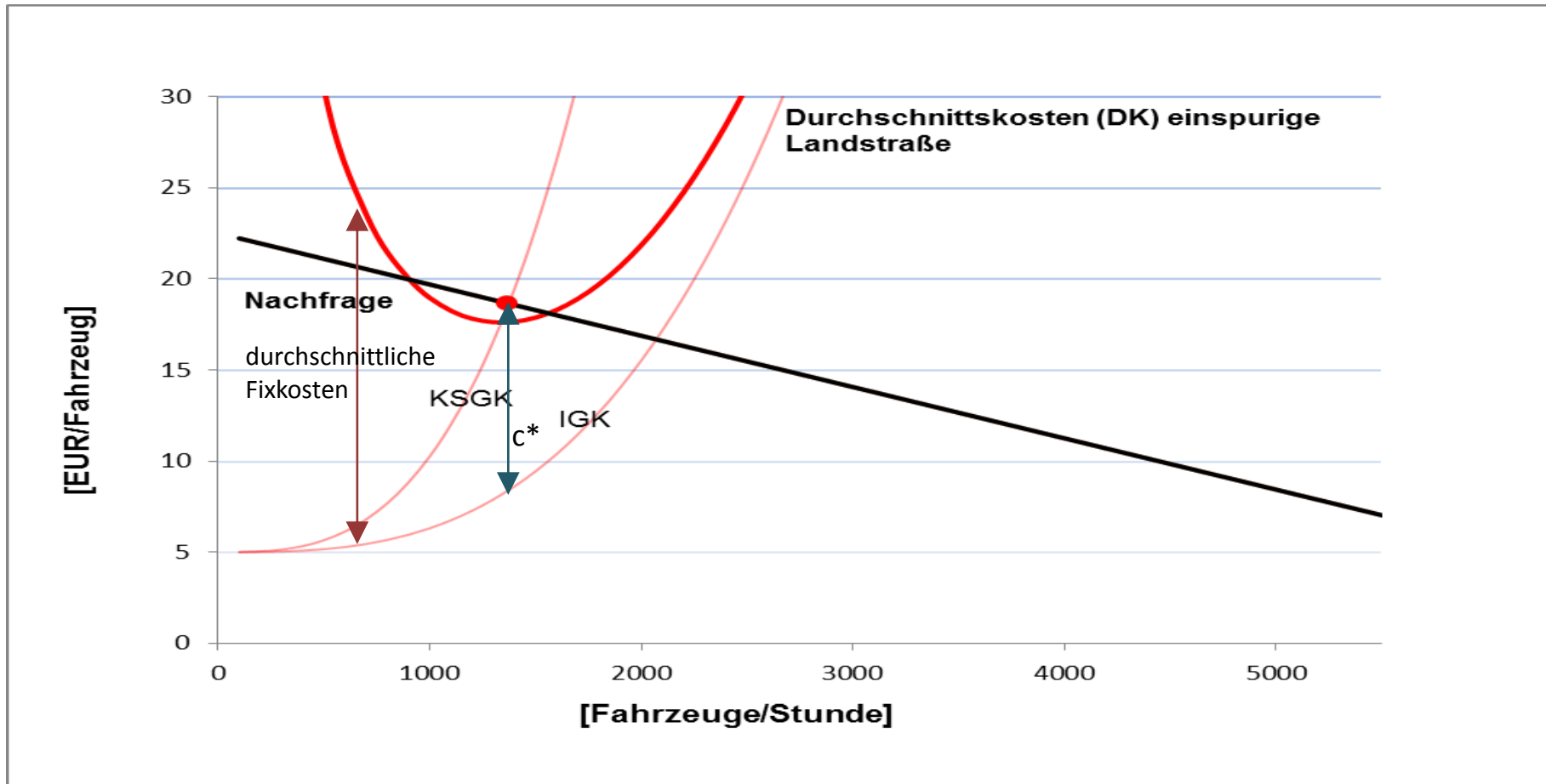
Staukosten und Preise bei unterschiedlichem Infrastrukturausbau

