

89. Jahrgang – Sonderausgabe (Heft 1) – 2018

ZEITSCHRIFT FÜR VERKEHRSWISSENSCHAFT

INHALTSVERZEICHNIS

Vorwort zu den drei in 2018 erscheinenden (Sonder-)Heften der ZfV	Seite 1
Simulationsgestützte robuste Umlaufplanung Von Knut Haase	Seite 4
Gegenwart versus Zukunft – Zur unsicheren Empirie der sozialen Diskontierungsrate Von Heike Link	Seite 14
Eisenbahnen an der Weiche ins digitale Zeitalter Von Werner Rothengatter	Seite 45
On-Street vs. Off-Street Parking: An Urban Economic Analysis Von Anna Straubinger, Stefan Tscharktschiew und Georg Hirte	Seite 68

Herausgeber

Prof. Dr. Thorsten Beckers (Technische Universität Berlin, federführender Herausgeber)
Prof. Dr. Kai Nagel (Technische Universität Berlin, federführender Herausgeber)
Prof. Dr. Herbert Baum (Universität zu Köln)
Prof. Dr. Alexander Eisenkopf (Zeppelin Universität)
Prof. Dr. Christos Evangelinos (Internationale Hochschule Bad Honnef · Bonn (IUBH))
Prof. Dr. Karl-Hans Hartwig (Universität Münster)
Dr. Hendrik Haßheider (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI))
Prof. Dr. Kay Mitusch (Karlsruher Institut für Technologie (KIT))
Prof. Dr. Christoph Walther (Bauhaus-Universität Weimar/ PTV AG)

Herausgeberbeirat

Prof. Dr. Gerd Aberle (Universität Gießen)
Prof. Dr. Kay W. Axhausen (Eidgenössische Technische Hochschule - ETH, Zürich)
Prof. Dr. Johannes Bröcker (Universität zu Kiel)
Prof. Dr. Frank Fichert (Hochschule Worms)
Prof. Dr. Matthias Finger (École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL))
Prof. Dr. Astrid Gühnemann (Universität für Bodenkultur Wien)
Prof. Dr. Georg Hauger (Technische Universität Wien)
Prof. Dr. Christian von Hirschhausen (Technische Universität Berlin)
Prof. Dr. Günter Knieps (Universität Freiburg)
Prof. Dr. Jürgen Kühling (Universität Regensburg)
Prof. Dr. Gernot Liedtke (Technische Universität Berlin/ DLR Berlin)
Dr. Heike Link (Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung - DIW, Berlin)
Prof. Dr. Robert Malina (Hasselt University)
Prof. Dr. Hans-Martin Niemeier (Hochschule Bremen)
Prof. Dr. Werner Rothengatter (Karlsruher Institut für Technologie (KIT))
Prof. Dr. Bernhard Schlag (Technische Universität Dresden)
Prof. Dr. Bernhard Wieland (Technische Universität Dresden)
Dr. Martin Winter (Technische Universität Berlin)

Redaktion

Prof. Dr. Thorsten Beckers (Technische Universität Berlin)
Dr. Martin Winter (Technische Universität Berlin)

Einreichung von Beiträgen

Manuskripte sind an die folgenden Herausgeber zu senden:

Prof. Dr. Thorsten Beckers
tb@wip.tu-berlin.de
Technische Universität Berlin
Fachgebiet Wirtschafts- und Infrastrukturpolitik (WIP)
Bereich Infrastrukturmanagement und Verkehrspolitik (IM-VP)
Sekt. H 33
Straße des 17. Juni 135
10623 Berlin

Prof. Dr. Kai Nagel
nagel@vsp.tu-berlin.de
Technische Universität Berlin
Fachgebiet Verkehrssystemplanung und Verkehrstelematik (VSP)
Sekt. SG 12
Salzufer 17-19
10587 Berlin

Informationen zur Einreichung von Beiträgen und zur Qualitätsprüfung und Begutachtung eingereicherter Beiträge finden Sie auf der Homepage der ZfV (www.z-f-v.de → „Einreichung von Beiträgen und Begutachtung / Qualitätsprüfung“).

Verlag – Herstellung – Vertrieb – Anzeigen

Verkehrs-Verlag J. Fischer,
Corneliusstraße 49, 40215 Düsseldorf
Telefon: (0211) 9 91 93-0, Telefax (0211) 6 80 15 44
www.verkehrsverlag-fischer.de

Einzelheft EUR 25,50 – Jahresabonnement EUR 74,50 zuzüglich MwSt und Versandkosten
Für Anzeigen gilt Preisliste Nr. 25 vom 1.1.2009
Erscheinungsweise: drei Hefte pro Jahr

© Verkehrs-Verlag J. Fischer, Corneliusstraße 49, 40215 Düsseldorf
ISSN: 0044-3670

Es ist ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages nicht gestattet, photographische Vervielfältigungen, Mikrofilme, Mikrophotos u.ä. von den Zeitschriftenheften, von einzelnen Beiträgen oder von Teilen daraus herzustellen.

Vorwort zu den drei in 2018 erscheinenden (Sonder-)Heften der ZfV

Anlässlich des kürzlich erfolgten Eintritts von Prof. Dr. Bernhard Wieland in den Ruhestand erscheinen die drei Hefte der Zeitschrift für Verkehrswissenschaft (ZfV) im Jahr 2018 zu dessen Ehren. Bernhard Wieland war bis Oktober 2017 Inhaber des Lehrstuhls für Verkehrswirtschaft und internationale Verkehrspolitik an der TU Dresden. Seit 2013 fungierte er als einer der federführenden Herausgeber der Zeitschrift für Verkehrswissenschaft. Sämtliche Artikel der Hefte 2018/1, 2018/2 und 2018/3 der ZfV sind von Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern verfasst worden, die als Kollegen, Schüler, Diskussionspartner und inhaltliche Weggefährten mit Bernhard Wieland zu verkehrs- und infrastrukturökonomischen Themen im Austausch gestanden haben. Die Zusammenstellung der Beiträge und die Qualitätssicherung ist von uns, den Herausgebern dieser drei (Sonder-)Hefte, durchgeführt worden.

Bernhard Wieland ist eine der zentralen Figuren der deutschen verkehrsökonomischen Wissenschaftsszene der letzten beiden Jahrzehnte. Er erarbeitete sich über die Jahre seines Wirkens eine Reputation als thematisch und methodisch breit aufgestellter Wissenschaftler, dem nicht die Vermarktung spektakulär aufbereiteter Ergebnisse, sondern die Fundiertheit seiner Analysen besonders wichtig ist. Gleichzeitig setzte sich Bernhard Wieland für die Forschung zu gesellschaftlich und (verkehrs-)politisch aktuellen Themen ein. Ebenso förderte er den breiten wissenschaftlichen Diskurs. In diesem Zusammenhang ist nicht nur seine Tätigkeit als federführender Herausgeber der ZfV, sondern auch seine maßgebliche Beteiligung an der Etablierung der Konferenz „Verkehrsökonomik und -politik“ zu erwähnen, der inzwischen jährlich durchgeführten Konferenz der Verkehrsökonomien im deutschsprachigen Raum. Eine besondere Bedeutung hatte für Bernhard Wieland die Ausbildung der Studierenden an seiner Fakultät, der Fakultät für Verkehrswissenschaft „Friedrich List“ an der TU Dresden. Eine Vernachlässigung dieser Aufgabe zugunsten anderer, im modernen Wissenschaftssystem als wichtig angesehenen und damit einhergehend z.T. auch in Anreizsystemen für Hochschullehrer verankerter Aufgaben ist für Bernhard Wieland zum Wohle seiner Studierenden nicht in Frage gekommen.

Bernhard Wieland absolvierte ein Studium der Mathematik an der Ludwig-Maximilians-Universität München und der Freien Universität Berlin, 1979 promovierte er dann an der FU Berlin. Nach mehrjähriger Arbeit am Deutschen Institut für Wirtschaftsforschung in Berlin und dem Institut für Kommunikationsdienste in Bad Honnef ging er an die Universität zu Köln und habilitierte dort 1994 bei Carl Christian von Weizsäcker. Von 1994 bis 1997 arbeitete er als wissenschaftlicher Assistent und Lehrstuhlvertreter für Wirtschaftspolitik an der Humboldt-Universität Berlin. 1997 wurde er Professor für Wirtschaftspolitik an der Fernuniversität Hagen. Ab 1999 bis zu seinem Eintritt in den Ruhestand im Jahr 2017 war er dann Professor für Verkehrswirtschaft und Internationale Verkehrspolitik am Institut für Wirtschaft und Verkehr der Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“ an der Technischen Universität Dresden.

Ein Thema, mit dem sich Bernhard Wieland seit jeher befasst hat, ist die Regulierung in Infrastruktursektoren. Hierzu forschte er zunächst mit Bezug zu Telekommunikationsfragen, die bis etwa 1999 sein wesentliches Forschungsfeld waren. Nach seiner Berufung an die TU Dresden wandte Bernhard Wieland seine regulierungstheoretische Expertise vermehrt auf verkehrsökonomische und -politische Fragestellungen an. Aus seiner Beschäftigung mit Regulierungsfragen resultierte auch die Auseinandersetzung mit institutionellen Aspekten der Verkehrspolitik und der Rolle von Interessengruppen. Darüber hinaus beschäftigte Bernhard Wieland sich mit methodischen Fragen der angewandten Wohlfahrtökonomik, etwa zu Nutzen-Kosten-Analysen. Aus seinem Erstaunen über den hohen Einfluss von kleinen individuellen Reisezeiteinsparungen bei der Ermittlung von Nutzen im Rahmen der Bundesverkehrswegeplanung resultierte der erfolgreiche DFG-Antrag zur Rolle kleiner Reisezeiteinsparungen. Zu weiteren Forschungsthemen Bernhards Wielands zählen z.B. der vermeintliche Gegensatz von ökonomischer und ökologischer Nachhaltigkeit, die Europäische Verkehrspolitik, aber auch Wettbewerbsfragen im Eisenbahnwesen und im Straßengüterverkehr. Wegen des breiten Spektrums seiner Forschungsinteressen bei ausgeprägter methodischer Kompetenz zählt Bernhard Wieland heute zu den führenden Wissenschaftlern seiner Disziplin im deutschsprachigen Raum. Seine Arbeiten werden auch künftigen Generationen von Verkehrswissenschaftlern wertvolle Einsichten und Anregungen für eigene Forschungsarbeiten liefern.

Für die drei (Sonder-)Heften der ZfV des Jahres 2018 sind im Einzelnen die folgenden Beiträge zu Ehren von Prof. Wieland verfasst worden:

- Haase, K.: Simulationsgestützte robuste Umlaufplanung (enthalten in Heft 2018/1)
- Link, H.: Gegenwart versus Zukunft – Zur unsicheren Empirie der sozialen Diskontierungsrate (enthalten in Heft 2018/1)
- Rothengatter, W.: Eisenbahnen an der Weiche ins digitale Zeitalter (enthalten in Heft 2018/1)
- Straubinger, A. / S. Tscharaktschiew / G. Hirte: On-Street vs. Off-Street Parking: An Urban Economic Analysis (enthalten in Heft 2018/1)
- Beckers, T. / T. Becker / F. Gizzi / K. Jäkel: Denkanstöße hinsichtlich einer effizienzorientierten (Re-)Organisation des deutschen Bahnsystems (enthalten in Heft 2018/2)
- Blankart, C. B.: Vom Fluch des Gewinners (enthalten in Heft 2018/2)
- Hartwig, K.-H.: Zwischen Inhouse-Vergabe und Ausschreibungswettbewerb: Leistungserbringung im Öffentlichen Straßenpersonenverkehr (enthalten in Heft 2018/2)
- Knieps, G.: ÖPNV in der App-Ökonomie: Chancen und Risiken (enthalten in Heft 2018/2)
- Bröcker, J.: Nutzenmessung im Verkehr: Eine Nachlese (enthalten in Heft 2018/3)
- Evangelinos, C. / Z. Szilvay: Airline Market Power and Airport Regulation (enthalten in Heft 2018/3)

-
- Nagel, K. / J. Bischoff / G. Leich / M. Maciejewski: Simulationsbasierte Analyse der Wirkungen von Flotten autonomer Fahrzeuge auf städtischen Verkehr (enthalten in Heft 2018/3)

Zuletzt möchte der Kreis der Herausgeber der drei in 2018 erscheinenden (Sonder-)Hefte der ZfV – sicherlich auch im Namen der Autoren der weiteren Beiträge in diesen Heften – Bernhard Wieland für die hervorragende Zusammenarbeit in den vergangenen Jahren danken und die Hoffnung zum Ausdruck bringen, dass der fachliche und sonstige Austausch fortgeführt werden kann und dass der Geehrte noch lange Zeit den verdienten Ruhestand genießen kann.

Prof. Dr. Thorsten Beckers (von 2013 bis 2017 federführender Herausgeber der ZfV gemeinsam mit Bernhard Wieland)

Prof. Dr. Christos Evangelinos (Doktorand bei Bernhard Wieland von 2006 bis 2012, Mitglied der ZfV-Schriftleitung von 2013 bis 2017, Co-Herausgeber der ZfV von 2016 bis 2017)

Prof. Dr. Georg Hirte (Kollege von Bernhard Wieland am Institut für Wirtschaft und Verkehr der TU Dresden von 2002 bis 2017)

Prof. Dr. Kai Nagel (von 2015 bis 2017 federführender Herausgeber der ZfV gemeinsam mit Bernhard Wieland)

Dr. Martin Winter (2001 Diplomand bei Bernhard Wieland, Co-Schriftleitung der ZfV von 2013 bis 2017 gemeinsam mit Bernhard Wieland)

Simulationsgestützte robuste Umlaufplanung

VON KNUT HAASE

Zusammenfassung

Ein simulationsgestützter Ansatz zur Umlaufplanung für die Fahrzeuge eines Verkehrsunternehmens des Öffentlichen Personennahverkehrs wird vorgestellt. Dabei beschränken wir uns gedanklich auf die Linienfahrten der morgendlichen Hauptverkehrszeit. Zielsetzung ist die Vermeidung von verspätet gestarteter Linienfahrten. Zur Lösung wird ein dreistufiger Ansatz vorgestellt. In der ersten Stufe wird die Anzahl an Fahrzeugen minimiert. In der zweiten Stufe minimieren wir die Leerzeit (Warten und Leerfahrten) unter Beachtung der minimalen Anzahl an Fahrzeugen. In der dritten Stufe betrachten wir (unabhängig) exponentiell verteilte Linienfahrtdauern. Zur Berücksichtigung der stochastischen Einflüsse generieren wir Szenarien. Jedes Szenario beinhaltet für jede Linienfahrt eine Realisierung der zufällig verteilten Linienfahrtdauer. Minimiert wird die durchschnittliche Summe an Verspätungsminuten der Startzeiten von Linienfahrten unter Einhaltung einer vorgegebenen Anzahl an Fahrzeugen und einer insgesamt verfügbaren Leerzeit. Durch eine Rechenstudie analysieren wir die Austauschbeziehungen zwischen zusätzlich bereitgestellter Fahrzeugen sowie Erhöhung der verfügbaren Leerzeit und verspätet gestarteter Linienfahrten. Im Ergebnis wird ersichtlich, dass eine geeignete Kombination beider Instrumente maßgeblich dazu beiträgt, planungsbedingte Verspätungen zu vermeiden.

1 Einführung

Die Zuordnung von Linienfahrten zu Fahrzeugen (z.B. Bus, Straßenbahn) ist Gegenstand der Umlaufplanung. Im Ergebnis wird festgelegt, wann ein Fahrzeug sein Depot erstmalig verlässt, welche Linien- und Leerfahrten im Laufe des Tages bedient werden und wann das

Anschrift des Verfassers:

Prof. Dr. Knut Haase
Universität Hamburg
Fakultät für Betriebswirtschaft
Institut für Verkehrswirtschaft
Moorweidenstraße 18
20148 Hamburg
E-Mail: knut.haase@uni-hamburg.de

Fahrzeug im Depot endgültig wieder abgestellt wird. Die Umlaufplanung gehört zur Dienstleistungsproduktion von Verkehrsunternehmen des öffentlichen Personenverkehrs, wobei von einem gegebenen Fahrplan ausgegangen wird. Die Abbildung 1 verdeutlicht die Einordnung der Umlaufplanung in den mehrstufigen Leistungserstellungsprozess eines Verkehrsunternehmens des Öffentlichen Personennahverkehrs (ÖPNV). Bezüglich eines umfangreichen Überblicks über Modellierungsansätze zur Umlaufplanung sei auf [3] verwiesen.

Zur Verbesserung des Gesamtergebnisses sind zwischen den einzelnen Planungsstufen Rückkopplungen vorgesehen. Diese können entfallen, wenn Stufen simultan geplant werden: In [2] und [11] werden die Umlaufplanung und die Fahrplanbildung unter Beachtung von Zeitfenstern für Linienfahrten betrachtet. In [5] wird ein Ansatz zur Bestimmung optimaler Dienste und Umläufe vorgestellt. In [7] wird die Fahrplanbildung in die Umlauf- und Dienstplanung integriert.

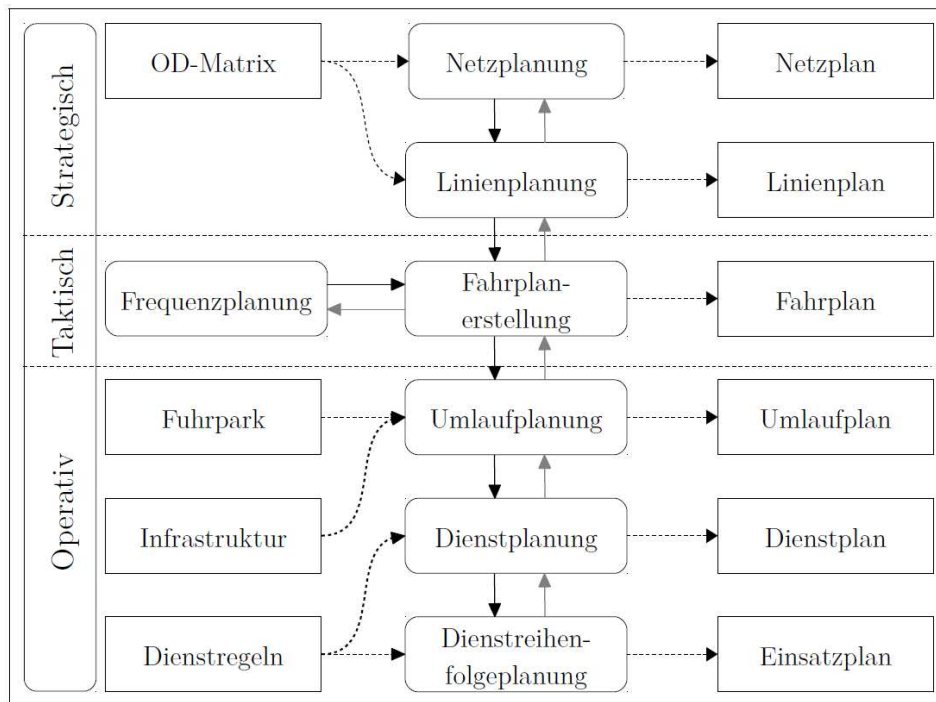


Abbildung 1: Dienstleistungsproduktion von Verkehrsunternehmen (in Anlehnung an [2, Bunte (2009)])

Die Abbildung 1 suggeriert, dass die OD-Matrix gegeben ist, d.h. die Anzahl der Passagiere, die von A nach B wollen, unabhängig vom Leistungsangebot ist. Dies steht im

Widerspruch zu empirischen Befunden (siehe z.B. [13, Abschnitt 3.9, S. 79ff] oder [9]). So haben die erwarteten Reisezeiten einen signifikanten Einfluss auf die Verkehrsmittelwahl. Da die Reisezeiten von den geplanten Linien und Fahrplänen abhängen, wäre eigentlich eine Rückkopplung zwischen der Angebotsplanung und der erwarteten Nachfrage erforderlich (siehe Abb. 2). Einen ersten Ansatz, der diesen Sachverhalt im Rahmen der Linienplanung aufgreift, finden wir in [8].

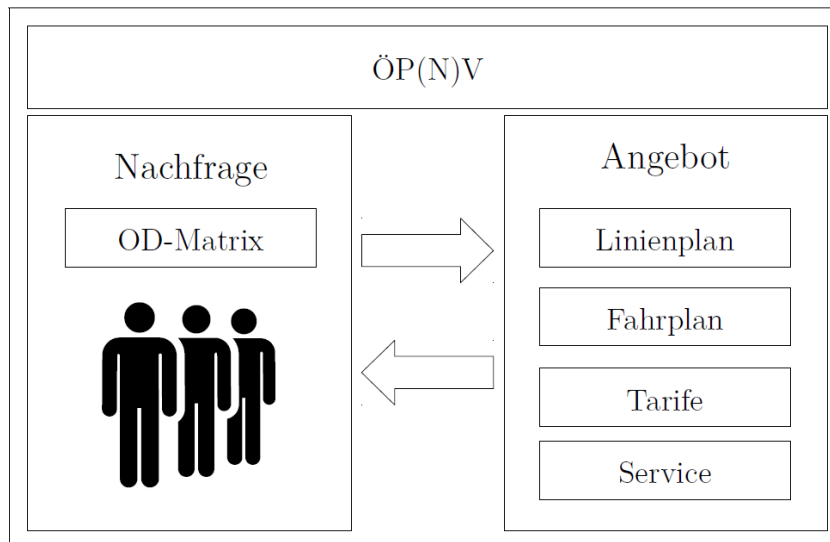


Abbildung 2: Wechselwirkung zwischen Angebot und Nachfrage im ÖP(N)V

Gerade bei morgendlichen Fahrten zur Arbeit ist es für die Individuen wichtig, dass ein Fahrplan eingehalten wird. Wenn zwischen zwei verknüpften Linienfahrten nur ein geringer zeitlicher Puffer liegt, kann eine Verspätung der ersten Fahrt zu einer Verspätung der zweiten Fahrt führen. Ein Umlaufplan ist robust, wenn derartige negative Wechselwirkungen nur mit geringer Wahrscheinlichkeit auftreten. In der Literatur finden wir kostenorientierte Ansätze zur robusten Umlaufplanung: [10], [12] und [6]. Sie sind dadurch gekennzeichnet, dass Strafterme für Verspätungen berücksichtigt werden.

Der weitere Aufbau des Beitrages ist wie folgt: Im nächsten Abschnitt stellen wir zunächst einen mehrstufigen Ansatz zur robusten Umlaufplanung vor. Stochastische Einflüsse bezüglich der Dauern von Linienfahrten werden über simulierte Szenarien erfasst. Im dritten Abschnitt stellen wir die Ergebnisse einer Rechenstudie vor. Dabei analysieren wir, inwieweit eine Erhöhung der Anzahl an Fahrzeugen oder der Leerzeiten einen Einfluss auf die Einhaltung der Startzeiten von Linienfahrten haben.

2 Modellbasierter Planungsansatz

In diesem Abschnitt präsentieren wir einen dreistufigen Ansatz zur robusten Umlaufplanung (vgl. [6]). Zunächst minimieren wir die Fahrzeuganzahl und in der zweiten Stufe die insgesamt erforderliche Leerzeit. In der letzten Stufe formulieren wir einen szenariobasierten Modellansatz zur Vermeidung verspätet gestarteter Linienfahrten.

2.1 MINIMIERUNG DER FAHRZEUGANZAHL

Eine Linienfahrt j ist kompatibel mit der Linienfahrt i , wenn der fahrplanmäßige Startzeitpunkt der Linienfahrt j größer oder gleich dem fahrplanmäßigen Endzeitpunkt der Linienfahrt i zuzüglich der Dauer der Leerfahrt von der Endhaltestelle der Fahrt i zur Starthaltestelle der Linienfahrt j ist. Nachfolgend gehen wir davon aus, dass wir nur einen Fahrzeugtyp und nur die Linienfahrten der Hauptverkehrszeit betrachten. Maximieren wir die Anzahl der Verknüpfungen kompatibler Fahrten, so erhalten wir als Ergebnis die zur Bedienung der Linienfahrten erforderliche minimale Anzahl an Fahrzeugen. Die Problemstellung ist ein lineares Zuordnungsproblem. Zur Formalisierung definieren wir folgende Mengen und Variablen:

Mengen

- I Menge der Linienfahrten; Indices i, j
- J_i Menge der zur Linienfahrt i kompatiblen Linienfahrten (Einhaltung des Fahrplanes)

Variablen

- F_1 Anzahl an Linienfahrtverknüpfungen
- X_{ij} =1, falls nach Linienfahrt i die Linienfahrt j bedient wird (0, sonst)

Das lineare Zuordnungsproblem kann nun wie folgt formalisiert werden:

Modell der ersten Stufe: Fahrzeugminimierung

$$\text{Maximiere } F_1 = \sum_i \sum_{j \in J_i} X_{ij} \quad (1)$$

unter den Nebenbedingungen

$$\sum_{j \in J_i} X_{ij} \leq 1 \quad \forall i \in I \quad (2)$$

$$\sum_{i \in I | j \in J_i} X_{ij} \leq 1 \quad \forall j \in I \quad (3)$$

$$X_{ij} \geq 0 \quad \forall i \in I, j \in J_i \quad (4)$$

Dabei gilt: (1) maximiert die Anzahl an Linienfahrtverknüpfungen, was äquivalent zur Minimierung der Fahrzeuganzahl ist. Jede Linienfahrt kann nur mit einer direkt nachfolgenden Linienfahrt sowie einer direkten Vorgängerfahrt verknüpft sein, was durch die Nebenbedingungen (2) bzw. (3) abgebildet wird.

2.2 MINIMIERUNG DER LEERZEITEN

Während der morgendlichen Hauptverkehrszeit finden mutmaßlich eher keine unbezahlten Pausen sowie Zwischenstopps in den Depots statt. Die Leerzeit zwischen zwei Linienfahrten eines Umlaufes sollte somit proportional zu den variablen Personalkosten sein. Daher ist die Annahme gerechtfertigt, dass die Minimierung der Leerzeiten nahezu äquivalent zur Minimierung der Personalkosten ist.

Zur Formalisierung unserer deterministischen Problemstellung definieren wir zunächst einige zusätzliche Parameter:

Zusätzliche Parameter

δ_{ij} fahrplanmäßiger zeitlicher Abstand zwischen dem Ende der Linienfahrt i und dem Beginn der Linienfahrt j

F_1^* optimaler Zielfunktionswert des ersten Modells (1) - (4)

f_1 zulässige Erhöhung der Fahrzeuganzahl

Der Parameter f_1 wird dazu dienen zu analysieren, welche Qualitätsverbesserung hinsichtlich der Fahrplanstabilität zu erwarten ist, wenn wir die Anzahl der Fahrzeuge erhöhen.

Unter Verwendung der zusätzlichen Parameter formalisieren wir nun das Modell der zweiten Stufe wie folgt:

Modell der zweiten Stufe: Leerzeitenminimierung

$$\text{Minimiere } F_2 = \sum_i \sum_{j \in J_i} \delta_{ij} X_{ij} \quad (5)$$

unter den Nebenbedingungen

$$(2), (3), (4)$$

$$\sum_i \sum_{j \in J_i} X_{ij} \geq F_1^* - f_1 \quad (6)$$

Die Zielfunktion (5) berechnet die entscheidungsrelevanten Leerzeiten. Dass die vorgegebene Anzahl an Fahrzeugen eingehalten wird, gewährleistet (6). Dabei ist zu beachten, dass die Anzahl der Linienfahrten abzüglich der Anzahl an Verknüpfungen die erforderliche Anzahl an Fahrzeugen ergibt. Reduzieren wir also die Anzahl der Verknüpfungen, so erhöhen wir die erforderliche Fahrzeuganzahl.

