Gernot Liedtke

Optimale Netzbewirtschaftung durch Knappheitspreissignale und resultierende Langfristanreize

DLR

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

Streckenlänge

Zahl der Nutzer pro Zeiteinheit

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

Parameter $\vartheta > 0$

$\beta \geq 1$

Kapazität

Maximalgeschwindigkeit
(Wunschgeschwindigkeit)

Fahrzeitkosten: $$t = VoT \cdot z$$

Value of Time

Individuelle Nutzerkosten: $$p = t(n, C) + c$$

Nutzergebühr („charge“)

Kurzfristige soziale Kosten und Grenzkosten

soziale Kosten:

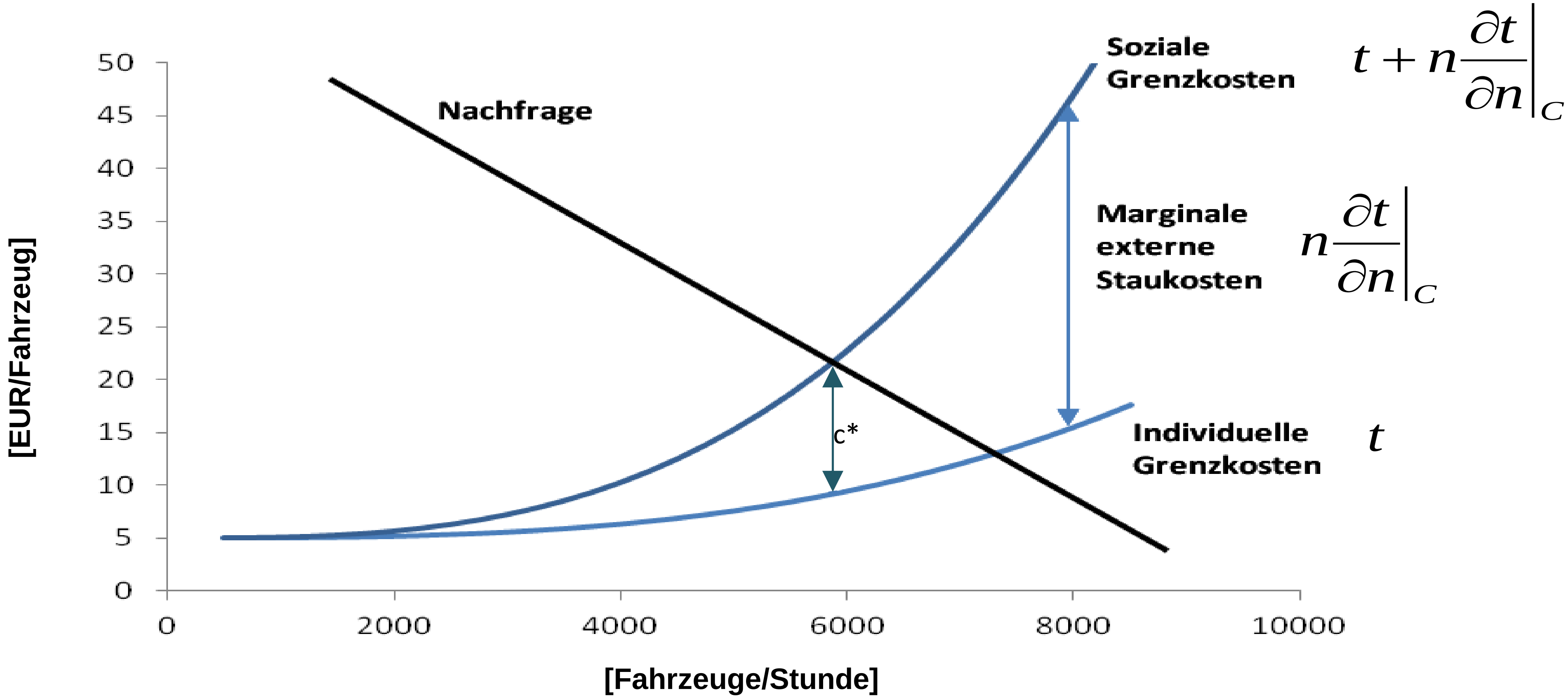
$$SK = n \cdot p + K(C,n) - n \cdot c$$
$$= n \cdot t(C,n) + K(C,n)$$

kurze Frist: *C*=fix

kurzfristige soziale Grenzkosten:

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

Optimale Staugebühr 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:

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

mit $p_i = t_i + c_i$

kurze Frist: K_i = fix für alle i

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

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

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: $$SK = n \cdot t(C,n) + K(C,n) \qquad \text{mit}: \quad t = T^0 \cdot \left(1 + \theta \cdot (n/C)^{\beta}\right)$$

$$\text{wobei}: T^0 = VoT \cdot L / V_0$$

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

Kapazitätskosten: $$K(C) = \underbrace{F}_{\text{Grundkosten}} + k \cdot \overbrace{C}^{\text{kapazitätsabhängige Kosten}}$$

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

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

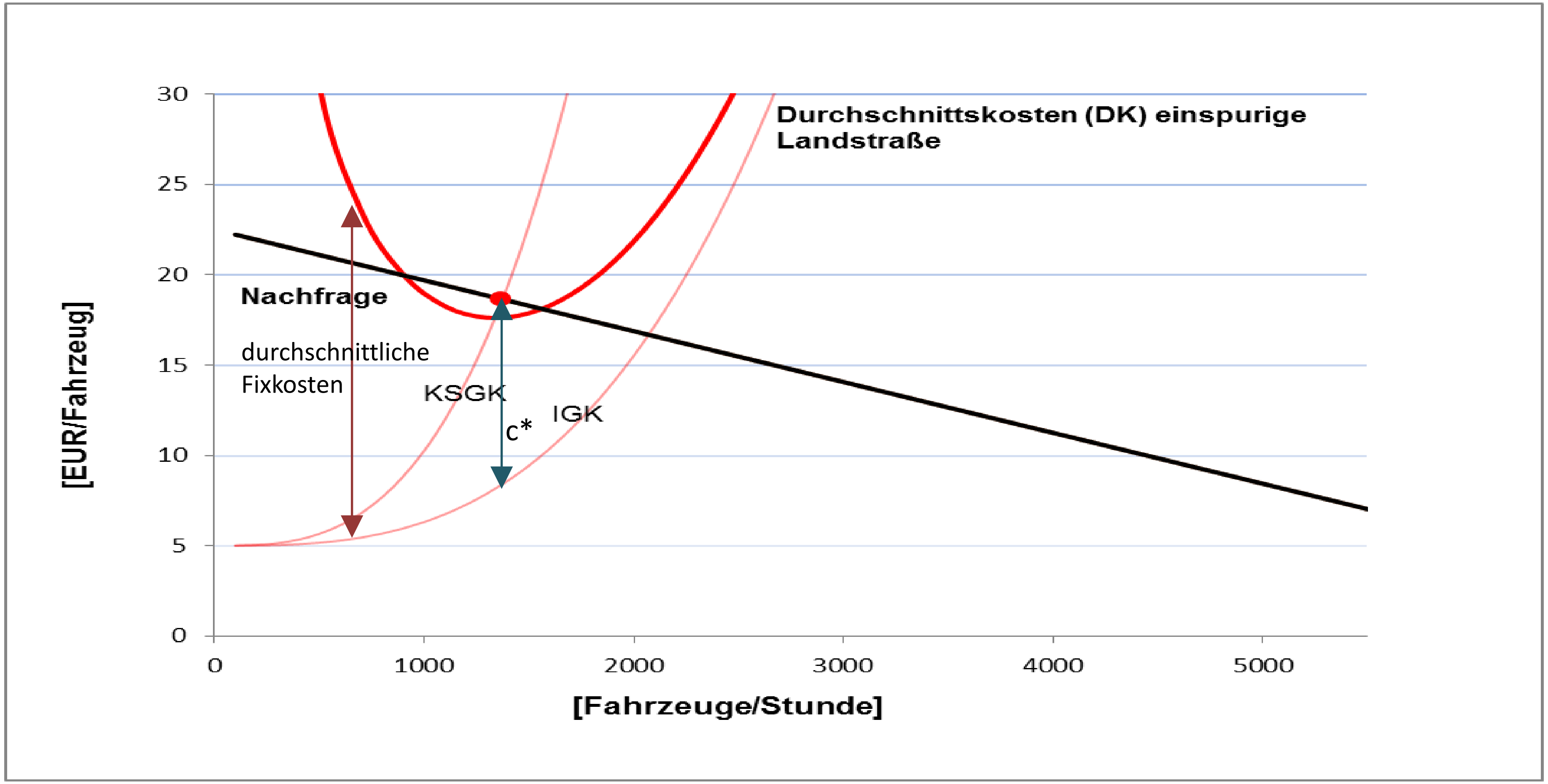
Im Beispiel: $$LSK = n \cdot \underbrace{T^0 \cdot \left(1 + \theta\left(\frac{k}{T^0 \cdot \theta\beta}\right)^{\frac{\beta}{\beta+1}}\right)}_{\text{individuelle Grenzkosten } \quad \tilde{t}} + F + n \cdot \underbrace{k\left(\frac{T^0 \cdot \theta\beta}{k}\right)^{\frac{1}{\beta+1}}}_{\text{Betreibergrenzkosten}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

