Kollektivgutprobleme im Verkehrswesen – können intelligente Akteure Abhilfe schaffen?

M. Lenz[a,1] **und R. Berkemer**[b,2]

[a] Institut für Straßen-und Verkehrswesen, Universität Stuttgart,
Pfaffenwaldring 7, 70569 Stuttgart, Germany

[b] ITV Denkendorf - Department of Management Research,
Koerschtalstr. 26, 73770 Denkendorf, Germany

Kurzfassung: Die Rolle von intelligenten (im Sinne von ubiquitär informierten) Akteuren in (Verkehrs-)Systemen, die durch einen Widerspruch zwischen individueller und kollektiver Rationalität (=Kollektivgutproblem) geprägt sind, wird in mehreren exemplarisch gewählten Situationen modelliert. Zur Beurteilung der Situationen wird auf spieltheoretische Fragestellungen zurückgegriffen. Die Modelle werden durch die Ergebnisse von Befragungen unterstützt, bei den die Probanden wiederholt zwischen Alternativen wählen mussten, deren Auszahlungsfunktionen von den Entscheidungen aller Probanden abhängig war. Es zeigt sich, dass intelligente Akteure zwar in der Lage sind, dank ihrer Informiertheit ihr eigenes Nutzenniveau zu optimieren, dass der Systemnutzen aber nur in seltenen Fällen gesteigert wird. Auch im Falle der Informiertheit eines großen Teils der Akteure führt an sich vernünftiges Einzelverhalten nicht zwangsläufig zu einem optimalen Zustand in den Verkehrssystemen. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Möglichkeiten der Verkehrsbeeinflussung durch Information in den hier behandelten Systemen gering sind. Dies gilt besonders dann, wenn nicht informierte Akteure erfahren mit der Entscheidungssituation umgehen.

Schlagworte: Nutzergleichgewicht, Systemoptimum, Kollektivgüter, Verkehrsinformationssysteme, Spieltheorie

[1]E-mail: `lenz@isvs.uni-stuttgart.de`
[2]E-mail: `rainer.berkemer@itvd.uni-stuttgart.de`

1 Einführung

Die vorliegende Abhandlung behandelt und definiert zunächst einige für die Untersuchung zentrale Sachverhalte wie Kollektivgüter (Abschnitt 2.1), Gleichgewichte (Abschnitt 2.2) und intelligente Akteure (Abschnitt 2.3). Darauf aufbauend wird auf theoretische Art und Weise anhand einiger konkreter Beispiele der Einfluss, den umfassend informierte Verkehrsteilnehmer (= intelligente Akteure) auf das Gesamtsystem ausüben können, betrachtet (Abschnitt 3).

In Beispiel 1 wird ein einfaches System untersucht, bei dem Nutzer- und Systemoptimum bei der gleichen Nachfragesituation eintreten. Die Beispiele 2-4 diskutieren Fälle, die in den Verkehrswissenschaften zwar nicht unbekannt sind (Schleichverkehr, Downs-Paradox, Mitläufer-Effekt), in der Mikroökonomie bzw. in der Spieltheorie bereits als klassisch zu bezeichnen sind (Minority game, Gefangenendilemma, Assurance game). In Abschnitt 4 werden die Ergebnisse einer experimentellen Untersuchung der Verkehrsteilnahme zu den Beispielen 2-4 diskutiert. Abschnitt 5 fasst die Ergebnisse zusammen.

2 Definitionen

2.1 Kollektivgutprobleme

Die Verkehrssysteme in nahezu allen westlichen Ländern sind durch punktuelle Überlastungen charakterisiert. Daraus resultierende Verzögerungen sind für enorme externe Kosten verantwortlich, die sich nicht nur in Zeitkosten, sondern auch in erhöhten Umweltbelastungen durch Lärm und Schadstoffemissionen niederschlagen. Solche externen Effekte sind charakteristisch für Kollektivgüter (siehe [4, 25]). Tabelle 1 veranschaulicht das Güterspektrum von privaten und kollektiven Gütern.

Tabelle 1 Güterspektrum [15]

Private Güter	Meritorische Güter	Unreine Kollektivgüter	Reine Kollektivgüter
Markt funktioniert und wird akzeptiert	Markt würde funktionieren, wird aber politisch nicht akzeptiert	Markt versagt teilweise, Marktversagen wegen externer Effekte	Markt versagt vollständig; Nicht-Rivalität, Nicht-Ausschluss
$U_i = f(X_i)$	$U_i = f(X_i, X_j)$	$U_i = f(X_i, aX_j)$	$U_i = f(X)$
$X = X_i + X_j$	$X = X_i = X_j$	$X = X_i + X_j$	$X = X_i = X_j$
	Gekorene Kollektivgüter: aus politischen Gründen		Geborene Kollektivgüter: aus technischen Gründen
Hose	Bildung, Gesundheit, Kultur	Verkehr, Energie	Umweltschutz

Infrastrukturanlagen weisen, ebenso wie zahlreiche Einrichtungen des Erholungs- und Freizeitsektors folgende Eigenschaften auf [3]:

- Die Anlage (z.B. Straßennetz) ist unteilbar, d.h. kein Individuum kann einen spezifischen Teil des Gutes für sich reklamieren.
- Die Nutzung einer bereitgestellten Menge erfolgt nicht zwangsweise. Der einzelne Konsument kann vielmehr darüber entscheiden, in welchem Umfang er die Anlagen in Anspruch nehmen will.
- Mit wachsender Inanspruchnahme kann es zu gegenseitigen Beeinträchtigungen zwischen den Benutzern kommen („Rivalität im Konsum“).

Die zugehörige Nutzenfunktion ergibt sich zu

$$U^i = f(x^i, y, V)$$

mit x^i als der auf den Konsumenten i entfallenden Menge des individuell verbrauchbaren Konsumgutes, y als der zur Nutzung zur Verfügung stehenden Menge der Infrastrukturanlage und V als der Gesamtzahl der Nutzungen der Infrastruktur durch alle potenziellen Konsumenten (Verkehrsteilnehmer). Dabei gilt

$$\delta U^i/\delta x^i > 0 \quad \text{und} \quad \delta U^i/\delta y > 0.$$

Der Zusammenhang zwischen dem individuellen Nutzen und der Gesamtzahl der Verkehrsteilnehmer ist weniger eindeutig. Für die in der Folge behandelten Szenarien sollen Anlagen für den Pkw-Verkehr durch $\delta U^i/\delta V < 0$, öffentliche Verkehrsmittel durch $\delta U^i/\delta V > 0$ charakterisiert werden. Der Zusammenhang im Straßenverkehr ist eindeutig: Laut Fundamentaldiagramm ist die Anzahl der Fahrzeuge auf einem bestimmten Streckenabschnitt und deren mittlere Reisegeschwindigkeit negativ korreliert. Die getroffene Annahme für den öffentlichen Verkehr ist idealisiert und basiert auf dem Umstand, dass höhere Kundenzahlen im öffentlichen Verkehr niedrigere Preise und / oder höhere Taktfrequenzen – wie z.B. in den Spitzenstunden tatsächlich der Fall - zur Folge haben können. Auch die Fortbewegung ohne motorisierte Verkehrsmittel soll hier durch $\delta U^i/\delta V > 0$ charakterisiert werden.

Eine effiziente Nutzung einer Infrastrukturanlage ergibt sich dann, wenn der einzelne Konsument die Inanspruchnahme einer gegebenen Menge des Kollektivguts nur solange ausdehnt, wie sein eigener Nutzenzuwachs die durch die Qualitätsverschlechterung bewirkten Nutzereinbußen bei allen anderen noch übersteigt [3]. Verkehrsteilnehmer, die sich an diese Beschränkung halten, handeln zwar im Interesse des Gemeinwohls, erbringen aber einseitige Verzichtleistungen, die allen tatsächlichen Verkehrsteilnehmern zum Vorteil gereichen. Andererseits können Verkehrsteilnehmer, die sich an diese Beschränkung nicht halten, ihr Handeln als Teil ihrer Konsumentenfreiheit verstehen [5]. Individuell rationales Verhalten von Verkehrsteilnehmern kann sich kontraproduktiv zum gemeinsamen Interesse auswirken, entgegen der Annahme, dass die zwar eigennützigen, aber vernünftigen Individualentscheidungen zu einem akzeptablen Zustand in den Verkehrssystemen führen.

In der Verkehrswissenschaft wird davon ausgegangen, dass das Verhaltensprinzip des maximalen subjektiven Nutzens dem tatsächlichen individuellen Entscheidungsverhalten am besten entspricht. Es basiert auf der Annahme, dass jeder Verkehrsteilnehmer jeder möglichen Alternative bewusst oder unbewusst einen bestimmten subjektiven Nutzen zuordnet und diejenige Alternative wählt, die für ihn den größten subjektiven Nutzen aufweist [34]. Daraus kann ein Widerspruch zwischen individueller und kollektiver Rationalität resultieren, mithin kann ein Kollektivgutproblem konstatiert werden [8].