2.3 MINIMIERUNG VERSPÄTETER STARTZEITEN VON LINIENFAHRTEN

In diesem Abschnitt beschränken wir uns darauf, davon auszugehen, dass lediglich die Dauern der Linienfahrten stochastischen Einflüssen ausgesetzt sind. Definieren wir die zusätzlichen

Parameter

- b_i fahrplanmäßiger Start der Linienfahrt i ,
- e_i fahrplanmäßiges Ende der Linienfahrt i ,
- d_{is} simulierte Dauer der Linienfahrt i im Szenario s ,
- l_{ij} Dauer der Leerfahrt von der Endstation der Linienfahrt i zur Startstation der Linienfahrt j ,
- f_2 zulässige Erhöhung der Leerzeiten,
- F_2^* optimaler Zielfunktionswert des zweiten Modells (5) - (6)

und die zusätzlichen

Variablen

- Z_{is} Verspätung der Linienfahrt i im Szenario s ,
- T_{is} Startzeit der Linienfahrt i im Szenario s ,

so kann unser Modell zur Bestimmung eines robusten Umlaufplanes (während der morgendlichen Hauptverkehrszeit) wie folgt formuliert werden:

Modell der dritten Stufe: Minimierung von Startzeitverspätungen

$$\text{Minimiere } F_3 = \frac{1}{|S|} \sum_s \sum_t Z_{is} \quad (7)$$

unter den Nebenbedingungen

(2), (3), (6)

$$\sum_i \sum_{j \in J_i} \delta_{ij} X_{ij} \leq F_2^* + f_2 \quad (8)$$

$$T_{is} + (d_{is} + l_{ij}) X_{ij} - T_{js} \leq 0 \quad \forall i \in I, j \in J_i, s \in S \quad (9)$$

$$T_{is} - Z_{is} \leq b_i \quad \forall i \in I, s \in S \quad (10)$$

$$Z_{is} \geq 0 \quad \forall i \in I, s \in S \quad (11)$$

$$T_{is} \geq b_i \quad \forall i \in I, s \in S \quad (12)$$

$$X_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in I, j \in J_i \quad (13)$$

Die Zielfunktion (7) schätzt die erwartete Summe der Verspätungen in Minuten. Die insgesamt verfügbare Leerzeit wird durch (8) vorgegeben. Die Startzeit einer Linienfahrt im Szenario s wird in (9) bestimmt. Inwieweit eine Linienfahrt verspätet im Szenario s beginnt, wird durch (10) erfasst. Die Wertbereiche unserer Entscheidungsvariablen werden durch die Nebenbedingungen (11) bis (13) definiert. Zu beachten ist, dass die Ganzzahligkeitseigenschaft unserer Verknüpfungsvariablen X_{ij} nicht mehr – wie bei den ersten beiden Modellen – gilt.

3 Rechenstudie

Die nachfolgenden Ergebnisse wurden unter Verwendung von GAMS\Cplex (siehe [1] und [4]) auf einem Surface Pro 3 mit einer i7 CPU (2.30 GHz) und einem Arbeitsspeicher von 8 GB unter dem Betriebssystem Microsoft Windows 10 Pro bestimmt.

3.1 GENERIERUNG VON INSTANZEN

Für unsere Rechenstudie verwenden wir ausschließlich synthetische Instanzen. Unter Verwendung einer Gleichverteilung und einer Exponentialverteilung generieren wir die Daten der Instanzen. Der Parameter einer Exponentialverteilung wird zumeist mit λ bezeichnet, wobei der Erwartungswert einer exponentialverteilten Zufallszahl $\mu = 1/\lambda$ ist. Details sind der Tabelle 1 zu entnehmen.

$U(a,b)$	liefert gleichverteilte Zufallszahl aus $\{a, a+1, \dots, b\}$
$\text{Exp}(\lambda)$	liefert exponentialverteilte Zufallszahl mit Erwartungswert $\mu = 1/\lambda$
Linienfahrten	150; Indices: $i \in \{1, \dots, 150\}$
Haltestellen	16; Indices: $h, k \in \{1, \dots, 16\}$
XY-Koordinaten der Haltestelle h	$X_h = U(1, 40), Y_h = U(1, 40)$
Starthaltestelle der Linienfahrt i	$U(1, 16)$
Endhaltestelle der Linienfahrt i	$U(1, 16)$
Distanz der Haltestellen h und k	$ X_h - X_k + Y_h - Y_k $
Dauer der Linienfahrt i	Distanz zwischen Start- und Endhaltestelle der Linienfahrt i plus $U(10, 20)$
Startzeit der Linienfahrt i	$i/180 \times 150$ gerundet
Szenarien	12; Indices: $s \in \{1, \dots, 100\}$
Simulierte Dauer der Linienfahrt i im Szenario s	Dauer der Linienfahrt i plus $\text{Exp}(\lambda)$ gerundet

Tabelle 1: Daten der generierten Instanzen

3.2 ANALYSE DER ERGEBNISSE

In der Tabelle 2 sind die Ergebnisse unserer Rechenstudie zusammengefasst. Wir betrachten insgesamt 18 Instanzen (s. 1. Spalte). Der Erwartungswert der exponentialverteilten Linienfahrtzeitverlängerungen in den Instanzen 1 bis 9 und 10 bis 18 beträgt 3 bzw. 6 Minuten (s. 2. Spalte). Mindestens 53 Fahrzeuge werden zur Bedienung der 150 Linienfahrten während der 3-stündigen Hauptverkehrszeit benötigt. In Abhängigkeit von f_1 erhöht sich die Anzahl auf 55 oder 57 Fahrzeuge (vgl. 2. und 5. Spalte). In der 7. Spalte ist die geschätzte erwartete Gesamtverspätung angegeben, d.h. die Angaben entsprechen dem Zielfunktionswert F_3 . Der durchschnittliche zeitliche Puffer zwischen zwei verknüpften Linienfahrten ist in der vorletzten Spalte angegeben. In der letzten Spalte ist die zugehörige Varianz der Pufferzeiten wiedergegeben.

Instanz	μ	f_1	f_2	Fahr- zeuge	Leer- zeit	Verspä- tung	Mittelwert Puffer	Varianz Puffer
1	3	0	0	53	416	32.67	14.58	175.93
2			60	53	476	15.50	14.51	120.02
3			120	53	536	11.42	14.12	109.02
4	3	2	0	55	312	25.83	17.19	197.75
5			60	55	372	9.33	17.60	155.95
6			120	55	427	6.00	17.14	143.80
7	3	4	0	57	264	15.33	19.80	222.68
8			60	57	324	3.83	20.44	188.83
9			120	57	382	1.33	20.25	159.37
10	6	0	0	53	416	146.92	14.75	178.08
11			60	53	476	99.92	14.62	102.63
12			120	53	536	91.67	14.20	90.36
13	6	2	0	55	312	112.83	17.41	195.44
14			60	55	369	69.00	18.03	155.74
15			120	55	429	54.00	17.54	109.45
16	6	4	0	57	264	76.67	20.06	214.28
17			60	57	323	38.00	20.87	150.07
18			120	57	384	30.75	20.51	119.24

Tabelle 2: Ergebnisse der Rechenstudie

Folgende Zusammenhänge lassen sich aus den Ergebnissen für die untersuchten Instanzen ableiten:

Je stärker die Dauern der Linienfahrten stochastischen Einflüssen ausgesetzt sind, desto höher sind die erwarteten Verspätungen; vergleiche z.B. Instanz 1 und Instanz 10 ($\mu = 3$ bzw. $\mu = 6$).

Zusätzliche Leerzeiten erhöhen nicht die durchschnittlichen Pufferzeiten. Sie reduzieren aber die Varianz der Pufferzeiten. Offenbar werden hohe Pufferzeiten und niedrige Pufferzeiten vermieden, was eine Reduzierung der Varianz der Pufferzeiten bewirkt.

Eine Erhöhung der erlaubten Leerzeitminuten wirkt sich stets positiv auf die Einhaltung der Startzeiten von Linienfahrten aus.

Insbesondere bei geringen Linienfahrzeitverlängerungen (Instanzen 1 bis 9) ist eine Erhöhung der zulässigen Leerzeit wirkungsvoller als eine Erhöhung der Fahrzeuganzahl. So ist in den Instanzen 2 und 7 eine Erhöhung der gesamten Leerzeit von 60 Minuten nahezu genauso wirkungsvoll wie der Einsatz von 4 zusätzlichen Fahrzeugen.

Beide Maßnahmen (Leerzeitminuten, Fahrzeuganzahl) ergänzen sich positiv. Insbesondere bei erheblichen Linienfahrzeitverlängerungen erscheint eine Kombination beider Maßnahmen angeraten, um verspätete Linienstartzeiten gravierend zu vermeiden.

Literatur

- [1] Bruce A. McCarl et. al. McCarl Expanded GAMS User Guide, GAMS Release 24.2.1. GAMS Development Corporation, Washington, DC, USA, 2013.
- [2] Stefan Bunte. Lösungen für Anwendungsfälle der Fahrzeugeinsatzplanung im öffentlichen Personennahverkehr. PhD thesis, 2009.
- [3] Stefan Bunte and Natalia Kliewer. An overview on vehicle scheduling models. *Public Transport*, 1(4):299–317, 2009.
- [4] GAMS Development Corporation, Washington, DC, USA. GAMS A User’s Guide, GAMS Release 24.2.1, 2013.
- [5] Knut Haase, Guy Desaulniers, and Jacques Desrosiers. Simultaneous vehicle and crew scheduling in urban mass transit systems. *Transportation science*, 35(3):286–303, 2001.
- [6] Dennis Huisman, Richard Freling, and Albert PM Wagelmans. A robust solution approach to the dynamic vehicle scheduling problem. *Transportation Science*, 38(4):447–458, 2004.
- [7] András Kéri and Knut Haase. Simultaneous vehicle and crew scheduling with trip shifting. In *Operations Research Proceedings 2007*, pages 467–472. Springer, 2008.
- [8] Michael J Klier and Knut Haase. Urban public transit network optimization with flexible demand. *Or Spectrum*, 37(1):195–215, 2015.
- [9] Sven Müller, Stefan Tscharktschiew, and Knut Haase. Travel-to-school mode choice modelling and patterns of school choice in urban areas. *Journal of Transport Geography*, 16(5):342–357, 2008.
- [10] Marc Naumann, Leena Suhl, and Stefan Kramkowski. A stochastic programming approach for robust vehicle scheduling in public bus transport. *Procedia Social and Behavioral Sciences*, 20:826–835, 2011.
- [11] Verena Schmid and Jan Fabian Ehmke. Integrated timetabling and vehicle scheduling with balanced departure times. *OR spectrum*, 37(4):903–928, 2015.
- [12] Yindong Shen, Jia Xu, and Jingpeng Li. A probabilistic model for vehicle scheduling based on stochastic trip times. *Transportation Research Part B: Methodological*, 85:19–31, 2016.
- [13] Kenneth E Train. *Discrete choice methods with simulation*. Cambridge university press, 2009.

Gegenwart versus Zukunft – Zur unsicheren Empirie der sozialen Diskontierungsrate

VON HEIKE LINK

*„Dreifach ist der Schritt der Zeit:
Zögernd kommt die Zukunft herangezogen,
Pfeilschnell ist das Jetzt entflohen,
Ewig still steht die Vergangenheit.“*

(Friedrich Schiller, Sprüche des Konfuzius)

Für die Niederschrift dieses Aufsatzes gab es zwei Anstöße, die mit dem Namen Prof. Wielands verbunden sind. Zum einen haben wir im Begleitkreis der Wegekostenstudie zur Berechnung der Lkw-Maut immer wieder angeregt über Fragen der Verzinsung öffentlicher Investitionen diskutiert. Den zweiten Anstoß bildete eine Vortragseinladung an die TU Dresden im April 2016. Es lag deshalb nahe, eine überarbeitete und erweiterte Version dieses Vortrags in einem Sonderheft zu Ehren von Prof. Wieland zu publizieren.

1 Einleitung

Die Diskontierung von zukünftigen Kosten und Nutzen einer bestimmten Handlungsalternative, d. h. die Bewertung von Zeit und Geld, gehört zu den interessantesten und am meisten diskutierten Fragen in den Wirtschaftswissenschaften, der Psychologie und in der noch jungen Disziplin der Neuroökonomie. Ein erster verallgemeinerter ökonomischer Modellansatz geht auf Samuelson (1937) zurück, der die zeitlichen Präferenzen eines Individuums bei Konsumententscheidungen über mehrere Perioden hinweg mittels einer intertemporalen Nutzenfunktion abbildete. In seinem als Discounted Utility Modell bekannten Ansatz werden alle Entscheidungsmotive des Individuums in einem einzigen Parameter, der Diskontierungsrate ausgedrückt. Die daraus resultierende Formel des exponentiellen Diskontierens hat, wohl auch wegen ihrer Einfachheit und Ähnlichkeit zur allgemeinen Zinsformel, große Popularität erlangt und Eingang in die Kosten-Nutzen-Analyse gefunden.

Anschrift der Verfasserin:

Dr. Heike Link
DIW Berlin
Mohrenstr. 58
10117 Berlin
E-Mail: hlink@diw.de

Die Verwendung der exponentiellen Diskontierungsformel in der Kosten-Nutzen-Analyse öffentlicher Investitionen wird jedoch seit den 80er Jahren kontrovers diskutiert. Zum einen steht sie im Widerspruch zum beobachteten Verhalten, dass Individuen Ereignisse in ferner Zukunft anders bewerten als wenn sie gerade bevorstünden, und einmal gefasste Pläne im Zeitverlauf ändern oder womöglich ganz ad acta legen. Dieses Phänomen gegenwartsverzerrter bzw. zeitinkonsistenter Präferenzen, bei dem eine Person die nahe Zukunft stärker bewertet als die ferne Zukunft, führte zum Ansatz der hyperbolischen Diskontierung, bei der die Diskontierungsrate selbst eine Funktion der Zeit ist.

Neben dieser Kritik an der Annahme zeitkonsistenter Präferenzen hat insbesondere die Nachhaltigkeitsdebatte dazu geführt, die klassische exponentielle Diskontierung infrage zu stellen. So würden beispielsweise die erst in sehr ferner Zukunft eintretenden Nutzen von Maßnahmen gegen den Klimawandel, gegen Verluste an Biodiversität oder auch zur Beseitigung von nuklearem Müll bei exponentieller Diskontierung zu gering bewertet und entsprechende Projekte nicht realisiert werden. Aus dieser Problematik sind seit den Nuller Jahren in den Wirtschaftswissenschaften eine Vielzahl theoretischer und empirischer Arbeiten zu im Zeitverlauf sinkenden Diskontierungsraten entstanden.

Der vorliegende Beitrag behandelt zunächst in Kapitel 2 die grundsätzliche Vorgehensweise des Diskontierens und stellt die möglichen konzeptionellen Herangehensweisen vor. Kapitel 3 diskutiert ausführlicher das Konzept der sozialen Zeitpräferenzrate und insbesondere die mit der Quantifizierung ihrer Parameter verbundenen Probleme. Außerdem werden die für Deutschland verfügbaren Schätzungen dargestellt. Kapitel 4 beschäftigt sich mit gegenwartsverzerrten Präferenzen und hyperbolischer Diskontierung. Kapitel 5 erläutert die Ansätze zur Bestimmung von im Zeitverlauf sinkenden Diskontierungsraten, die im Rahmen der Nachhaltigkeitsdebatte entwickelt wurden. Sie können auch für Investitionen im Verkehrsbereich eine wichtige Rolle spielen, da hier ebenfalls sehr langfristige Folgen von Investitionsentscheidungen auftreten können (Flächennutzung, externe Kosten). Kapitel 6 leitet Schlussfolgerungen ab.

2 Herangehensweisen zur Bestimmung der sozialen Diskontierungsrate

In der Kosten-Nutzen-Analyse fallen die (monetarisierten) Wirkungen eines Projektes zu unterschiedlichen Zeitpunkten und eventuell in den einzelnen Jahren in unterschiedlicher Höhe an. Um diese Nutzen und Kosten bzw. Zahlungsströme vergleichen zu können, müssen sie zeitlich homogenisiert, d.h. auf ein gemeinsames Jahr diskontiert werden. Aus Samuelson (1937) Discounted Utility Modell ergibt sich unter den Annahmen eines rationalen Entscheidungsträgers mit zeitlich konsistentem Verhalten, der Möglichkeit einer kardinalen Nutzenmessung und der Separabilität der Bewertung von Zeit und Geld folgende Formel für die Diskontierung eines Nutzenstroms $U(c_t, \dots, c_T)$ aus dem Konsum eines Güterbündels c zum Zeitpunkt T :

$$U(c_t, \dots, c_T) = \sum_{\tau=0}^T \delta^\tau u(c_\tau) \quad (1)$$

Dabei ist $\delta < 1$ ein zeitlich konstanter Faktor, dessen Anwendung zu zeitlich konsistenten und ökonomisch effizienten Konsumplänen führt.

Zur Bestimmung der sozialen Diskontierungsrate existieren in der wirtschaftswissenschaftlichen Literatur zwei grundsätzliche Herangehensweisen: Das Konzept der sozialen Opportunitätskostenrate r , und das Konzept der sozialen Zeitpräferenzrate s . Beide Ansätze leiten sich aus volkswirtschaftlichen Erklärungsmodellen her, die die Entscheidung der Wirtschaftsakteure zwischen Konsumieren und Investieren intertemporal abbilden. Die soziale Opportunitätskostenrate ergibt sich aus der Investitionsseite des Modells und drückt aus, welche Rate of Return erzielt werden könnte, würde „heute“ auf eine Einheit Konsum verzichtet werden. Dieser Ansatz geht davon aus, dass bei konstantem öffentlichen Konsum die Generierung von Ressourcen für die Realisierung eines öffentlichen Projektes den privaten Konsum und/oder private Investitionen verdrängen. Die Ableitung eines Zinssatzes zur Diskontierung öffentlicher Investitionen mittels des Opportunitätskostenansatzes ist daher von Art und Verhältnis der angenommenen Verdrängung (privater Konsum oder private Investitionen) abhängig. Neben der Annahme zur Art der Verdrängung basiert der Opportunitätskostenansatz auf der Annahme idealer Märkte mit vollkommener Konkurrenz, in denen keine externen Effekte oder Unsicherheit vorliegen und keinerlei verzerrende Steuern und Abgaben erhoben werden.

Die soziale Zeitpräferenzrate hingegen spiegelt die Konsumseite des Modells wider und ist die Rate, mit der die Konsumenten den heutigen Konsum gegen den zukünftigen Konsum abwägen. Die Opportunitätskostenrate und die Zeitpräferenzrate sind quantitativ nur im Optimum der Volkswirtschaft identisch, wenn die Allokation der Konsummenge optimal zwischen „heute“ und „morgen“ erfolgt (für eine ausführlichere Darstellung vgl. Pearce und Nash, 1981). In der Realität ist jedoch typischerweise die Allokation zwischen heutigem und zukünftigem Konsum und damit zwischen Konsum und Investition aufgrund der Existenz von Steuern, externen Effekten, unvollständiger Information, Risikoprämien bei privaten Investitionen etc. nicht optimal (vgl. Baumol, 1969), so dass die Annahme $r = s$ nicht erfüllt ist. Damit stellt sich das Problem, welches Konzept bei der Bestimmung der sozialen Diskontierungsrate verwendet werden sollte, da die Ergebnisse voneinander abweichen. Goulder und Williams (2012) kritisieren beispielsweise die Vermengung beider Konzepte in den gängigen Modellen zur Bewertung von Maßnahmen gegen den Klimawandel.

3 Die Ramsey-Gleichung zur Quantifizierung der sozialen Zeitpräferenzrate

Das Konzept der sozialen Zeitpräferenzrate basiert auf einer utilitaristischen sozialen Wohlfahrtsfunktion und bildet die gesellschaftlichen Präferenzen mittels der Substitutionsrate zwischen heutigen und zukünftigen Konsum ab. Unter den Annahmen einer streng konkaven und iso-elastischen¹ Nutzenfunktion, einer konstanten Wachstumsrate des Konsums und der kardinalen Messbarkeit des Nutzens ist die soziale Zeitpräferenzrate definiert durch die so genannte Ramsey-Formel (Ramsey, 1928) als

$$s = p + \eta g t \quad (2)$$

wobei p die „pure“ Zeitpräferenzrate, η die Elastizität des Grenznutzens des Einkommens (bzw. des Konsums) und g das Pro-Kopf-Wachstum des Konsums darstellen. Für die Bestimmung eines Wertes für die soziale Zeitpräferenzrate ist die Quantifizierung der in Gleichung (2) enthaltenen Parameter p , η und g erforderlich. Allerdings existiert bislang kein Konsens über eine einheitliche Methodik zur Bestimmung dieser Parameter (vgl. Arrow et al., 2013, S. 4).

3.1 QUANTIFIZIERUNG DER REINEN ZEITPRÄFERENZRATE

Die reine Zeitpräferenzrate p wird im Hinblick auf das zu Grunde liegende Konzept und die sich daraus ergebenden Quantifizierungsprobleme kontrovers diskutiert. Zunächst ist anzumerken, dass p ein Parameter einer intergenerationellen gesellschaftlichen Wohlfahrtsfunktion ist und damit nicht mit einer individuellen Zeitpräferenzrate gleichgesetzt werden kann (Goulder und Williams, 2012, S. 7). Konzeptionell lassen sich zwei Phänomene unterscheiden, die zu einer (positiven) Zeitpräferenzrate führen: zum einen die individuelle Ungeduld (Myopia) und zum anderen das Untergangsrisiko der Menschheit. Eine klare analytisch quantitative Abgrenzung zwischen diesen beiden Phänomenen existiert in der Literatur nicht. Viele empirische Studien setzen aus ethischen Gründen die Ungeduldskomponente auf null (z. B. Cline, 1992; Stern, 2006) bzw. argumentieren, dass die Berücksichtigung einer individuellen Ungeduldskomponente in der sozialen Zeitpräferenzrate ein irrationales Entscheidungsverhalten in die Kosten-Nutzen-Analyse einbringen würde, die jedoch gerade eine rationale Entscheidungsfindung unterstützen soll (vgl. z. B. Kula, 1984). Demgegenüber weisen andere Autoren (z. B.

¹ Bei einer iso-elastischen Nutzenfunktion variiert die Elastizität des Grenznutzens nicht mit dem Konsumniveau.

Arrow, 1995) darauf hin, dass eine Ungeduldskomponente von null dem beobachteten Sparverhalten widerspricht und zur paradoxen Situation führen würde, dass heutige Generationen ihren Konsum zu Gunsten der zukünftigen Generationen nahezu einstellen müssten. Dies würde dann auch für jede zukünftige Generation gelten, sobald sie zur gegenwärtigen wird. Die Autoren, die eine Ungeduldskomponente mit einem Wert größer null als gegeben ansehen und bei der Ermittlung der reinen Zeitpräferenzrate berücksichtigen, leiten Werte von 0,3% (Scott, 1989), 0 - 0,5% (OXERA, 2002) und 1% (Arrow, 1995) ab.

Für die zweite Komponente, das Untergangsrisiko der Menschheit, wird in der Literatur weniger über eine grundsätzliche Berücksichtigung, sondern über die Art und Weise der Quantifizierung diskutiert. Eine Möglichkeit besteht darin, diese Komponente empirisch aus Sterbetafeln abzuleiten (z. B. Kula, 1987; Pearce und Ulph, 1995; OXERA, 2002; Evans, 2006). Eine solche Schätzung basiert auf der Annahme, dass die Individuen die nächste Zeitperiode mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit nicht erleben werden und deshalb eine bestimmte Menge Konsum heute derselben Menge an Konsum in einem Jahr vorziehen. Damit kann die jährliche Sterblichkeitsrate als Approximation der reinen Zeitpräferenzrate dienen. Hierbei stellt sich allerdings die Frage, ob mit diesem Vorgehen nicht ein zu niedriger Wert ermittelt wird, da das aus Sterbetafeln abgeleitete Todesrisiko andere Risiken wie Naturkatastrophen, Kriege oder Seuchen nicht abbildet. Darüber hinaus ist zu kritisieren, dass altruistisches Verhalten (z. B. die Sorge der Individuen für ihre Nachkommen und für nahestehende Personen, aber auch für die Gesellschaft insgesamt) mit einem solchen Vorgehen nicht berücksichtigt. Ein weiteres Problem dieses Vorgehens besteht darin, dass mit Sterbetafeln das individuelle Sterberisiko abgebildet wird, die menschliche Gesellschaft jedoch im Gegensatz zu Individuen nicht sterblich ist. Newbery (1992) verwendet deshalb eine Schätzung für das Untergangsrisiko der Menschheit in 100 Jahren. Der Stern-Report (Stern, 2006) definiert dieses Risiko als Untergangsrisiko der Menschheit aufgrund von Meteoriteneinschlag, Nuklearkrieg oder dem Ausbruch verheerender Seuchen und setzt normativ einen Wert von 0,1.

3.2 QUANTIFIZIERUNG DER ZUKÜNFTIGEN WACHSTUMSRATE DES KONSUMS

Die zukünftige Wachstumsrate des Konsums g könnte grundsätzlich aus historischen Daten über die durchschnittliche reale Konsumententwicklung aus den volkswirtschaftlichen Gesamtrechnungen (VGR) prognostiziert werden². Allerdings ist eine solche Langfristprognose mit erheblichen Unsicherheiten behaftet, auf die z. B. Gollier (2002) mit

² Dabei ist allerdings zu berücksichtigen, dass das Konsumwachstum in der Ramsey-Gleichung auch Veränderungen in der Freizeit sowie bei öffentlichen Gütern wie der Umweltqualität und der persönlichen Sicherheit beinhaltet und somit der Konsum in einem breiteren Sinne als in der VGR berücksichtigt werden müsste.

einer Erweiterung der Ramsey-Gleichung um einen Unsicherheitsterm reagierte (vgl. Kap. 5).

3.3 ELASTIZITÄT DES GRENZNUTZENS DES KONSUMS

Der am schwierigsten zu bestimmende Parameter der sozialen Zeitpräferenzrate ist die Elastizität des Grenznutzens des Konsums. Hierzu gibt es verschiedene Vorgehensweisen.

Steuerprogressionsansatz

Der Steuerprogressionsansatz basiert auf dem Argument, dass das Einkommenssteuersystem in demokratischen Staaten mit freien Wahlen die gesellschaftlichen Präferenzen hinsichtlich der Steuerbelastung und -gerechtigkeit widerspiegelt. So beruht das Einkommenssteuersystem in den meisten modernen Staaten auf dem Leistungsfähigkeitsprinzip, d. h. die zu zahlende Steuer soll für jedes Einkommen zum gleichen Nutzenverlust führen (sogenannter „equal sacrifice“-Ansatz, Opfertheorie). Das Prinzip des equal sacrifice impliziert, dass für jedes Einkommen Y die Gleichung

$$U(Y) - U(Y - T(Y)) = k \quad (3)$$

gilt, wobei U der Nutzen, $T(Y)$ die Einkommenssteuerfunktion und k eine Konstante sind. Unter der Annahme einer iso-elastischen Nutzenfunktion $U(Y) = (Y^{1-\eta} - 1)/(1 - \eta)$ ist die Elastizität des Grenznutzens des Konsums konstant und kann anhand des durchschnittlichen und des marginalen Steuersatzes für ein beliebiges Einkommen über die Gleichung

$$\eta = \frac{\ln\left(1 - \frac{\partial T(Y)}{\partial Y}\right)}{\ln\left(1 - \frac{\partial T(Y)}{Y}\right)} \quad (4)$$

bestimmt werden. Hierzu können entweder bestimmte Einkommensniveaus (meist die Durchschnittseinkommen) und die zugehörigen Steuersätze direkt eingesetzt werden, oder Gleichung (4) wird als lineare Regressionsgleichung abgeleitet und mittels der Steuersätze für die Einkommensklassen geschätzt. Die Unterschiede in den vorliegenden Schätzungen (Tabelle 1) ergeben sich aus der Berücksichtigung von Sozialversicherungsabgaben, der Bereinigung um Steuerfreibeträge und aus der Gewichtung der Schätzungen mit der Anzahl der Steuerpflichtigen in der jeweiligen Steuerkategorie. Die meisten Studien nutzen als Datenbasis die Steuersätze nur eines Beobachtungsjahres. Groom und Maddison (2013) verwenden allerdings für den Regressionsansatz einen Beobachtungszeitraum von zehn

Jahren und für den direkten Ansatz einen Zeitraum von fast 60 Jahren. Sie argumentieren, dass für die Analyse eines längeren Zeitraums zum einen die Veränderungen des Einkommenssteuersystems im Zeitverlauf sprechen, und zum anderen insbesondere für öffentliche Investitionen mit langer Lebensdauer ein langfristiger Ansatz zur Steuergerechtigkeit eher adäquat ist.

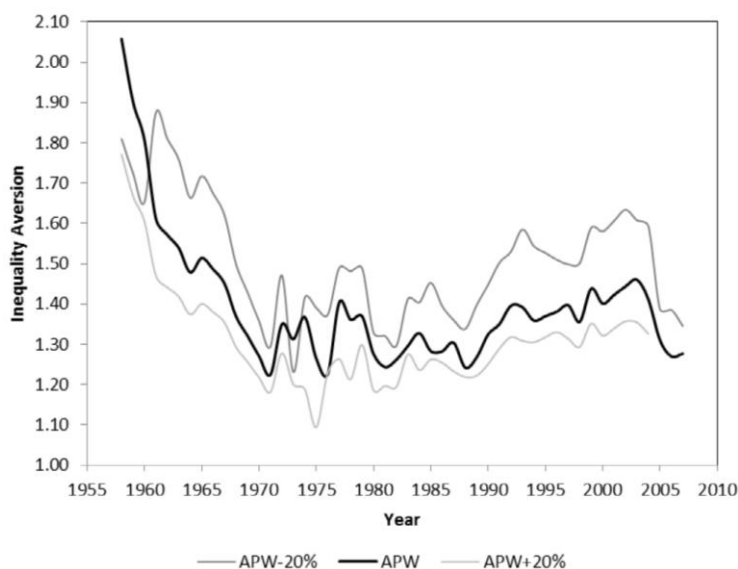


Abbildung 1: Schätzung der Aversion gegen Ungleichheit bei $\pm 20\%$ des Durchschnittseinkommens (Quelle: Groom und Maddison (2013), Appendix 2, S. 38.)