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

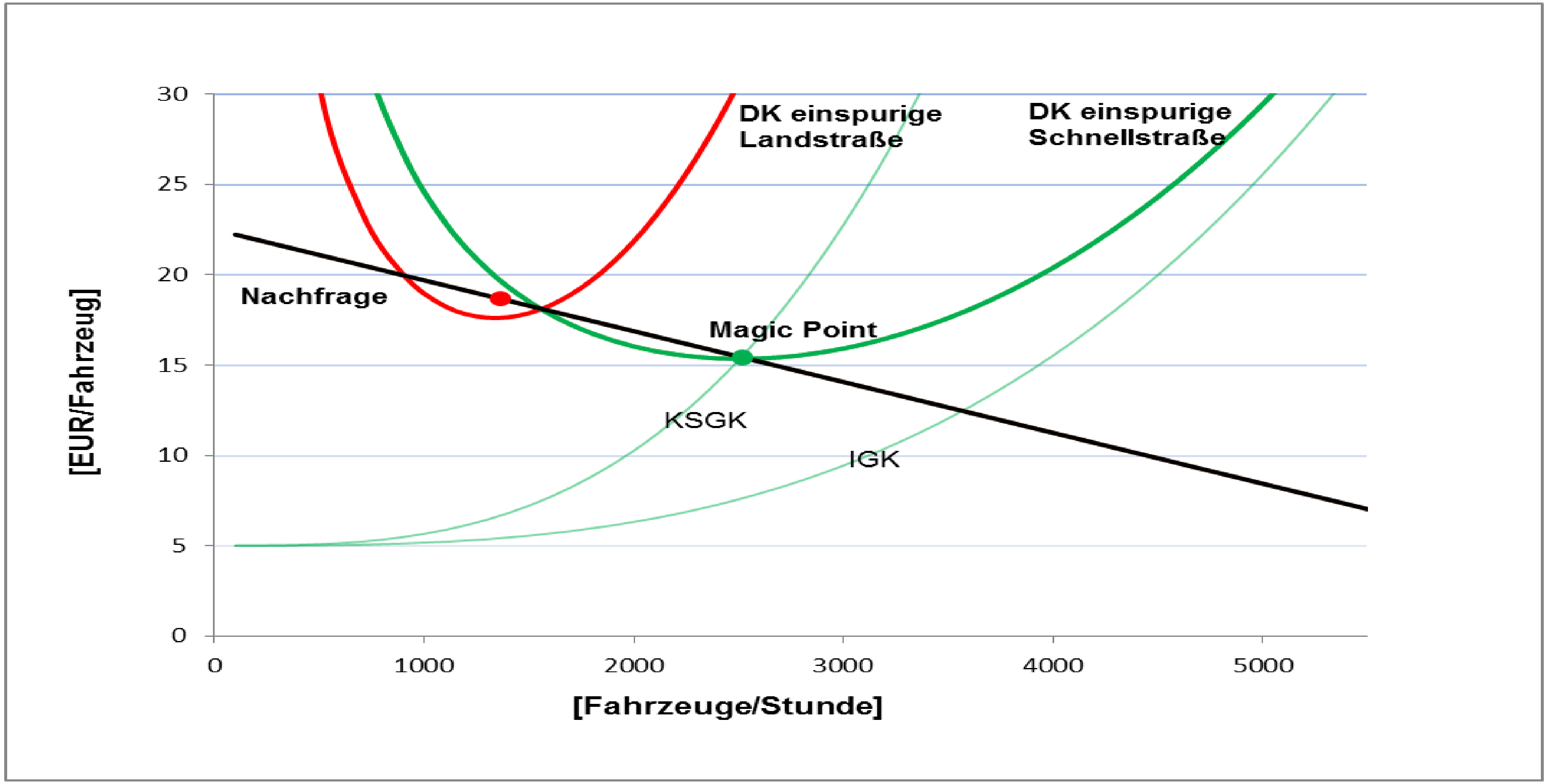
	Investitionskosten [Mio. EUR/km]	Gesamtkapazität [Kfz/h]
Straße 1	3,5	1100 Kfz/h
Straße 2	5,5	2200 Kfz/h
Straße 3	7,0	4400 Kfz/h
Straße 4	8,5	6600 Kfz/h