Grundsätzlich gibt es zwei Typen von Kollektivgutproblemen: tragedy of the commons und social loafing. Tragedy of the commons steht für Systeme in denen es für alle Akteure vorteilhaft ist, ein begrenztes Gut zu nutzen, während die Nichtnutzung anderen, möglicherweise konkurrierenden Akteuren ermöglicht, dies zu tun. Wird diese Strategie aber von allen verfolgt, resultiert Über-Nutzung, was die Vorteilhaftigkeit der Nutzung wieder mindert. Social loafing beschreibt die individuelle Vorteilhaftigkeit der Nichtnutzung eines Kollektivgutes. Für beide Fälle gibt es zahlreiche Beispiele aus dem Verkehrsbereich. Allen Beispielen gemeinsam ist die Diskrepanz zwischen Nutzergleichgewicht und Systemoptimum.

2.2 Nutzergleichgewicht und Systemoptimum

Für alle Verkehrssysteme und alle Nachfragesituationen besteht mindestens ein Nutzergleichgewicht und mindestens ein Systemoptimum. Rationale Akteure orientieren sich am Gleichgewichtspunkt eines Systems, da sie in allen anderen Situationen durch Wechsel ihrer Strategie bzw. Entscheidung einen höheren Nutzen erzielen können. Reale Verkehrssysteme konvergieren auf das Nutzergleichgewicht zu bzw. fluktuieren um den Gleichgewichtspunkt. Das Systemoptimum hat für den einzelnen Verkehrsteilnehmer keine praktische Bedeutung. Diese Diskrepanz ist seit langer Zeit bekannt. Pigou [26] bemerkte:

"Suppose there are two roads ABD and ACD both leading from A to D. If left to itself, traffic would be so distributed that the trouble involved in driving a "representative" cart along each of the two roads would be equal. But, in some circumstances, it would be possible, by shifting a few carts from route B to route C, greatly lessen the trouble of driving those still left in B, while only slightly increasing the trouble of driving along C. In these circumstances a rightly chosen measure of differential taxation against route B would create an "artificial" situation superior to the "natural" one."

Diese Formulierung verdeutlicht den praktischen Unterschied zwischen Gleichgewicht und Optimum. Wardrop [33] formulierte diesen Sachverhalt unter der Voraussetzung einer sehr großen Zahl von Verkehrsteilnehmern folgendermaßen (*Wardrops User Equilibrium Principle*):

"The travel times on all the routes actually used are equal, and less than those which would be experienced by a single vehicle on any unused path“ bzw. „every traveller follows the minimum travel time path".

Demgegenüber steht *Wardrops System Optimum Principle*:

"The travel times on all the routes actually used are of equal *marginal* travel time, and less than those which would be experienced by a single vehicle on any unused path“ bzw. "Every traveller follows the minium *marginal* travel time path"

Die Gleichgewichtsdefinition von Wardrop entspricht der Gleichgewichtsdefinition von Nash [24], übertragen auf ein N-Personen-Spiel (zur Theorie der Gleichgewichte: siehe auch [2, 6, 7, 10, 14, 23, 35]). Ein Nash-Gleichgewicht ist eine selbst-durchsetzende Kombination von miteinander konsistenten Erwartungen: Die Strategie s_i von Spieler i ist optimal gegeben seine Erwartungen über die Strategie s_j von Spieler j, während es für Spieler j tatsächlich optimal ist sich entsprechend den Erwartungen von Spieler i zu verhalten, wenn er selbst erwartet, dass Spieler i die Strategie s_i wählen wird. Kein Akteur hat den Anreiz von der Gleichgewichtssituation abzuweichen. Es gilt:

$$u_i(s_1,...s_i,...,s_n) = \max u_i(s_1,...s_i,...,s_n)$$

Systeme können auch durch zwei oder mehrere Gleichgewichtspunkte charakterisiert sein. In diesem Fall ist es a priori häufig nicht klar, welches Gleichgewicht von den Akteuren gewählt wird. Die trifft auch dann zu, wenn ein Pareto-effizientes Gleichgewicht existiert, beispielsweise wenn das Pareto-Gleichgewicht von einer anderen Gleichgewichtsituation risikodominiert wird. Eine Situation ist pareto-effizient, wenn es keine alternative Situation gibt, die jeden Akteur zumindest gleich gut stellt und mindestens einen Akteur besser stellt (siehe auch [12, 16, 20, 21]).

Das Erreichen der Gleichgewichtssituationen setzt voraus, dass jeder Verkehrsteilnehmer bei seinen Entscheidungen nicht nur seine subjektiven Präferenzen, den Preis pro Nutzung und die zur Verfügung stehende Menge der Infrastrukturanlagen kennt, sondern darüber hinaus auch Annahmen über das Verhalten von allen anderen möglichen Akteuren trifft. Erst wenn dies geschehen ist, kann die Nutzenfunktion spezifiziert werden. Die Nutzenfunktion aller potenziellen Akteure ist wiederum von der eigenen Verkehrsteilnahme abhängig. Die Rekursivität kann durch Kommunikation unter den Akteuren umgangen werden.

2.3 Intelligente Akteure

Die systemoptimale Auslastung der Verkehrssysteme, ermöglicht durch die Steigerung der Auslastung der Verkehrsmittel, der Erhöhung der Kapazität der Verkehrsinfrastruktur und der Verknüpfung der Verkehrsträger, wird häufig als wichtiges Ziel von Verkehrsinformationssystemen – vom klassischen Verkehrsfunk über multi-modales, dynamisches Routing bis zu antizipatorischen Verkehrsprognosen [32] – genannt [9, 17, 28]. Dem Verkehrsteilnehmer sollen unter den aktuell vorherrschenden Straßen- und Verkehrsbedingungen die (zeit-) kürzesten Wege zu den individuellen Zielen mitgeteilt werden. Verkehrsinformationssysteme dienen letztlich dazu, die eigene Entscheidung vor dem Hintergrund des Verhaltens anderer Verkehrsteilnehmer zu optimieren.

Welche Auswirkungen die Information der Verkehrsteilnehmer auf das Verkehrsgeschehen haben, ist nach wie vor ungeklärt. Dies liegt auch daran, dass einerseits technologische Machbarkeit allzu häufig im Vordergrund der Betrachtung steht, während andererseits das Verhalten der potenziellen Nutzer (z.B. Beeinflussbarkeit) und grundlegende ökonomische Prinzipien (z.B. der Kollektivgutcharakter der Verkehrsinfrastruktur, die Bedeutung des Nutzergleichgewichts, interpersonelle Abhängigkeiten) vernachlässigt werden.

Auf der Aggregatebene ergeben sich daraus folgende Fragestellungen:

- Wann und wie kann Information helfen, Systeme besser auszulasten und zu verknüpfen?
- Wo liegt der für das Erreichen des Systemoptimums notwendige Grad der Informiertheit der Verkehrsteilnehmer über die aktuellen Zustände der Verkehrssysteme? Bei 100% (ubiquitäre Informationslage), bei 0% (keinerlei Information) oder dazwischen?
- Ist der Grad der Informiertheit überhaupt wichtig, oder stellen sich nur minimale Abweichungen ein?

Übertragen auf die Individualebene stellen sich die Fragen wie folgt:

- In welchen Situationen wenden Verkehrsteilnehmer reine Strategien an? In welchen Situationen gemischte?
- Können Verkehrsteilnehmer als „statisch“ oder „dynamisch“ bezüglich ihrer Beeinflussbarkeit bezeichnet werden?
- Wie reagieren Verkehrsteilnehmer in Situationen mit mehreren Gleichgewichtszuständen?
- Welche Rolle spielen risiko-dominierte Gleichgewichtszustände?

Die Beantwortung dieser Fragen steht im Weiteren im Vordergrund. Dazu werden die Verkehrsteilnehmer folgendermaßen kategorisiert:

- *konventionelle Akteure bzw. Verkehrsteilnehmer*: verhalten sich in Entscheidungssituationen unreflektiert („x-beliebig“)

- *erfahrene Akteure bzw. Verkehrsteilnehmer*: zeichnen sich durch individuell rationales Verhalten aus, unter Kenntnis der Spezifikation der der Entscheidungssituation zu Grunde liegenden Alternativen ohne Kenntnis des Verhaltens der anderen, allerdings mit Kenntnis der den anderen Akteuren zugehörigen Nutzenfunktion.
- *intelligente Akteure bzw. Verkehrsteilnehmer*: sind über das Verhalten aller nicht intelligenten Verkehrsteilnehmer und auch über das Verhalten aller anderen intelligenten Verkehrsteilnehmer informiert. Die Gesamtheit aller intelligenten Akteure kann als ein singulärer Akteur betrachtet werden, der sich rational im Sinne der individuellen Nutzenmaximierung verhält.

Das Verhalten realer Verkehrsteilnehmer wird durch die Bandbreite zwischen konventionell und erfahren beschrieben. Regelmäßig durchgeführte Wege führen zu immer besserer Kenntnis der Entscheidungssituation und somit zu erfahrenem Entscheidungsverhalten. Intelligente Akteure stehen für ein durch Verkehrsinformationssysteme maximal denkbares Wissensniveau, was eine Maximalabschätzung der durch Information induzierbaren Wirkungen ermöglicht.