Die in Tabelle 1 zusammengefassten Studien des Steuerprogressionsansatzes weisen eine relativ geringe Bandbreite für den gesuchten Parameter η auf, der zwischen 1,3 und 1,7 liegt. Groom und Maddison (2013) weisen jedoch einen statistisch signifikanten Unterschied zwischen den Schätzungen für den gesuchten Parameter η bei einer Abweichung von $\pm 20\%$ des Durchschnittseinkommens nach und stellen damit die dem Ansatz zu Grunde liegende Annahme der Unabhängigkeit der Elastizität des Grenznutzens des Konsums vom Einkommensniveau (iso-elastische Nutzenfunktion) in Frage (Abb. 1).

Studie	Land	Zeitraum	Ergebnis
<i>Steuerprogressionsansatz</i>			
Evans und Sezer (2004)	Australien	2001/02	1,72
	Frankreich	2001/02	1,28
	Deutschland	2001/02	1,42
	Japan	2001/02	1,37
	UK	2001/02	1,47

	USA	2001/02	1,43
Cowell und Gardiner (1999)	UK	1998/9 1999/0	1,43 1,41
Rapp Trans (2005)	Schweiz	2003	1,45
Evans (2008)	UK	2002/03	1,58*
Groom und Maddison (2013)	UK	1948 - 2010	1,57
Aristei und Perugini (2010) ¹⁾	UK	2006	1,68
	Frankreich	2006	1,27
	Deutschland	2006	1,44
<i>Ansatz intertemporaler Konsumentscheidungen</i>			
Kula (1987)	UK	1954 - 1976	0,70
	USA	1954 - 1976	1,89
	Kanada	1954 - 1976	1,56
Scott (1977)	UK	1951 - 1973	1,50
Selvanathan und Selvanathan (1993)	UK	1965 - 1981	2,58
	USA	1965 - 1981	2,53
	Kanada	1965 - 1981	1,80
	Schweiz	1965 - 1981	1,80
	Deutschland	1965 - 1981	1,62
	Frankreich	1965 - 1981	1,89
	Niederlande	1965 - 1981	1,21
Patterson und Pesaran (1992)	UK	1955 - 1989 (Quartalsdaten)	2,56
Blundell et al. (1994)	UK	1970 - 1986	0,90
Van Dahlen (1995)	UK	1830 - 1990	2,28
Berloffa (1997)	UK	1970 - 1986	2,76
Evans und Sezer (2002)	UK	1967 - 1997	1,64
Rapp Trans (2005)	Schweiz	1983 - 2003	1,50
Evans (2004)	UK	1965 - 2001	1,60
Groom und Maddison (2013)	UK	1975 - 2011 (Quartalsdaten)	1,52 - 1,57
		1964 - 2010 (Jahresdaten)	1,10 - 1,55
Chetty (2006)	Meta-Analyse von Studien zur Elastizität des Arbeitsangebots, unterschiedliche Zeiträume		< 2
Asplund (2017)	Meta-Analyse Schweden und USA		0,9 - 1,6

<i>Lebenszufriedenheitsansatz</i>			
Layard et al. (2008)	Deutschland ²⁾	1994 - 2005	1.15 - 1.26
Gandelman und Fernandez-Murillo (2014)	Deutschland ³⁾	Gallup World Poll, 2006	0.77
Häse und Obermeyer (2017)	Deutschland	1994-2013	1.19 - 1.43
*Ungewichteter Wert, ohne National Insurance Contributions. Der Wert für einen Single-Vollzeitbeschäftigten mit durchschnittlichem Einkommen liegt lt. Evans (2008) bei 1.06. - ¹⁾ Die Studie weist Ergebnisse für insgesamt 26 europäische Länder aus, hier sind nur Länder dargestellt, für die es auch aus anderen Studien Vergleichsergebnisse gibt.- ²⁾ Die Studie weist Ergebnisse für insgesamt 6 Länder aus.- ³⁾ Die Studie weist Ergebnisse für insgesamt 75 Länder aus.			

Tabelle 1: Studien zur Elastizität des Grenznutzens des Konsums, Quelle: Eigene Zusammenstellung.

Die in Tabelle 1 dargestellten Schätzungen mittels Euler-Gleichung basieren entweder auf aggregierten Makrodaten zu Einkommen und Konsum aus der VGR oder auf Mikrodaten auf Haushaltsebene aus Zensus- oder Panel-Befragungen; die methodische Basis bilden Kointegrationsmodelle sowie Modelle mit Instrumentenvariablen. Die Unterschiede der aus den Euler-Gleichungen resultierenden Schätzungen für den Parameter η resultieren aus der Definition der Konsumvariable, die sich hinsichtlich der Berücksichtigung dauerhafter Güter, demographischer Veränderungen und sich im Zeitverlauf ändernder Konsumbedürfnisse der Haushalte unterscheiden. So berücksichtigen einige Studien neben den Konsumausgaben im engeren Sinne auch Freizeitausgaben, längerlebige Güter (z. B. Groom und Maddison, 2013) oder neben dem privaten auch den öffentlichen Konsum (z.B. Van Dahlen, 1995). Die als Referenzstudie geltende Arbeit von Blundell et al. (1994) zeigt, dass Analysen, die nur eine aggregierte Konsumvariable enthalten und demographische Variablen ignorieren, zu verzerrten Ergebnissen führen. Dementsprechend beziehen spätere Studien (beispielsweise Attanasio und Browning, 1995; Berloff, 1997) Haushaltscharakteristika und demographische Faktoren explizit in die Schätzung ein.

Groom und Maddison (2013) zeigen innerhalb eines Überblicks über Studien zur Euler-Gleichung für Großbritannien, dass die Verwendung von Mikro-Daten zu höheren Schätzergebnissen für die intertemporale Substitutionselastizität führen als die Nutzung von Makrodaten, wenngleich die Differenz nicht statistisch signifikant ist. Außerdem zeigen mit Ausnahme von Patterson und Pesaran (1992) alle Studien, dass die Euler-Gleichung strukturell instabil ist. Interessant ist außerdem das Ergebnis von Blundell et al. (1994), dass die Elastizität des Grenznutzens des Konsums nicht konstant ist, ein Ergebnis, das mit den aus dem Steuerprogressionsansatz resultierenden Schätzungen in Groom und Maddison (2013) korrespondiert.

Ein weiterer Ansatz, der ebenfalls auf der Annahme der additiven Separabilität der Nutzenfunktion beruht, ist die so genannte Frisch-Formel (Frisch, 1959)

$$\eta = \frac{K_i(1-w_i)K_i}{\varepsilon_{ii}}, \quad (6)$$

in der K_i die Einkommenselastizität und ε_{ii} die kompensierte Eigenelastizität der Nachfrage nach Gut i sowie w_i den entsprechenden Anteil der Ausgaben für Gut i am Einkommen des Haushalts repräsentieren. Die Frisch-Formel wird unter der Annahme, dass diese Gütergruppen additiv separabel sind, auf die Ausgaben der Haushalte für Nahrungsmittel und die restlichen Ausgaben angewendet. Es ist allerdings anzumerken, dass es für diese Annahme so gut wie keinen empirischen oder ökonometrischen Beleg gibt.

Die vorliegenden Studien zur Schätzung der Elastizität des Grenznutzens des Konsums mittels des Ansatzes der intertemporalen Konsumententscheidungen weisen im Vergleich zum Steuerprogressionsansatz eine höhere Bandbreite der Schätzergebnisse auf (Tab. 1).

Schätzung mittels der Lohnelastizität des Arbeitsangebots

Während der Ansatz der intertemporalen Konsumententscheidungen auf Lebenszyklusmodellen des intertemporalen Konsumierens und Sparens basiert, schlägt Chetty (2006) einen alternativen Ansatz vor, der – ebenfalls im Rahmen von Lebenszyklusmodellen – die Entscheidung zwischen Konsum und Freizeit durch die Reaktion des Arbeitsangebots (in Arbeitsstunden) auf Lohnänderungen abbildet. Mittels der Slutsky-Zerlegung des Arbeitsangebots identifiziert Chetty (2006) einen Einkommenseffekt, bei dem ein Lohnanstieg zu einer höheren Nachfrage nach Freizeit führt, sowie einen Substitutionseffekt, der zu einem Anstieg des relativen Grenzpreises für Freizeit und damit zu sinkender Freizeitnachfrage führt. Unter der Annahme, dass der Nutzen aus Freizeit unabhängig vom Konsum ist und es neben dem Lohneinkommen keine weiteren Einkommen gibt, diskutiert Chetty (2006) zunächst drei Fälle:

- $\eta = 1$: Beide Effekte heben einander auf.
- $\eta < 1$: Der Substitutionseffekt dominiert und die Freizeitnachfrage sinkt.
- $\eta > 1$: Der Einkommenseffekt dominiert und die Freizeitnachfrage steigt.

Unter der Annahme, dass die Änderungen der Freizeitnachfrage durch Änderungen des Arbeitsangebotes bedingt sind, kann η über die Reaktion des Arbeitsangebotes auf Lohnänderungen geschätzt werden. Chetty (2006) leitet analytisch durch eine Meta-Analyse von 33 Studien zur Elastizität des Arbeitsangebots eine Obergrenze von $\eta < 2$ her, wobei schließlich neben dem Arbeitseinkommen auch Nicht-Arbeitseinkommen berücksichtigt und Komplementarität zwischen Arbeit und Konsum angenommen wird.

Asplund (2017) bezieht in Chettys (2006) analytisches Modell zusätzlich die Möglichkeit ein, dass die Individuen zwischen Marktarbeit und Haushaltsarbeit substituieren können und leitet für zwei Spezialfälle

- keine Reaktion des Arbeitsangebotes auf Lohnänderung,
- Nutzen aus Freizeit und Konsum sind additiv,
- eine Mindestgröße für η her, die zwischen 0,9 und 1,6 liegt.

Im Vergleich zu den Ergebnissen des Ansatzes der intertemporalen Konsumententscheidungen liefern die Schätzungen mittels der Elastizität des Arbeitsangebotes niedrigere Werte für η .

Lebenszufriedenheitsansatz

Eine weitere Methode zur Ermittlung der Elastizität des Grenznutzens des Konsums basiert auf Befragungen von Individuen oder Haushalten zur subjektiven Lebenszufriedenheit. Mit diesem aus der sogenannten Glücksforschung stammenden Ansatz wird angenommen, dass die Lebenszufriedenheit mit dem Nutzen des Konsums korrespondiert und dass die Befragungsteilnehmer in der Lage sind, ihren Nutzen U_i bzw. ihre subjektive Lebenszufriedenheit H_i auf einer diskreten Skala anzugeben, so dass der Zusammenhang zwischen Lebenszufriedenheit und Nutzen für jedes Individuum mittels einer Transformationsfunktion $H_i = g(U_i)$ beschrieben werden kann. Unter der Annahme einer ordinalen Beziehung zwischen H und U kann mit Hilfe eines ordinalen Regressionsmodells der gesuchte Schätzwert für die Elastizität des Grenznutzens des Konsums abgeleitet werden.

Layard et al. (2008) wenden diesen Ansatz auf sechs internationale Haushaltsbefragungen zur Lebenszufriedenheit an, wobei die Schätzergebnisse für die gesuchte Elastizität bei allen sechs Haushaltsbefragungen relativ nahe beieinanderliegen, jedoch zwischen verschiedenen Untergruppen der Bevölkerung (Geschlecht, Alter, Bildungsstand oder Familienstand) variieren. Gandelmann und Hernandez-Murillo (2014) schätzen auf Basis der Daten des Gallup World Poll für 2006 für 75 Länder die gesuchte Elastizität. Häse und Obermeyer (2017) untersuchen verschiedene Modelltypen für Deutschland. Die mit dem Lebenszufriedenheitsansatz erhaltenen Schätzungen (Tabelle 1) liefern im Vergleich zum Stererprogressionsansatz und zum Ansatz der intertemporalen Konsumententscheidungen niedrigere Werte.

3.4 DISKONTIERUNGSSÄTZE FÜR DEUTSCHLAND

Für Deutschland sind zur Ableitung des Diskontierungssatzes nur wenige ökonometrische Studien verfügbar (Tabelle 2). Die aus Evans und Sezer (2004) sowie aus Aristei und Perrugini (2010) mit dem Steuerprogressionsansatz ermittelten Werte für die Elastizität des Grenznutzens des Konsums liegen mit 1,43 und 1,44 nahe beieinander. Selvanathan und Selvanathan (1993) schätzen mit dem Ansatz der intertemporalen Konsumententscheidungen einen Wert von 1,62. Für den Lebenszufriedenheitsansatz liegen drei Studien vor, die von

0,77 bis 1,43 reichen (Layard et al., 2008; Gandelmann und Hernandez-Murillo, 2014; Häse und Obermeyer; 2017). Unter der Annahme einer reinen Zeitpräferenzrate von 0,1 und einer Wachstumsrate des Konsums von 1% würde sich aus diesen Schätzungen für die soziale Diskontierungsrate in Deutschland eine Bandbreite von 0,87 bis 1,72 ergeben, bei einer Wachstumsrate des Konsums von 2% eine Spanne von 1,64 bis 3,34.

Die weiteren in Tabelle 2 angegebenen Quellen sind im Rahmen der Arbeiten zur Bundesverkehrswegeplanung bzw. in zahlreichen Wegekostenstudien verschiedener Institute entstanden. Im Gegensatz zu den Studien zur Elastizität des Grenznutzens des Konsums basieren sie nicht auf empirisch-ökonomischen Arbeiten. Kotz et al. (1987) leiten unter der Annahme einer optimalen Allokation zwischen Investitionen und Konsum mittels eines intertemporalen Modells für $r = s$ eine Größenordnung von 2% bis 3% ab³. Beckers et al. (2009) ermitteln durch Einsetzen plausibler Werte für die relevanten Parameter (Steuersätze, Wachstumsrate des Konsums, Elastizität des Grenznutzens des Konsums etc.) mit dem Opportunitätskostenansatz einen Wert von 2% und mit dem Ansatz der sozialen Zeitpräferenzrate einen Wert von 1,97%. Der aktuelle Bundesverkehrswegeplan 2015 verwendet darauf aufbauend, eine Diskontierungsrate von 1,7%. Link et al. (2009) folgen der Konvention der deutschen Wegekosten-Enquete und legen, basierend auf dem Opportunitätskostenansatz einen realen Zinssatz von 2,5% als Diskontierungsrate in der Wegekostenstudie für 2007 zugrunde⁴. Die Wegekostenstudie von Alfen et al. (2014) präferiert ebenfalls den Opportunitätskostenansatz und leitet aus einer Prognose der durchschnittlichen Umlaufrendite von Bundesanleihen mittlerer Laufzeit einen realen Zinssatz von 1,1% ab.

Studie	Methode	Daten und Annahmen	Ergebnis
<i>Schätzungen für die für die Elastizität des Grenznutzens des Konsums η</i>			
Evans und Sezer (2004)	Steuerprogression	OECD-Daten	1,4
Selvanathan und Selvanathan (1993)	Intertemporale Konsumentscheidungen	OECD-Daten	1,62
Layard et al. (2008)	Lebenszufriedenheitsansatz	SOEP-Daten	1,26 (0,9 - 1,63)
Aristei und Perugini (2010) ¹⁾	Steuerprogression	2006	1,44
Gandelman und Fernandez-Murillo (2014)	Lebenszufriedenheitsansatz	Gallup World Poll, 2006	0,77

³ Der obere Schätzwert von 3% war bis zum vorletzten BVWP 2003 der maßgebliche Zinssatz für die Bewertungsmethodik der BVWP.

⁴ Sie wurde aus dem langjährigen Durchschnitt der Renditen für Anleihen der öffentlichen Hand, vermindert um die durchschnittliche jährliche Preissteigerungsrate für Verkehrswegeinvestitionen, errechnet.

Häse und Obermeyer (2017)	Lebenszufriedenheitsansatz	1994 – 2013	1,19 – 1,43
<i>Angenommene Werte für die soziale Diskontierungsrate</i>			
Kotz et al. (1987)	Intertemporale Wohlfahrtsfunktion	Optimale Allokation zwischen Konsum und Investitionen	$2,0 < r < 3,0$ $r = p = 3,0$
Prograns und IWW (2007)	Opportunitätskostenansatz	Keine Angabe	$r = 5,5$ (nominal)
Beckers et al. (2009)	Opportunitätskostenansatz Einsetzen plausibler Werte	$t_s, t_d = 0$; $0,25 < t_u < 0,35$ $1,3 < i < 3,5$ $0,6 < \lambda < 0,8$	$1,4 < r < 3,0$ $r = 2,0$
Beckers et al. (2009)	Soziale Zeitpräferenzrate Einsetzen plausibler Werte	$1,0 < g < 2,0$ $1,0 < \eta < 1,5$ $\delta = 0,1$	$1,1 < p < 3,1$ $p = 1,97$
Link et al. (2009)	Opportunitätskostenansatz	langjähriger historischer Durchschnitt der Renditen für Anleihen der öffentlichen Hand	$r = 2,5$
Alfen et al. (2014)	Opportunitätskostenansatz	Prognose der durchschnittlichen Umlaufrendite von Bundesanleihen mittlerer Laufzeit	$r = 1,1$

Tabelle 2: Diskontierungssätze für Deutschland, Quelle: Eigene Zusammenstellung.

4 Zeitinkonsistenz und hyperbolisches Diskontieren

Die exponentielle Diskontierungsformel geht davon aus, dass sich eine Entscheidung zwischen zwei verschiedenen Optionen nicht ändert, wenn man diese beiden Optionen um die gleiche Zeitspanne verschiebt. Diese Annahme zeitkonsistenter Präferenzen steht jedoch im Widerspruch zum beobachteten Verhalten, dass Individuen Ereignisse in ferner Zukunft anders bewerten als wenn sie gerade bevorstünden, und einmal gefasste Pläne im Zeitverlauf ändern oder womöglich ganz ad acta legen. Das Phänomen gegenwartsverzerrter Präferenzen, bei dem eine Person die nahe Zukunft stärker bewertet als die ferne Zukunft, bzw. verallgemeinert die Existenz von zeitinkonsistenten Präferenzen, führte zum Ansatz der hyperbolischen sowie quasi-hyperbolischen Diskontierung, bei der die Diskontierungsrate selbst eine Funktion der Zeit ist. So zeigen zahlreiche experimentelle Studien wie zum Beispiel Thaler (1981), Kirby (1997), Laibson (1997), Benhabib et al. (2004) und Cameron und Gerdes (2005), dass Individuen hyperbolisch diskontieren, d.h. eine höhere Diskontierungsrate für die nähere Zukunft und eine niedrigere für die entfernte Zukunft verwenden. In den letzten Jahren konnten im

Rahmen der Neuroökonomie anhand von Messungen der Hirnaktivität von Versuchspersonen zudem nachgewiesen werden, dass beim Diskontieren bestimmte Hirnareale wie der ventromediale präfrontale Kortex und das Striatum aktiv sind, wenngleich es innerhalb dieser Disziplin noch einen Dissens darüber gibt, ob ein einziges System oder zwei getrennte Systeme für das hyperbolische Diskontieren verantwortlich sind. Eine Darstellung dieser Forschungsrichtung würde den vorliegenden Beitrag sprengen; der interessierte Leser sei beispielsweise auf McClure et al. (2004), Kable und Glimcher (2007) und Gregoriuos-Pippas et al. (2009) verwiesen.

In der wirtschaftswissenschaftlichen Literatur wurde die Anwendung des hyperbolischen Diskontierens durch Arbeiten von Phelps und Pollack (1968) zum intergenerationellen Altruismus, Akerlof (1991) zum Phänomen des Aufschiebens, Ainslie (1992) zum Suchtverhalten, und Loewenstein und Prelec (1992) sowie Laibson (1997) zur Analyse von Sparen und Konsum inspiriert. In den meisten Studien hat sich die von Laibson (1997) vorgeschlagene quasi-hyperbolische Diskontierungsfunktion durchgesetzt, die eine Approximation der hyperbolischen Diskontierungsfunktion darstellt und analytisch leichter handhabbar ist. Die Diskontierung eines Nutzenstroms $U(c_t, \dots, c_T)$ ergibt sich danach als

$$U(c_t, \dots, c_T) = \delta^t u(c_t) + \beta \sum_{\tau=t+1}^T \delta^\tau u(c_\tau) \quad (7)$$

mit $0 \leq \beta < 1$ und $0 < \delta < 1$, wobei der Nutzenstrom der aktuellen Periode t mit dem Faktor δ^t und die Nutzenströme aller folgenden Perioden mit einem um $\beta < 1$ verminderten exponentiellen Faktor δ^τ multipliziert werden. Für $\beta = 0$ ergibt sich die bekannte exponentielle Diskontierungsformel, für $\beta < 1$ ein „Gegenwartsbias“, d. h. eine stärkere Bewertung des gegenwärtigen Konsums. O’Donoghue und Rabin (1999) bezeichnen hyperbolische Präferenzen auch als (β, δ) Präferenzen. Grundsätzlich ist zu berücksichtigen, dass hyperbolisches Diskontieren zwar zeitinkonsistentes, jedoch nicht zwangsläufig irrationales Verhalten widerspiegelt. Zudem kann das Problem fehlender Zeitkonsistenz von Entscheidungen durch Maßnahmen der Selbstbindung sowohl auf individueller als auch auf politisch-gesellschaftlicher Ebene gelöst werden.

Karp (2005) verwendet das quasi-hyperbolische Diskontieren in einem theoretischen Modell zur Diskontierung von Maßnahmen gegen den Klimawandel. Ein empirischer Nachweis des quasi-hyperbolischen Diskontierens findet sich zum Beispiel in Viscusi und Huber (2006) bei der Bewertung von Kosten zur Verbesserung der Wasserqualität von Gewässern in den USA. Hepburn (2004) zeigt, dass „naives“ hyperbolisches Diskontieren beispielsweise beim Bewirtschaften einer natürlichen, reproduzierbaren Ressource wie dem nordatlantischen Kabeljau und der peruanischen Sardelle zur völligen Erschöpfung dieser Ressource führen kann. Die Ursache hierfür liegt wiederum in der Zeitinkonsistenz des „naiven“ Planers begründet, die ein informierter Planer mittels geeigneter Regulierungs- und Selbstbindungsmaßnahmen zu berücksichtigen weiß.

5 Im Zeitverlauf sinkende Diskontierungsraten

Die traditionell in der Kosten-Nutzen-Analyse für öffentliche Investitionen verwendete exponentielle Diskontierungsformel führt bei Entscheidungen, die einen sehr langen Zeithorizont betreffen, dazu, dass in ferner und sehr ferner Zukunft auftretende Kosten und Nutzen zu stark abgewertet werden und die Entscheidungssituation verzerrt wird. Dieses Problem ist insbesondere im Rahmen der Nachhaltigkeitsdiskussion relevant. Prominente Beispiele hierfür sind Maßnahmen gegen den Klimawandel und gegen Verluste an Biodiversität, Investitionen zur Beseitigung von nuklearem Müll oder auch die Folgekosten von Projekten bzw. Entscheidungen wie z. B. dem Kohleabbau⁵. Dementsprechend wurde seit den 80er Jahren insbesondere innerhalb der Ökologiebewegung und im Zusammenhang mit der Diskussion um die Generationengerechtigkeit grundsätzliche Kritik am Konzept der Diskontierung geübt (vgl. z. B. Birnbacher, 1989; Schelling, 1995), teilweise die Diskontierung grundsätzlich in Frage gestellt (Lesser und Zerbe, 1995; Schelling, 1995) und vorgeschlagen, Gerechtigkeitsaspekte in der Kosten-Nutzen-Analyse zu berücksichtigen. Dem steht jedoch das Argument gegenüber, dass die Kosten-Nutzen-Analyse ein Instrument für die (auf einheitlichen Kriterien beruhende, nachvollziehbare und transparente) Auswahl und Priorisierung effizienter Projekte darstellt, in denen Gerechtigkeitsaspekte zunächst keine Rolle spielen. Zudem müssten die Parameter der Diskontierungsrate normativ gesetzt werden und unterliegen damit ethisch-moralischen Bewertungen, für die möglicherweise weder ein wissenschaftlicher noch ein demokratischer Konsens existiert.

Neben dem politisch-praktischen Problem einer zu starken Abwertung von weit in der Zukunft liegenden Kosten und Nutzen steht die Anwendung des exponentiellen Diskontierens mit einer zeitlich konstanten Diskontierungsrate im Widerspruch zum in der Realität bzw. in Experimenten beobachteten hyperbolischen Diskontierungsverhalten (Kapitel 4). Aus diesem Widerspruch zwischen der verhaltensökonomischen Erklärung des beobachteten hyperbolischen Diskontierens von Individuen und der aus dem Discounted Utility Modell abgeleiteten exponentiellen Diskontierungsformel, die im Zeitverlauf konstant und zeitkonsistent ist, resultierten einige Arbeiten zur Verbindung beider Konzepte. Ausgehend von dem Argument, dass eine soziale Diskontierungsrate, die zur Entscheidung über öffentliche Investitionen verwendet wird, die individuellen Präferenzen der Bevölkerung abbilden sollte, beschäftigten sich Gollier und Zeckhauser (2005), Jackson und Yariv (2012), Heal und Milner (2013) sowie Milner und Heal (2014) mit der Aggregation heterogener intertemporaler Präferenzen von Individuen zu einer sozialen Diskontierungsrate. Dennoch haben sich die dort beschriebenen Erklärungsansätze nicht durchgesetzt. So kritisieren z. B. Henderson und Bateman (1995), dass die hyperbolische

⁵ So fallen zum Beispiel aufgrund der durch den Kohleabbau bedingten Absenkung des Ruhrgebietes „ewige“ Pumpkosten an.

Diskontierung als Ansatz zur Beschreibung zeitinkonsistenten Verhaltens ungeeignet für ein Modell der rationalen politischen Entscheidungsfindung sei⁶. Groom und Hepburn (2017) weisen zudem darauf hin, dass die verhaltensökonomischen Modelle für kürzere Zeiträume des Entscheidungsverhaltens wie Tage, Wochen oder bestenfalls 1 bis 2 Jahre abgeleitet wurden, nicht aber für Dekaden oder gar Jahrhunderte.

Die ökonomische Forschung und Politikberatung hat seit den neunziger Jahren auf die Kritik an der exponentiellen Diskontierungsformel mit zahlreichen theoretischen und empirischen Arbeiten zu im Zeitverlauf sinkenden Diskontierungsraten reagiert, die im Folgenden dargestellt werden sollen. Dabei handelt es sich im Wesentlichen um zwei zunächst voneinander unabhängig entwickelte Denkansätze: die von Christian Gollier (Toulouse School of Economics) entwickelte stochastische Erweiterung der Ramsey-Gleichung, und der vom Harvard-Ökonomen Martin Weitzman entwickelte Ansatz des erwarteten Gegenwartwertes unter Zugrundelegung der Gammaverteilung.

5.1 STOCHASTISCHE ERWEITERUNG DER RAMSEY-GLEICHUNG

Ausgangspunkt für Erweiterungen der Ramsey-Formel war zunächst die Unsicherheit über die zukünftige Wachstumsrate des Konsums g , insbesondere bei sehr langem Zeithorizont. Die Modellierung dieser Unsicherheit basiert auf der Annahme, dass Konsumschocks unabhängig und identisch normalverteilt mit bekannten Mittelwert μ_g und Varianz σ_g^2 sind, und ergänzt die Ramsey-Gleichung um einen dritten Term, der als Unsicherheits- oder Vorsorgeterm interpretiert wird (Gollier, 2002; Mankiw, 1981):

$$p = \delta + \eta \mu_g - 0.5 \eta^2 \sigma_g^2 \quad . \quad (8)$$

Er drückt die Unsicherheit über die Wachstumsrate des zukünftigen Konsums aus und würde den Planer veranlassen, durch höheres Sparen in der Gegenwart Vorsorge zu treffen. Die Größe dieses Terms ist von der Art der betrachteten Konsumschocks abhängig und variiert von Land zu Land. So schätzt Kocherlokata (1996), basierend auf Daten zum Konsumverhalten in den USA von 1889 - 1978, für die Parameter μ und σ Werte von 1,8% und 3,6%, was unter der Annahme von $\delta = 0$ und $\eta = 2$ (Gollier, 2008) zu einem Vorsorgetermen von 0,26% und einer Diskontierungsrate von 3,34% anstelle von 3,6% in der originalen Ramsey-Formel führen würde. Gollier (2011) findet insbesondere für Entwicklungsländer wesentlich höhere Vorsorgeterme. Wenn die Konsumschocks durch Katastrophen ausgelöst werden (zum Beispiel große Depression, Bio-Terrorismus, Mega-

⁶ Wie an anderer Stelle bereits ausgeführt, ist hyperbolisches Diskontieren allerdings nicht zwangsläufig als Ausdruck fehlender Rationalität anzusehen.