Kostenparameter (eine Richtung)	
Streckenlänge	150 km
Fahrzeit auf leerer Strecke	1 h
Value of Time	5 EUR/h
Abschreibungsdauer	30 Jahre
Nominalzins	4 % p.a.
Nachtruhe	14 h
Flussparameter Θ	0,35
Flussparameter β	3

	Investitionskosten [Mio. EUR/km]	Gesamtkapazität [Kfz/h]
Straße 1	3,5	1100 Kfz/h
Straße 2	5,5	2200 Kfz/h
Straße 3	7,0	4400 Kfz/h
Straße 4	8,5	6600 Kfz/h



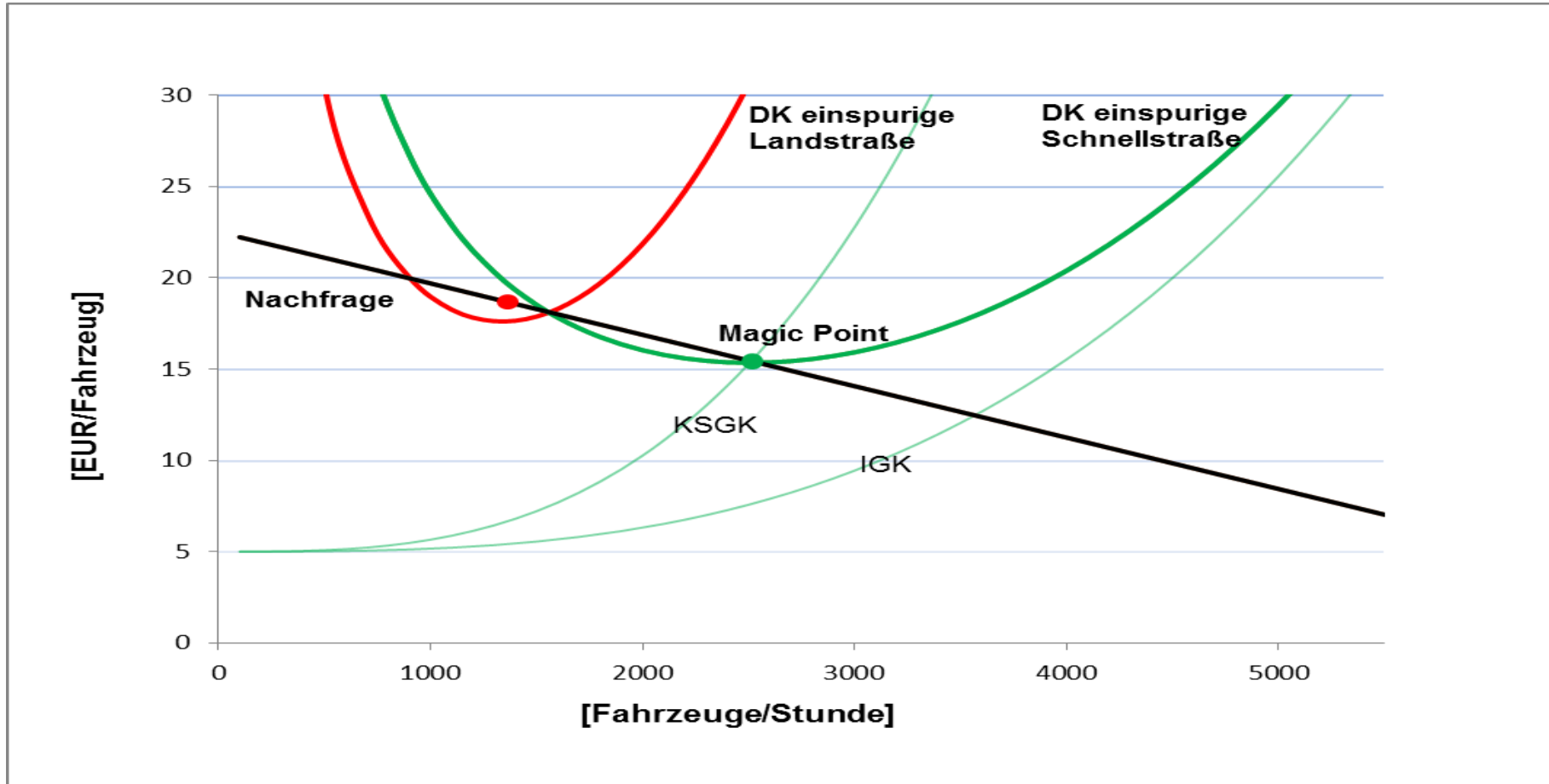
Engpassgebühr für unzureichend dimensionierte Straße