3 Der Einfluss intelligenter Akteure auf das Gesamtsystem

3.1 Ein symmetrisches System (Beispiel 1)

Gegeben sei ein geschlossenes Netzwerk mit einem Startpunkt (O) und einem Zielpunkt (D). Es gibt zwei Möglichkeiten um von O nach D zu kommen. Beide Teilstrecken K_{links} und K_{rechts} zwischen O und D sind durch eine belastungsabhängige Funktion y_i charakterisiert, mit

$$y_i = N - n_i.$$

Es ist: N die Gesamtheit aller Akteure
n_i die Zahl der Akteure auf dem Teilabschnitt K_i.

Der Gesamtnutzen auf einem Teilabschnitt K_i ergibt sich zu $U_i = y_i * n_i$. Das System ist symmetrisch, stellt also den Sonderfall dar, in dem das Nutzergleichgewicht und das Systemoptimum für den gleichen Belastungsfall auftreten (siehe Abbildung 1). Oder mit Wardrop gesprochen: Der Belastungsfall mit der geringsten Reisezeit für den n-ten Akteur und die Route mit der geringsten marginalen Reisezeit sind identisch.

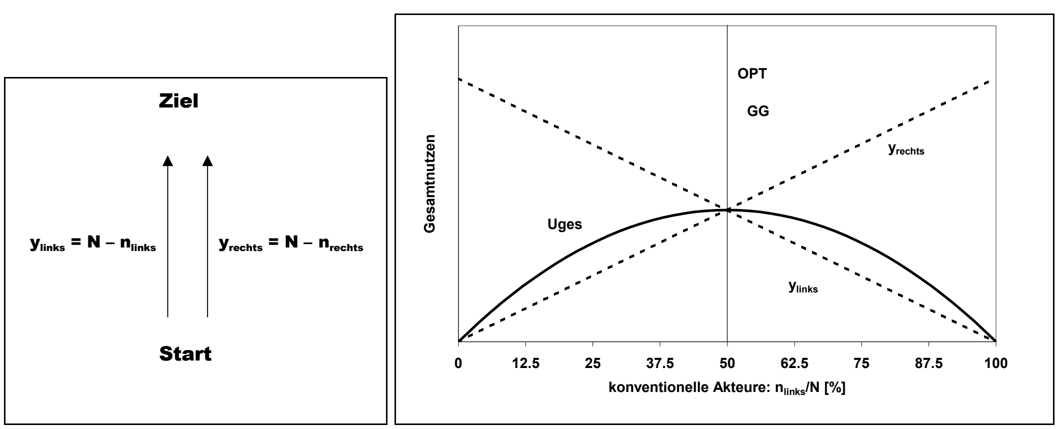


Abbildung 1 Symmetrisches System mit belastungsabhängigen Funktionen y (links) und dazugehöriger Gesamtnutzenfunktion U (rechts)

Aus dem rechten Teil der Abbildung 1 lässt sich leicht folgern, dass intelligente Verkehrsteilnehmer den Gesamtnutzen des Systems dann steigern können, wenn sich die konventionellen Akteure nicht optimal verhalten. Beträgt der Anteil der intelligenten Akteure mindestens 50%, so ist sichergestellt, dass beide Teilstrecken gleichmäßig belastet sind und das Systemoptimum unabhängig vom Verhalten der konventionellen Akteure erreicht wird. Dann gilt $n_{links} = n_{rechts} = N/2$, woraus ein Gesamtnutzen von

$$U_{ges\ OPT} = U_{ges\ GG} = 1/2 * \mathbf{N}^2$$

resultiert.

Im weiteren soll davon ausgegangen werden, dass sich alle erfahrenen Verkehrsteilnehmer über die Symmetrie des Netzes bewusst sind und auch sonst keinerlei Vorlieben für bestimmte Streckenabschnitte hegen. Die Wahrscheinlichkeit für jeden erfahrenen Akteur nach links oder rechts abzubiegen ist entsprechend $p_{links} = p_{rechts} = 0{,}5$ (probabilistisches Nutzergleichgewicht).

Dann ergibt sich für das System folgender Nutzen:

$$U_{ges} = U_{links} + U_{rechts} = \frac{1}{2^N} * \sum_{n_{links}=0}^{N} \binom{N}{n_{links}} * 2n_{links} * \left(N - n_{links}\right) = \frac{N}{2} * \left(N - 1\right)$$

Vergleicht man den Gesamtnutzen des probabilistischen Nutzergleichgewichts mit dem Gesamtnutzen im Falle des Systemoptimums, ergibt sich:

$$\lim_{N \to \infty} \left(\frac{U_{ges}}{U_{gesGG}} \right) = 1$$

Intelligente Akteure können den Systemnutzen gegenüber konventionellen Verkehrsteilnehmern deutlich steigern, wenn sich diese ungünstig verhalten; im Vergleich zur Situation mit erfahrenen Verkehrsteilnehmern ist nur eine Steigerung um den Faktor N / (N – 1) möglich. Für eine große Zahl von Akteuren konvergiert dieser Faktor gegen 1.

3.2 Schleichverkehr bzw. Minority Game (Beispiel 2)

Zwei Verkehrsteilnehmer fahren gleichzeitig auf einen Knotenpunkt zu, auf dem sie auf eine breite (links) und eine schmale (rechts) Straße abbiegen können, um ihr gemeinsames Ziel zu erreichen. Jeder der beiden Akteure muss seine Entscheidung unabhängig vom anderen treffen. Wählen beide Akteure die gleiche Straße, behindern sie sich gegenseitig, wobei die Behinderungen auf der schmalen Straße stärker sind als auf der breiten. Wählt nur ein Akteur die schmale Straße, so ist er zwar schneller, als wenn er auch die breite gewählt hätte, aber langsamer als der andere Akteur.

Dies ist eine mögliche Formulierung für das Minority Game mit zwei Akteuren. In der Spieltheorie ist das Minority Game als Spiel definiert, bei dem N Spieler zwischen zwei Möglichkeiten wählen müssen. Diejenigen, die die Alternative der Minderheit der Spieler wählen, gewinnen. Die Krux dieses Spieles liegt in der Wahl der Strategie: wenn alle Spieler die Situation gleich bewerten, werden sie die gleiche Alternative wählen und verlieren. Um ein für alle zumindest erträgliches Ergebnis zu gewährleisten, müssen die Spieler heterogen agieren. Abbildung 2 zeigt für diese Situationen exemplarisch Auszahlungsfunktionen und die daraus resultierenden Gleichgewichts- und Optimumsituationen.

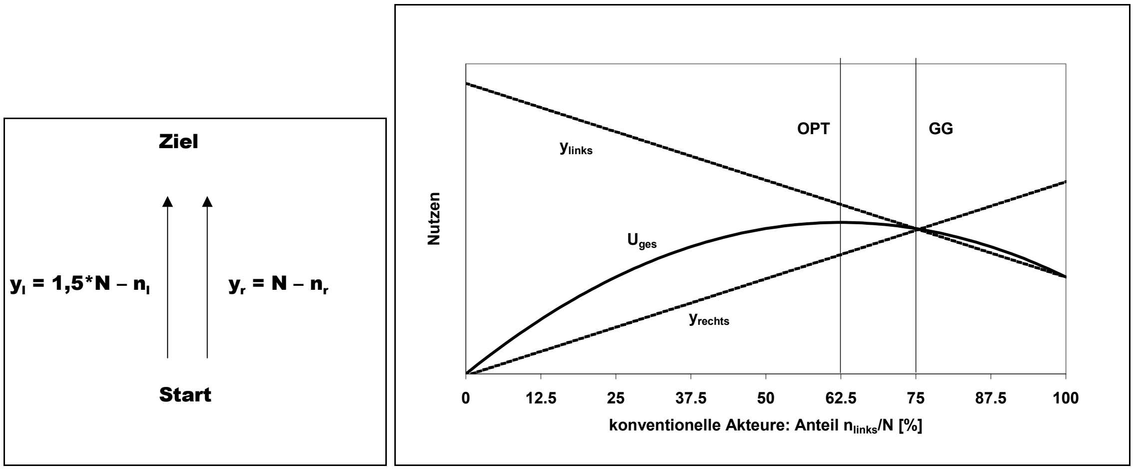


Abbildung 2 Schematische Darstellung der Auszahlungsfunktionen, der Gleichgewichts- und Optimumsituationen für das Beispiel „Schleichverkehr"

Betrachtet man dieses Beispiel unter der Annahme einer großen Zahl von Akteuren, zeigt sich – anders als bei identischen Auszahlungsfunktionen – eine Diskrepanz zwischen Systemoptimum und Nutzergleichgewicht.

Systemoptimum: $\Sigma\ y_i * n_i = \max.$ $\Rightarrow$ $n_{links} = 0{,}625 * N$; $n_{rechts} = 0{,}375 * N$
Nutzergleichgewicht: $y_{links} = y_{rechts}$ $\Rightarrow$ $n_{links} = 0{,}75 * N$; $n_{rechts} = 0{,}25 * N$

Die Frage ist nun, wie intelligente Verkehrsteilnehmer den Systemnutzen beeinflussen, abhängig von dem prozentualen Anteil der intelligenten Akteure an der Gesamtzahl und abhängig vom Verhalten der konventionellen Verkehrsteilnehmer. Abbildung 3 zeigt diese Zusammenhänge exemplarisch für 4 verschiedene Fälle: 5%, 10%, 50% und 75% intelligenter Akteure.