Viren), ergeben sich nach Pindyck und Wang (2013) höhere Unsicherheits- bzw. Vorsorgeterme in der Größenordnung von 1,2 bis 1,6.

Während die Erweiterung der Ramsey-Gleichung um einen Vorsorge- bzw. Unsicherheitsterm zu einer zwar niedrigeren, aber dennoch konstanten Diskontierungsrate führt, leitet Gollier (2008) unter den Annahmen einer CRRA-Nutzenfunktion (d. h. einer iso-elastischen Nutzenfunktion) sowie zeitlich positiv korrelierter Konsumschocks eine im Zeitverlauf sinkende Diskontierungsrate her. So kann die Wachstumsrate des Konsums $\ln(c_t/c_{t-1}) \equiv x_t$ unter der Annahme, dass die Konsumschocks einem autoregressiven Prozess erster Ordnung (AR (1) - Prozess) folgen, wie folgt modelliert werden:

$$x_t = \varphi x_{t-1} + (1 - \varphi)\mu + u_t. \quad (9)$$

Unter der Bedingung, dass $0 < \varphi < 1$, ergibt sich eine sinkende Diskontierungsrate, wobei für unendliches t der Vorsorgeterm mit dem Faktor $(1 - \varphi)^2$ multipliziert wird. Gollier (2008) leitet für $\varphi = 0,3$ eine moderat sinkende Diskontierungsrate ab. Ceccetti et al. (2000) erhalten bei Zugrundelegung eines Regime-Switching Prozesses in einem positiven Wachstumsregime eine sicherheits-äquivalente Diskontierungsrate von 4,3% in der Gegenwart und 3,4% nach 100 Jahren. Für den – der Realität am besten entsprechenden – Fall von Unsicherheit hinsichtlich der zukünftigen Wachstumsrate des Konsums, d. h. für den Fall, dass μ_g und σ_g unbekannt sind, ergeben sich ebenfalls im Zeitverlauf sinkende Diskontierungsraten. So betrachtet Gollier (2008) den Fall, dass die Wachstumsrate des Konsums in logarithmierter Form einem Random-Walk folgt und die durchschnittliche Wachstumsrate von einem Parameter θ abhängt, d. h. $\mu_g = \mu_g(\theta)$. Die sicherheitsäquivalente Diskontierungsrate ist dann durch

$$R_t = \delta + \eta M_t \quad (10)$$

gegeben, wobei M_t wie folgt definiert ist:

$$\exp(-\eta t M_t) = E_\theta \exp[-(\eta t \mu_g(\theta) - 0.5 \eta \sigma_g^2)] \quad (11)$$

Aufgrund der Jensenschen Ungleichung sinken M_t und R_t über die Zeit. Abb. 2 zeigt den Verlauf der Diskontierungsrate R_t für die Parameter $\delta = 0$, $\eta = 2$ und $\sigma_g = 3,6\%$ sowie gleichverteiltem μ_g mit 1% bzw. 3%. Die sicherheitsäquivalente Diskontierungsrate beträgt bei Wahl dieser Parameter 3,8% heute und 2% nach 300 Jahren.

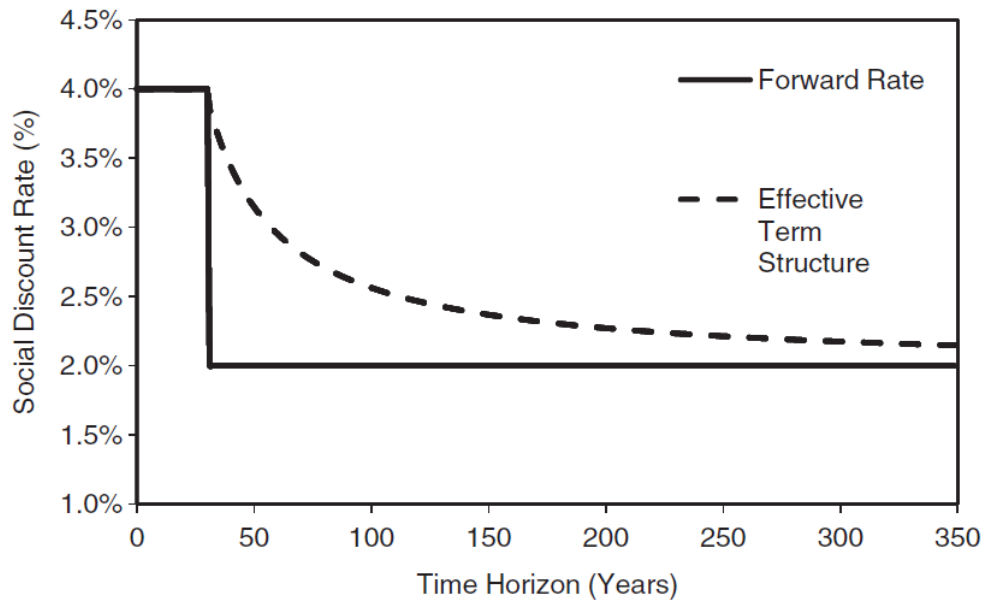


Abbildung 2: Im Zeitverlauf sinkende soziale Diskontierungsrate in Frankreich, Quelle: Lebegue (2005).⁷

5.2 DER ERWARTETE GEGENWARTSWERT ALS ALTERNATIVER ANSATZ

Die Ramsey-Gleichung sowohl in ihrer ursprünglichen als auch in ihrer erweiterten Form kann keinen unmittelbaren empirischen Verlauf für die sicherheitsäquivalente Diskontierungsrate liefern, sondern muss parametrisiert werden. Parallel zu den Arbeiten von Gollier an der Erweiterung der Ramsey-Formel entwickelte Weitzman einen Modellierungsansatz, mit dem die Diskontierungsrate direkt empirisch bestimmt werden kann. Ausgangspunkt für den von Weitzman vorgeschlagenen Ansatz des erwarteten Nettogegenwartswertes ist das „klassische“ Diskontieren, bei dem zukünftigen Nutzen auf ihren Gegenwartswert über die Rendite langfristiger öffentlicher Anleihen r bei sehr langen Zeithorizont diskontiert werden. Berücksichtigt man dabei die Unsicherheit über den zukünftigen Verlauf der Rate of Return langfristiger öffentlicher Anleihen mittels einer (stationären) Wahrscheinlichkeitsverteilung, so ergibt sich eine im Zeitverlauf sinkende Diskontierungsrate.

⁷ Anmerkung: Die Forward Rate ist die Rate, mit der die Kosten und Nutzen des Jahres $t + 1$ auf das Jahr t diskontiert werden. Die Effective Term Structure ist die Rate zur Diskontierung von t zurück auf $t = 0$.

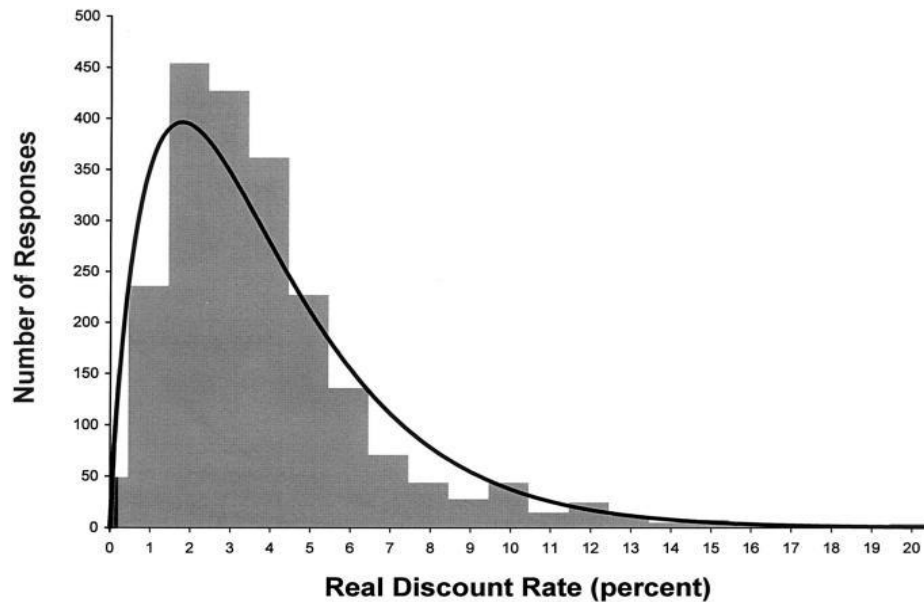


Abbildung 3: Gammaverteilung für die langfristige Diskontierungsrate für klimapolitische Maßnahmen, Quelle: Weitzman (2001).

Weitzman (1998, 2001) beschreibt die Unsicherheit bezüglich r mittels einer Gammaverteilung mit dem Mittelwert μ und der Varianz σ^2 und leitet für die sicherheitsäquivalente Diskontierungsrate die Gleichung

$$R_t = \mu / [1 + t \sigma^2 / \mu] \quad (12)$$

ab. Die verwendete Gammaverteilung wurde dabei empirisch über eine Befragung von mehr als 2000 PhD-Ökonomen und 50 Top-Ökonomen⁸ hinsichtlich ihrer als angemessen

⁸ Zu den 50 befragten Top-Volkswirten gehörten: Akerlof, Arrow, Atkinson, Barro, Baumol, Becker, Bradford, Campbell, Card, Cline, Diamond, Dixit, Dreze, Feldstein, Fischer, Gordon, Hall, Harberger, Hausman, Jorgenson, Kotlikoff, Kreps, Krugman, Laffont, Leland, Lucas, Maler, Malkiel, Manne, McFadden, Merton, Mirrlees, Murphy, Nordhaus, Pestieau, Portney, Porterba, Ross, Sandmo, Schelling, Schmalensee, Scholes, Sen, Shiller, Shoven, Solow, Stiglitz, Summers, Tobin, Viscusi.

eingeschätzten Diskontierungsrate für die Kosten und Nutzen von Maßnahmen gegen den Klimawandel ermittelt. Die Antworten waren gamma-verteilt in einer Spanne von -3% bis +27% sowie einem Mittelwert von $\mu = 3,96$ und einer Varianz von $\sigma^2 = 2,94$ (vgl. Abbildung 3). Die daraus abgeleitete Diskontierungsrate würde stufenweise von 4% in der unmittelbaren Zukunft (innerhalb von 1 bis 5 Jahren), 3% innerhalb von 6 bis 25 Jahren, 2% innerhalb von 26 bis 75 Jahren auf 1% innerhalb von 76 bis 300 Jahren fallen und für die weit entfernte Zukunft (mehr als 300 Jahre) schließlich 0% betragen.

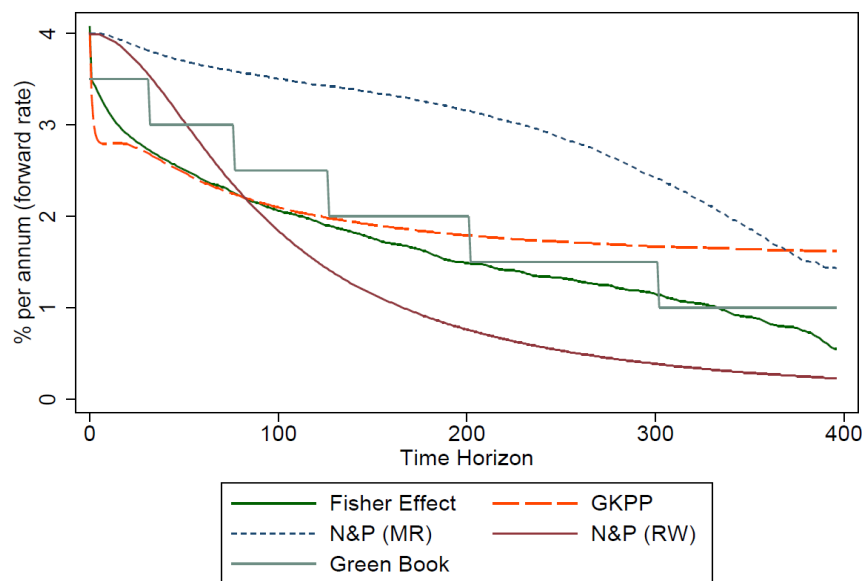


Abbildung 4: Beispiele für empirisch ermittelte Verläufe sozialer Diskontierungsraten, Quelle: Freeman et al. (2015).⁹

Die in Weitzmans Gammaverteilung der Expertenschätzungen abgebildete Unsicherheit ist allerdings laut Weitzman (2001) weniger als Unsicherheit über die zukünftige Zinsentwicklung, sondern eher als Heterogenität der Expertenmeinungen im Hinblick auf die normativ-ethische Bewertung zu interpretieren.

⁹ Anmerkungen: GKPP: State space Modell aus Groom et al. (2007). Fisher Effect: Kointegrationsmodell mit Fisher-Effekt aus Freeman et al. (2015). N&P (MR): Mean-Reverting Modell aus Newell and Pizer (2003). N&P (RW): Random-walk Modell aus Newell and Pizer (2003).

Studie	Datenbasis	Diskontierungsrate (%)					Kosten pro t CO ₂ **	Abweichung zu konstanter Diskontierung
		Heute	100 Jahre	200 Jahre	300 Jahre	400 Jahre		
Newell und Pizer (2003) Konstant 4% Random Walk Modell Mean-Reverting Modell*	USA 1798 - 1999	4	4	4	4	4	5,74	
		4	2	1	0,5	< 0,5	10,44	82%
		4	3,5	3,1	2	1	6,52	14%
Groom et al. (2007) Konstant 4% Random Walk Modell Mean-Reverting Modell IGARCH Modell Regime-Switching Modell State Space Modell*	USA 1798 - 1999						5,74	
		4,0	2,17	0,94	0,56	0,34	10,32	80%
		4,0	3,51	3,16	2,43	1,41	6,43	12%
		4,0	3,42	1,62	0,23	0,04	6,37	11%
		4,0	4,09	3,31	1,83	0,70	5,22	-9%
		4,0	2,10	1,79	1,67	1,61	14,44	152%
Gollier et al. (2008) Regime-Switching Modelle für:								
	Frankreich	1746 - 2006	4,8	3,6	2,7	1,7	1,1	
	Japan	1870 - 2006	4,5	3,1	2,6	2,1	1,4	
	Südafrika	1860 - 2006	3,9	3,5	3,1	2,7	2,4	
	Indien	1800 - 2006	4,5	3,8	3,1	1,8	0,8	

Hepburn et al. (2009)								
Regime-Switching Modelle für:								
Australien	1856 - 2004	3,5	3,38	3,2	2,87	1,03	15,50	130%
Kanada	1844 - 2004	3,5	2,79	2,56	2,37	2,16	17,30	150%
Deutschland	1804 - 2004	3,5	3,5	3,14	1,98	1,02	8,90	31%
UK	1802 - 2004	3,5	3,42	3,10	2,42	0,99	9,50	39%
** Die angegebenen Werte sind den entsprechenden Studien entnommen und basieren auf unterschiedlichen Währungen/Preisbasen wie folgt: Newell und Pizer (2003) sowie Groom et al. (2007) in US\$ auf Preisbasis 1989. Hepburn et al. (2006) in £ auf Preisbasis 2005. Keine vergleichbaren Angaben in Gollier et al. (2008).								

Tabelle 3: Empirische Verläufe von Diskontierungsraten basierend auf univariaten Zeitreihenmodellen, Quellen: Eigene Zusammenstellung, basierend auf Newell und Pizer (2003), Groom et al. (2007), Gollier et al. (2008), Hepburn et al. (2006).

5.3 EMPIRISCHE ARBEITEN ZU SINKENDEN DISKONTIERUNGSRATEN UND PRAKTISCHE RELEVANZ

Die vorliegenden empirischen Schätzungen von im Zeitverlauf sinkenden Diskontierungsraten basieren auf der Annahme, dass r_t durch die Entwicklung der Rate of Return von risikolosen Staatsanleihen approximiert werden kann. Grundsätzlich könnte deren langfristige Entwicklung entweder durch die Modellierung möglichst aller relevanten Einflussfaktoren oder durch univariate Zeitreihenmodelle geschätzt werden. Aufgrund der für die Modellierung aller relevanten Einflussgrößen erforderlichen Annahmen und den erheblichen empirischen Problemen hat sich die Nutzung univariater Zeitreihenmodelle durchgesetzt. Sie basieren auf Daten zur Entwicklung der realen Marktzinsen risikoloser Staatsanleihen¹⁰.

Beispielhaft sind einige der daraus resultierenden Verläufe von empirisch ermittelten Diskontierungsraten in Tabelle 3 und Abbildung 4 dargestellt. Aus ihnen wird die Modellabhängigkeit des Verlaufs der sozialen Diskontierungsrate gut ersichtlich: So sinkt beispielsweise im State Space Modell von Grom et al. (2007) die Diskontierungsrate in den ersten 100 Jahren am schnellsten, weist aber nach 400 Jahren den höchsten Wert der

¹⁰ Gollier et al. (2008) argumentieren, dass die Verwendung von Marktzinsen zwar durchaus problematisch, die Alternative einer Verwendung der Schattenpreise des Kapitals jedoch nicht praktikabel sei. Zudem würde die aus Schattenpreisen abgeleitete Diskontierungsrate relativ nahe bei einer aus den Zinsen risikoloser öffentlicher Anleihen abgeleiteten Diskontierungsrate liegen.

geschätzten Modelle auf. Das auf den gleichen Daten basierende Mean Reverting Modell von Newell und Pizer (2003) ergibt im Vergleich dazu zunächst ein weniger starkes Sinken der Diskontierungsrate, jedoch nach 400 Jahren einen niedrigeren Wert als das State Space Modell von Groom et al. (2007). Freeman et al. (2015) zeigen außerdem die Abhängigkeit der Diskontierungsrate von der Berücksichtigung der Inflation in den verwendeten Zinsreihen. So ist zu berücksichtigen, dass die Ergebnisse in Newell und Pizer (2003) sowie Groom et al. (2007) auf Zinsdaten der USA basieren, die aufgrund fehlender Informationen für die Zeit vor 1950 nicht deflationiert wurden, d. h. die verwendete Zeitreihe besteht bis 1950 aus nominalen und ab 1959 aus realen Zins-Daten. Freeman et al. (2015) schätzen deshalb ein Zeitreihenmodell mit Kointegration zwischen der nominalen Zinsentwicklung und der Inflationsentwicklung mittels des Fisher-Effekts. Die daraus resultierende Diskontierungsrate sinkt stärker als die mit den jeweils präferierten Modellen von Newell und Pizer (2003) und Groom et al. (2007).

5.4 KONSEQUENZEN SINKENDER DISKONTIERUNGSRATEN UND PRAKTISCHE ANWENDUNG

Die Verwendung einer im Zeitverlauf sinkenden Diskontierungsrate führt zu beträchtlichen quantitativen Auswirkungen im Vergleich zum zeitlich konstanten, exponentiellen Diskontieren. Ein Vergleich des Wertes je Tonne CO₂ mit konstanter und zeitlich sinkender Diskontierungsrate in Tabelle 3 zeigt z. B. für die auf den gleichen Daten basierenden, jeweils präferierten Modelle von Newell und Pizer (2003) und Groom et al. (2007) Abweichungen von 14% bis 152%. Die Abweichungen der mit sinkenden Diskontierungsraten ermittelten Werte je Tonne CO₂ in Hepburn et al. (2009) reichen von 31% für Deutschland bis zu 50% für Kanada.

Sinkende Diskontierungsraten sind inzwischen in einigen Ländern Bestandteil der offiziellen Empfehlungen zur Kosten-Nutzen-Analyse öffentlicher Projekte. Abbildung 5 zeigt für einige Länder den Verlauf der vorgeschlagenen bzw. implementierten Diskontierungsrate. So wird in Großbritannien seit 2003 eine Diskontierungsrate von 3,5% für kürzere Zeithorizonte und eine stufenweise von 3,5% auf 1% fallende Rate für den Langfristbereich angewendet. In Frankreich basiert die aktuelle Empfehlung der Kosten-Nutzen-Analyse auf drei Gutachten, die seit 2005 erstellt worden. Lebegue (2005) empfahl für risikofreie Projekte eine Diskontierungsrate von 4%, die nach 30 Jahren auf 2% sinkt. Gollier (2011) erweiterte diese Empfehlung um die Betrachtung risikobehafteter Projekte und schlug für solche Projekte eine Risikoprämie von mehr als 4% vor. Quinet (2013) empfahl, basierend auf Gollier (2011) etwas geringere Risikoaufschläge. Im Ergebnis der geführten akademischen und politischen Diskussion wendet Frankreich nunmehr eine Diskontierungsrate von 2,5% für risikolose Projekte und einen Risikoaufschlag von 2% für risikobehaftete Projekte an, der ab 2070 auf 3% ansteigt.

Eine 2011 vom norwegischen Finanzministerium eingesetzte Expertenkommission schlug für die Kosten-Nutzen-Analyse in Norwegen eine sinkende Diskontierungsrate für risikofreie Projekte von 2,5% für die ersten 30 Jahre und 2% nach 30 Jahren vor, die

inzwischen Eingang in die offiziellen Empfehlungen der Kosten-Nutzen-Analyse gefunden hat. In den Niederlanden erfolgte in den Jahren 2014 und 2015 eine turnusmäßige Überprüfung der Empfehlungen für die offizielle Kosten-Nutzen-Analyse, aus der prinzipiell eine Befürwortung für eine im Zeitverlauf sinkende Diskontierungsrate hervorging. Diese Empfehlung wurde allerdings nicht umgesetzt, da der Realzins zu diesem Zeitpunkt bereits 0% betrug und ein Sinken der Diskontierungsrate in den Negativbereich als problematisch angesehen wurde. Stattdessen wurde eine konstante Diskontierungsrate von 3% für alle öffentlichen Projekte als eine systematische Risikoprämie vorgeschlagen und erwogen, ein sogenanntes duales Diskontieren einzuführen, bei dem unterschiedliche Diskontierungsraten für unterschiedliche Projektarten verwendet werden. In den USA fand ebenfalls eine wissenschaftliche und politisch praktische Diskussion zur Anwendung einer sinkenden Diskontierungsrate statt; bislang wird jedoch nach wie vor eine konstante Diskontierungsrate angewendet.

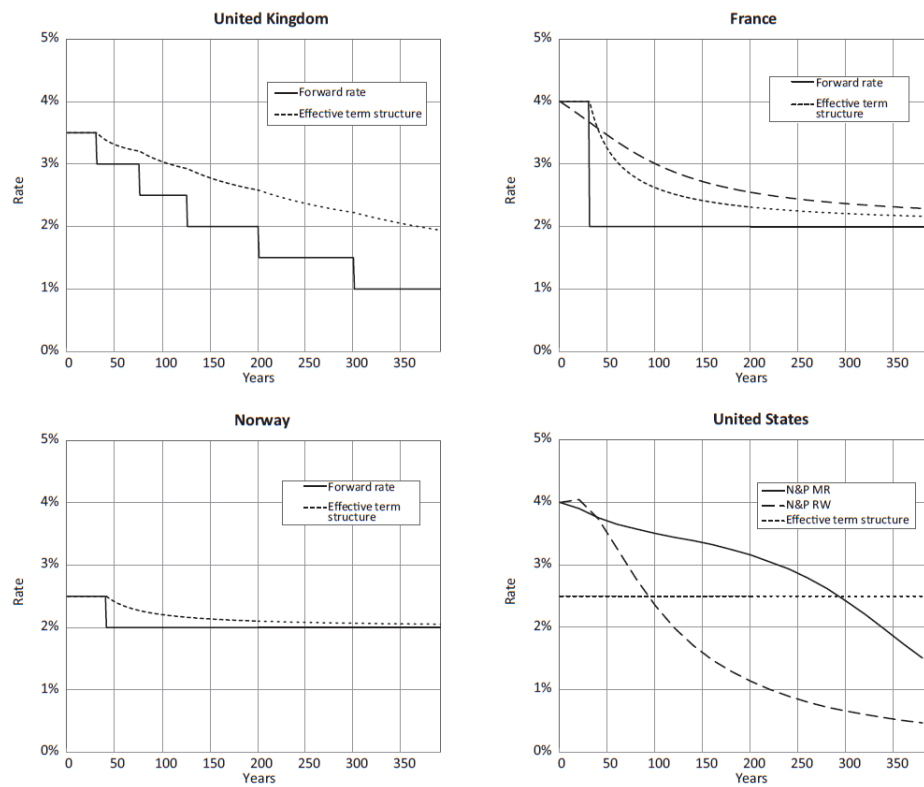


Abbildung 5: Im Zeitverlauf sinkende Diskontierungsraten in Großbritannien, Frankreich, Norwegen und den USA (Quelle: Groom und Hepburn (2017)).

6 Schlussfolgerungen

Die Problematik der sozialen Diskontierungsrate gehört zu den ökonomischen Themen, die den Weg vom theoretischen Konstrukt in die praktische Anwendung in der Politik geschafft haben. Beginnend mit dem auf Samuelsons Discounted Utility Modell basierenden exponentiellen Diskontieren über die verhaltensökonomischen Erklärungsansätze des hyperbolischen Diskontierens bis hin zu den theoretischen und empirischen Studien zur Anwendung von zeitlich sinkenden Diskontierungsraten sind eine Vielzahl theoretischer, methodischer und empirischer Arbeiten entstanden. Dennoch ist festzustellen, dass insbesondere für die empirische Umsetzung der sozialen Diskontierungsrate nach wie vor große Lücken existieren, so zum Beispiel in der Bestimmung der wesentlichen Parameter der Ramsey-Gleichung sowohl für den konstanten Fall als auch für ihre stochastische Erweiterung. Gleiches gilt für die Ableitung von sinkenden Diskontierungsraten zur Bewertung von sehr langfristigen Projektwirkungen.

Für Deutschland existieren, trotz einer Tradition der Kosten-Nutzen-Analyse in der Bundesverkehrswegeplanung, nur wenige Untersuchungen zur konzeptionellen und empirischen Ableitung einer sozialen Diskontierungsrate. Dies ist nicht nur vor dem Hintergrund der Investitionsplanung im Bundesverkehrswegeplan, sondern auch im Rahmen der seit der Finanzkrise aufgekommenen Diskussion über die Verzinsung des Straßenkapitals in den Wegekostenrechnungen zur Bestimmung der Maut auf Autobahnen und Bundesstraßen erstaunlich. Auch die Vorreiterrolle, die Deutschland so gerne in der Nachhaltigkeitsdebatte und bei der Energiewende für sich in Anspruch nimmt, hat sich bislang in keinerlei wissenschaftlichen Arbeiten zur Thematik von im Zeitverlauf sinkenden Diskontierungsraten niedergeschlagen. Aus diesen Defiziten ergeben sich die Anforderung und auch das Potenzial für die weitere Forschung in der deutschen verkehrsökonomischen Community.

Literatur

- Ainslee, G. (1992), *Picoeconomics: The Strategic Interaction of Successive Motivational States Within the Person*, Cambridge University Press,
- Akerlof, G. A. (1991), Procrastination and Obedience, *American Economic Review*, 81(2), 1-19.
- Alfen, Aviso, IVM (2014), Berechnung der Wegekosten für das Bundesfernstraßennetz sowie der externen Kosten nach Maßgabe der Richtlinie 1999/62/EG für die Jahre 2013-2017. Gutachten im Auftrage des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur, Weimar, Leipzig, Aachen, Münster.
- Arstei, D., C. Perugini (2010), Preferences for Redistribution and Inequality in Well-being across Europe, *Journal of Policy Modeling*, 32, Nr. 2, 176–195.
- Arrow, K., Cropper, M., Gollier, C., Groom, B., Heal, G., Newell, R., Nordhaus W. D., Pindyck, R. S., Pizer, W.A., Portney, P.R., Sterner, T., Tol, R.S.J., Weitzman, M.L. (2013), How should Benefits and Costs be discounted in an inter-generational Context? *University of Sussex Economics Department Working Paper Series*, No. 56-2013.
- Arrow, K., Cropper, M., Gollier, C., Groom, B., Heal, G., Newell, R., Nordhaus W. D., Pindyck, R. S., Pizer, W.A., Portney, P.R., Sterner, T., Tol, R.S.J., Weitzman, M.L. (2014), Should governments Use a Declining Discount Rate in Project Analysis? *Review of Environmental Economics and Policy*, 8(2), 145-163.
- Arrow, K. (1995), Intergenerational Equity and the Rate of Discount in Long-term Social Investment, IEA World Congress, Tunis, Tunesien, December 1995.
- Asplund, D. (2017), Household Production and the Elasticity of Marginal Utility of Consumption, *The B.E. Journal of Economic analysis & Policy*, 2017, 20160265. DOI, 10.1515/bejeap-2016-0265.
- Attanasio, O., Browning, M. (1995), Consumption over the Life Cycle and over the Business Cycle, *American Economic Review* 85(5), 1118-1137.
- Baumol, W. J. (1969), On the Social Rate of Discount, *American Economic Review* 59 (5), 930.
- Benhabib, J., Bisin, A., Schotter, A. (2010), Present-bias, Hyperbolic Discounting, and Fixed Costs, *Games and Behavior* 69(2), 205-223.
- Beckers, T., Klatt, J. P., Corneo, G., Mühlenkamp, H. (2009), Zeitliche Homogenisierung und Berücksichtigung von Risiko im Rahmen von Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen, Gutachten im Auftrage des Bundesrechnungshofes, Berlin, Speyer.