- Überschüsse durch Staugebühr



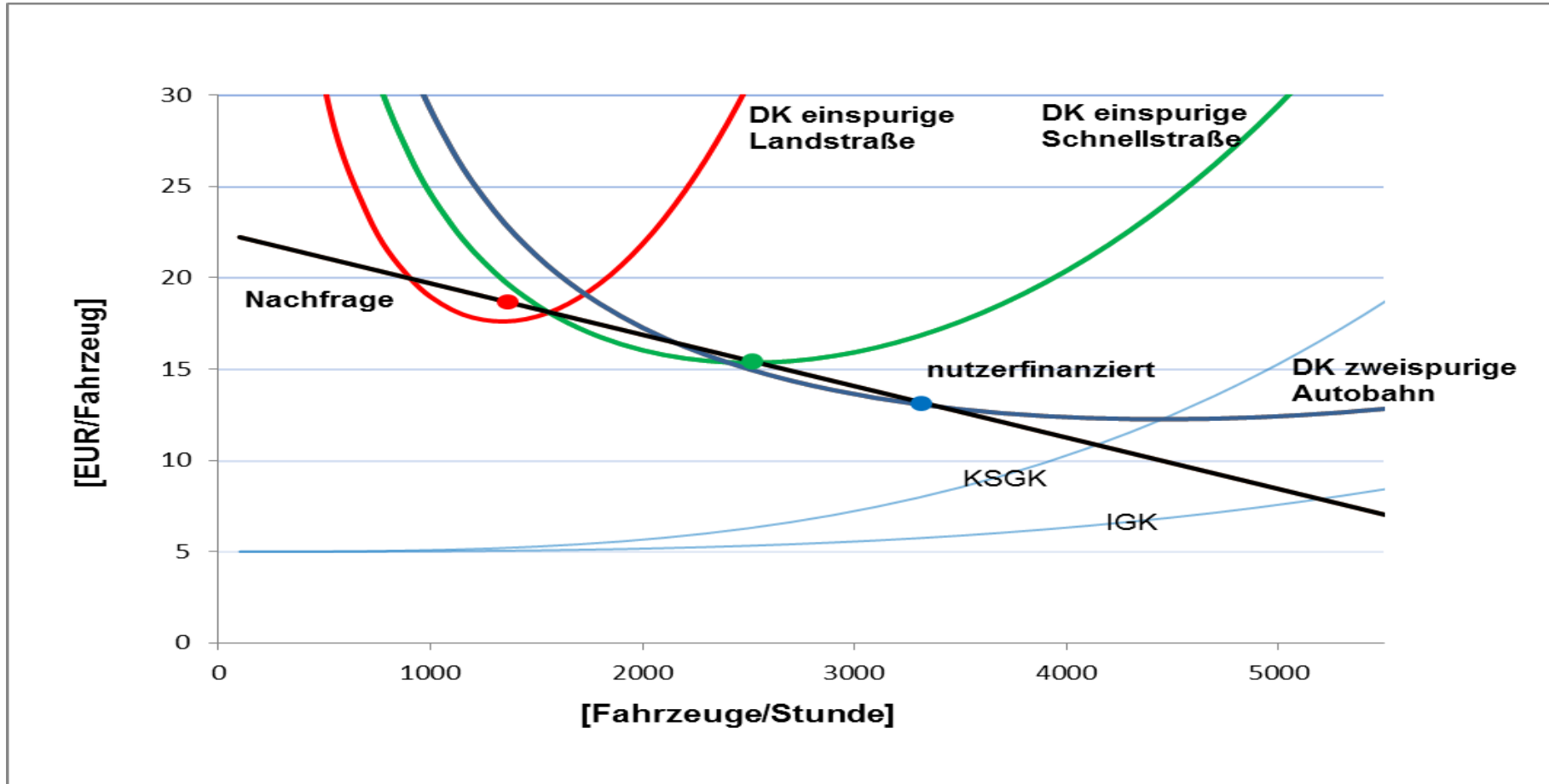
Aus Engpassgebühren refinanzierbare Straße