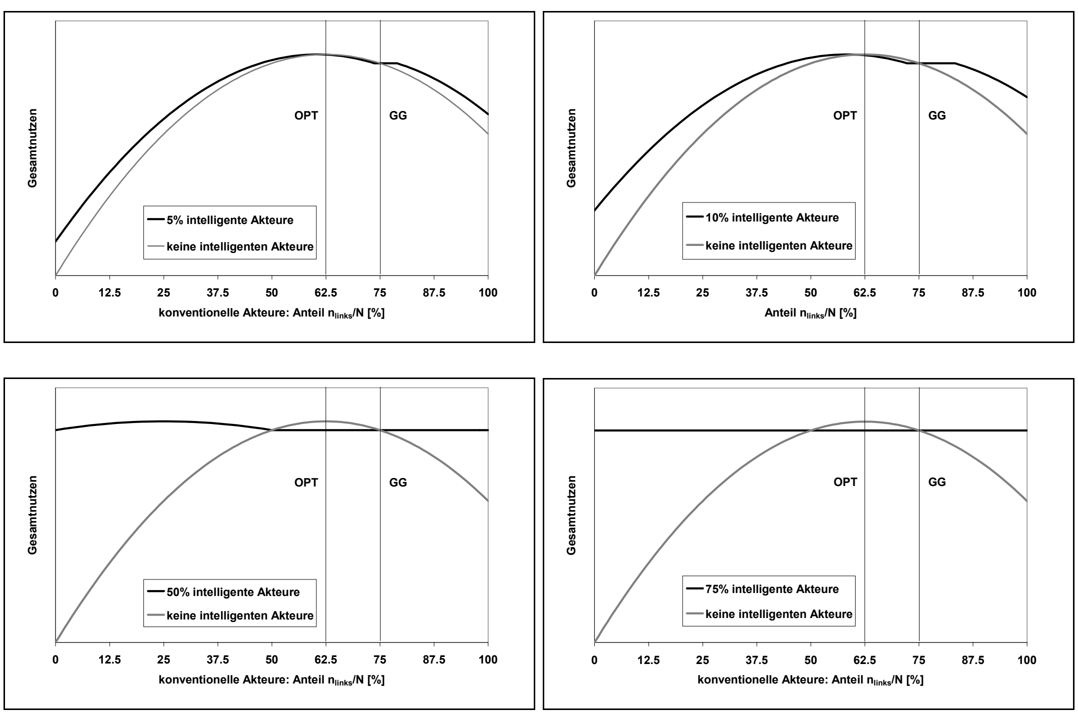


Abbildung 3 Gesamtnutzen des Systems „Schleichverkehr“ abhängig vom Anteil der intelligenten Akteure und vom Verhalten der konventionellen

Intelligente Akteure können den Gesamtnutzen im System nur erhöhen, wenn das Verhalten der konventionellen Verkehrsteilnehmer nicht zwischen Systemoptimum und Nutzergleichgewicht liegt, d.h. $n_{links}/N > 0{,}75$ oder $n_{links}/N < 0{,}625$ (siehe Abbildung 3 oben links und oben rechts). Allerdings ist auch dann eine Nutzensteigerung keinesfalls zwangsläufig. Ab einem bestimmten Anteil an intelligenten Akteuren (hier: 50%) steigert sich der Gesamtnutzen nur dann, wenn er sich unterhalb des Gesamtnutzens im Gleichgewichtsfall befindet, d.h. $n_{links}/N > 0{,}75$ oder $n_{links}/N < 0{,}5$ (Abbildung 3 unten links). Steigt der Anteil der intelligenten Akteure auf 75% an, so wird unabhängig vom Verhalten der konventionellen Akteure der dem Nutzergleichgewicht entsprechende Gesamtnutzen erreicht (Abbildung 3 unten rechts).

Liegt der Anteil der konventionellen Akteure, die sich für links entscheiden, zwischen 62,5% (Gleichgewicht) und 75% (Systemoptimum), so wird durch die intelligenten Akteure der Gesamtnutzen des Systems unabhängig von deren Anteil gemindert. Grund hierfür ist, dass sich die intelligenten Akteure am Nutzergleichgewicht orientieren, das Systemoptimum hat für den Einzelnen keine praktische Bedeutung.

Das Nutzergleichgewicht ist ein stabiles, gemischtes Nash-Gleichgewicht, das heißt, die beste Strategie für uninformierte Verkehrsteilnehmer ist die zufällige Entscheidung für eine der beiden Routen. Die Wahrscheinlichkeit für die Wahl der breiten Straße muss aber 75% betragen. Dies kann beispielsweise durch zweimaliges Münzwerfen geschehen: 2x Kopf: schmale Straße, ansonsten: breite Straße. Der Erwartungswert des Gesamtnutzens bei diesem Vorgehen summiert sich zu

$$U_{ges} = U_{links} + U_{rechts} = \begin{array}{l} \left(\sum_{n_{links}=0}^{N} \binom{N}{n_{links}} * 0{,}75^{n_{links}} * (1-0{,}75)^{(N-n_{links})} * (1{,}5 * N - n_{links}) * n_{links}\right) + \\ \left(\sum_{n_{links}=0}^{N} \binom{N}{N-n_{links}} * 0{,}75^{n_{links}} * (1-0{,}75)^{(N-n_{links})} * (N - n_{links}) * n_{links}\right) \end{array}$$

$$= \tfrac{3}{4} * N * (N - 0{,}5).$$

Wie im vorherigen Beispiel wird auch hier der Gesamtnutzen des probabilistischen Nutzengleichgewichts dem Gesamtnutzen der tatsächlichen Gleichgewichtssituation für eine große Zahl von Akteuren gegenübergestellt. Mit

$$U_{ges\,GG} = \tfrac{3}{4} * N^2$$

ergibt sich wiederum

$$\lim_{N \to \infty}\left(\frac{U_{ges}}{U_{gesGG}}\right) = 1.$$

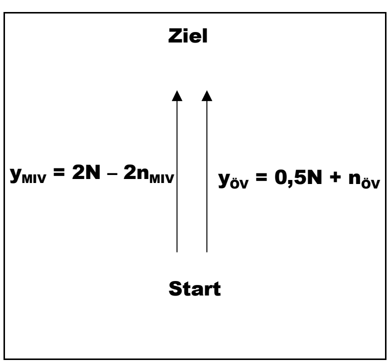
Die Vorteilhaftigkeit der Informiertheit hängt stark vom Verhalten der konventionellen Teilnehmer ab. Unterstellt man den konventionellen Teilnehmern ein Verhalten, das dem probabilistischen Nutzergleichgewicht nahe kommt, ist durch informierte Verkehrsteilnehmer keine Nutzensteigerung mehr möglich.

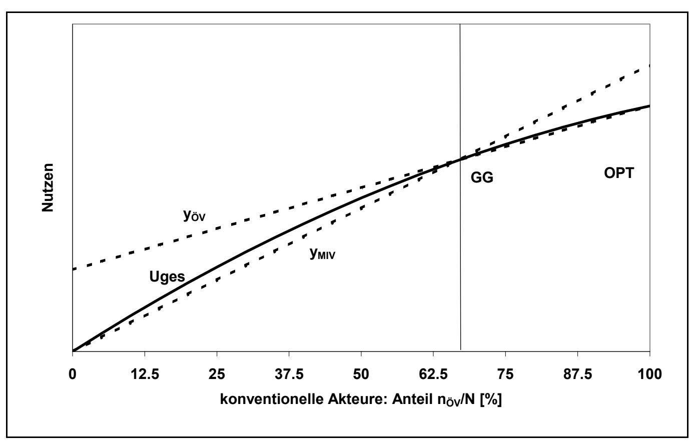
3.3 Downs-Paradox / Gefangenendilemma (Beispiel 3)

Wie in Abschnitt 2.2 erläutert, weisen über die Zahl der Nutzer aufgetragene Kostenfunktionen der Benutzung von Straßen positive Steigungen auf, Kostenfunktionen von öffentlichen Transportsystemen negative. Vor diesem Hintergrund betrachtete Downs [13] eine verkehrliche Relation, die durch eine Straße und eine Bahnlinie charakterisiert ist. Der Gleichgewichtspunkt wird durch den Schnittpunkt der beiden Funktionen bestimmt. Der Modal-Split an diesem Gleichgewichtspunkt ist dadurch gekennzeichnet, dass alle Verkehrsteilnehmer, unabhängig vom gewählten Verkehrsmittel, die gleichen Kosten für die Ortsveränderung bezahlen müssen. Die Frage war nun, wie sich der Modal-Split und die von den Verkehrsteilnehmern aufzubringenden Kosten verändern, vorausgesetzt, die Kapazität der vorhandenen Straße wird erhöht. Downs zeigt, dass es keineswegs zwangsläufig ist, dass die aufzubringenden Kosten der Verkehrsteilnehmer nach dem Ausbau der Straße geringer sind:

„If a very large number of persons shift from segregated track transit to automobiles, the cost of such transit per passenger may rise so that its attractiveness is drastically reduced. In such a case, congestion on the highways may have to become slightly worse than it was before the expressway was opened and automobile travel becomes just as undesirable as segregated track transit level“. „We thus arrive at the paradoxical conclusion that the opening of an expressway could conceivably cause traffic congestion to become worse instead of better, and automobile commuting times to rise instead of fall“ (zum Downs-Paradox siehe auch [1, 22]). Betrachtet man diese Situationen unter der Annahme eines 2-Personen-Spiels, zeigt sich die Äquivalenz der Vorher-Situation mit dem Chicken Game („Zwei Jugendliche fahren mit gestohlenen Autos aufeinander zu. Wer dem anderen ausweicht, ist der Feigling“ [20]) und die der Nachher-Situation mit dem Gefangenendilemma („Two men charged with a joint violation of law, are held seperately by the police. Each is told: If he confesses and the other does not, the former will be given a reward and the latter will be fined. If both confess, each will be fined. If neither confesses, the police has plans to sentence both to a year in prison on minor charges“ [27]).