- Berloff G. (1997), Temporary and Permanent Changes in Consumption Growth, *The Economic Journal* 107, 345-358.
- Blundell, R., Browning, M., Meghir, C. (1994), Consumer Demand and the Life-Cycle Allocation of Household Expenditures, *Review of Economic Studies* 61 (1), 57–80.
- Birnbacher, D. (1989), Intergenerationelle Verantwortung oder, Dürfen wir die Zukunft der Menschheit diskontieren?, In, Kümmel, R. J. und Klawitter (Hrsg.), Umweltschutz und Marktwirtschaft aus der Sicht unterschiedlicher Disziplinen. Würzburg 1989, 101-115.
- Cameron, T. A., Gerdes, G.R. (2005), Individual Subjective Discounting, Form, Context, Format and Noise, Working Paper, University of Oregon.
- Cecchetti, S.G., Lam, P.S., Mark, N. C. (2000), Asset Pricing With Distorted Beliefs, Are Equity Returns too Good to be True?, *American Economic Review* 90(4), 787-805.
- Chetty, R. (2006), A New Method of Estimating Risk Aversion, *American Economic Review* 96(5), 1821-1834.
- Cline, W. (1992), The Economics of Global Warming, Institute for International Economics, Washington D.C.
- Cowell, F. A., Gardiner, K. (1999), Welfare Weights, STICERD, London School of Economics.
- Evans D. J. (2004), The Elevated Status of the Elasticity of Marginal Utility, *Applied Economics Letters*, 11, 443-447.
- Evans, D., Sezer, H. (2004), Social Discount Rates for Six Major Countries, *Applied Economics Letters*, 11, 557-560.
- Evans D. J., Sezer, H. (2002), A Time Preference Measure of the Social Discount Rate for the UK, *Applied Economics* 34, 1925-1934.
- Evans D. J. (2008), The Marginal Social Valuation of Income for the UK, *Journal of Economic Studies* 35(1), 26-43.
- Freeman, M. C., Groom, B., Paopoulou, E., Pantelidis, T. (2015), Declining Discount Rates and the Fisher Effect, Inflated past, Discounted Future?, *Discussion Paper* No 1/2015, University of Macedonia, Department of Economics.
- Frisch, R. (1959), A Complete Scheme for Computing all Direct and Cross Demand Elasticities in a Model with many Sectors, *Econometrica* 27, 177-196
- Gandelman, N. & R. Hernandez-Murillo (2015), Risk Aversion at the Country Level, *Working Paper 2014-005B*, Federal Reserve Bank of St. Louis - Research Division.
- Gollier, C. (2002), Time Horizon and the Discount Rate. *Journal of Economic Theory* 107, 463-473.

- Gollier, C. (2008), Discounting with Fat-tailed Economic Growth, *Journal of Risk and Uncertainty* 37, 171-186.
- Gollier, C. (2011), On the Understanding of the Precautionary Effect in Discounting, *Geneva Risk and Insurance Review* 36, 171-186.
- Gollier, C., Zeckhauser, R. (2005), Aggregation of heterogeneous Time Preferences, *Journal of Political Economy* 113, 878- 896.
- Gollier, C., P. Koundouri & T. Pantelidis (2008), Declining Discount Rates, Economic Justifications and Implications for long-run Policy, *Economic Policy* 23(56).
- Goulder, L.H., Williams, R. (2012), The Choice of Discount Rate for Climate Change Policy Evaluation, *Climate Change Economics* 3(4), 1-18.
- Gregorius-Pippas, L., Tobler, P.N., Shultz, W. (2009), Short-term Intertemporal Discounting of Reward Value in Human Ventral Striatum, *Journal of Neurophysiology*, 101(3), 1507-1523.
- Groom, B., Madison, D. (2013), Non-identical Quadruplets, Four new estimates of the elasticity of marginal utility for the UK, Centre for Climate Change Economics and Policy, *Working Paper* No. 141.
- Groom, B., Koundouri, P., Panopoulou, K., & Pantelides, T. (2007), Discounting the distant Future, How much does Model Selection affect the certainty equivalent Discount Rate?, *Journal of Applied Econometrics*, 22 (3).
- Häse, S., Obermeyer, A. (2017), Empirische Ermittlung der Grenznutzenelastizität als Einflussfaktor der sozialen Diskontrate – Anwendung des Lebenszufriedenheitsansatzes, Vortrag auf der Konferenz für Verkehrsökonomik und –politik, Berlin, 30. Juni 2017.
- Heal, G., and Millner, A. (2013), Discounting under Disagreement, National Bureau of Economic Research, *NBER Working Paper Series, Working Paper No. 18999*.
- Henderson, N., Bateman, I. (1995), Empirical and public Choice Evidence for hyperbolic social Discount Rates and the Implications for intergenerational Discounting, *Environmental and Resource Economics*, 5(4), 413-423.
- Hepburn, C., P. (2004), Hyperbolic Discounting and Resource Collapse, Royal Economic Society Annual Conference, No. 103, 2004. <http://repec.org/res2004/Hepburn.pdf>.
- Hepburn, C., P. Koundouri, E. Panopoulou and T. Pantelidis (2009), Social Discounting under Uncertainty, A cross-country comparison, *Journal of Environmental Economics and Management* 57(2),140- 150.
- Hepburn, C., Groom, B. (2017), Looking Back at Social Discount Rates, Effect of Papers, Presentations and Personalities on Policy, *Review of Environmental Economics and Policy* 11(2), 336-356.

- Jackson, M. O., Yarif, L. (2015), Collective dynamic Choice, The Necessity of Time Inconsistency, *American Economic Journal, Microeconomics* 7(4), 150-178.
- Kable, J. W., Glimcher, P. W. (2007), The Neural Correlates of Subjective during Intertemporal Choice, *Nature Neuroscience* 10, 1625-1633.
- Karp, L. (2005), Global Warming and Hyperbolic Discounting, *Journal of Public Economics* 89(2005), 261-282.
- Kirby, K. N. (1997), Bidding on the Future, Evidence against normative Discounting of delayed Rewards, *Journal of Experimental Psychology, General*, 126, 54-70.
- Kocherlakota, N. R. (1996), The Equity Premium – It's still a Puzzle, *Journal of Economic Literature*, 34(1), 42-71.
- Kotz, R., Müller, P., Rothengatter, W. (1987), Entwicklung eines Verfahrens für dynamische Investitionsplanung und Ermittlung des bei der Fortschreibung der BVWP anzuwendenden Zinssatzes, Gutachten im Auftrage des Bundesministeriums für Verkehr, Universität Ulm, Ulm.
- Kula, E. (1984), Derivation of Social Time Preference Rates for the United States and Canada, *The Quarterly Journal of Economics*, November 1984, 872-882.
- Kula, E. (1987), Social Interest Rate for Public Sector Appraisal in the United Kingdom, the United States and Canada, *Project Appraisal* 2 (3), 169-174.
- Laibson, D. (1997), Golden Eggs and hyperbolic Discounting, *Quarterly Journal of Economics*, 112, 443-77.
- Layard, R., Nickell, S., Mayraz, G. (2008), The marginal Utility of Income, *Journal of Public Economics*, 92, 1846-1857.
- Lesser, J., Zerbe, R. (1995), What Can Economic Analysis Contribute to the Sustainability Debate?, *Contemporary Economic Policy* 13(3), 88-100.
- Link, H., Kalinowska, K., Kunert, U., Radke, S. (2009), Wegekosten und Wegekostendeckung des Straßen- und Schienenverkehrs in Deutschland im Jahre 2007, *Politikberatung kompakt*, 53, DIW Berlin.
- Mankiv, N. G. (1981), The Permanent Income Hypothesis and the Real Interest Rate, *Economics Letters* 7(4), 307-311.
- McClure, S.M., Laibson, D.I., Loewenstein, G., Cohen, J. D. (2004), Separate Systems for Immediate and Delayed Monetary Rewards, *Science* Vol. 306, Issue 5495, 503-507.
- Milner, A., Heal, G. (2014), Resolving Intertemporal Conflicts, Economics vs. Politics, CESifo Area Conference on Energy and Climate Economics, 17-18 October 2014.
- Newbery, D. (1992), Long-term Discount Rates for the Forrest Enterprise, Paper commissioned by the Department of Forestry, Forestry Commission, Edinburgh.

- Newell, R. G., Pizer, W. A. (2003), Discounting the Distant Future, How Much Do Uncertain Rates Increase Valuations?, *Journal of Environmental Economics and Management* 46(1), 52-71.
- Oxera (2002), The Selection of a Social Time Preference Rate to be Used in Long-Term Discounting, Oxera ltd, Oxford. <http://www.oxera.com/Publications/Reports/2002/>
- Patterson K. D., Pesaran, B. (1992), The Intertemporal Elasticity of Substitution of Consumption in the United States and United Kingdom, *Review of Economics and Statistics* XXIV(4), 573-584
- Pearce, D. W., Nash, C. A. (1981), The social Appraisal of Projects. A Text in Cost-benefit Analysis, Macmillian Press, London - Basingstoke.
- Prognos, IWW (2002), Wegekostenrechnung für das Bundesfernstraßennetz unter Berücksichtigung der Vorbereitung einer streckenbezogenen Autobahnnutzungsgebühr, FE-Nr. 96.693/2001, Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Berlin.
- Pindyck, R.S., Wang, N. (2013), The Economic and Policy Consequences of Catastrophes, *American Economic Journal, Economic Policy* 5(4), 306-339.
- Ramsey, F. P. (1928), A mathematical Theory of Saving, *Economic Journal*, 38, 548-559.
- Rapp Trans (2005), Diskontsatz in Kosten-Nutzen-Analysen im Verkehr, Forschungsprojekt VSS 2003/201 im Auftrag des schweizerischen Verbandes der Straßen strich und Verkehrsfachleute (VSS) Zürich.
- Samuelson, P. (1937), A Note on Measurement of Utility, *Review of Economic Studies* 4(2), 155-161.
- Scott, M. (1977), The Test Rate of Discount and Changes in Base Level Income in the United Kingdom, *The Economic Journal* 87(346), 219-241.
- Schelling, T. (1995), Intergenerational Discounting, *Energy Policy* 23, 395- 401.
- Selvanathan, S., Selvanathan E. A. (1993), A Cross-Country Analysis of Consumption Patterns, *Applied Economics* 25, 1245-1259.
- Stern, N. (2006), The Economics of Climate Change, The Stern Review. Abgerufen im Internet am 14. 10. 2014 unter http://webarchive.nationalarchives.gov.uk/+/http://www.hm-treasury.gov.uk/independent_reviews/stern_review_economics_climate_change/stern_review_report.cfm.
- Van Dalen, H. (1995), Intertemporal Substitution in War and Peace, Evidence from the United Kingdom, 1830-1990, *Journal of Macroeconomics* 17(3), 447-469.
- Viscusi, W. K., Huber, J. (2006), Hyperbolic Discounting of Public Goods, *Discussion Paper* No. 543, 2/2006, Harvard University.

Weitzman, M. L. (1998), Why the far-distant Future should be discounted at its lowest possible Rate, *Journal of Environmental Economics and Management* 36, 201-208.

Weitzman, M. L. (2001), Gamma Discounting, *American Economic Review* 91, 261-271.

Eisenbahnen an der Weiche ins digitale Zeitalter

VON WERNER ROTHENGATTER

1 Einführung

Die Erfindung der Eisenbahn im frühen 19. Jahrhundert führte zu bahnbrechenden Innovationen im Personen- und Güterverkehr. Sie war mit Sonderentwicklungen – in Europa auf nationaler Ebene überwiegend mit dem Zweck der Landesverteidigung – verbunden, die zusammen mit den hohen Fixkosten nationale und teilweise regionale natürliche Monopole begründeten. Nach dem Zweiten Weltkrieg haben die Eisenbahnen massiv an Marktanteilen verloren, weil sie nicht zuletzt aufgrund von starken Einschränkungen der unternehmerischen Bewegungsfreiheit durch heterogene Standardisierung, Regulierung und öffentliche Kontrolle wenig Innovationskraft aufwiesen und der Marktdynamik nicht gewachsen waren. Auch die bahnfremde EU-Verkehrspolitik konnte an dieser Tendenz trotz der Milliarden-Investitionen in transeuropäische Bahnnetze wenig ändern. Denn wenn im Jahr 2030 tatsächlich alle Kernnetz-Korridore einheitliche Spurweiten, Zuglängen, max. Achslasten und Leitsysteme (ERTMS) aufweisen, so treffen sie auf Marktkonkurrenten, die diese Interoperabilität der Infrastrukturen seit Jahrzehnten nutzen und die Fortschritte der nächsten technischen Revolution dann bereits voll umsetzen. Letztere sind vor allem durch weitere Entwicklungssprünge der Informations- und Kommunikationstechnik gekennzeichnet, die zusätzliche Rationalisierung auf der Kostenseite und höhere Effizienz sowie Flexibilität auf der Leistungsseite versprechen. Selbst die Automatisierung des Transportbetriebs, die man vor 50 Jahren vor allem als Bahnchance gesehen hatte, wird möglicherweise auf der Straße schneller als auf der Schiene netzweit realisiert, obwohl dies technisch um ein Vielfaches schwieriger ist.

Wenn die Eisenbahnen im digitalen Zeitalter mithalten wollen, so sind grundlegende Innovationen bei Technik und Organisation erforderlich. Viele der gegenwärtigen Standardisierungen und Regulierungen, beziehen sich auf die Bahntechnik des letzten Jahrhunderts und behindern den technischen Fortschritt. Dabei ist zu berücksichtigen, dass sich technischer Fortschritt im Bahnwesen vielfach nicht simultan auf dem gesamten Netz

Anschrift des Verfassers:

Prof. Dr. Werner Rothengatter
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Waldhornstraße 27
76131 Karlsruhe
E-Mail: rothengatter@kit.edu

umsetzen lässt. Es sind daher von der Regulierungsseite Ausnahmereiche vorzusehen, die Pilotanwendungen für neue Techniken unterstützen. Ferner müssen auf von Seiten der Bahnpolitik Anreize geschaffen werden, Innovationen zu fördern und Pilotprojekte mit zu finanzieren.

2 Die „Vierte Industrielle Revolution“

In den Wirtschaftswissenschaften ist die Vorstellung von langen Wellen der wirtschaftlichen Entwicklung vor allem von Kondratieff (1925) entwickelt und durch Schumpeter (1942; 1952) populär gemacht geworden. Nach der Interpretation Schumpeters werden die Langzeitzyklen durch radikale Innovationen ausgelöst, die Produktionstechnik und Gütereigenschaften grundlegend verändern. Vertreter der Kondratieff-Lehre, wie etwa Nefiodow et al. (2014), führen fünf Langzeitzyklen seit Beginn der industriellen Revolution an, die durch folgende Technikinnovationen geprägt waren:

1.	Dampfmaschine	1770
2.	Eisenbahnen, Stahlindustrie	1830
3.	Elektro- und chemische Industrie	1875
4.	Petrochemie, Automobilindustrie	1910
5.	Informationstechnologie	1970-

Nefiodow et al. (2014) erwarten einen sechsten Kondratieff-Zyklus und nehmen an, dass dieser durch Technik und Dienstleistungen für die „psychosoziale Gesundheit“, „soziale und physische Vernetzung“ und „Biotechnologie“ geprägt sein wird.

Die Einteilung der industriellen Entwicklung in „vier Revolutionen“ ist unabhängig vom wirtschaftswissenschaftlichen Paradigma der Kondratieff-Zyklen entstanden. Sie entstammt einem Projekt der High-Tech Industrie, das von H. Kagermann und S. Drais (SAP AG/Robert Bosch GmbH) geleitet und vom Ministerium für Bildung und Forschung gefördert wurde. Die Gruppe stellte das Konzept bei der Hannover Messe 2013 erstmals vor und machte es durch die Präsentation beim Weltwirtschafts-Forum in Davos (Schwab, 2016) populär. Die vier industriellen Revolutionen sind in Abbildung 1 zusammengefasst.

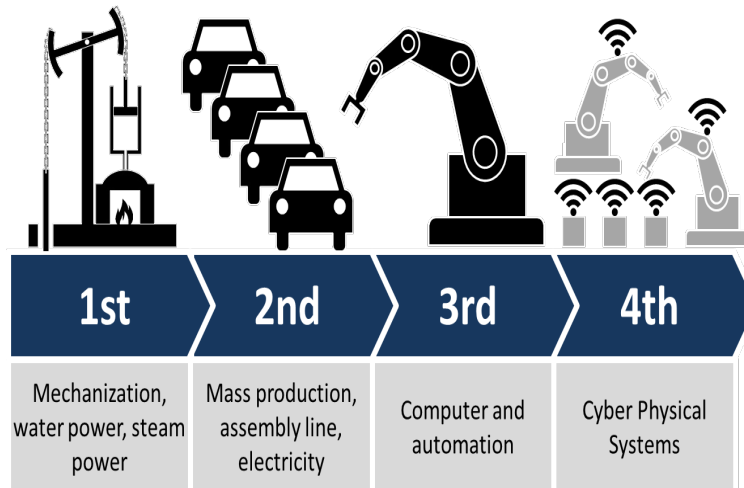


Abbildung 1: Vier industrielle Revolutionen,
Quelle: www.Industry4.0-Wikipedia.html

Die erste industrielle Revolution begann nach diesem Konzept mit der Mechanisierung der Produktion und der Nutzung von Dampfkraft. Die zweite ist durch den Beginn von Massenproduktion und der Nutzung von Elektrizität charakterisiert, während sich die dritte durch die Computertechnik und Prozessautomatisierung auszeichnet. Die vierte industrielle Revolution (Industrie 4.0) schließlich basiert auf den vier Säulen: cyber-physikalische Systeme, Internet der Dinge, Cloud Computing und durchgehende Digitalisierung von Prozessen in Produktion und Konsum. Die Design-Prinzipien sind laut Herrmann et al. (2016) und IBM (2015):

- Interoperabilität: Fähigkeit von Maschinen und Geräten, eigenständig zu kommunizieren und Aktivitäten zu koordinieren.
- Transparenz: Fähigkeit von Informationssystemen, virtuelle Kopien von realen physikalischen Welten zu schaffen.
- Technische Assistenz: Unterstützung menschlicher Aktivitäten bei Behinderung, mangelnder Befähigung oder belastenden Aufgaben.
- Dezentralisierung: Durchführung von Aufgaben durch lernfähige cyber-physikalische Systeme, autonom und an flexiblen Einsatzorten.

Die erwarteten Auswirkungen sind:

- Innovationen bei Produktions-Technologien, insbesondere Sprünge in der Automatisierungstechnik.
- Neue Netzwerke und kooperative Formen von Produktion und Logistik.

- Produktinnovationen durch neue Kombinationen von IT und physischen Produkten, vor allem in Verbindungen mit automatisierten Systemen.
- Änderungen der räumlichen Muster von Produktion und Transportflüssen.

Die IT - Entwicklung wird sich vor allem auf Bereiche konzentrieren, wie:

- Kommunikationssysteme (Realzeit-Bus-Technologien, IT-Sicherheit, Selbstorganisation von Kommunikationsnetzen, mobile Kommunikations-Kanäle).
- Sensor-Systeme (Muster-Erkennung, Bewegungs-Erkennung, „Big Data“, Cloud Computing, Ontologien, holistische Analyse und Bewertung).
- Aktor-Systeme (Multi-Agenten-Systeme, intelligente lernfähige künstliche Agenten, netzgesteuerte Agentensysteme, Sicherheitssysteme).

Die Produktion von Gütern und Dienstleistungen wird nicht mehr von der begleitenden Kommunikationstechnologie zu trennen sein. Ein gutes Beispiel dafür ist die additive Fertigung, zum Beispiel mit 3D-Druckern, für die rasante Zuwächse in den nächsten 10 Jahren zu erwarten sind (vgl. Tschiesner, 2013; FhG ISI, 2016). Gleichfalls werden Produkt, Assistenzsysteme und Kommunikationsdienste um das Produkt künftig für den Verbraucher eine Einheit bilden. Ein Beispiel bildet die Steuerung von Haushaltseinrichtungen und -geräten über Smartphone-Apps.

3 Auswirkungen auf Verkehrsmärkte

Auf der Angebotsseite der Verkehrsmärkte stehen im Mittelpunkt:

- Automatisierung, autonomes Fahren.
- Fahrtbegleitende Kommunikation, Assistenzsysteme.
- Weitgehende Synchronisierung von logistischen Prozessen.
- Dezentralisierung und individualisierte Zuschnitt von Transportleistungen.

Auf der Nachfrageseite führt dies zu Veränderungen, wie:

- Verstärkte Individualisierung von Reisen und Transportvorgängen.
- „Nutzen statt kaufen“ („sharing economy“) sowohl bei Endverbrauchern wie bei Produzenten (vgl. Harvard Business Review, 2015).
- Verstärkter Kauf in virtuellen Supermärkten und Kundenbedienug durch KEP-Dienste.
- Veränderung der Güterstruktur durch Verlagerung der Produktion in Richtung auf die Nachfrage-Standorte.
- Verringerung von Massenguttransporten und industriellen Abfällen.

Dies bedeutet auf der einen Seite eine Verstärkung von Trends, die heute schon zu beobachten sind und somit eher inkrementale Veränderungen bringen. Auf der anderen Seite entstehen aber auch Möglichkeiten für radikale Innovationen, etwa durch

Verknüpfung digitaler Technologien mit anderen Technik-Linien, wie zum Beispiel Bio-Technologie oder Nano-Maschinen/Robotik.

Im Personenverkehr wird dies zu einer stärkeren Entkoppelung von Automobil-Besitz und -nutzung führen, wie dies die großen Hersteller durch die begonnenen Kooperationen mit Unternehmen der Sharing-Economy bereits antizipieren. Auch bedarfsgesteuerte Bus-Dienste, die seit Jahrzehnten in der Diskussion sind, sich aber aufgrund mangelnder Wirtschaftlichkeit (Personal- und Vorhaltekosten) nicht durchsetzen konnten, werden durch bessere Information und Möglichkeiten autonomer Prozess-Steuerung wieder aktuell. Dies bedeutet, dass neben den Kategorien des individuellen motorisierten Personenverkehrs und des öffentlichen Verkehrs eine dritte Kategorie entstehen wird, nämlich die des individualisierten autonom gesteuerten Verkehrs mit bedarfsorientierten und temporär genutzten Fahrzeugeinheiten.

Der Güterverkehr wird auf der Nachfrageseite durch einen Rückgang der Massenguttransporte gekennzeichnet sein, während die Stückgut- und Container-Transporte zunehmen werden. Dabei wird die Intelligenz der Transportgüter wachsen, d.h., sie werden sich zunehmend autonom die besten Transportmittel, Routen und Umschlagprozesse wählen. Auch die Fahrzeuge werden entsprechend autonom gesteuert, wie dies von der Lkw-Industrie sukzessive ausgebaut wird, angefangen von automatischen Abstandshaltungs- und Stausteuerungssystemen bis hin zur voll autonomen Steuerung, die wohl im Jahr 2030 auf Autobahnen Realität sein könnte. Dies geht mit der Bildung größerer Transporteinheiten im Güterfernverkehr auf der Straße, durch Giga-Liner und Koppelungen von Fahrzeugverbänden, einher. Im Unterschied zu den üblichen Annahmen der Güterverkehrsprognostik, dass die Kosten im Straßengüterverkehr relativ zum Bahngüterverkehr über die Zeit ansteigen, wird das Gegenteil der Fall sein, wenn Bahntechnik und -organisation keine vergleichbaren Innovationssprünge aufweisen werden.

4 Bahntechnik: Neue Produktionstechnologien und Prozesskontrolle

4.1 INTEROPERABILITÄT

Die Bahntechnik war nur in der Frühphase radikal innovativ, anschließend gab es zwar inkrementale Verbesserungen, doch beschränkten sich diese in Europa auf die unterschiedlichen nationalen und regionalen Bahnsysteme, die sich aufgrund der Militärinteressen entwickelt hatten. Kohle und Dampfkraft wurden durch Elektro- und Dieselantriebe ersetzt, ohne dass dies radikale Auswirkungen auf Produktionstechnologie und Service-Qualität im Personen- und Güterverkehr hatte. Service-Verbesserungen wie kostenlose WLAN-Verbindungen, kamen bei den Bahnen spät und wurden vom Kunden kaum positiv registriert, weil sie im konkurrierenden Fernbus-Verkehr längst eingeführt waren.

Die EU-Kommission versucht mit ihrem Konzept der transeuropäischen Netze, den Bahnverkehr zu fördern und wesentliche technische oder organisatorische Hemmnisse durch Investitionsförderung, Regulierung und Standardisierung abzubauen. An der Spitze der Bemühungen steht die Interoperabilität der Bahnsysteme, also die Überwindung der unterschiedlichen Technik-Welten wegen der Vergangenheits-Hypothesen. So wurden Leitindikatoren (key performance indicators, KPI) definiert, die in den neun Kernnetz-Korridoren (CNC) der transeuropäischen Netze bis 2030 realisiert sein sollen. Diese betreffen:

- Auslegung für einheitliche max. Zuglängen (740 m).
- Auslegung für Höchstgeschwindigkeiten im Güterverkehr (100 km/h).
- Standard-Spurweite (1435 mm).
- Doppelgleisigkeit und Elektrifizierung.
- Auslegung für max. Achslasten (22.5 t).
- Zugsicherung und -steuerung durch ERTMS (ETCS Level 2).

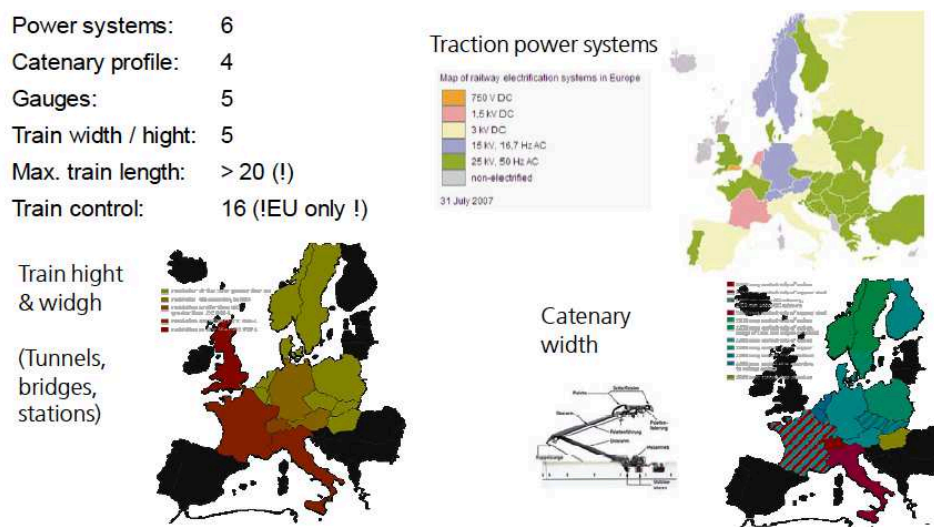
Auch in Deutschland ist man noch weit von der Erfüllung der KPI entfernt, so dass im Zuge der Realisierung der CNC (6 von 9 CNC verlaufen durch Deutschland) eine massive Erhöhung der Schienen-Investitionen erforderlich ist. So beträgt der Streckenanteil für längere Güterzüge (mehr als 700 m) nur 11%, die Elektrifizierung umfasst derzeit erst 60% des Fernbahnnetzes und der Anteil der mit ERTMS ausgerüsteten Strecken liegt auf einigen CNC noch unter 10%.¹ Da ERTMS-Investitionen mit 50% EU-Förderung rechnen können und ein gemeinsamer Standard für ETCS Level 2 („Baseline 3“) vereinbart werden konnte, darf man eine beschleunigte Realisierung erwarten, wenngleich dies nicht für alle CNC-Korridore durchgehend bis 2030 erfüllt sein dürfte.