- Magic Point: Staugebühr deckt genau die Infrastrukturkosten



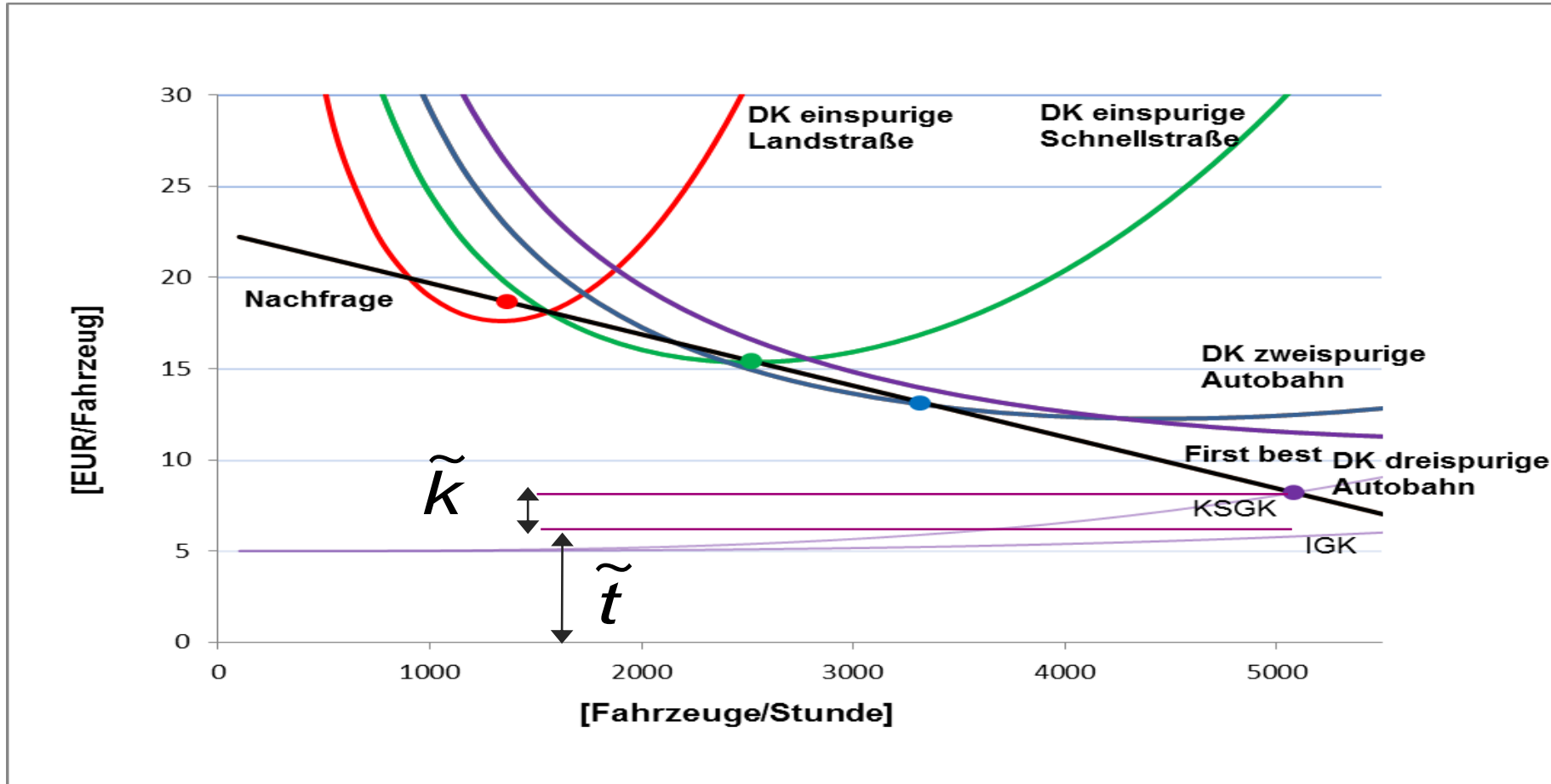
Vollständig nutzerfinanzierte Straße



- Weitere Wohlfahrtsverbesserung durch Kapazitätsausbau
- Gebühr auf Basis der Infrastrukturkosten > Staugebühr