Abbildung 4 zeigt für beide Situationen exemplarisch die Auszahlungsfunktionen und die daraus resultierenden Gleichgewichts- und Optimumsituationen.





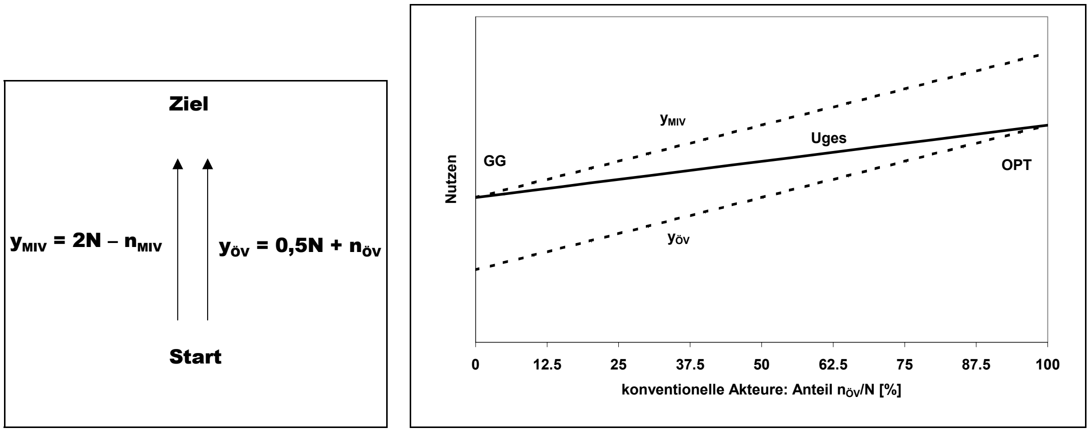


Abbildung 4 Das Downs-Paradox: Auszahlungsfunktionen, Nutzergleichgewicht und Systemoptimum im Vorher (oben)- und Nachher-Fall (unten)

Beide Situationen sind dadurch charakterisiert, dass sich der Nutzen beider Verkehrsmittel mit zunehmender Anzahl öffentlicher Verkehrsteilnehmer steigert (vgl. [8]). Die Vorher-Situation weist einen Schnittpunkt der beiden Auszahlungsfunktionen auf, so dass angenommen werden kann, dass die Verkehrsmittelwahl erfahrener Akteure auf Dauer Richtung Gleichgewichtspunkt konvergiert und dann um diesen schwankt. Die vorliegenden Zahlenbeispiele haben auch die Lage des Systemoptimums gemeinsam, das eintritt, wenn alle Akteure öffentliche Verkehrsmittel benutzen (Beim Chicken Game ist im Gegensatz zum Gefangenendilemma die Lage des Systemoptimums nicht notwendigerweise bei 100% ÖV.). In diesem Fall können Verkehrsteilnehmer ihre Auszahlung verbessern, wenn sie auf den Pkw umsteigen: in der Vorher-Situation gilt dies nur für eine bestimmte Anzahl von Akteuren, in der Nachher-Situation für alle.
Beim Gefangenendilemma ist unter der Voraussetzung, dass der eine nicht weiß, was der andere tut, das *Defektieren* bzw. die Nutzung des Pkw die einzige stabile Strategie. Es führt unabhängig vom Verhalten der anderen zu einem höheren individuellen Nutzen (vgl. [11]). Der Gebrauch des Pkw dominiert die Benützung öffentlicher Verkehrsmittel. Allerdings - dies ist die klassische Situation des Gefangenendilemmas – ist der Nutzen jedes einzelnen in der Gleichgewichtssituation nach Ausbau der Straße niedriger als zuvor. Der Widerspruch zwischen individueller und kollektiver Rationalität wird hier besonders deutlich.

Obwohl keinerlei Informationen über das Verhalten anderer Verkehrsteilnehmer vorliegen, wählen erfahrene Akteure den Pkw als Verkehrsmittel (Abbildung 5). Die Frage lautet nun, welche Entscheidung intelligente Akteure treffen. Wie bereits angedeutet, ist die Vorteilhaftigkeit des privaten Pkws unabhängig vom Verhalten aller anderen Verkehrsteilnehmer gegeben. Das Wissen über deren Verhalten ändert diese Situation nicht grundsätzlich; einziger Vorteil intelligenter Akteure ist das Wissen über den absoluten Nutzen ihrer Entscheidung. Abbildung 5 verdeutlicht diese Situation. Wenn der Anteil der intelligenten Verkehrsteilnehmer weniger als 100% beträgt, können diese das System nicht verbessern. Durch die Entscheidung für den Pkw reduziert sich der kollektive Nutzen sogar. Beträgt der Anteil dagegen 100%, führt die Entscheidung für das öffentliche Verkehrsmittel zum Systemoptimum.

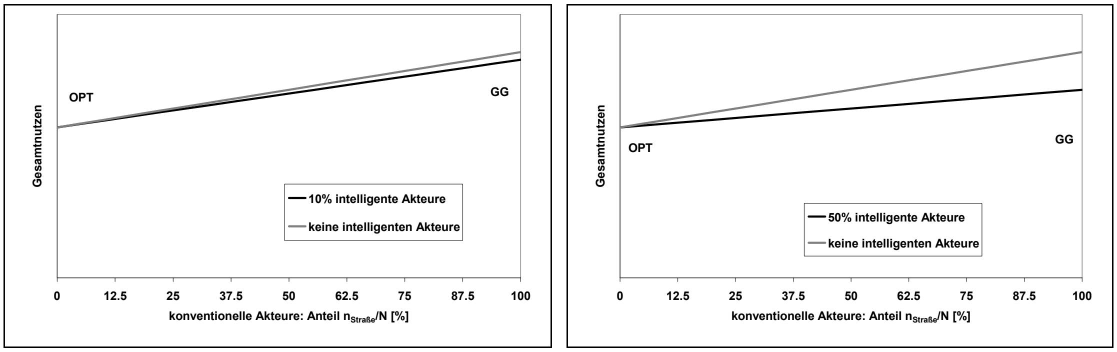


Abbildung 5 Gesamtnutzen des Systems „Downs-Paradox“ abhängig vom Anteil der intelligenten Akteure und vom Verhalten der nicht intelligenten

3.3 Mitläufer Effekt / Assurance game (Beispiel 4)

Ein Teilnehmer am Einkaufsverkehr kann zwischen der Fahrt mit dem eigenen Pkw oder einem Spaziergang zum nahegelegenen Supermarkt wählen. Er pflegt das Auto zu benutzen. Eines Tages kommt er zu der Einsicht, dass es mit dem Verkehr so nicht weitergehen kann und er mit gutem Beispiel vorangehen sollte. Er erwägt, in Zukunft zu Fuß zum Supermarkt zu gehen. Der Einkäufer merkt jedoch relativ schnell, dass seine neue Verkehrsmittelwahl unsinnig ist. Durch seine Enthaltung vom motorisierten Verkehr bringt er sich in Unannehmlichkeiten (Lärm und Abgase auf dem Gehweg). Für alle anderen Verkehrsteilnehmer verkürzt sich dadurch, wenn auch nur marginal, die Reisezeit zum Supermarkt. Er hat sogar einem neuen Kunden die Teilnahme am Individualverkehr ermöglicht. Kurz, er hat mit seiner Entscheidung nichts erreicht. Selbst wenn sein Beispiel epidemisch wirken sollte und sich ihm eine größere Zahl anschließt – umso besser für den Rest, dessen Motivierung zum Umsteigen mit jedem Konvertierten sinkt. Für den Einkäufer zahlt es sich aus, zum Auto zurückzukehren (nach [29]). Dieses Beispiel kann durch folgende Auszahlungsfunktionen charakterisiert werden (Abbildung 6).