Die Bedingungen für den grenzüberschreitenden Bahnverkehr sollen ferner durch Abbau von Barrieren an den Grenzen (Lok- und Personalwechsel, technische Kontrollen, Ladungskontrollen, Behebung von Engpässen im Netz) nachhaltig verbessert werden. So fallen derzeit im Bahngüterverkehr von Hamburg nach Athen sechs Lok- und Personalwechsel an.² Häufig treten Verzögerungen an den Grenzen auf, die mehr als einen Tag in Anspruch nehmen können. Abbildung 2 fasst die gegenwärtig existierenden

¹ Nach Veröffentlichungen der Allianz pro Schiene (<https://www.allianz-pro-schiene.de/themen/aktuell/740-meter-gueterzug/>), Angaben der DB AG zu ERTMS-Vorhaben (17 Projekte, zum größten Teil im Zusammenhang mit Neu- und Ausbauprojekten für den schnellen Personenverkehr) und Angaben aus CNC-Studien der EU Kommission (ERTMS Workplan of the Coordinator, 2015; ERTMS European Deployment Action Plan, 2017). Vgl. auch Rothengatter, Schade und Hartwig, 2016.

² Die max. Zuglänge beträgt dabei in Bulgarien streckenweise nur 445 m, die max. Achslast 20 t und die max. Geschwindigkeit auf 510 km 80 km/h mit Langsam-Fahrstellen bis 40 km/h.

unterschiedlichen Standards zusammen und unterstreicht die Notwendigkeit einer EU-weiten Standardisierung, um die Transportabwicklung zu vereinfachen und zu rationalisieren. Mit einer Realisierung der KPI bis zum Jahr 2030 auf den Kernnetz-Korridoren der transeuropäischen Verkehrsnetze sind zwar nicht alle Unterschiede beseitigt (etwa: Stromsysteme oder Spurweiten), doch lassen sich manche technisch überbrücken (etwa: Mehr-Strom-Lokomotiven, drittes Gleis).



Sources: en.wikipedia.org/wiki/Railway_electrification_system (upper right),
bueker.net/trainspotting/voltage_map_europe.php (lower left and right)

Abbildung 2: Unterschiedliche Bahntechnologien in europäischen Ländern

Quelle: Doll, Schade und Rothengatter, 2015

Abbildung 3 gibt ein Beispiel für Modal-Split-Prognosen im Güterverkehr, die einer Studie zu den Kernnetz-Korridoren der transeuropäische Netze entnommen sind (IC Consulanten et al., 2014: Study on Orient-East-Med Corridor). Auf der linken Seite der Abbildung ist die erwartete Modal Split-Änderung bis 2030 abgetragen. Sie zeigt ein optimistisches Bild des Verkehrsmittelanteils der Bahnen im Güterverkehr nach der Realisierung der KPI-Investitionen. Die rechte Seite bekräftigt zunächst diese optimistische Aussicht für den westlichen Teil des Korridors. Im östlichen Teil, also östlich der ungarischen Grenze, werden die Stromlinien aber sehr dünn, was zeigt, dass auch nach technischer Verbesserung keine nachhaltigen Wirkungen eintreten. Hier ist zu erkennen, dass die gegenwärtige Mitgliedschaft von Ländern in der EU eine ausschlaggebende Rolle bei der Korridor-

Definition gespielt hat. Denn ein alternativer Korridor von Thessaloniki nach Budapest über Mazedonien und Serbien ist bereits besser ausgebaut und rund 300 km kürzer. Hier planen derzeit chinesische Investoren, eine moderne Bahnverbindung von Budapest bis Athen zu schaffen, um den Hafen von Piräus aufzuwerten und die „neue Seidenstraße“ zu verlängern. Dennoch plant die EU Kommission, auch den schwach belasteten Ast durch Bulgarien mit hohem Einsatz auf die KPI-Standards zu bringen. Dies ist ein Beispiel für verkehrlich und wirtschaftlich schwer zu rechtfertigende Projekte im Rahmen der Kernnetzwerk-Korridore, für die ein Gesamtvolumen von ca. 623 Mrd. EUR (davon 468 Mrd. EUR bis 2030) geschätzt wird (FhG ISI et al., 2015; EU Kommission, 2013)).

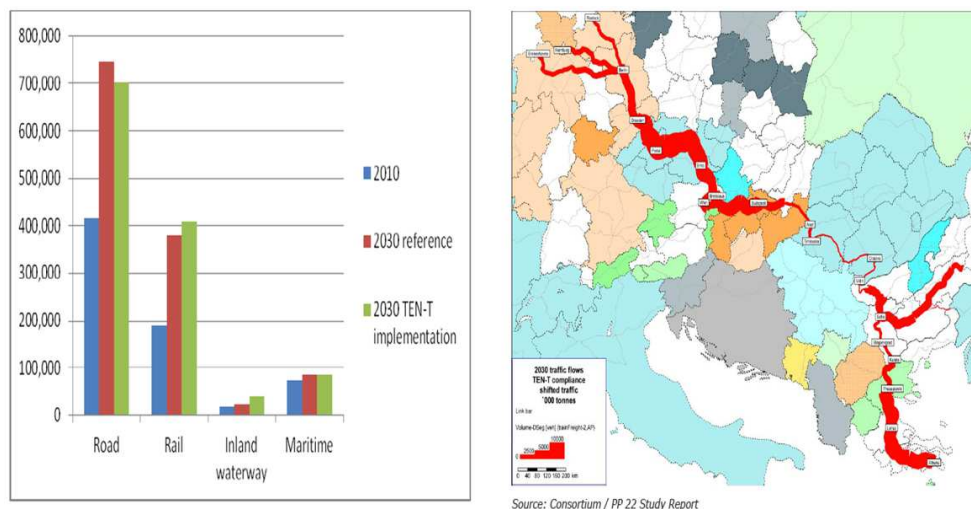


Abbildung 3: Prognose der Modal Split-Änderung bis 2030 (links, in 1000 t) und der verlagerten Transporte im Güterverkehr (rechts) im Rhein-Donau Korridor

Quelle: IC Consulanten et al., 2014

In diesen Studien ist angenommen, dass sich die Kosten und Leistungsqualitäten der Eisenbahn wesentlich gegenüber dem Straßenverkehr verbessern. Dies führt in den Prognosen zu einem stärkeren Wachstum des Bahngüter- und Personenverkehrs gegenüber dem Marktwachstum und zu einer deutlichen Verlagerung von der Straße zur Schiene. Geht man aber davon aus, dass es durch die digitale Revolution erhebliche Rationalisierungseffekte und Qualitätsverbesserungen im Straßenverkehr geben wird, so sind die grundlegenden Prognose-Annahmen nicht realistisch. In den letzten Jahren war die Kostenentwicklung genau gegenläufig, wie Abbildung 4 unterstreicht.

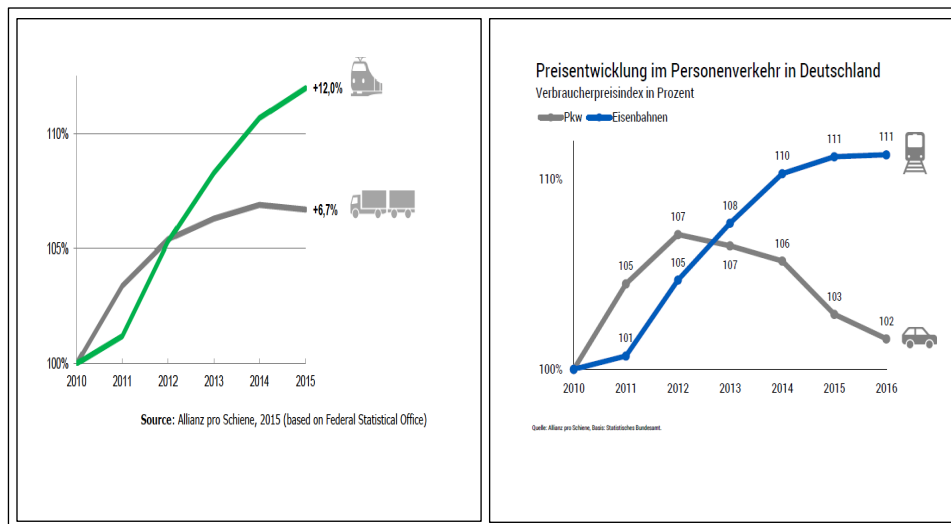


Abbildung 4: Kostenentwicklung im Straßen- und Schienenverkehr in Deutschland 2010-2016. Links: Güterverkehr. Rechts: Personenverkehr.

Quelle: Allianz pro Schiene; Stat. Bundesamt

Entsprechend sind die Marktanteile des Schienengüterverkehrs nach unten gegangen und stagnieren im Personenfernverkehr. Betrachtet man die gegenwärtigen politischen Weichenstellungen im Personenfernverkehr in Deutschland im Hinblick auf

- Konkurrenzlage (Fernbus-Verkehr mautfrei),
- steuerliche Behandlung (19% MwSt im internationalen Bahnverkehr, internationaler Luftverkehr MwSt-frei),
- Sozialauflagen (Tarifvereinbarungen für Lokführer und Personal, Niedriglöhne und schwach kontrollierte Sozialvorschriften im internationalen Verkehr),
- Förderung neuer Technologien vorwiegend im Straßenverkehr,

und im Güterverkehr mit

- Zulassung von Gigalinern ab 1.1.2017,
- Mautreduzierung für Lkw ab 2015,
- Energiebesteuerung und Einbeziehung in das ETS für Bahnen,

- Niedriglöhne und schwache Überwachung der Sozialvorschriften auf der Straße, Verkehr als Ausnahmereich in der Reform der Entsende-Richtlinie³,
- Minimale Streikwahrscheinlichkeiten auf der Straße,
- Förderung neuer Technologien vorwiegend im Straßengüterverkehr,

so ist nicht zu erkennen, welche relativen Vorteile für den Schienenverkehr entstehen sollen, selbst wenn die KPI bis 2030 voll realisiert sind. Vielmehr wird der Schienenverkehr dann mit den Bedingungen des Straßenverkehrs von 2010 konkurrieren können, aber noch nicht mit denen des Jahres 2030.

Damit bleiben zwei Bereiche, die zu einer relativen Verbesserung der Wettbewerbslage für die Bahnen beitragen können: Erstens Auflagen für die Konkurrenz wegen externer Kosten und zweitens kostensenkende sowie qualitätsverbessernde Bahn-Innovationen. Bei Klimaeffekten und anderen Externalitäten (Abgase, Unfallfolgen) haben die Bahnen Systemvorteile, die bei Durchsetzung und weiterer Verschärfung der EU-Gesetzgebung wirksam werden können. Bei den Pkw wird es für die Hersteller schwierig, die EU-Vorschriften zu Abgasen (NO_x) und CO₂ (95 g/km ab 31.12.2021)⁴ einzuhalten, zumal nicht Labor- sondern reale Einsatzbedingungen (WLTP)⁵ für die Tests maßgebend sein werden. Dabei hat nicht nur die Diesel-Technologie große Probleme, die NO_x-Abgasvorschriften im realen Betrieb einzuhalten, sondern auch Benzin-Motoren werden die CO₂-Vorschriften nach 2020 beim heutigen Fahrzeugmix weit verfehlen.

Auch bei Lkw und Bussen werden die EURO 6 Normen nur theoretisch eingehalten, neben den Abweichungen zwischen Prüfstand und realem Betrieb kommen Manipulationen hinzu, etwa durch Reduzierung der AddBlue-Einspritzung – teils durch die herstellerseitige Motorsteuerung und teils durch illegale Zusatzgeräte. Bisher gibt es keine Grenzwerte zum CO₂-Ausstoß und Lkw/Busse sind nicht in das ETS (EU Emission Trading System) einbezogen – im Gegensatz zu elektrisch, also umweltfreundlich, betriebenen Bahnen. Die EU Kommission hat den Entwurf eines Klimaschutz-Pakets vorbereitet, der Grenzwerte für die Emission von CO₂ bei Lkw und Bussen vorsieht. Die Lobby der Hersteller arbeitet naturgemäß dagegen, doch hat sich ihr politisches Gewicht durch das „Dieselgate“ im Pkw-Bereich verringert. Die Tatsache, dass sich in Deutschland die gesamten CO₂-Emissionen seit dem Jahr 2016 wieder erhöht haben, das Emissions-Reduktionsziel von 40% für 2020

³ Lohn- und Sozialdumping sollen dadurch abgeschafft werden, dass Arbeitnehmer aus einem anderen EU Land wie Einheimische entlohnt und sozial versichert werden sollen. Der Verkehrsbereich ist aus der EU-Richtlinie ausgenommen, d.h. im Bus- und Lkw-Sektor bleiben Dumping-Praktiken weiter möglich.

⁴ Ein Kommissionsvorschlag sieht für die Zeit nach 2020 eine weitere Senkung der CO₂-Emissionen von neu zugelassenen Pkw um 15% bis 2025 und 30% bis 2030 vor.

⁵ World-wide Light Vehicle Testing Procedure; diese löst den laborbasierten Neuen Europäischen Fahrzyklus (NEFZ) ab.

gegenüber 1990 wahrscheinlich weit verfehlt wird⁶ und der Verkehrsbereich an dieser Fehlentwicklung primär beteiligt ist, könnte auch in Deutschland die Bereitschaft der Verkehrspolitik stärken, die Umweltstandards für den Straßengüterverkehr anzuziehen. Zusammen mit einer Ausdehnung der Lkw-Maut (und ggfs. Einbeziehung von Bussen) auf alle Bundesfernstraßen wäre der Trend zu sinkenden relativen Kosten des Straßengüterverkehrs zumindest abzuschwächen.

4.2 INNOVATIONEN

Eine Wiederbelebung der Eisenbahnen und Stärkung ihrer Wettbewerbsfähigkeit verlangt Innovationen bei Technik und Organisation, die zu deutlich höherer Produktivität, sinkenden Kosten und gesteigerter Leistungsqualität führen. In der Vergangenheit hat es immer wieder Versuche gegeben, den spurgeführten Verkehr oder den Verkehr auf Schienen technisch zu revolutionieren. Beispiele für die Lösung von der konventionellen Bahnschiene sind:

- Magnetschwebe-Bahnen: Transrapid (Deutschland), MLX (Japan).
- Bahnen in Unterdruck-Röhren: Swiss Metro (Schweiz), Hyperloop (USA).
- Druckluft getragene Plattformen: Talpino (Österreich).
- Klein- und Großkabinenbahnen (realisiert an einzelnen Flughäfen).
- Ein-Schienen-Bahnen (einzelne Städte, Flughäfen).

Für alle oben genannten Lösungen gilt, dass sie auf Einzelverbindungen starke Vorteile gegenüber der konventionellen Schiene zeigen können, aber eine beschränkte Netzbildungsfähigkeit aufweisen. Dies liegt – wie vor allem das Beispiel Transrapid zeigt – zum großen Teil an der Technik der Weiche, eine Basisinnovation, ohne die der Aufbau von Eisenbahnnetzen nicht möglich gewesen wäre.

Andere Technik-Innovationen zielten auf einer Verbesserung der Prozesse auf der Schienen-Infrastruktur, wie etwa:

- Automatisch betriebene Bahnen (bislang Einzel-Linien für Metros).
- Automatische Umschlageinrichtungen.
- Selbstgesteuerter Güterwagen.
- Selbstgesteuerte Wagenverbände (Ziel der Cargo-Sprinter-Entwicklung).
- ERTMS Level 3 als Betriebsleitsystem.
- Automatische Kupplung von Fahrzeugen (seit Gründung der UIC im Jahr 1922 ein Dauerthema).
- Automatisch betriebene Rangier-Prozesse.

⁶ Man rechnet derzeit mit einer Reduktion zwischen 31 und 33%.

Letztlich wurde auch eine Reihe von Organisations-Innovationen entwickelt, zum Beispiel:

- Pallet-Flow-Systeme: Transportorganisation für kleine Behälter bis hinunter zur Palettengröße.
- Linienzug-Betrieb im Güterverkehr: feste Fahrpläne, Umstellung von Containern/Behältern an Güterverkehrszentren statt Rangieren von Wagen und Zugteilen.
- Horizontal-Umschlag von Containern und Sattelaufliegern unter dem Fahrdraht.

Bei den Großtechnologien sind nur noch das MLX-Magnetbahnsystem in Japan – dank starker staatlicher Unterstützung – und das Hyperloop-System in den USA⁷ – dank eines visionären Milliardärs – in der Entwicklung. In Deutschland gibt es noch die Cargo-Beamer-Entwicklung, die als Pilotprojekt gefördert wird, und eine automatische Umschlageinrichtung am Hamburger Hafen. Eine ähnliche Pilotentwicklung zur horizontalen Umschlagtechnik läuft in Frankreich (ModaLohr System). Während man die Möglichkeit eines automatischen Betriebs spurgeführter Systeme bereits vor 50 Jahren intensiv diskutierte und erwartete, dass diese in naher Zukunft Realität werden könnte, geschah außer der Automatisierung einzelner Linien im Nah- und Regionalverkehr (etwa: Paris, London, Kopenhagen) nichts. Dabei zeigt das Beispiel der Automatisierung von Metro-Linien 1 und 14 in Paris, dass sich allein durch die Takterhöhung und höhere Verlässlichkeit des Betriebs Fahrgastzuwächse in einer Größenordnung von mehr als 20% realisieren lassen.⁸

Für die Einführung automatischer Systeme in offenen Schienennetzen gibt es bislang nur allgemeine Beschreibungen der Automatisierungsstufen und die Definition entsprechender Begrifflichkeiten (vgl. etwa: Randeloff, 2016). Automatische Systeme in offenen Netzen werden paradoxerweise zuerst auf der Straße erprobt, wo die Herausforderungen für die Sensorik, Informationsverarbeitung und Reaktionsgeschwindigkeit ungleich höher sind als bei der Bahn. Dies führt zu der Frage, warum die Innovationsfähigkeit bei Bahnsystemen so beschränkt ist.

4.3 SYSTEMBEDINGTE BARRIEREN DER INNOVATIONSFÄHIGKEIT

Auf die am Ende des Abschnitts 4.2 gestellte Frage geben Müller, Liedtke und Lobig (2017, mit Kommentar von Rothengatter) eine Antwort, die direkt von den Erkenntnissen der Innovationstheorie abgeleitet ist. Sie nennen drei entscheidende Barrieren: sozio-technische Abgeschlossenheit und Pfadabhängigkeit (lock-in), Erfinder-Dilemma und technologisches Patt. Die Eisenbahn hat sich als abgeschlossenes sozio-technisches System

⁷ Eine erste Anwendung ist in den Emiraten auf der Verbindung Dubai-Abu Dhabi geplant.

⁸ Vgl. Gaudry (2017).

entwickelt, bei dem technische und organisatorische Komponenten eng aufeinander abgestimmt sein müssen, so dass der Raum für innovatorische Entwicklungen stark eingeschränkt ist (lock-in). Der Erfindergeist in der Privatwirtschaft wird aber gerade dort am stärksten angeregt, wo der Markt besonders dynamisch ist. Dies ist beim expandierenden Straßen- aber nicht beim rückläufigen Schienenverkehr der Fall. Ein Beispiel für dieses Erfinder-Dilemma ist der auch bei Umweltschutzorganisationen populäre Vorschlag der Industrie, Oberleitungen an Autobahnen zu installieren, um Lkw elektrisch anzutreiben.⁹

Der Stillstand der Basis-Bahntechnologie ist auch dadurch wesentlich begründet, dass größere Änderungen auf das gesamte Netz projiziert werden und mit enormen Umstellungen und Investitionskosten verbunden sind. Den Bahngesellschaften fehlen hierzu die Mittel und im internationalen Verkehr aufgrund der nationalen Regulierungen auch die Kompetenzen für die Einführung neuer Technologien. Die Staaten beschränken sich auf die Subventionierung bestehender und veralteter Technologien, wobei häufig in der Bürokratie die Wissenskompetenz fehlt, um vielversprechende technische Neuerungen zumindest durch Entwicklungsprogramme und Pilotanwendungen zu fördern. Zusammen mit den langen Nutzungsdauern von Einrichtungen und rollendem Material führt dies zu einem Stillstand der Technik (technologisches Patt), während die Konkurrenz auf der Straße in wesentlich kürzeren technischen Anpassungszeiträumen und durch Regulierungen weitgehend unbehindert auf die Marktentwicklungen reagieren kann.

Daraus folgt die These, dass sich die Barrieren nicht durch in einem Schritt in voller Breite abbauen lassen. Vielmehr ist es erforderlich, Zukunftstechnologien in Nischen zu erproben, um sie dann in Hauptkorridoren oder in Schlüsselbereichen zum Einsatz zu bringen. Ein Beispiel für einen solchen Schlüsselbereich besteht in der Verbindung von Güteraufkommenspunkten zu den Zugbildungs-Zentren. Gleisanschlüsse und dezentrale Aufkommenspunkte werden in der Zukunft nur rentabel sein können, wenn Wagen oder Wagenverbände automatisch zu den Zugbildungs-Zentren geführt und dort bearbeitet werden. Die hierzu nötigen Einrichtungen an Zentren (automatische Rangier-Loks) und Zubringer-Strecken (Sensorik, Kommunikationsinfrastruktur) könnten aber vom Regulierer als „Essential Facilities“ eingestuft werden, so dass das Interesse großer Bahngesellschaften niedrig bleibt. Damit gibt es nur zwei Möglichkeiten, dieses technologische Patt zu überwinden: Entweder werden solche Innovationsbereiche aus der Regulierung (teilweise oder zeitweise) heraus genommen oder der Staat (bzw. eine öffentliche Gesellschaft)

⁹ Siehe FhG ISI et al. (2016). Diese Studie zeigt die technischen Möglichkeiten, deren Kosten und die mögliche Konkurrenz zum Bahntransport, weil insbesondere Transporte auf größeren Entfernungen in aufkommensstarken Korridoren attrahiert werden. Die wirtschaftlichste Variante wäre ein Shuttle-System in hoch belasteten Korridoren mit Umschlagseinrichtungen an zentralen Knoten für die Weitertransporte im nachgeordneten Netz, also die Übertragung der Schienengüterverkehrstechnologie auf die Straße.

übernimmt die Investitionen und ordnet die Kapazitäten den Wettbewerbern nach definierten Regeln zu.

Sollte sich dies nicht in absehbarer Zeit (etwa: bis 2030) realisieren lassen, so müssen kommerziell ausgerichtete Bahngesellschaften in eine andere Richtung denken, Gleisanschlüsse und dezentrale Aufkommenspunkte mit niedrigem Aufkommen schließen und die regionalen Zubringer-Dienste mit dem Lkw in Form effizienter „milk-run“-Organisationen durchführen (vgl. Nemoto und Rothengatter, 2013).

5 Konsequenzen für die F&E Politik

5.1 NATIONALE UND EU INNOVATIONSFÖRDERUNG

Die Wettbewerbspolitik der EU zielt darauf hin, die intramodale Konkurrenz zu fördern und den großen – vormals oder immer noch – staatlichen Gesellschaften Marktanteile zugunsten kleinerer Wettbewerber zu nehmen. Gemeinsam mit der Regulierung der Monopolbereiche („essential facilities“) führt dies zu der Situation, dass weder die großen Bahngesellschaften noch ihre kleineren Konkurrenten Anreize für technische und organisatorische Innovationen haben. Der Konkurrenzdruck wird primär über die Kosten ausgetragen, wobei nationale Entlohnungs-, Regulierungs- und Subventionierungs-Differenzen eine Rolle spielen, weil die stärksten Wettbewerber großer nationaler Gesellschaften Töchter ausländischer nationaler Gesellschaften sind. Da die Hersteller von Bahntechnik im Erfinder-Dilemma stecken, gibt es weder von Seiten der Technik-Hersteller noch der Betreiber-Gesellschaften einen nennenswerten Innovationsdruck, so dass die Rolle des Innovators beim Staat verbleibt.

Die öffentliche Bahnforschung ist in der Bundesrepublik und in der EU im Wesentlichen auf Universitätsinstitute und kleinere Abteilungen in Forschungszentren verteilt, die nicht die Möglichkeit haben, Forschungsideen in aufwendige Produktentwicklungen umzusetzen. Die Privatisierung der Eisenbahnen wurde weder national noch auf Seiten der EU mit der Einrichtung von zentralen Forschungs- und Entwicklungsorganisationen für den Eisenbahnverkehr (etwa analog zum japanischen Beispiel, siehe Abschnitt 5.2) begleitet. Die Einrichtung einer kleinen Abteilung beim Eisenbahnbundesamt, die als Schnittstelle zwischen Wissenschaft, Industrie und Politik fungieren soll, unterstreicht das unterentwickelte Interesse der deutschen Verkehrspolitik an radikalen Bahninnovationen.¹⁰ Erst der im Sommer 2017 erschienene Masterplan Schienengüterverkehr spricht Innovationsnotwendigkeiten an, wobei allerdings die Maßnahmen auf Seiten der

¹⁰ Im Internet-Auftritt des BMVI zum Stichwort „Eisenbahnforschung“ wird dies neben der Beteiligung am EU Projekt „Shift2Rail“ als wesentlicher Beitrag der Verkehrspolitik aufgeführt.

Verkehrspolitik nur Ankündigungscharakter haben und für die nächste Legislatur-Periode in Aussicht gestellt werden. Sie lassen aber immerhin erkennen, dass die Modernisierung der Güterbahn mit einem größeren Nachdruck betrieben werden soll als in den vorangegangenen Legislaturperioden, vorausgesetzt, dass die amtierende Regierung an eine Umsetzung dieses Planes denkt.

Die EU Kommission hat sich zunächst darauf beschränkt, eine Reihe von Forschungsprojekten in Auftrag gegeben, die technische und organisatorische Wege zu der gewünschten Revitalisierung der Eisenbahnen aufzeigen sollten. Zu erwähnen sind die Projekte NEW OPERA, TIGER, SPIDER, SPIDER PLUS oder LIVINGRAIL. Alle Projekte gehen von einer Überwindung der Fragmentierung aus, die das europäische Bahnwesen kennzeichnet. Zusätzlich diskutieren sie einige der möglichen Innovationsrichtungen, wie sie in Abschnitt 4.2 erwähnt sind und kommen so zu dem sehr optimistischen Ergebnis, dass sich die Verkehrsleistungen der Bahnen bis 2030 verdoppeln bis verdreifachen können und Modal Split Anteilswerte bis zu 25% im europäischen Güterfernverkehr möglich sind. Dies hat die Kommission ermutigt, in ihrem letzten Weißbuch zur gemeinsamen Verkehrspolitik (2011) das Ziel zu formulieren, mindestens ein Drittel des Güterverkehrs über 300 km Distanz bis 2030 den Bahnen zuzuordnen und sogar die Hälfte bis 2050.

Die erste EU-Maßnahme, Innovationen gezielt über die Behebung von Interoperabilitäts-Defiziten hinaus anzustoßen, besteht in der Ausschreibung des Projekts SHIFT2RAIL im Rahmen des HORIZON (H) 2020 Forschungsprogramms. Forschungsinstitute, Consultants und Bahngesellschaften sollen F&E-Partnerschaften bilden, um neue Bahntechnologien zu entwickeln. Die Federführung (Governing Board) liegt bei Bahngesellschaften und Bahnindustrie, die Koordinierung bei der ERA (European Railway Agency). SHIFT2RAIL definiert 5 prioritäre Innovationsprogramme:

- Innovationsprogramm 1: Kosteneffizienz und Zuverlässigkeit für Züge
- Innovationsprogramm 2: Moderne Zugmanagement- und Kontrollsysteme
- Innovationsprogramm 3: Kosteneffiziente, zuverlässige Infrastruktur mit hoher Kapazität
- Innovationsprogramm 4: Lösungen für attraktiven Bahnservice
- Innovationsprogramm 5: Technologien für zukunftssicheren und attraktiven Bahngütertransport.

Die von 2014 bis 2020 geplanten Mittel umfassen 920 Mill. EUR, wobei die EU Kommission etwa 50% (450 Mill. EUR) kofinanziert. Damit erreicht die Forschungsförderung für die Bahnen erstmals ein relevantes Niveau und bietet aufgrund der Industriebeteiligung die Aussicht, dass daraus innovative Umsetzungen, wie zum Beispiel Pilotprojekte für ausgewählte Marktsegmente oder Korridore, folgen können. Im Vergleich zur Förderung von Innovationen im Straßenverkehr ist diese Summe allerdings bescheiden. Die Forschungsförderung der EU für alternative Antriebe und „grüne Fahrzeuge (green vehicles)“ im Rahmen von H2020 liegt bereits deutlich höher und hinzu kommen die nationalen Förderungen bis hin zur Subventionierung von Pilotmärkten (allein in

Deutschland 1,2 Mrd. EUR für Elektro- und Hybrid-Fahrzeuge). Diese Mittel addieren sich zu den F&E-Investitionen der Industrie, so dass die gesamten Investitionen in Zukunftstechnologien bei der Straße nach Schätzung des Verfassers zumindest beim 20-fachen der F&E-Investitionen für die Schiene liegen. Die öffentliche Förderung des Industrievorschlags einer Elektrifizierung der Autobahnen mit Oberleitungen zeigt eindrucksvoll, wie die Privatwirtschaft den Staat in ihre straßenseitigen Entwicklungsinteressen hinein zieht, so dass der Staat das Erfinderdilemma verstärkt statt abzubauen hilft.