Langfristige First Best Lösung



- Langfristige soziale Grenzkosten schneiden mit Nachfrage
- Nicht mehr nutzerfinanzierbar



Zwischenfazit

- Überschüsse aus Knappheitsgebühr signalisieren Rentabilität eines weiteren Netzausbaus
- Gleichgewichtspunkt mit „Engpassgebühr = durchschnittliche Fixkosten“ (Magic Point) stellt kein Wohlfahrtsoptimum dar
- Weiterer Netzausbau erfordert Gebührenerhebung zur Deckung von Infrastruktur-Durchschnittskosten
- Im Langfristoptimum sind langfristige Subventionen notwendig



Langfristig optimale Bepreisung bei Routenalternativen l

Langfristig: $K_0 = F_0 + n_0 \cdot \tilde{k}_0$

$$t_0 = \tilde{t}_0$$

Kapazität optimal entsprechend der Nachfragemenge

$$W = N \cdot EMU + \sum_{i=0}^l \Pi_i$$

$$\max_{c_0} W \Leftrightarrow \frac{dW}{dc_0} = 0$$

$$c_0 = \tilde{k}_0 + \frac{\sum_{i=1}^l \frac{n_i}{N} \cdot (c_i - (SGK_i - t_i))}{\left(1 - \frac{n_0}{N}\right)}$$

Wenn: Preissetzung auf alternativen Routen	Dann: Langfristig wohlfahrtsmaximierende Preissetzung auf Route 0
(Langfrist-)Grenzkosten	Langfristgrenzkosten
> (Langfrist-)Grenzkosten	> Langfristgrenzkosten
keine	< Langfristgrenzkosten

- Proost et al. (2011): Subventionen zur Deckung der Finanzierungslücke!



Optimale Bepreisung bei endogener Angebotsvielfalt

Annahme monopolistischer Konkurrenz für die Alternativen:

- l Alternativen mit symmetrischer Kostenfunktion
- l endogen
- vollkostenbasierte Preissetzung
- Nullgewinn

$$n_0 = N \frac{\exp(-\alpha \cdot p_0)}{\exp(-\alpha \cdot p_0) + l \cdot \exp(-\alpha \cdot AC)}$$

↑ Annahme: konstant

Bedingung erster Ordnung:
$$\frac{dW}{dc_0} = \frac{\partial(EMU + \Pi_0)}{\partial c_0} + \frac{\partial(EMU + \Pi_0)}{\partial l} \frac{\partial l}{\partial c_0} = 0$$

$$c_0 = \tilde{k} + \frac{1}{\alpha} \approx AC$$

$\frac{1}{\alpha}$: drückt (Wertschätzung für) Heterogenität im Gesamtmarkt aus
 → steuert die Anzahl der Anbieter im Gesamtmarkt

Wenn: Preissetzung auf alternativen Routen	Dann: wohlfahrtsmaximierende Preissetzung auf Route 0
Durchschnittskosten	≈ Durchschnittskosten



Agenda

- Soziale Grenzkosten im Verkehr
 - (Stau-)Kostenfunktionen und optimale Knappheitsgebühr
 - Bepreisungslösungen für unterschiedlich dimensionierte Infrastruktur
 - Schlussfolgerungen und Alternativen
-



Infrastrukturpolitische Implikationen

Überstaute Gebiete mit zentraler Planungshoheit (z.B. Metropole)

- Kurzfristige Pigou-Gebühr mit Überschüssen wegen baulich begrenztem Straßenraum
- Existenz eines ÖPNV Systems im öffentlichen Interesse (Daseinsvorsorge)
- Interdependenzen der Gebührenfestlegung mit ÖPNV beachten

Verkehrsträger-/Routenwettbewerb mit teilweise auch privatfinanzierter Infrastruktur (z.B. Fernverkehr) und ohne Kapazitätsrestriktion

- Durchschnittskosten als Bezugspreis zur Deckung der Infrastrukturkosten
- Bewertung von Maßnahmen nach betriebswirtschaftlichen bzw. Lebenszyklusgesichtspunkten
- Koordination bei Planung sinnvoll
- Variation der Durchschnittskosten zur Auslastungssteuerung