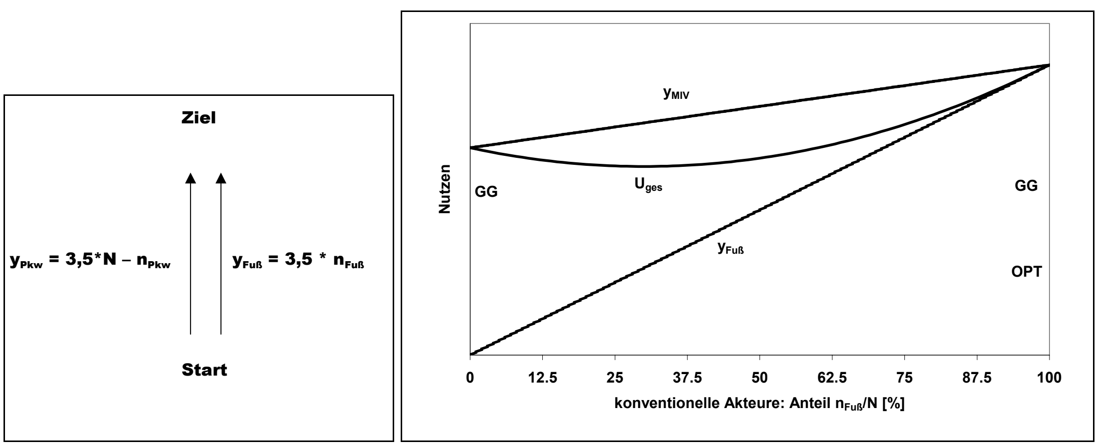
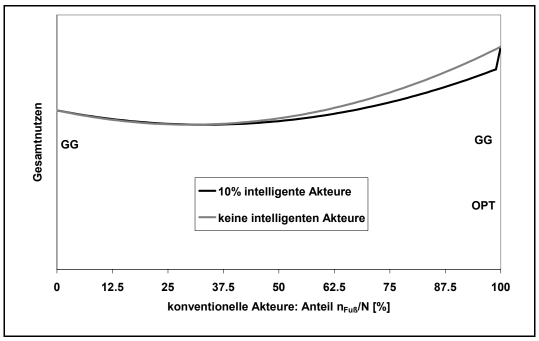


Abbildung 6 Schematische Darstellung der Auszahlungsfunktionen, der Nutzergleichgewicht und des Systemoptimums beim Mitläufer Effekt /Assurance Game

Die Auszahlungsfunktion zeigt, dass die Kombinationen Fuß: 100% / Pkw: 0% und Fuß: 0% / Pkw: 100% Nash-Gleichgewichte sind. Nur ersteres ist ein pareto-effizientes Gleichgewicht und stellt somit auch das Systemoptimum dar.

Die Besonderheit dieses Beispiels ist das Risiko, das der Entscheidung für den Fußweg innewohnt: benutzt nur ein geringer Anteil der Akteure seinen Pkw, so mindert sich der Nutzen der Fußgänger stark. Spieler, die dieses Risiko nicht eingehen wollen, wählen den Pkw als Verkehrsmittel, das ihnen immerhin 80 bis 90 % des maximal möglichen Nutzens garantiert. Das Gleichgewicht 100% Fuß ist dann vom Gleichgewicht 100% Pkw risikodominiert. Die evolutionäre Spieltheorie befasst sich mit der Frage, welches Gleichgewicht von rationalen Akteuren gespielt werden sollte und unter welchen Umständen sich überhaupt ein Gleichgewicht durchsetzt [18].

Im vorliegenden Fall ist ist die Frage nach dem sich durchsetzenden Gleichgewicht auch bei Beteiligung intelligenter Akteure unzweifelhaft: Intelligente Akteure benutzen den Pkw, so lange es konventionelle Akteure gibt, die auch mit dem Pkw fahren. Nur wenn alle konventionellen Akteure zu Fuß gehen, gehen die intelligenten auch zu Fuß (Abbildung 7).



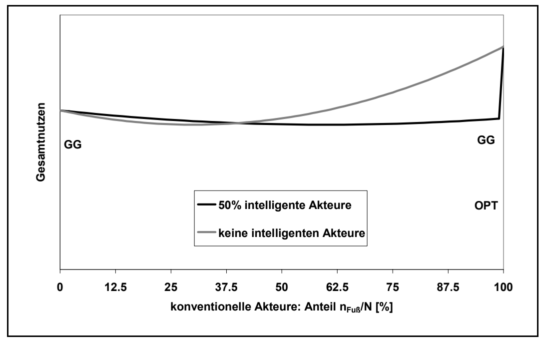


Abbildung 7 Auszahlungsfunktion und Systemnutzen in Abhängigkeit des Anteils der Fußgänger beim Mitläufer – Effekt

Intelligente Akteure steigern den Gesamtnutzen des Systems, wenn die konventionellen Akteure überwiegend den Pkw benutzen – allerdings nur minimal. Gehen die konventionellen Akteure in der Mehrzahl zu Fuß, führt die individuell rationale Entscheidung der intelligenten Akteure zu einer Minderung des Gesamtnutzens. Das Verhalten erfahrener Akteure und das Verhalten intelligenter Akteure ist identisch, da ebenso wie beim Downs–Paradox das Wissen über das Verhalten der anderen Akteure keinen Einfluss auf das eigene Verhalten hat – zumindest solange nicht alle anderen Akteure zu Fuß gehen.

4 Experimentelle Untersuchungen

4.1 Design der Experimente

In den Monaten Mai und Juni 2002 erklärten sich 14 Studenten der Fakultät Bauingenieurwesen der Universität Stuttgart bereit, an folgender aus drei Teilexperimenten bestehender Untersuchung teilzunehmen:

Für jedes Teilexperiment sind zwei Alternativen A und B gegeben, die durch Auszahlungsfunktionen spezifiziert sind. Die Auszahlung hängt von der eigenen Wahl und der Entscheidung der anderen Probanden ab. Jedes Teilexperiment wird acht Mal wiederholt. Nach jeder Runde wurden die Ergebnisse (jeweils die Anzahl der Spieler, die sich für A und B entschieden haben und die zugehörige Auszahlung) bekannt gegeben. Sieger jedes Teilexperiments war, wer am Ende jeweils die höchste Punktzahl erreicht hat (Tabelle 2).

Tabelle 2 Auszahlungsfunktionen der drei Teilexperimente

	Teilexperiment 1:	Teilexperiment 2:	Teilexperiment 3:
	Schleichverkehr	Downs-Paradox	Mitläufer-Effekt
A	$y_A = 6 - (2/7) * n_A$	$y_A = 2 + (2/7) * n_A$	$y_A = 14 - (2/7) * n_A$
B	$y_B = 4 – (2/7) * n_B$	$y_B = 8 – (2/7) * n_B$	$y_B = n_B$

4.2 Schleichverkehr/Minority Game

Entsprechend den Ausführungen in Abschnitt 3.2 ist das System im Nutzergleichgewicht, wenn sich 75% oder 10,5 der 14 Teilnehmer für A und 25% oder 3,5 für B entscheiden. Das Systemoptimum wird gespielt, wenn sich 62,5% oder 8,75 der 14 Teilnehmer für A und 37,5% oder 5,25 für B entscheiden. Für $n_B = 4$ und $n_B = 5$ befindet sich das System zwischen Nutzergleichgewicht und Systemoptimum. Dies wird in 4 von 8 Spielrunden gespielt (i = 2, 3, 6, 8). Abbildung 8 zeigt die Ergebnisse des Teilexperiments Schleichverkehr/Minority Game.

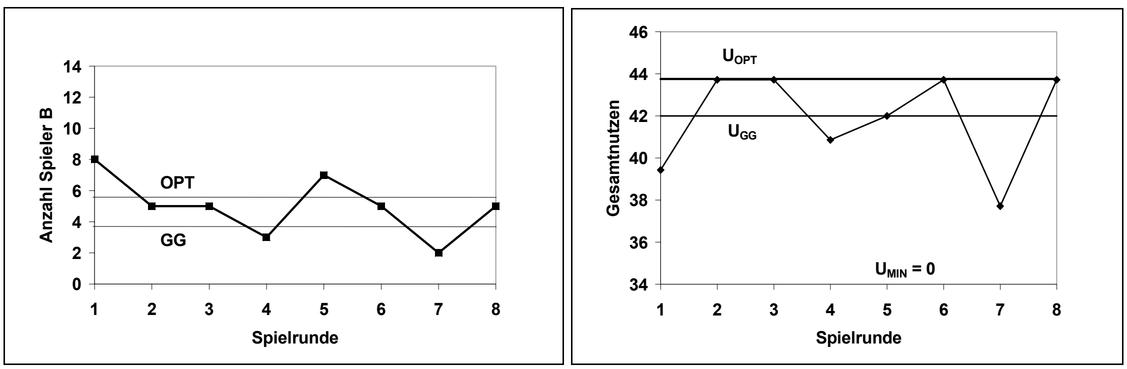


Abbildung 8 Ergebnis des Teilexperiments Schleichverkehr/Minority Game

Entsprechend den Ausführungen in Abschnitt 3.2 ist das System im Nutzergleichgewicht, wenn sich 75% oder 10,5 der 14 Teilnehmer für A und 25% oder 3,5 für B entscheiden. Das Systemoptimum wird gespielt, wenn sich 62,5% oder 8,75 der 14 Teilnehmer für A und 37,5% oder 5,25 für B entscheiden. Für $n_B = 4$ und $n_B = 5$ befindet sich das System zwischen Nutzergleichgewicht und Systemoptimum. Dies wird in 4 von 8 Spielrunden gespielt (i = 2, 3, 6, 8). Abbildung 8 zeigt die Ergebnisse des Teilexperiments Schleichverkehr/Minority Game.