5.2 INSTITUTIONELLE VORAUSSETZUNGEN FÜR ERFOLGREICHE BAHN-INNOVATIONEN

Wenn es um institutionelle Bedingungen für den Erfolg von Eisenbahnen geht, so lassen sich Anregungen aus dem Ausland gewinnen, auch wenn direkte Übertragungen in der Regel nicht möglich sind. Japan gibt ein Beispiel für erfolgreiche Innovationsmodelle im Bahnwesen. Die Shinkansen Schnellzüge sind seit 1964 immer weiter entwickelt worden und stehen hinsichtlich Wirtschaftlichkeit, Energieverbrauch, und Attraktivität für den Passagier an der Spitze der internationalen Skala. Aufgrund der hohen Nachfrage und der Notwendigkeit grundlegender Streckenüberholung für die hoch belasteten Sanyo/Tokkaido-Linien ist der Plan einer parallelen Strecke von Tokyo nach Osaka durch die japanischen Mittelgebirge entstanden. Diese soll aber nicht durch konventionelle Zugtechnik bedient werden, sondern durch eine Magnetschwebbahn, deren Technikentwicklung in Japan bereits seit Jahrzehnten (zeitweise parallel zum Transrapid) voran getrieben wird. Unabhängig von der Frage, ob dies die beste Technik-Lösung für das Verkehrsproblem darstellt¹¹, ist interessant, mit welchem Regime dieses Jahrhundert-Projekt auf den Weg gebracht wird. Die beteiligten Organisationen sind:

- Railway Technical Research Institute (RTRI): Ein zentrales Institut für Bahntechnik, das im Zuge der Privatisierung der staatlichen japanischen Eisenbahnen 1987 gegründet wurde. RTRI betreibt Grundlagenforschung und -entwicklung, während die Entwicklung zur Marktreife in der Kompetenz der (heute privaten) Bahngesellschaften liegt.
- Japan Railways Central: Die Bahngesellschaft, welche die profitabelste Bahnverbindung der Welt betreibt, den Tokkaido-Shinkansen zwischen Tokyo und Osaka. JR Central leitet die Pilotentwicklung der Magnetbahn-Versuchsstrecke bei

¹¹ Nach wie vor gibt es erhebliche Zweifel an der Technik und vor allem an der Wirtschaftlichkeit des Vorhabens. Manche Experten gehen davon aus, dass die technischen Probleme nicht lösbar sein werden, so dass man künftig Shinkansen-Züge mit Linearmotor-Antrieb auf der Strecke einsetzen wird (was aufgrund der Infrastruktur-Design-Parameter möglich bleibt).

Yamanashi und plant, diese bis 2027 zwischen Tokyo (Shinagawa) und Nagoya auszubauen und anschließend zu betreiben. Sie wird weiter die Kosten dieses ersten Teilstücks privat finanzieren (ca. 90 Mrd. USD). Die Kosten der Weiterführung bis Shin-Osaka übernimmt der Staat.

- Japanische Regierung: Neben der Kostenbeteiligung an der Versuchsstrecke und der Kostenübernahme für das zweite Teilstück von Nagoya nach Osaka hat die japanische Zentralregierung eine wesentliche Markthürde für einen wirtschaftlichen Erfolg des Vorhabens beseitigt. Die zentrale Maßnahme besteht darin, das Wachstum des Inlandsluftverkehrs dadurch abzubremsen, dass der stadtnahe Flughafen Tokyo-Haneda nicht mehr kapazitiv für den Kurzstrecken-Luftverkehr erweitert wird. Dies soll den besonders zahlungsfähigen Geschäftsreiseverkehr zwischen den Ballungszentren zum großen Teil vom Flugzeug auf die (Magnet)Bahn verlagern.
- Bahnindustrie und Forschungsinstitute: Neue Technologien für magnetisches Schweben, Antrieb und Steuerung, Supraleitung und Kühlung werden in umfangreichen Forschungsprogrammen entwickelt, getestet und zusammen geführt.

Vergleicht man diese institutionellen Bedingungen mit Deutschland oder Europa, so folgt das Ergebnis:

- Weder Deutschland noch Europa haben ein zentrales Bahnforschungs-Institut. Die ERA (European Railway Agency) ist primär für die Interoperabilität konventioneller Techniken zuständig, so dass wenig EU Impulse für Innovationen zu erwarten sind. Die nationalen Forschungseinrichtungen für das Bahnwesen sind zu klein, um Innovationen bis zur Entwicklungsebene voran zu bringen.
- Die Bahngesellschaften haben aufgrund der nationalen und EU Regulierungen keine Möglichkeit, Gewinne in ihren Geschäftsfeldern zu erzielen, die es ermöglichen würden, radikale Innovationen zu entwickeln und marktreif zu machen, sowie die damit verbundenen Risiken zu tragen.
- Der staatliche Flankenschutz auf der Marktseite fehlt. Parallele Investitionen für die Infrastruktur des Straßen- oder Luftverkehrs sowie hohe Subventionen zur Förderung von Innovationen für die konkurrierenden Verkehrsträger sind dagegen Realität. Die Vorteile der Bahnen bei Umwelt, Sicherheit und Klima bleiben bislang aufgrund mangelnder Internalisierung externer Kosten nicht marktrelevant.
- Die großen Hersteller (Siemens, Alstom, Bombardier) ziehen sich eher zurück, fusionieren, um zu rationalisieren, und reduzieren Kapazitäten, weil die Auftragslose zu klein und die Risiken neuer Technologien nicht aus Gewinnmargen zu decken sind.

Wenngleich das japanische Beispiel nicht das einzige Geschäftsmodell für erfolgreiche Bahninvestitionen darstellt, so zeigt es doch, dass die wichtigen Partner an einem Strang ziehen müssen, um Innovationen zu realisieren. In Europa scheint die EU Kommission die einzige Institution zu sein, die mit dem SHIFT2RAIL-Projekt den Versuch unternimmt, eine solche Partnerschaft zusammen zu führen.¹² Allerdings sind Finanzierung und Risikoträgerschaft für Spin-offs aus diesem Programm noch völlig ungelöst, denn den Bahngesellschaften fehlen die Mittel, die Bahnindustrieunternehmen sehen keine Renditen und die nationalen Regierungen haben andere Probleme und Prioritäten.

6 Konsequenzen für die Regulierung

6.1 TECHNISCHE REGULIERUNG

Für die technische Regulierung und Standardisierung ist in Deutschland das Eisenbahnbundesamt (EBA) und in Europa die European Railway Agency (ERA) zuständig. Das EBA sieht – wie auch die anderen nationalen technischen Regulierer – seine Hauptaufgabe darin, die Sicherheit des Eisenbahnbetriebs zu gewährleisten. Daher sind bereits die Zulassungen für konventionelle Technik außerordentlich langwierig und aufwendig. Sind neue Technik-Elemente enthalten, so kann es Jahre dauern, bis sie vom Regulierer zugelassen werden. Aufgrund dieses Risikos gibt es wenig Anreize für die Bahnindustrie, neue Techniken zu erproben und anzubieten. So hat auch die japanische Bahnindustrie, die im Bereich des Personenzugverkehrs international eine führende Rolle spielt, bislang davon abgesehen, in Europa anzubieten, obwohl sie von Bahngesellschaften wie der DB AG dazu ermutigt wurde.

Damit fehlt ein wirksamer Druck auf die beteiligten Partner, neue Techniken zu erproben. Im Falle der Automatisierungstechniken und autonomen Zugsteuerungen hat dies dazu geführt, dass das ECTS Level 3 System, das die starre Blocksicherungstechnik ablösen und individuelle Zugsteuerungen erlauben soll, aus dem Katalog der „Key Performance Indicators (KPI)“ heraus genommen wurde (vgl. Rothengatter, 2016). Denn Bahngesellschaften und Regulierer sahen keine Möglichkeit einer baldigen Einigung in der EU auf die Level 3 Standards, während man sich beim Level 2 auf Standards einigen konnte, die allerdings den technischen Stand von vor 2010 repräsentieren¹³.

¹² Dabei soll nicht verkannt werden, dass einige Länder, wie die Schweiz, Österreich sowie Frankreich oder Spanien im Personenverkehr eine wesentlich aktivere Bahnpolitik betreiben als der EU Durchschnitt und insbesondere Deutschland.

¹³ Kommission, EU-Länder und Bahngesellschaften haben sich im Jahr 2016 auf eine gemeinsame Spezifikation für Level 2, „Baseline 3“, geeinigt.

6.2 ORGANISATORISCHE REGULIERUNG

Falls die vierte industrielle Revolution das Bahnwesen tatsächlich erfassen sollte, so sind die wesentlichen Bahnkomponenten nicht nur physische Infrastruktur und das rollende Material, sondern vor allem die Kommunikationsinfrastruktur. Letztere wird aber nicht mit der physischen Infrastruktur zwangsgekoppelt sein, sondern als verteilte Intelligenz in Clouds, Servern und Fahrzeugen integriert, die noch über die Sensorik mit dem Fahrweg verbunden sein kann (etwa: Balisen). Dabei stellt sich die Frage, ob die wachsende Bedeutung der dritten Komponente die EU – Konzeption einer Trennung der Verantwortlichkeiten von Infrastruktur und Verkehrsbetrieb stützt oder sich als hinderlich erweist. Gegen das Trennungsmodell lässt sich vorbringen, dass die Integration von Infrastruktur und Betrieb durch die begleitende Kommunikation noch intensiver wird. Gegen das Integrationsmodell spricht auf der anderen Seite, dass die natürliche Monopoleigenschaft gestärkt und die Kontrolle eines fairen Netzzugangs für Konkurrenten erschwert wird.

Zumindest wird ein regulatorisches Dach erforderlich sein, das EU-weit einheitliche technische und organisatorische Standards setzt, um heterogene Lösungen, inkompatible Systeme und Inselstrategien zu vermeiden. Sind solche Standards einheitlich gesetzt, so entsteht ein beachtlicher Markt für Bahnautomatisierungs-Technologien mit interessanten Stückzahlen, der das Industrieinteresse wecken und Innovationen auf Seiten der Fahrzeugtechnik und Betriebsorganisation antreiben kann.

Analog zur Flugsicherung (EUROCONTROL, Single European Sky) ließe sich ein europäisches Zugsicherungssystem aufbauen, das die Fahrzeugbewegungen über Satellitenkommunikation (Galileo) kontrolliert und koordiniert sowie die Standards (Protokolle) definiert, die von Infrastruktur- und Bahngesellschaften einzuhalten sind, um eine reibungslose Führung auf internationalen Routen zu gewährleisten. Letztere verlangt die Gründung einer europäischen Gesellschaft, die den nationalen Zugleitungs-Organisationen übergeordnet ist, also eine Art EURAIL CONTROL mit einer gemeinsamen digitalen Plattform („Single European Rail Intelligence“). Die Aufgabenbereiche sind:

- Koordinierung der Fahrzeugführung und -überwachung auf angemeldeten Fahrtrassen – in Abstimmung mit den dezentralen (nationalen und regionalen) Zugleitorganisationen.
- Koordinierung der Informationsbereitstellung für Planung und Vorbereitung von Zugfahrten oder Fahrplänen.
- Koordinierung und Überwachung der Telekommunikations-, Navigations- und Ortungssysteme.
- Ausbildung qualifizierten Personals.

Mit dem Schritt ins digitale Zeitalter müssen die Bahnen damit auch den Schritt in die Integration nationaler Kommunikationssysteme in ein übergeordnetes Kontrollsystem vollziehen. Der intra- und intermodale Konkurrenzkampf spielt sich dann auf den Ebene der Produkte und Dienste ab, welche die nachgeordneten Schichten der Kommunikationstechnologien für die digitale Assistenz nutzen. Hier sind größere regulatorische Freiheiten für die Bahngesellschaften zur Nutzung von Skaleneffekten angezeigt. Dies gilt zum Beispiel für die Gewährung von Ausnahmetatbeständen im Falle der Einführung von Innovationen und für Leistungsbereiche, die eine ausgeprägte Netzbildungskapazität verlangen (etwa: Einzelwagen, Wagengruppen-Shuttle, Railports, Linien-Güterzüge mit automatisiertem Umschlag an Knotenpunkten).

7 Fazit

Die Eisenbahnen in Europa waren eine radikale Innovation im Anschluss an die erste industrielle Revolution, haben sich aber in der Folgezeit nur inkremental weiter entwickelt und konnten nach dem Zweiten Weltkrieg – bis auf Teilsegmente wie den Hochgeschwindigkeitsverkehr – nicht mit der Marktdynamik Schritt halten. Die Entwicklung von weiteren Basisinnovationen wurde durch Barrieren, wie die in sich abgeschlossene Technik und Organisation („lock-in“), das Erfinder-Dilemma („Konzentration der Entwickler auf dynamische Märkte“) oder das technologische Patt („Projektion auf das Gesamtnetz“), gehemmt. Die „Vierte Industrielle Revolution“ zwingt die Bahnen, die Weichen für das digitale Zeitalter zu stellen. Dies wird durch weitgehende Automatisierung der Beförderungsprozesse im Personen- und Güterverkehr und Begleitung der Transportvorgänge durch Kommunikation und umfassende Assistenzsysteme gekennzeichnet sein. Von der Technologie her ist es leichter, solche Systeme bei Bahnen einzuführen als auf der Straße. Allerdings ist es schwierig, die Innovations-Barrieren zu überwinden. Dies verlangt:

- Koordinierung von Forschung und Entwicklung, wie zum Beispiel in Japan mit dem zentralen Institut für Eisenbahnforschung (RTRI).
- Einrichtung einer europäischen Zentrale für die Kontrolle und Überwachung der Kommunikationssysteme für die Zugleitung (EURAIL CONTROL) in Abstimmung mit den nationalen und regionalen Organisationen.
- Übertragung zentraler Koordinierungs-Funktionen an EURAIL CONTROL analog zur Luftfahrt.
- Förderung von Innovationen in Partnerschaft von Forschung, Bahnindustrie und Bahngesellschaften.
- Anreize durch Aussetzen der Regulierung von „Essential Facilities“ für Innovationen, teilweise oder zeitweise.
- Förderung von Pilotprojekten auf Teilstrecken und Korridoren, mit Ko-Finanzierungen der Partner.
- Größere unternehmerische Freiheiten für Bahngesellschaften zur Ermöglichung von Gewinnerzielung durch neue Produkte und Initiierung von Innovationsprojekten.

- Aufstockung von Forschungsmitteln für innovationsfördernde Projekte wie SHIFT2RAIL und Ko-Finanzierung von Spin-offs.

Die gegenwärtige Politik der EU Kommission und der Mitgliedsländer beschränkt sich derzeit darauf, die Interoperabilität einer Eisenbahntechnik vom Stand des Jahres 2010 in Europa auf den Kernnetz-Korridoren bis zum Jahre 2030 herzustellen. Die Bahnen werden dann aber auf Konkurrenten treffen, welche die Fortschritte der Vierten Industriellen Revolution bereits in weiten Teilen umsetzen. Eine Revitalisierung der Eisenbahnen wird daher nur möglich sein, wenn die Weichen in Richtung auf innovative Bahntechniken und Dienste für das digitale Zeitalter zügig gestellt werden.

Abstract

Die Veränderungen von Produktion und Dienstleistungen, wie sie die "Industrie 4.0" Initiative angekündigt hat, wird weite Bereiche der Wirtschaft umgestalten, darunter auch den Verkehr. Digitale Assistenz und Automatisierung werden den Personen- und Güterverkehr bis zum Jahr 2030 nachhaltig verändern. Bis zu diesem Jahr plant die EU Kommission, die Interoperabilität im europäischen Eisenbahnwesen wenigstens auf den Kernnetz-Korridoren herzustellen. Dies reicht aber bei weitem nicht aus, um die Bahnen konkurrenzfähig zu machen, die dann auf eine Konkurrenz treffen werden, welche die "digitale Revolution" bereits weitgehend umgesetzt hat. Eine Wiederbelebung der Eisenbahnen setzt daher voraus, dass die systemimmanenten Barrieren der Bahninnovation, wie technische Abgeschlossenheit, Erfinder-Dilemma und technologisches Patt, überwunden werden können.

Literatur

- Bundesministerium für Verkehr und Digitale Infrastruktur, 2017: Masterplan Schienengüterverkehr. Berlin.
- Doll, C. Rothengatter, W. und W. Schade, 2015: Results and Efficiency of Railway Infrastructure Financing in the EU. Study for the European Parliament. Brüssel.
- EU Kommission, 2013: Regulation 1316/2013. Core Network Corridors. Brüssel.
- EU Kommission, 2011: White Paper “Road Map to a Single European Transport Area – Towards a competitive and resources efficient transport system”. Brüssel.
- EU Kommission: Projekte NEW OPERA, TIGER, SPIDER, SPIDER PLUS, LIVING RAIL, SHIFT2RAIL. ERTMS Workplan of the Coordinator; European Deployment Plan. Web Page der EU Kommission.
- FhG ISI, 2016: Automatisierung und Robotik Systeme. Automation and Robot Systems. Study for the Expert Commission on Research and Innovation of the German Ministry of Education and Research. Karlsruhe.
- Fhg ISI, Fhg IML, PTV, m-five und TUHH, 2016: Machbarkeitsstudie zur Ermittlung der Potentiale des Hybrid-Oberleitungs-Lkw. Im Auftrag des BMVI. Karlsruhe.
- Fhg ISI, INFRAS, M-FIVE und PTV, 2015: Cost of non-completion of the TEN-T. Im Auftrage der EU Kommission. Brüssel.
- Gaudry, M., 2017: The demand for journey duration and reliability: Paris region work trips by mode and sex, 2010-2011. To appear in: Bonnafous, A. and W. Rothengatter (eds.) Transport Policy. Special Issue on Jules Dupuit.
- Harvard Business Review, 2015: "The Sharing Economy Isn't About Sharing at All". *HBR*. 2015-01-28. Retrieved 2015-07-11.
- Herrmann, M., Pentek, T. und B. Otto, 2016: Design Principles for Industry 4.0 Scenarios. In: System Sciences (HICSS). Presentation to the 49th Hawaii International Conference on System Sciences.
- IBM, 2015: Was kann die Industrie 4.0? Potenzial für die deutsche Industrie. Performance of Industry 4.0. Potential for the German Industry. Ehningen.
- IC Consulente, HACON, Panteia, Viadonau und Universität Bukarest, 2014: Study on TEN-T Core Network Corridor “Rhine-Danube” und “Orient-East Med”. Im Auftrag der EU Kommission. Brüssel.
- Kondratieff, N. 1925: The Major Economic Cycles. Moscow. Transl. 1984. New York.
- Müller, S., Liedtke, G. und A. Lobig, 2017: Chancen und Barrieren für Innovationen im deutschen Schienengüterverkehr: Eine innovationstheoretische Perspektive. In: Zeitschrift für Verkehrswissenschaft. 87. 3. 177-206.

- Nefiodow, L. und S. Nefiodow, 2014: *The Sixth Kondratieff. The New Long Wave of the Global Economy*. Charleston.
- Nemoto, T. und W. Rothengatter, 2013: Efficient green logistics in urban areas – a case of milk-run logistics in the automotive industry. In: May, T. Kii, M, Pan, H. and R. Mackett (eds.): *Green Urban Transport Agenda: Implications for Cities in China*. Emerald. Bingley.
- Randeloff, M., 2016: *Automatisierter Bahnbetrieb und führerlose Züge: Eine Einführung*. Aktualisiert 27.6.2016. <https://www.zukunft-mobilitaet.net/90799/schieneverkehr/eisenbahn/fuehrerlose-zuege>.
- Rothengatter, W., Schade, W. and J. Hartwig, 2016: *Logistics in the TEN-T Corridors. Study for the Committee on Transport and Tourism of the European Parliament*. Brüssel.
- Schwab, K., 2016: *The Fourth Industrial Revolution*. World Economic Forum. Geneva.
- Schumpeter, J.A., 1942: *Capitalism, Socialism, and Democracy*. New York.
- Schumpeter, J.A., 1952: *Theorie der wirtschaftlichen Entwicklung*. Berlin.
- Tschiesner, A., 2013: *The Internet of Things and the Future of Manufacturing*. Mc Kinsey Publication of an Interview with S. Drais and H. Derenbach, Members of the 4IR Group.

On-Street vs. Off-Street Parking: An Urban Economic Analysis

VON ANNA STRAUBINGER, STEFAN TSCHARAKTSCHIEW UND GEORG HIRTE

Abstract

On-street parking is suggested to be associated with congestion due to cruising for parking. Against this background, we examine a full switch from on-street parking to off-street by means of a spatial urban CGE model. Hereby, we model cruising for parking, on-street and off-street parking together with location decisions, land and labor markets. We consider different funding schemes for infrastructure: lump-sum taxation, congestion tolls and parking fees. We find that prohibiting on-street parking generates a positive social net benefit if it is financed by the urban society as whole (lump-sum), and not by car users alone. Further, urban welfare declines in any case due to the effects on the land markets. This may help to explain why local policymakers are reluctant to foster off-street parking. In all cases, distributional effects are substantial with landowners being the main beneficiary of the measure.

1 Introduction

Increasing transport demand poses various problems for many European cities. Congestion in the surroundings of the urban region is calculated to cause losses of 100 billion Euro, respectively 1% of the European gross domestic product (GDP). For this reason, a reduction of congestion, accidents and pollution is supposed to increase the attractiveness of urban mobility for users and non-users. (EUROPEAN COMMISSION, 2017).

Anschrift der Verfasser:

Anna Straubinger
Bauhaus Luftfahrt e.V.
Ökonomie und Verkehr
Willy-Messerschmitt-Str. 1
D-82024 Taufkirchen
E-Mail: anna.straubinger@bauhaus-luftfahrt.net

Dr. Stefan Tscharaktschiew
Technische Universität Dresden
Institut für Wirtschaft und Verkehr
Würzburger Str. 35
D-01187 Dresden
E-Mail: stefan.tscharaktschiew@tu-dresden.de

Prof. Dr. Georg Hirte
Technische Universität Dresden
Institut für Wirtschaft und Verkehr
Würzburger Str. 35
D-01187 Dresden
E-Mail: georg.hirte@tu-dresden.de

The majority of these problems arise from motorized private transport but, surprisingly, parking issues play a subordinate role even though an average car is parked 23 hours a day (SHOUP, 2011, p. 621) and, as a consequence, takes up a lot of space without being used. Furthermore, the market for parking is subject to different disruptions. In the USA up to 99% of parking is free of charge (SHOUP, 2011, p. 621) and all over the world the price for parking is usually very low. But how can that be? After all, whoever owns the land could earn money if it were used for other purposes.

A major part of public parking space is on the curb and free of charge for the user. Yet even off-street parking is often at zero cost. DELUCCHI (1997) shows that only 1 % to 4 % of costs for parking are paid by parking fees, while the rest is funded via subsidies or cross-subsidization. This cost is financed by public budgets, shops and offices, house owners or the employers but eventually leads to rising taxes, good prices and rents or lower wages. In all cases, private households pay the land for parking but not necessarily those who use off-street parking (SHOUP, 2011). Additional costs arise because the jurisdictions impose heavy regulation on off-street parking to avoid land-use for on-street parking (LEHE, 2017). In the case of employer paid parking, even tax revenue might be negatively affected as employers offer lower wages (which are taxed) in exchange for the provision of free parking at the workplace (VAN OMMEREN and WENTINK, 2012). These effects decline the relative price of private car use much below the social costs and, thus, imposes inefficiencies in the transport markets. For these reasons, an economic consideration of parking considering interdependencies between public budgets, transport, land-use and economic decisions is essential.

The literature not only considers parking in general but also addresses the problem of cruising for parking. SHOUP (2006) shows that up to 30% of urban traffic result from searching for parking. The marginal costs of cruising for parking may have the same magnitude as the external costs of congestion. Nevertheless, they often stay unconsidered even though an efficient parking policy can minimize the deadweight loss resulting from it (INCI ET AL., 2017). Anderson and de PALMA (2004) and INCI (2015) emphasize the common property characteristics of parking (tragedy of commons) and the excess demand arising from it.¹ They state that in a case with congestion due to searching for parking monopolistic pricing of garage owners can lead to an optimal allocation. PIERCE et al. (2015) propose to vary parking garage fees according to the demand to achieve an optimal solution. Two types of parking – on-street and off-street – are examined by

¹ Parking is a textbook example for the tragedy of commons (INCI, 2015). While pure public goods can be characterized by non-rivalry in and non-excludability from consumption, this is not the case for commons where only non-excludability applies. For public parking that is free of charge this is exactly the case. No one is excluded from using it while there still is rivalry among the users (OSTROM, 1999). But, even if there are parking fees, excludability is below the optimal level as long as there is underpricing of parking in particular on the curb. This results in an excess demand and, thus, in cruising for parking caused by a lack of available parking lots (INCI, 2015).

CATHROP and PROOST (2006). Each user can decide whether to search for cheap on-street parking or whether to use a parking garage which is more expensive. In this case the optimal fee for on-street parking equals the marginal costs at the optimal quantity and is the same as the price for off-street parking.

We study a full switch from an on-street parking city to an off-street parking city where on-street parking is fully prohibited and off-street parking is offered and subsidized by the city. This experiment is instructive because it provides the strongest consequences and, thus, the upper bound of the effects of regulating on-street parking.

The model borrows from models of cruising for parking and monocentric city approaches. A basic model for cruising for parking, which will be thoroughly regarded in the following, was introduced by ARNOTT and INCI (2006). ARNOTT and ROWSE (2009) refine the model by considering ARNOTT (2006) who shows that increasing the prices for on-street parking seems to increase social welfare in the presence of spatial competition between different parking garages and congestion due to cruising for parking. INCI and LINDSEY (2015) examine a similar setting. Due to the spatial considerations the parking garage owners have market power. This leads to an instable equilibrium. Differentiated on-street parking fees can be one feasible solution. MARTENS ET AL. (2010) pursue a different approach. They model cruising for parking by implementing an agent-based model for cruising. Hereby, the agents simulate the car drivers' decisions while parking in order to determine the share of parking lots that have to remain vacant to prevent cruising for parking.

Another approach considering the spatial distribution of parking was pursued by GALLO ET AL. (2011). Applying a multi-layer network supply model they simulate different phases of parking including walking to the final destination. The spatial aspect for cruising for parking is also emphasized by VAN OMMEREN ET AL. (2012). They propose peak load pricing in order to minimize deadweight loss resulting from congestion. Further literature is discussed in INCI'S (2015) review of the economics of parking. This review emphasizes that the major part of research is on congestion due to cruising for parking and on spatial competition between different parking locations.

To the best of our knowledge there is no study that accounts for the trade-off between on-street parking, cruising for parking, congestion and off-street parking as well as land-use and economic markets when moving from on-street to off-street parking. We, thus, consider simultaneously the major effects of parking: (i) the congestion externality from cruising for parking, (ii) the substitution effects imposed by different funding options and subsidization (full subsidization vs. parking fees), e.g. on induced travel mode choices, as well as (iii) multiple market interactions in good, labor and housing markets. We fill this gap and study these effects simultaneously while allowing for endogenous location choices of households and firms by applying a spatial computable general equilibrium (SCGE) model of a city.

We also study how several funding schemes of the land required for off-street parking work in the spatial equilibrium: a general lump-sum tax used to offer off-street parking free of charge vs. user financing in the form of congestion tolls and user financing through parking fees.²

We consider lump-sum funding to consider the pure case of getting rid of the externality from cruising-for-parking while going on with offering parking at zero costs for users and without adding tax distortions when funding parking. In the second scenario we add the user-pay principle for parking which also reduces the parking subsidization of car using. This also should reduce the congestion externality from commuting through reducing the parking subsidy. Eventually, we introduce congestion tolls to directly tackle the congestion externality from car driving and use their revenue to finance off-street parking infrastructure.

Our spatial modeling borrows from FRANCO (2016) and BRUECKNER and FRANCO (2017) who study parking in a monocentric partial equilibrium model. The former considers parking at the Central Business District and residential parking while the latter consider different types of parking. However, neither of them models cruising for parking. In contrast, we consider cruising as well as on-street and off-street parking.

Section 2 will set up the problem in the light of the existing literature. Section 3 describes the main features of the urban CGE model followed by a brief description of its calibration for an average German city (Section 4). Section 5 presents the results of the policy simulations and the final Section 6 concludes.

2 The Market for Parking

In the following we illustrate on-street and off-street parking and summarize the main impacts both parking modes cause in an urban economy.

2.1 ON-STREET PARKING - THE BENCHMARK

We, first, define the benchmark where all parking is on the curb due to missing off-street parking infrastructure. Figure 1 illustrates this benchmark where the outer lanes of the road are offered for on-street parking. In the figure, demand equals supply and all available on-street parking lots are fully occupied by parking cars. The middle lanes are used for driving symbolized by the arrows. Hence, main parts of the road infrastructure are used for parking, which approximately halves the potential capacity for driving vehicles even without considering interference through parking procedures.