Engpassgebühr für unzureichend dimensionierte Straße



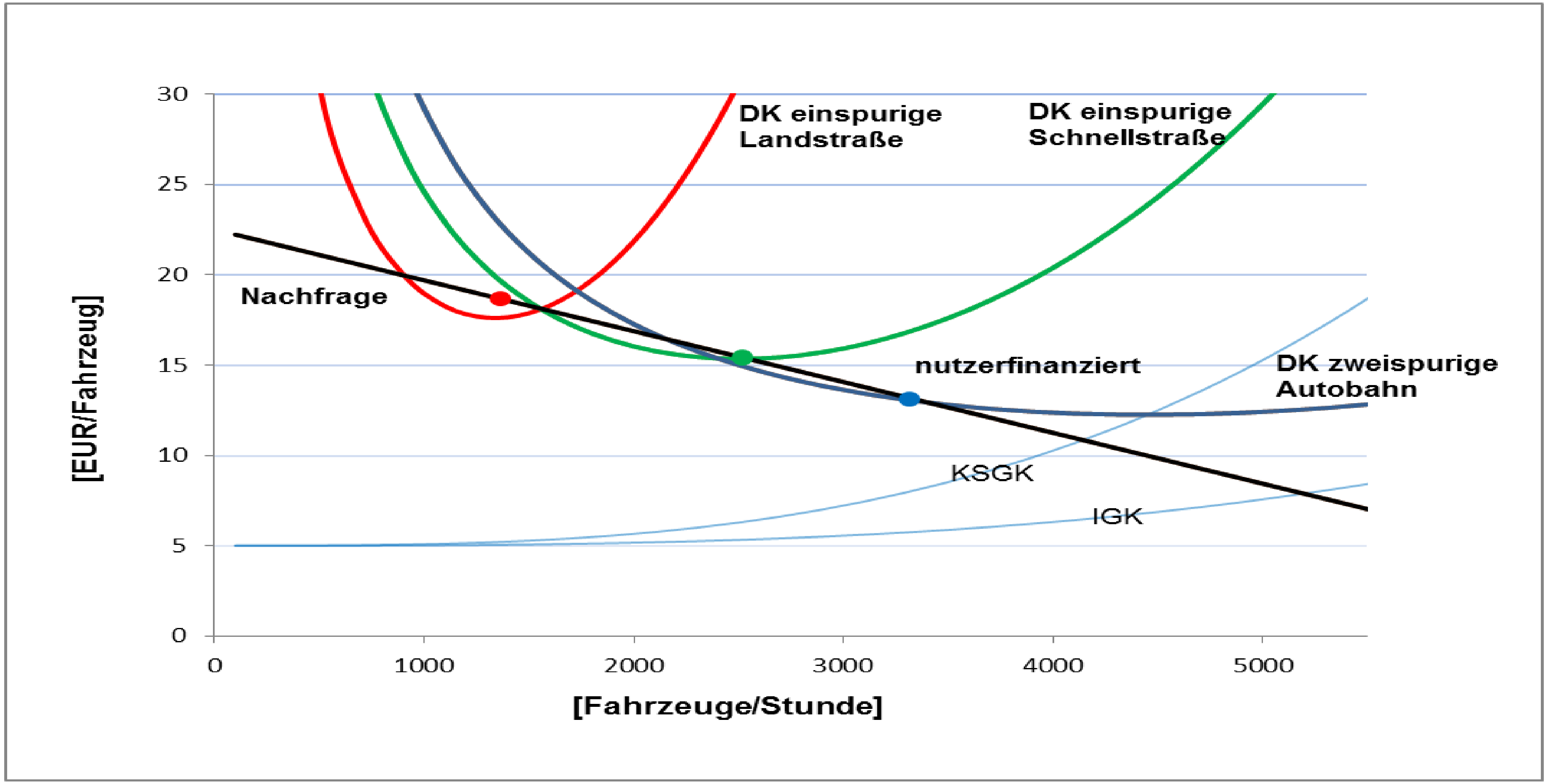
- Überschüsse durch Staugebühr

Aus Engpassgebühren refinanzierbare Straße



- Magic Point: Staugebühr deckt genau die Infrastrukturkosten

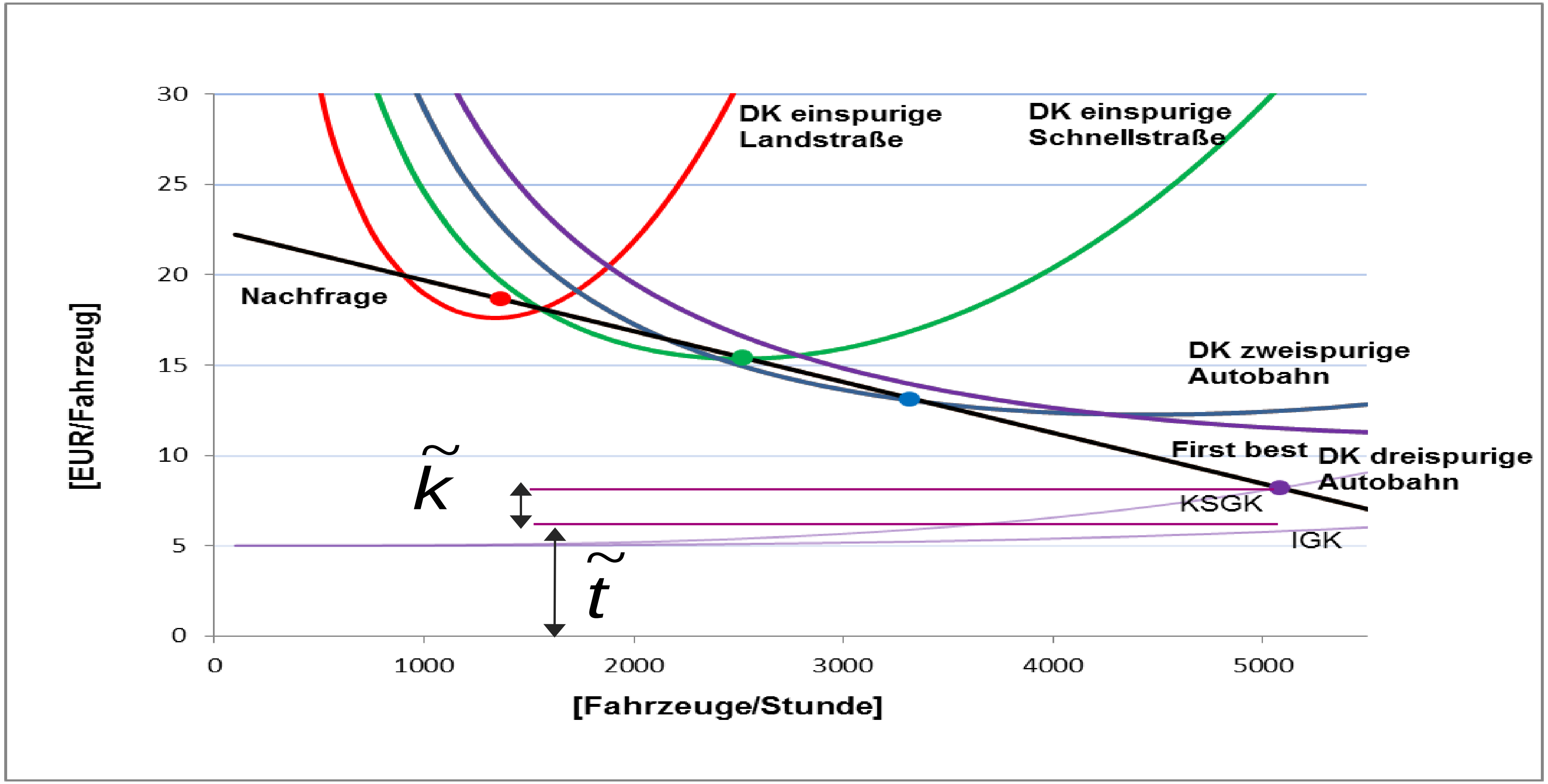
Vollständig nutzerfinanzierte Straße



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

DLR

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 l Routenalternativen

Langfristig: $K_0 = F_0 + n_0 \cdot \tilde{k}_0$ $\qquad t_0 = \tilde{t}_0$ $\qquad$ Kapazität optimal entsprechend der Nachfragemenge

$$W = N \cdot EMU + \sum_{i=0}^{l} \Pi_i \qquad \max_{c_0} W \Leftrightarrow \frac{dW}{dc_0} = 0$$

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

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**

DLR

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

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

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

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

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

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

Wohlfahrtsoptimale gebühr bei gegebenen und fixen Routen

Annahmen:

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

$$n_j = N \frac{\exp(-\alpha \cdot p_j)}{\sum_{i=0}^{I} \exp(-\alpha \cdot p_i)} \qquad EMU = \frac{N}{\alpha} \ln\left(\sum_{i=1}^{I} \exp(-\alpha \cdot p_i) \right)$$

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