- Auf Grund der geringen Zahl an Spielrunden können keine definitiven Aussagen zur Konvergenz getroffen werden. Möglicherweise ist auch der Umstand, dass die Gleichgewichtssituation nicht ganzzahlig ist, mitverantwortlich für Fluktuation. Selten et al. [30] haben ein ähnliches Experiment ($y_A = N/3 + 2n_A$; $y_B = 2N/3 + 3n_B$) mit 18 Probanden und 200 Runden durchgeführt: „...The mean number on both roads tend to be very near to the equilibrium. Nevertheless, fluctuations persist until the end of the sessions...“. Weitere Experimente siehe [19, 31].
- Gesamtsieger waren die beiden Spieler, die sich immer für die breite Straße (Alternative A) entschieden haben. Die theoretisch erfolgreichste Strategie – eine große Zahl von Probanden vorausgesetzt - ist die zufällige Entscheidung mit $p_A = 0,75$ und $p_B = 0,25$.
- Die schlechteste Strategie war, immer die schmale Straße (Alternative B) zu nehmen.

- Insgesamt vier Spieler haben sich immer für die gleiche Alternative entschieden, ebenfalls 4 Spieler haben ein Mal gewechselt, ein Spieler zwei Mal und 5 Spieler 3 Mal.
- 19 der 21 Wechsel wurden nach Verlustrunden vollzogen. 13 dieser 19 Wechsel hatten einen erneuten Verlust zur Folge. „...road changes may also be attempts to improve payoffs. The finding of a negative correlation between a subjects payoff and number of road changes suggests that on the average such attempts are not successful... (Selten et al.)"

4.3 Downs-Paradox/Gefangenendilemma

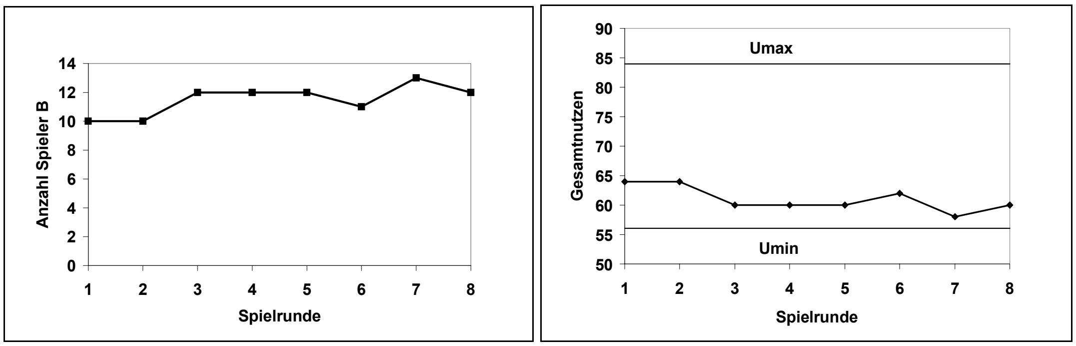


Abbildung 9 Ergebnis des Teilexperiments Downs-Paradox/Gefangenendilemma

- Das System konvergiert wie erwartet gegen das Nutzergleichgewicht. Allerdings gibt es in allen acht Runden auch Spieler, die die für sie unvorteilhafte Alternative A wählen.
- Gesamtsieger waren die sechs Spieler, die sich in allen Runden für Alternative B entschieden haben.
- Sieben Spieler haben in allen Runden die gleiche Alternative gewählt. Drei Spieler haben ein Mal gewechselt, je ein Spieler hat zwei bzw. drei Mal gewechselt und zwei Spieler haben vier Mal gewechselt.

4.4 Mitläufer-Effekt/ Assurance Game

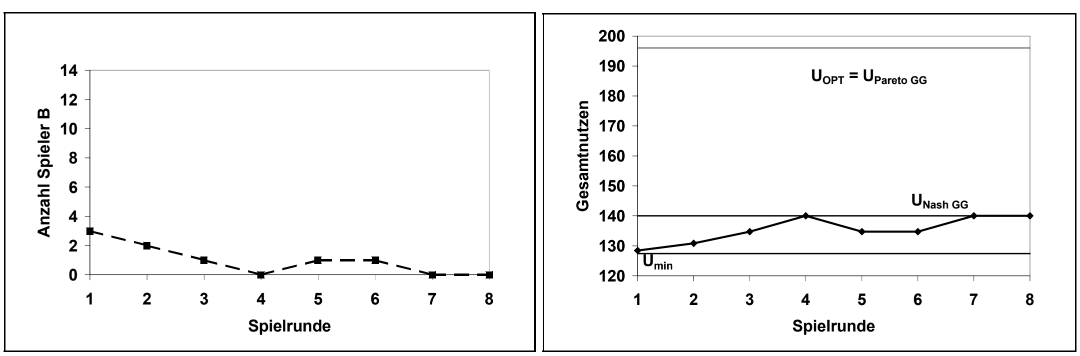


Abbildung 10 Ergebnis des Teilexperiments Mitläufer-Effekt/ Assurance Game

- Das System konvergiert wie erwartet gegen das „sichere" Nutzergleichgewicht und nicht gegen das risikodominierte aber pareto-effiziente Gleichgewicht. Pareto-effiziente Gleichgewichte können bei rationalem Verhalten der Akteure also nicht grundsätzlich als gespielte Strategie erwartet werden.

- Allerdings gibt es in einigen Runden auch Spieler, die die für sie unvorteilhafte Alternative A wählen.

5 Schlussfolgerungen

Welche Auswirkungen die Information der Verkehrsteilnehmer über alternative Routen oder Verkehrsmittel auf das Verkehrsgeschehen haben, ist nach wie vor ungeklärt. Die vorliegende Abhandlung zeigt die besondere Bedeutung dreier der Verkehrsinfrastruktur und den Verkehrsteilnehmern immanenten Eigenschaften:

- Verkehrssysteme sind Kollektivgüter.
- Es gibt sehr häufig eine Diskrepanz zwischen Nutzergleichgewicht und Systemoptimum.
- Rational agierende Verkehrsteilnehmer orientieren sich am Nutzergleichgewicht.

Die Berücksichtigung dieser Tatbestände bei der Abschätzung von Wirkungen von Eingriffen in die Verkehrssysteme – nicht nur durch Information, sondern auch durch Ausbau von Infrastruktur oder anderweitige Veränderungen der Kostenfunktionen – kann vor unerwünschten Resultaten schützen, sind doch das Ausmaß und die Richtung der Wirkungen häufig anti-intuitiv.

Die untersuchten Beispiele zeigen, dass Wirkungen, die auf Informiertheit von Verkehrsteilnehmern zurückzuführen sind, nicht immer der Intention, d.h. der Auslastung der Verkehrsmittel und der Erhöhung der Kapazität der Verkehrsinfrastruktur entsprechen. In den Beispielen 1 und 2 (Schleichverkehr/ Minority Game) können intelligente Akteure den kollektiven Nutzen zwar steigern. Die Steigerung ist aber nur dann relevant, wenn das Verhalten der übrigen Verkehrsteilnehmer ungünstig ist. Der sich gegenüber einer Situation mit erfahrenen Akteuren einstellende Nutzengewinn ist vernachlässigbar. Grund hierfür ist das individuell rationale aber nicht kooperative Entscheidungsverhalten der intelligenten Akteure, die das System zum Nutzergleichgewicht und nicht zum Optimum konvergieren lassen – genauso wie es auch bei Voraussetzung erfahrener Akteure der Fall ist.

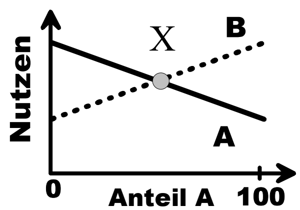
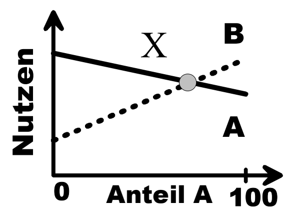
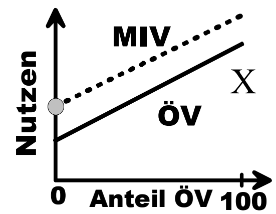
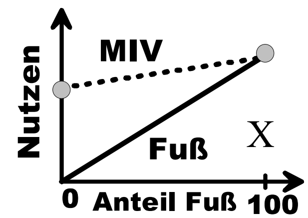
Beispiel	1	2	3	4
Sachverhalt	Routenwahl im MIV (zwei „gleiche“ Routen A und B)	Routenwahl im MIV (breite Route A, schmale Route B)	Verkehrsmittelwahl ÖV/MIV	Verkehrsmittelwahl MIV/zu Fuß
Verkehr	Links oder rechts?	Schleichverkehr	Downs-Paradox	Mitläufer-Effekt
Spieltheorie	Minority game	Minority game	Gefangenendilemma	Assurance game (Sonderfall: Pareto-effizientes GG ist risikodominiert)
Auszahlungsfunktionen ● Gleichgewicht X Optimum				
stabile Gleichgewichtspunkt(e)	Anteil A = 50; Anteil B = 50	Anteil A = 75; Anteil B = 25	Anteil ÖV = 0; Anteil MIV = 100	Anteil zu Fuß = 0; Anteil MIV = 100; Anteil zu Fuß = 100; Anteil MIV = 0 (risikodominiert)
Systemoptimum	Anteil A = 50; Anteil B = 50	Anteil A = 62,5; Anteil B = 37,5	Anteil ÖV = 100; Anteil MIV = 0	Anteil zu Fuß = 0; Anteil MIV = 100
Systemzustand bei erfahrenen Akteuren	Probabilistisches Nutzergleichgewicht	Probabilistisches Nutzergleichgewicht	System konvergiert zum Nutzergleichgewicht	System konvergiert zum nicht-pareto-effizienten Gleichgewichtspunkt
Systemzustand bei intelligenten Akteuren	Nutzergleichgewicht (=Optimum)	Nutzergleichgewicht (≠ Optimum)	Nutzergleichgewicht	System konvergiert zum nicht-pareto-effizienten Gleichgewichtspunkt
Dominante Strategie erfahrener Verkehrsteilnehmer	zufällige Entscheidung für A oder B mit $p_A = p_B = 0,5$	zufällige Entscheidung für A oder B mit $p_A = 0,75$ und $p_B = 0,25$	MIV	MIV
intelligente Akteure (Anteil < 100%) verbessern das System...	....nur dann, wenn sich konventionelle Akteure ungünstig verhalten.	....nur dann, wenn sich konventionelle Akteure ungünstig verhalten.	....niemals.	....nur dann geringfügig, wenn sich konventionelle Akteure bereits günstig verhalten.