**Vielen Dank für Ihre
Aufmerksamkeit**



Anhang



Anhang 1: Stauzeitausdruck

$$C_{ges} = t_0 x \left(1 + \theta \left(\frac{x}{C} \right)^\beta \right) + Ck + S$$

$$\frac{\partial C_{ges}}{\partial C} = k - t_0 \theta \beta x^{\beta+1} C^{-1-\beta} = 0 \quad \Leftrightarrow k = t_0 \theta \beta \left(\frac{x}{C} \right)^{\beta+1}$$

$$\Leftrightarrow \frac{x}{C} = \left(\frac{k}{t_0 \theta \beta} \right)^{\frac{1}{\beta+1}}$$

$$\Leftrightarrow \left(\frac{x}{C} \right)^{\beta+1} = \frac{k}{t_0 \theta \beta}$$

$$\Leftrightarrow C = x \left(\frac{k}{t_0 \theta \beta} \right)^{-\frac{1}{\beta+1}}$$

$$\Leftrightarrow \left(\frac{x}{C} \right)^\beta = \left(\frac{k}{t_0 \theta \beta} \right)^{\frac{\beta}{\beta+1}}$$

$$\begin{aligned} C_{ges} &= t_0 x \left(1 + \theta \left(\frac{k}{t_0 \theta \beta} \right)^{\frac{\beta}{\beta+1}} \right) + kx \left(\frac{k}{t_0 \theta \beta} \right)^{-\frac{1}{\beta+1}} + S \\ &= xt_0 \left(1 + \left(\frac{k}{t_0 \theta \beta} \right)^{\frac{\beta}{\beta+1}} (\theta + \theta \beta) \right) + S \end{aligned}$$



Wohlfahrtsoptimale gebühr bei gegebenen und fixen Routen

Annahmen:

- Es gibt $l + 1$ Routen von A nach B
- fixe Gesamtnachfrage
- Routenauswahl gemäß Logit-Funktion
- Maximierung der Wohlfahrt durch Wahl der Nutzergebühr auf Route 0

$$n_j = N \frac{\exp(-\alpha \cdot p_j)}{\sum_{i=0}^l \exp(-\alpha \cdot p_i)}$$

$$EMU = \frac{N}{\alpha} \ln \left(\sum_{i=1}^l \exp(-\alpha \cdot p_i) \right)$$

$$\max\{w\} = \max\{EMU + \Pi\} = \max_{c_0} \left\{ \frac{N}{\alpha} \ln \left(\sum_{i=0}^l \exp(-\alpha p_i) \right) + \sum_{i=0}^l n_i c_i - K_i \right\}$$

$$\frac{dEMU}{dc_0} = \frac{N}{\alpha} \frac{\sum_{i=1}^l \frac{d \exp(-\alpha p_i)}{dc_0}}{\sum_{i=1}^l \exp(-\alpha p_i)} = \sum_{i=0}^l -n_i \cdot \frac{d(t_i + c_i)}{dc_0} = \sum_{i=1}^l -n_i \left(\frac{dt_i}{dn_i} + \frac{dc_i}{dn_i} \right) \frac{dn_i}{dc_0}$$

$$\sum_{i=0}^l \frac{d\Pi_i}{dc_0} = \sum_{i=0}^l \frac{d\Pi_i}{dn_i} \frac{dn_i}{dc_0} = \sum_{i=0}^l \frac{d(n_i c_i - K_i)}{dn_i} \frac{dn_i}{dc_0} = \sum_{i=0}^l \left(c_i + n_i \frac{dc_i}{dn_i} - \frac{dK_i}{dn_i} \right) \frac{dn_i}{dc_0}$$

$$\frac{dw}{dc_0} = \frac{dEMU}{dc_0} + \frac{d\Pi}{dc_0} \stackrel{!}{=} 0$$

$$\frac{dn_0}{dc_0} \left(c_0 - n_0 \frac{dt_0}{dn_0} - \frac{dK_0}{dn_0} \right) = - \sum_{i=1}^l \frac{dn_i}{dc_0} \left(c_i - n_i \frac{dt_i}{dn_i} - \frac{dK_i}{dn_i} \right)$$