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

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

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

$$\frac{dn_0}{dc_0} \left(c_0 - n_0 \frac{dt_0}{dn_0} - \frac{dK_0}{dn_0} \right) = - \sum_{i=1}^{I} \frac{dn_i}{dc_0} \underbrace{\left(c_i - n_i \frac{dt_i}{dn_i} - \frac{dK_i}{dn_i} \right)}_{\substack{=0,\ \text{wenn } c_1 = \text{externe Staukosten} \\ >0,\ \text{wenn privatwirtschaftliche Preissetzung} \\ <0,\ \text{wenn keine Bepreisung}}}$$

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

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

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

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

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

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

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

$$\frac{dn_0}{dc_0}\left(c_0 - \tilde{k}_0\right) = \underbrace{-\sum_{i=1}^{l}\frac{dn_i}{dc_0}\left(c_i - \tilde{k}_i\right)}_{\substack{=0,\ \text{wenn } c_1 = \text{externe Staukosten} \\ >0,\ \text{wenn privatwirtschaftliche Preissetzung} \\ <0,\ \text{wenn keine Bepreisung}}}$$

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

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

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

Annahmen: *AC*$_i$ = const. für i>0
***l* = flexibel**

Reduktion der Auswahlvielfalt

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

Preissetzung auf alternativen Routen	wohlfahrtsmaximierende Preissetzung auf Route 0
Durchschnittskosten	Durchschnittskosten

Optimale Bepreisung unter Berücksichtigung der Angebotsbreite

$$\frac{dEMU}{dc_0} = -n_0 + \frac{1}{\alpha}\underbrace{\frac{(N-n_0)}{l}}_{n} \cdot \frac{dl}{dc_0} = -n_0 + \frac{\tilde{N}}{\alpha}\frac{d\ln l}{dc_0}$$

$$= -n_0 + \frac{\tilde{N}}{\alpha}\frac{d\ln\left(\frac{\tilde{N}}{\alpha F}\right)}{dc_0} = -n_0 + \frac{1}{\alpha}\frac{d\tilde{N}}{dc_0} = -n_0 - \frac{1}{\alpha}\frac{dn_0}{dc_0}$$

Gleichgewichtsfirmengröße bei monopolistischem Wettbewerb:

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

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

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:

$$n_0 = n = \frac{\tilde{N}}{l} = \alpha F \qquad \Rightarrow \qquad \frac{1}{\alpha} = \frac{F}{n_0}$$

- Gebührenfestsetzung anhand durchschnittlicher Infrastrukturkosten unterstützt die Herausbildung einer optimalen Angebotsbreite

Elastizitäten

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

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

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

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

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

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

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

a: Anteil für betrachtete Alternative