Abbildung 11 Zusammenfassende Darstellung der Bespiele

Die Beispiele 3 (Downs–Paradox/ Gefangenendilemma) und 4 (Mitläufer–Effekt/ Assurance Game) zeigen, dass Erfahrung und Information auch kontraproduktiv bezüglich der Steigerung des kollektiven Nutzens sein können. Das Downs-Paradox beschreibt eine Situation, die zwangsläufig zu einer Nutzenminderung durch informierte Akteure führt. Beim Mitläufer-Effekt können intelligente Akteure immerhin leichte Nutzensteigerungen bewirken, wenn das Verhalten der nicht intelligenten Akteure schon nahe des Nutzergleichgewichts ist. Abbildung 11 zeigt zusammenfassend die Ergebnisse aller Beispiele.

Große Teilnehmerzahlen bzw. Betrachtungen auf der Aggregatebene marginalisieren die Interdependenzen zwischen den Reaktionen der verschiedenen Akteure bzw. vernachlässigen den Einfluss jedes einzelnen Individuums auf das Gesamtresultat. Spieltheoretische Ansätze für Problemsituationen mit kleinen (Verkehrs-)Teilnehmerzahlen (2-, 3- oder 4-Personen-Spiele) können hilfreich sein, wenn das gleiche Problem unter der Voraussetzung einer großen Teilnehmerzahl betrachtet wird. Zukünftig sollte die Theorie auf komplexere Situationen, d.h. realitätsnäheren Topologien und Auszahlungsfunktionen angewandt werden. Die experimentelle Überprüfung theoretisch ermittelter Resultate muss dabei eine zentrale Rolle spielen.

6 Literatur

[1] Abraham, J.E., J.D.Hunt, 2001, Transit System Management, Equilibrium Mode Split and the Downs-Thompson Paradox. Department of Civil Engineering, University of Calgary.

[2] Altman, E., R. El Azouzi, V. Abramov, 2002, Non-Cooperative Routing in Loss Networks. Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique. Rapport de Recherche N° 4405. Sophia Antipolis.

[3] Arnold, V., 1984, Theorie der Kollektivgüter. München : Vahlen.

[4] Arrow, K.J., 1963, Social Choice and Individual Values. New York : Wiley.

[5] Axhausen, K.W., 1999, Kunde oder Bürger: das Dilemma der Verkehrsteilnehmer. Arbeitsbericht Nr. 20. Institut für Verkehrsplanung, Transporttechnik, Straßen- und Eisenbahnbau. ETH Zürich. Zürich 1999.

[6] Beckmann, M.J., C.B. McGuire, C. Winston, 1956, Studies in the Economics of Transportation. New Haven : Yale University Press.

[7] Berger, C., A. Ghouila-Houri, 1962, Programmes, Jeux et Reseaux de Transport. Paris : Dunod.

[8] Berkemer, R., 2000, Modal Split and Social Dilemmas. In: Helbing, D., H.J. Herrmann, M. Schreckenberg, D.E. Wolf: Traffic and Granular Flow ´99. Social, Traffic and Granular Dynamics. Springer: Heidelberg.

[9] Bonsall, P., 2000, Information System and other intelligent Transport System Innovation. In: Hensher, D.A., Button, K.J.: Handbook of Transport Modelling. Elsevier Science.

[10] Braess, D., 1968, Über ein Paradoxon aus der Verkehrsplanung. In: Unternehmensforschung 12, S. 258 – 268.

[11] Dietiker J., P. Regli, F. Davatz, 2002, Warum steht Paul Müller lieber im Stau als im Tram? Motive der Verkehrsteilnahme – Teil 2. Forschungsauftrag auf Antrag der Vereinigiung Schweizerischer Verkehrsingenieure (SVI).

[12] Dixit, A.K. & B.J. Nalebuff, 1997, Spieltheorie für Einsteiger-strategisches Know-how für Gewinner. Stuttgart : Schäffer-Poeschel.

[13] Downs, A., 1962, The Law of Peak-Hour Expressway Congestion. In: Traffic Quarterly, 16. S. 393-409.

[14] Friesz, T.L., D. Bernstein, 2000, Analytical Dynamic Traffic Assignment Models. In: Hensher, D.A., Button, K.J.: Handbook of Transport Modelling. Elsevier Science.

[15] Frey, R.L., 2003, www.unibas.ch/wwz/wipo/lehre_fiwi/folien_skript/OeFi_B4_02_03.pdf. Stand: 04.07.03.

[16] Fudenberg, D., J. Tirole, 1991, Game Theory. Massachusetts Institute of Technology. 1991.

[17] Halbritter, G., R. Bräutigam, T. Fleischer, E. Fulda, D. Georgiewa, S. Klein-Vielhauer, C. Kupsch, 2002, Verkehr in Ballungsräumen. Mögliche Beiträge von Telematiktechniken und -diensten für einen effizienteren und umweltverträglicheren Verkehr. Berlin: Erich Schmidt.

[18] Harsanyi, J.C., R. Selten, 1988, A General Theory of Equilibrium Selection in Games, MIT Press, Cambridge, Massachusetts.

[19] Helbing, D., M. Schönhof, D. Kern, 2002, Volatile Decision Dynamics: Experiments, Stochatic Description, Intermittency Control and Traffic Optimization. In: New Journal of Physics, 4, S. 33.1-33.16.

[20] Merö L., 1998, Die Logik der Unvernunft. Spieltheorie und die Psychologie des Handelns. Reinbek : Rowohlt Taschenbuch Verlag.

[21] Mesterton-Gibbons, M., 1992, An Introduction into Game-Theoretical Modelling. Addison-Wesley: Redwood City.

[22] Mogridge, M.J.H., 1990, Travel in Towns: Jam Yesterday, Jam Today, Jam Tomorrow. Macmillan: London.

[23] Murchland, J.D., 1970, Brass's Paradox of Traffic Flow, Transportation Research., 4, S. 391-394.

[24] Nash, J.F., 1950, Equilibrium Points in N-Person Games. Proceedings of the National Academy of Sciences 36, S. 48-49.

[25] Olsen, M., 1965, The Logic of Collective Action.

[26] Pigou, A.C., 1962, The Economics of Welfare. London : MacMillan. Nachdruck der Ausgabe von 1920.

[27] Poundstone, W., 1992, Prisonners Dilemma. New York : Doubleday.

[28] PROGNOS AG, Keller, 2002, Wirkungspotentiale der Verkehrstelematik zur Verbesserung der Verkehrsinfrastruktur- und Verkehrsmittelnutzung.

[29] Rittel, H.W., 1973, Gesellschaftliche Alternativen im Berufsverkehr. In: Friedrichs, G.: Aufgabe Zukunft – Qualität des Lebens, Band 3 Verkehr. Frankfurt am Main: Europäische Verlagsanstalt.

[30] Selten, R., M. Schreckenberg, T. Pitz , T. Chmura, S. Kube, 2002, Experiments and Simulations on Day-to-Day Route Choice-Behaviour, Bonn Econ Discussion Papers, University of Bonn, Germany.

[31] Wahle, J., A.L.C. Bazzan, F. Klügl, M. Schreckenberg, 2000, Decision Dynamics in a Traffic Scenario. In: Physica A 287, S.669 - 681. 2000.

[32] Wahle, J., A.L.C. Bazzan, F. Klügl, M. Schreckenberg, 2000, Anticipatory traffic forecast using multi-agent techniques. In: Helbing, D., H.J. Herrmann, M. Schreckenberg, D.E. Wolf: Traffic and Granular Flow ´99. Social, Traffic and Granular Dynamics. Springer: Heidelberg.

[33] Wardrop, G.J., 1952, Some Theoretical Aspects of Road Traffic Research. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Part II, 1(2), S. 325-362, U.K.

[34] Wermuth, M., 1993, Modellvorstellungen zur Prognose. In: Steierwald, G., H.-D. Künne: Stadtverkehrsplanung. Heidelberg : Springer. S. 221-273.

[35] Yin, Y., H. Yang, 2003, Simultaneous Determination of the Equilibrium Market Penetration and Compliance Rate of Advanced Traveler Information Systems. Transportation Research, S. 165-181.