$= 0$, wenn c_i = externe Staukosten
 > 0 , wenn privatwirtschaftliche Preissetzung
 < 0 , wenn keine Bepreisung

Preissetzung auf alternativen Routen	wohlfahrtsmaximierende Preissetzung auf Route 0
Kurzfristgrenzkosten	Kurzfristgrenzkosten
gewinnmaximierend	> Kurzfristgrenzkosten
keine	< Kurzfristgrenzkosten



Langfristig optimale Bepreisung

Annahmen:

- Es gibt $l + 1$ Routen von A nach B
- fixe Gesamtnachfrage
- Routenauswahl gemäß Logit-Funktion
- Maximierung der Wohlfahrt durch Wahl der der Nutzergebühr und der Kapazität

$$n_j = N \frac{\exp(-\alpha \cdot p_j)}{\sum_{i=0}^l \exp(-\alpha \cdot p_i)}$$

$$EMU = \frac{N}{\alpha} \ln \left(\sum_{i=0}^l \exp(-\alpha \cdot p_i) \right)$$

$$\max\{w\} = \max_{p_0} \{ EMU + \Pi \} = \max_{p_0} \left\{ \frac{N}{\alpha} \ln \left(\sum_{i=0}^l \exp(-\alpha p_i) \right) + \sum_{i=0}^l n_i \underbrace{(p_i - t_i)}_{c_i} - K_i \right\}$$

$$\frac{dEMU}{dc_0} = \frac{N}{\alpha} \frac{\sum_{i=1}^l \frac{d \exp(-\alpha p_i)}{dc_0}}{\sum_{i=0}^l \exp(-\alpha p_i)} = \sum_{i=0}^l -n_i \cdot \frac{d(t_i + c_i)}{dc_0} = \sum_{i=0}^l -n_i \left(0 + \frac{dc_i}{dn_i} \right) \frac{dn_i}{dc_0}$$

$$\sum_{i=0}^l \frac{d\Pi_i}{dc_0} = \sum_{i=0}^l \frac{d\Pi_i}{dn_i} \frac{dn_i}{dc_0} = \sum_{i=0}^l \frac{d(n_i c_i - K_i)}{dn_i} \frac{dn_i}{dc_0} = \sum_{i=0}^l \left(c_i + n_i \frac{dc_i}{dn_i} - \tilde{k}_i \right) \frac{dn_i}{dc_0}$$

$$\frac{dw}{dc_0} = \frac{dEMU}{dc_0} + \frac{d\Pi}{dc_0} = 0$$

$$\frac{dn_0}{dc_0} (c_0 - \tilde{k}_0) = - \sum_{i=1}^l \frac{dn_i}{dc_0} (c_i - \tilde{k}_i)$$

=0, wenn c_i = externe Staukosten
 >0, wenn privatwirtschaftliche Preissetzung
 <0, wenn keine Bepreisung

Kapazität entsprechend Nachfragemenge

Deckungslücke bei den Set-up Kosten

Preissetzung auf alternativen Routen	wohlfahrtsmaximierende Preissetzung auf Route 0
Langfristgrenzkosten	Langfristgrenzkosten
Gewinnmaximierend	> Langfristgrenzkosten
keine	< Langfristgrenzkosten



Optimale Bepreisung unter Berücksichtigung der Angebotsbreite

$$n_0 = N \frac{\exp(-\alpha \cdot p_0)}{\exp(-\alpha \cdot p_0) + l \cdot \exp(-\alpha \cdot AC)}$$

Annahme: Kostenorientierte Preissetzung

$$\max\{w\} = \max\{EMU + \Pi\} = \max_{p_0} \left\{ \frac{N}{\alpha} \ln(\exp(-\alpha p_0) + l \cdot \exp(-\alpha \cdot AC)) + (n_0 p_0 - K_0) + 0 \right\}$$

Bedingung erster Ordnung: $\frac{dw}{dc_0} = \frac{d\Pi}{dc_0} + \frac{dEMU}{dc_0} = 0$

Annahmen: $AC_i = \text{const.}$ für $i > 0$

$l = \text{flexibel}$

Reduktion der Auswahlvielfalt

$$\frac{dEMU}{dc_0} = \frac{N}{\alpha} \frac{\exp(-\alpha p_0)(-\alpha) + \frac{d}{dc_0}(l \cdot \exp(-\alpha \cdot AC))}{\exp(-\alpha p_0) + l \cdot \exp(-\alpha \cdot AC)} = -n_0 + \frac{1}{\alpha} \tilde{n} \cdot \frac{dl}{dc_0}$$

Preissetzung auf alternativen Routen	wohlfahrtsmaximierende Preissetzung auf Route 0
Durchschnittskosten	Durchschnittskosten



Optimale Bepreisung unter Berücksichtigung der Angebotsbreite

$$\begin{aligned} \frac{dEMU}{dc_0} &= -n_0 + \frac{1}{\alpha} \underbrace{\frac{(N-n_0)}{l}}_n \cdot \frac{dl}{dc_0} = -n_0 + \frac{\tilde{N}}{\alpha} \frac{d \ln l}{dc_0} \\ &= -n_0 + \frac{\tilde{N}}{\alpha} \frac{d \ln \left(\frac{\tilde{N}}{\alpha F} \right)}{dc_0} = -n_0 + \frac{1}{\alpha} \frac{d\tilde{N}}{dc_0} = -n_0 - \frac{1}{\alpha} \frac{dn_0}{dc_0} \end{aligned}$$



Gleichgewichtsfirmengröße
bei monopolistischem Wettbewerb:

$$n^* = \alpha F \quad l = \frac{\tilde{N}}{\alpha F}$$

$$\frac{d\Pi}{dc_0} = n_0 + c_0 \cdot \frac{dn_0}{dc_0} - \frac{dK_0}{dn_0} \cdot \frac{dn_0}{dc_0}$$

Bedingung erster Ordnung:

$$c_0 \cdot \frac{dn_0}{dc_0} - \frac{dK_0}{dn_0} \cdot \frac{dn_0}{dc_0} - \frac{1}{\alpha} \frac{dn_0}{dc_0} = \frac{dn_0}{dc_0} \left(c_0 - \frac{dK_0}{dn_0} - \frac{1}{\alpha} \right) = 0$$

Sofern: $n_0 = n = \frac{\tilde{N}}{l} = \alpha F \quad \Rightarrow \quad \frac{1}{\alpha} = \frac{F}{n_0}$

- Gebührenfestsetzung anhand durchschnittlicher Infrastrukturkosten unterstützt die Herausbildung einer optimalen Angebotsbreite



Elastizitäten

$$n_j = N \frac{\exp(-\alpha \cdot p_j)}{\sum_{i=0}^l \exp(-\alpha \cdot p_i)}$$

$$EMU = \frac{N}{\alpha} \ln \left(\sum_{i=1}^l \exp(-\alpha \cdot p_i) \right)$$

$$\frac{\partial n_j}{\partial p_j} = N \left(\frac{\exp(-\alpha \cdot p_j) \cdot (-\alpha)}{\sum_{i=0}^l \exp(-\alpha \cdot p_i)} - \frac{\exp(-\alpha \cdot p_j) \cdot \exp(-\alpha \cdot p_j) \cdot (-\alpha)}{\left(\sum_{i=0}^l \exp(-\alpha \cdot p_i) \right)^2} \right)$$

$$\frac{\partial n_j}{\partial p_j} = N\alpha(-a_j + a_j^2) = N\alpha a_j(a_j - 1)$$

$$\frac{\partial n_j}{\partial p_j} = -\alpha n_j + \frac{\alpha n_j^2}{N} = -\alpha n_j(1 - a_j)$$

$$\frac{\partial n_k}{\partial p_j} = N \left(- \frac{\exp(-\alpha \cdot p_j) \cdot \exp(-\alpha \cdot p_k) \cdot (-\alpha)}{\left(\sum_{i=0}^l \exp(-\alpha \cdot p_i) \right)^2} \right)$$

$$\frac{\partial n_k}{\partial p_j} = \alpha N(a_j \cdot a_k) = \frac{\alpha}{N} n_j \cdot n_k$$

a: Anteil für betrachtete Alternative