² Some research views both options as substitutes in terms of their potential to mitigate congestion (e.g. CALTHROP ET. AL, 2000; GLAZER and NISKANEN, 1992). However, as we will show in the present paper, spatial economic effects may induce non-negligible differences between these measures.

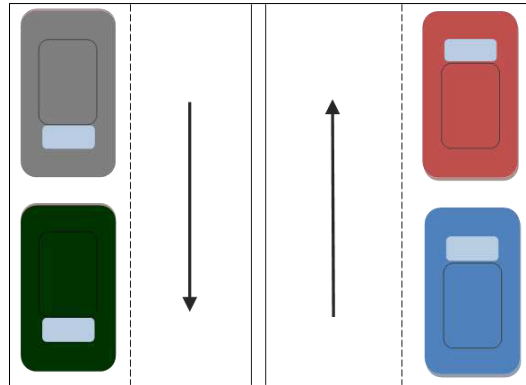


Figure 1: Parking in the Benchmark

If we add cruising for parking congestion may arise. This is an important issue in urban transport. For instance, SHOUP (2006) reports that roughly 30% of urban traffic relates to cruising for parking while an average search for parking takes 8.1 minutes. The main reason for cruising is excess demand resulting from too low prices of parking given the scarce parking supply (INCI, 2015). Usually, off-street parking is mainly privately owned and parking there is charged. As long as the private cost for cruising is lower than the private cost for parking, cruising will exist (SHOUP, 2006). There are two reasons why users do not consider true prices. First, many car users neglect their own costs for parking search resulting from time, fuel and wear costs (SHOUP, 2006), and, second, they do not take account of the adverse impacts on other drivers and the environment (VAN OMMEREN ET AL., 2012). Interestingly, the congestion externality from car use is even stronger in the presence of on-street parking as cruising cars increase congestion over-proportionally compared to vehicles in transit (INCI, 2015).

2.2 OFF-STREET PARKING – THE POLICY CASE

Our focal point of interest is to study the spatial and welfare effects of a policy that imposes a full switch from on-street to off-street parking. Figure 2 visualizes this case. Road infrastructure is now fully available to driving vehicles while parking procedures

exclusively take place in the dedicated off-street parking³ lots that imply a reduction of land available for other purposes (housing, office space etc.).

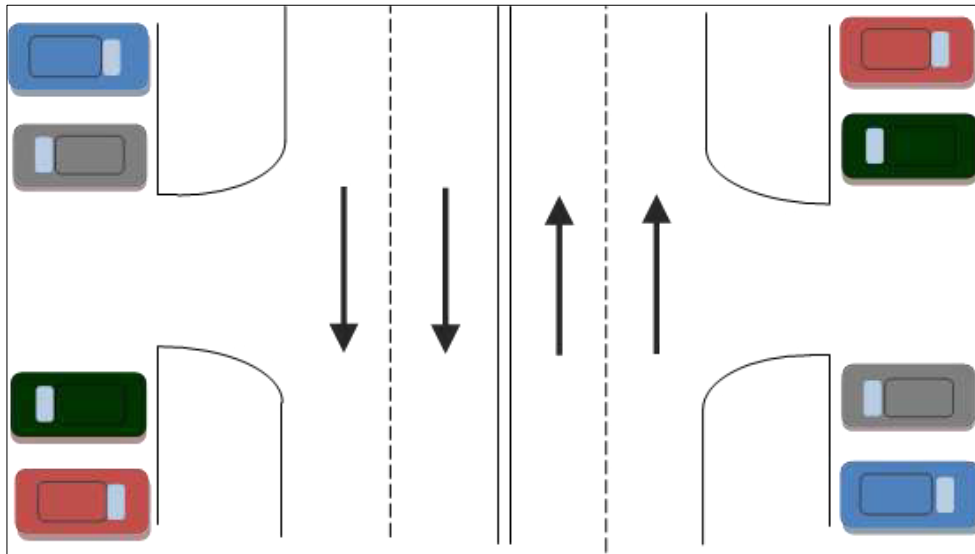


Figure 2: Parking in the Policy Case

At first sight, a prohibition of curbside parking seems reasonable and efficient as it not only lowers congestion due to parking search but also increases the capacity of roads, thereby increasing throughput by making the prevailing floating traffic less congested. On the other side, the spatial economic (general equilibrium) impacts of additional off-street parking infrastructure has to be considered. This, however, is usually neglected in existing studies. The potential impacts are manifold and, as a consequence, may induce a wide range of interesting feedback effects.

First, because urban land is scarce, the additional parking lots beyond the road will exacerbate competition on the urban land market and thus drive up land rents. This makes housing and office space more expensive causing substitution effects away from land use. For example, firms might substitute labor for land as a response to the provision of off-street parking. The increase in labor demand in turn positively affects urban wages and so

³ We do not consider spatial competition for (private) parking spaces. Off-street parking spaces are provided publicly and viewed as homogenous by drivers within the same location (but parking spaces are heterogeneous across space as parking in the city center might be more expensive than in the suburbs).

income of city residents. On the other side, since higher rents increase production cost the provision of urban goods and services is getting more expensive, *ceteris paribus*, which reduces final good demand.

Second, the increase in road capacity makes car driving more attractive. This induces a change in mode choice in favor of private car use. While a higher road capacity per se reduces congestion, *ceteris paribus*, more car use induces a negative feedback effect on congestion. The net effect determines the parking policy's contribution to congestion.

Third, off-street parking lots will crowd out other land use, thus, forcing residents and firms to relocate and to lower housing demand and reduce plant size. This diminishes utility and decreases the production of urban goods/services and, as a result, deteriorates welfare and income in the urban economy.

Fourth, as off-street parking lots are assumed to be supplied by the city funding issues come into play. Depending on whether parking lots are financed by all citizens or by road users alone, the policy's impact may differ substantially.

Fifth, given the wide range of potential policy impacts on travel decisions – which may (partly) stem from household relocations – travel related environmental effects can be expected. Here, we capture environmental effects by carbon emissions from car driving at the extensive margin, i.e. via changes in distance traveled, and at the intensive margin, i.e. via changes in emissions per kilometer traveled.

In the next section we describe the main features of the spatial urban CGE model. The model has been described extensively in previous studies so that we primarily pay attention to novel model features with special focus on integrating cruising for parking and the physical presence of parking infrastructure.

3 An Urban CGE Model with Parking

We apply and extend the framework of ANAS and XU (1999) and Anas and RHEE (2006). The spatial computable general equilibrium (SCGE) model considers three players: households, firms and the public household. Households and firms choose their utility and profit maximizing locations in the city that consists of two zones: the city center and the suburbs. The model's equilibrium is reached if all local markets for labor, land and goods are cleared and the current account is zero (ANAS and RHEE, 2006).

We assume a nested utility tree implying that utility maximizing choices of a typical household follow a three stage decision process. In the upper stage, they choose their optimal work and home location considering random utility

$$\tilde{U}_{ij} = U_{ij} + e_{ij}, \quad (1)$$

where U_{ij} is deterministic utility of a household residing in i and working in j and e_{ij} is the idiosyncratic constant that denotes individual preferences for the location combination ij . The household determines his utility maximizing location choice, i.e. choice of household type, by comparing random utilities for all location bundles of available location bundles.

In the second decision stage, households choose consumption of a composite good, housing lot size q_{ij} and leisure l_{ij} in order to maximize their deterministic utility subject to the budget constraint. Utility is assumed to be of the Cobb-Douglas type

$$U_{ij} = \alpha \ln \left(\sum_{k=1}^K z_{ijk}^\eta \right)^{1/\eta} + \beta \ln q_{ij} + \gamma \ln l_{ij}. \quad (2)$$

The composite good, i.e. the first term in (2), is defined as a constant elasticity of substitution (CES) index over consumer goods z_{ijk} bought in zone k . The decision on these goods is made in the third stage by maximizing CES utility subject to the budget available for consumption of goods. There is love of variety over the spatially differentiated local consumer goods because the quasi-concavity of CES utility ensures that consumption of different goods – here from different zones – generates a larger utility than repeatedly consuming the same good (ANAS and XU, 1999).

Utility maximization is subject to two constraints that are closely related: the monetary budget and the time budget.

$$L_{ij}D + l_{ij} + \sum_{k=1}^I 2t_{ik}z_{ijk} + 2t_{ij}D = E \quad (3)$$

is the time-budget restriction in annual terms. Total available time, E , is used for working, $L_{ij}D$, where D is the fixed number of working days per year and L_{ij} is daily working hours, for leisure time, l_{ij} , and for travelling to shops $\sum_{k=1}^I 2t_{ik}z_{ijk}$ and to work $2t_{ij}D$ (ANAS and XU, 1999). t_{ik} is one-way travel time which is symmetric.

The monetary budget constraint is

$$\sum_{k=1}^I p_{ijk} z_{ijk} + r_i q_{ij} + \tau^{ls} + c_{ij}D = (1 - \tau^w)w_j L_{ij}D + R. \quad (4)$$

Monetary income consists of the annual net salary $(1 - \tau^w)w_j L_{ij}D$ and income from land rents, R , which is the same for each household. $L_{ij}D$ is time spent working per year, τ^w is the wage tax rate and w_j is the hourly gross wage. This income is spent for consumption

goods including shopping trips, housing, lump sum taxes τ^{ls} and travel costs. p_{ijk} is the consumer price including monetary travel costs.

The use of the random utility approach and the assumption that the idiosyncratic location-preference parameter e_{ij} is extreme value distributed allows us to apply a multinomial logit model (ANAS and XU, 1999) to the location decision. Therefore, we can interpret expected values (choice probabilities) as shares of the household types ij in the household population, denoted as ψ_{ij} in the following.

The model is closed by the public budget constraint, zero profit conditions of location specific firms following from perfect competition, a current account and market clearing conditions of local labor, land and good markets.

The government levies a labor income tax to finance lump-sum transfers and road infrastructure cost. The latter are opportunity costs of land used for roads.

Good market clearing

$$N \sum_{i,j=1}^{I,J} \psi_{ij} z_{ijk} + EX_k = X_k \quad (5)$$

states that local good supply X_k in zone k equals the demand of all households ij (first term on the LHS), plus export EX_k from this zone.

Labor market clearing requires

$$N \sum_{i=1}^I \psi_{ij} L_{ij} D = M_j. \quad (6)$$

annual labor demand in zone j , M_j , equals total labor supply that consists of the number of people working in j multiplied with their annual working time (ANAS and RHEE, 2006).

$$N \sum_{j=1}^J \psi_{ij} q_{ij} + Q_i + S_i = A_i \quad (7)$$

is the clearing condition of the land market. It states that the land demand of households, firms, Q_i , and for infrastructure, S_i , equals fixed land supply A_i in zone i (ANAS and RHEE, 2006). Further, we assume that there are absentee landlords. To balance the current account, exports of local goods must have exactly the same value than the payments of all land rents to absentee landlords and of monetary transport costs to the outside-city transport sector.

A representative local firm uses local land and local labor as input factors to produce the profit-maximizing number of local goods. This approach is equivalent with assuming that a large and variable number of equally sized firms producing a fixed output level choose their optimal location in order to maximize profits (ANAS and XU, 1999)⁴.

The model's transport sector is of special interest since congestion and traffic volume are endogenous. We use the BPR congestion function to calculate speed, thus, congestion (ANAS and XU, 1999). Travel time on the route from i to j , t_{ij} , strongly depends on the infrastructure's capacity, C_{ij} , and the traffic volume on this link, F_{ij} . The parameters of this function are the inverse of the free-flow travel speed, d , and the parameters b and a required for calibration. This gives⁵

$$g_{ij} = d \left[1 + b \left(\frac{F_{ij}}{C_{ij}} \right)^a \right]; \quad d, b > 0, \quad a \geq 1 \quad (8)$$

This basic structure of the spatial CGE model closely follows the framework developed by Anas and coauthors (ANAS and RHEE, 2006; ANAS and XU, 1999). In order to make it suitable for the parking issue considered here we need some extensions: mode choice, cruising for parking and an additive land-use category for parking infrastructure.

Parking infrastructure is financed by the government and, thus, enters the public budget constraint, the land market clearing condition, S_i in Eq. (7), and the current account via rents paid to absentee landlords.

The inclusion of mode choice into the model is essential to consider substitution effects among transport modes. We model mode choice close to ANAS and LIU (2007). The household can choose between car, public transport and walking. This choice is modeled using a multinomial logit-model that includes monetary and time costs for each mode.

Our major extension of the model is the modeling of cruising for parking. The literature proposes different approaches, most of them including on- and off-street parking⁶. We use some ideas of ARNOTT and INCI (2006) who focus on on-street parking. In their model, traffic flow is the sum of cars in transit T to a final destination (transit pool) plus the cruisers for parking (cruising pool) C . In steady state, entry into both pools per unit of time equals the number of cars leaving the on-street parking lots (the parking pool) per unit of

⁴ Note that the model is silent on whether changes in good production occur on account of relocation and market exit and entry of firms or changes in output of existing firms.

⁵ This approach is not able to depict peaks because it assumes an equal distribution during the day (ANAS and RHEE, 2006).

⁶ E.g. CALTHROP and PROOST (2006), INCI and LINDSEY (2015), SHOUP (2006), THOMPSON and RICHARDSON (1998), VAN OMMEREN ET AL. (2012).

time. We use the basic ideas of their approach and adjust it so that it fits to our models' CES structure.

To simplify issues, we assume that only commuters are affected by congestion whereas shopping is free of it. We justify this by the dominant morning and evening peaks stemming mainly from commuting traffic (INFRAS and DLR, 2010). This implies the assumption that cruising for parking is an issue only during peak hours. Hence, only commuters have problems to find a parking lot and may cause congestion through cruising. In contrast shoppers who need a parking lot instantaneously find an available one without any search time. The reason for this is that parking lots near shopping areas are not filled up by commuters. As a consequence, there is no cruising for parking and, thus, no link between parking and congestion outside the peaks.

As our model considers two zones, there is no real transit traffic as in ARNOTT and INCI (2006) because all trips at least start or end in a considered zone. Due to this fact, we modify the assignment of the vehicles to the different pools (transit and cruising).

All vehicles used for commuting, starting in zone i and traveling to any zone j belong to the pool of transit vehicles:

$$T(i) = \sum_j Flow(i, j). \quad (9)$$

We further assume that each commuting vehicle whose destination is in i is assigned to the pool of cruising vehicles because there is on average no parking without cruising. In contrast to ARNOTT and INCI (2006) who assume a continuous entry and exit into parking, there are enough on-street parking lots in our model and each commuter will eventually find a parking lot. Nonetheless, available parking lots are scarce at a specific address and commuters have to cruise around to find one. However, not the whole zone area will be used for cruising and since some vehicles are able to find a parking lot rather fast, the traffic volume of the cruisers is weighted with the factor 0.5, implying an average number of cruising vehicles of

$$C(i) = 0,5 \cdot \sum_j Flow(j, i). \quad (10)$$

Traffic volume in zone i is the sum of cars in transit plus traffic due to cruising. However, cruising cars travel around and, thus, are more than proportionally contributing to traffic flow. To specify that we adapt the traffic flow function from ARNOTT and INCI (2006) who assume that cruising vehicles contribute 1.5 as much to traffic volume TF as the transit vehicles do, implying:

$$TF(i) = T(i) + 1,5 C(i). \quad (11)$$

This benchmark model is modified in the policy scenarios. We examine a switch from on-street to off-street parking. In this case, we assume that there is no cruising for off-street parking and entering parking lots is fast enough⁷. However, offering off-street parking requires additional land used for parking.

In addition, we consider two ways of financing the infrastructure for off-street parking. In a first scenario, the city finances the infrastructure through lump-sum taxation. In the second scenario, there is full user financing. Users pay parking fees so that the revenues just equal the expenses for parking infrastructure. In that case, we assume that parking fees during working are four times the fees for shopping. This implicitly considers that on average parking for working is much longer than parking for shopping. In the third scenario, there is a congestion toll modeled as the difference between private and social time costs as proposed in ANAS and RHEE (2006, p. 520). The welfare effects of introducing these policies are evaluated using equivalent variation in order to monetarize utility losses or gains.

4 Calibrating the model

The model is calibrated to fit a German city with approximately 500.000 inhabitants (DESTATIS, 2015) and an area of 400km², from which one fifth is the city center (DESTATIS, 2016c, 2016d). 45% of the inhabitants own apartments whereas 55% are owned by absentee landlords (DESTATIS, 2014B).

The utility function's parameter are chosen in order to fit existing data ($\alpha=0.35$, $\beta=0.18$ and $\gamma=0.40$) (ANAS and XU, 1999; STATISTISCHES BUNDESAMT, 2013; TSCHARAKTSCHIEW and HIRTE, 2010). The constant elasticity of substitution depicts the love for variety and for this reason was set to 2.5 (TSCHARAKTSCHIEW and HIRTE, 2010).

The scale parameters are set to 0.7 and inner city production is more labor intensive than production in the suburbs (ANAS and XU, 1999; TSCHARAKTSCHIEW and HIRTE, 2010).

Free-flow speed for cars is set to 40 km/h with regard to junctions that decrease the speed from the maximum limit. The congestion function is calibrated following the Bureau of Public Roads (BPR)-function (SMALL and VERHOEF, 2007). The fuel costs are chosen to be 1.39 €/l, 0.51 €/l being the gross price (BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR UND DIGITALE INFRASTRUKTUR, 2015, p. 294; STATISTA, 2017a). Public transport speed is set to 18km/h, walking speed to 6 km/h (NITZSCHE, 2015). Marginal damage costs of CO₂ emissions is 145€/t (BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR UND DIGITALE INFRASTRUKTUR, 2015).

Table 1 shows some results and compares them to empirical values.

⁷ This would be the case if the city installs a well-working car-park routing system.

	City				Empirical values
GDP [billion €]	24.9				23 ⁸
Disposable income [€]	47.376				44,750 ⁹
Marginal congestion costs [€/km]	0.34				0.30 ¹⁰
Fuel consumption shopping [l/100km]	7.22				7.6 ¹¹
Modal Split (Car/ Public Transport/ Walking) per trips	63 %	/ 35 %	/ 2 %		63 %/ 35% / 2% ¹²
	Zone 1 (<i>i</i> or <i>j</i> = 1)		Zone 2 (<i>i</i> or <i>j</i> = 2)		
Wage [€/hour] in <i>j</i>	21.95		18.04		19.65 ¹³
Rent [€/m ²] in <i>i</i>	7.52		3.09		7.39 ¹⁴
	<i>i</i> =1, <i>j</i> =1	<i>i</i> =1, <i>j</i> =2	<i>i</i> =2, <i>j</i> =1	<i>i</i> =2, <i>j</i> =2	
Working hours per day of worker living in from <i>i</i> and working in <i>j</i>	8.0	7.5	7.2	7.2	8 ¹⁵
Daily commuting time car (one-way) from <i>i</i> to <i>j</i> [h]	0.35	0.81	0.91	0.55	
Fuel consumption commuting from <i>i</i> to <i>j</i> [l/100km]	10.32	8.58	9.29	8.73	
Price elasticity w.r.t fuel prices	commuting	-0.11	shopping	-0.08	-0.1 - -0.3 ¹⁶
Price elasticity wr.t. fares	commuting	-0.21	shopping	-0.18	-0.0 - -0.8 ¹⁷

Table 1: Some Benchmark Results.

⁸(STADT NÜRNBERG, 2014, p. 6).

⁹(DESTATIS, 2016a). Calculated with an average household size of two (children, partner etc.) (STATISTA, 2016).

¹⁰(ANAS and RHEE, 2006, p. 527).

¹¹(ADAC, 2016).

¹²(DESTATIS 2016b, p. 342).

¹³(DESTATIS, 2014b).

¹⁴(IMMOWELT 2017).

¹⁵(DESTATIS, 2014a).

¹⁶(SMALL and VERHOEF, 2007; TSCHARAKTSCHIEW and HIRTE, 2012, p. 295).

¹⁷(OUM, WATERS, and YONG, 1992; TSCHARAKTSCHIEW and HIRTE, 2012, p. 295).

5 Policy analysis

All scenarios (lump-sum tax, congestion toll and parking fee) examine the prohibition of on-street parking. The city government offers off-street parking that is fully funded. The different scenarios concern the refinancing schemes are: lump sum tax, parking fee, congestion toll.

We first have to specify supply of off-street parking. Parking at the home location stays totally unconsidered in this work. We assume an off-street parking lot requires on average 25 m² of land (KORDA, 1999).¹⁸

The policies have different spatial, economic and ecological impacts. We first give a short intuition on the major effects before we will move on to the simulation results.

5.1 EXPECTED RESULTS

We give an intuition on the expect outcomes of the three scenarios in Figure 3.

¹⁸ A rough calculation gives us an idea of how much land is required to substitute all on-street parking in the benchmark. The initial car modal split is 63%. Assume this increases to at most 70%. Let us assume that on average a maximum of 85% of all commuters by car need a parking place at the same time, for instance, since there is some shift operation. If each household only owns one vehicle that makes $500,000 \cdot 0.70 \cdot 0.85 = 297,000$ parking lots. Calculating this adds up to 7.5km² for parking. The full reduction of on-street parking will increase the road-capacity parameter from 51% to 61%.

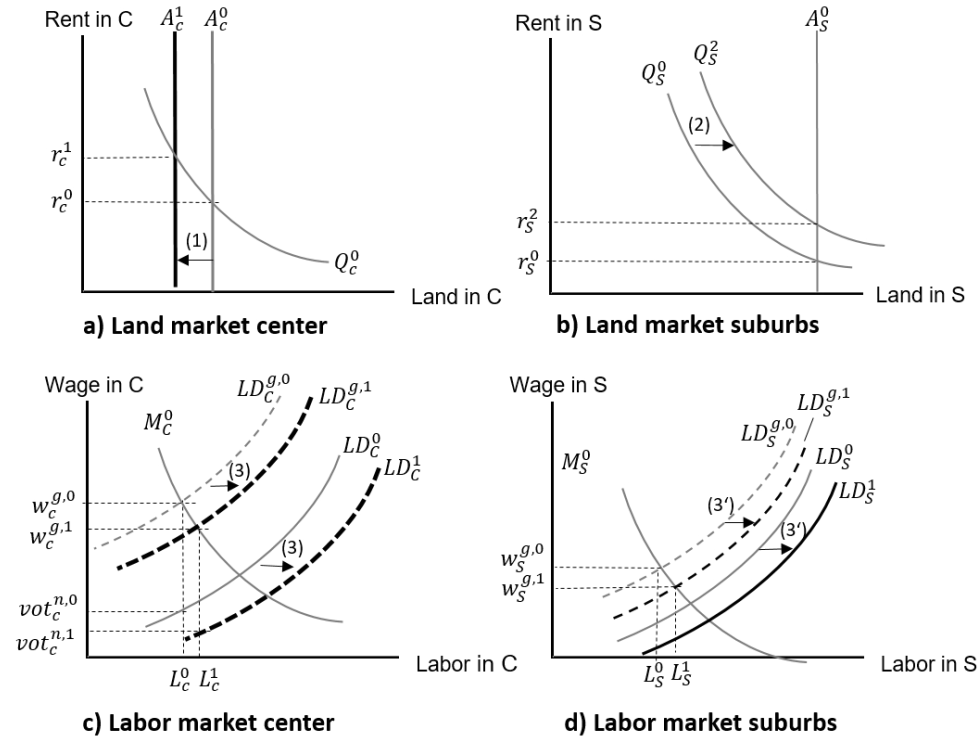


Figure 3: Policy Effects on the Land and Labor Markets

Panel a) and b) of Figure 3 display the center's and suburbs' land markets, respectively. The benchmark equilibrium is denoted by indices '0', 'C' denotes the center and 'S' the suburbs. A_C^0 , respectively, A_S^0 are fixed land supply available for use by households and firms and Q_C^0 and Q_S^0 are their aggregate land demands implying benchmark land rents r_C^0 and r_S^0 , respectively. At the center's labor market, M_C^0 denotes local labor demand and LD_C^0 local labor supply in the absence of price distortions. The income tax rate drives a wedge between the gross wage $w_C^{g,0}$ and the value of time (VOT) $vot_C^{n,0}$, that is equal to the net wage. Labor supply in terms of the gross wage is $LD_C^{g,0}$ and local employment in the benchmark is L_C^0 .

Now, consider the switch to off-street parking financed by a lump-sum tax. To simplify matters we assume for the time being that this happens only in the center. In that case, land supply for housing and offices declines to A_C^1 (see shift (1)). This shocks the land market in the center and implies a rise in the land price to r_C^1 . As a consequence, housing demand declines and some households move to the suburbs. This shifts the land demand curve at

the suburbs' land market to the right to Q_S^2 (see shift (2)) implying τ_S^2 . This relocation lowers labor supply in the center and increases labor demand in the suburbs (shift the labor supply curves, not drawn).

Introducing off-street parking causes a positive shock on the center's labor market because it reduces income through lump-sum taxation but raises time available for leisure and working due to the reduction in congestion. Both increase labor supply, the first is a negative income effect on leisure and the second is a positive wealth effect of time endowment that increases both leisure and labor supply. This shifts the gross and net labor supply curves to the right, see shift (3) in the center's and (3') in the suburb's labor market. However, the wedge between the gross wage and the value of time (VOT) stays constant.

To summarize: off-street parking funded by lump-sum taxes leads to relocation of households to the suburbs, relocation of firms to the center, higher employment at the center and the suburbs, higher income and lower gross wages. Relocation implies additional commuting.

Next, consider the case of parking fees used for funding parking supply. In that case the shock on the land market stay almost the same, see shift (1). Higher land rents cause higher costs of road infrastructure which implies higher lump-sum taxes and, thus a shock on the labor markets that is similar to that caused by lump-sum taxation but smaller. In addition, parking fees reduce disposable income and, thus, leads to a further right movement of labor supply curves. In contrast to lump-sum taxation, parking fees are also paid for shopping. Hence, there is a distortion in consumer prices implying a substitution in favor of housing demand and leisure. As a consequence, labor supply increases less than with lump-sum tax funding. This is the reason why the shift of the labor supply curve is smaller than under lump-sum tax funding, a shift smaller than (3) in panel c).

What happens with congestion tolls? In comparison to parking fees that account only for parking costs and indirectly internalize the congestion externality, congestion tolls fully internalize the congestion externality and, additionally, finance a major part of parking costs. Whether they have a stronger effect than parking fees depends on the relative size of infrastructure costs to congestion costs. Besides, there are two main differences between both instruments. The congestion toll is a tax on distance while parking fees 'tax' each trip equally. Hence, with congestion there might be less relocation to the suburbs compared to the case of parking fees while parking fees favor longer trips. While the congestion toll does not affect the value of time nor the consumer price of local goods, it makes traveling by car more expensive and, thus, induces an increase in mode share of public transport. Because public transport is slower, people lose time available for leisure. This reduces wealth and imposes a negative effect on leisure but also labor supply for commuters. If this effect offsets the labor stimulating effect of lower income, leisure supply declines otherwise it increases. In any case, the right shift of labor supply curves is considerably lower than with parking fees or lump-sum tax funding.

Next, we move to the simulation results. Table 2 displays some results which we discuss in the following.

	Benchmark	Lump-Sum	Toll	Parking fee
Percentage of housing in center	37.0 %	-0.3 %	-0.5 %	-0.6 %
Percentage of jobs in center	57.5 %	+0.1 %	+0.2 %	±0 %
Rent center [€/m ²]	7.52	+5.7 %	+3.9 %	+4.9 %
Wage center [€/hour]	21.95	-0.6 %	-0.4 %	-0.4 %
Annual disposable income [€]	47,376	+0.8 %	-2.6 %	+1.4 %
Lump-sum transfer [€]	3,720	-27.2 %	-38.2 %	-8.0 %
Price for goods in suburb [€]	67.39	+1.6 %	+0.4 %	+1.4 %
Income absentee landlords [m. €]	10,495	+4.3 %	+2.4 %	+3.9 %
Marginal congestion costs [€/km]	0.34	-61.8 %	-91.2 %	-70.6 %
Annual travel distance [km]	22,388	+0.2 %	-0.3 %	-0.3 %
Emissions per HH [kg CO ₂]	2,238	+0.3 %	-27.6 %	-7.2 %
Modal split (car/ PT/ walking)	0.63 /0.35 /0.02	0.67 /0.31 /0.02	0.53 /0.44 /0.02	0.62 /0.36 /0.02
Modal split commuting	0.56 /0.41 /0.03	0.68 /0.30 /0.03	0.32 /0.65/0.03	0.58 /0.39 /0.03
Modal split shopping	0.67 /0.31 /0.02	0.67 /0.31 /0.02	0.67 /0.31 /0.02	0.64 /0.34 /0.02
Road infrastructure costs [Mio. €]	4,306	+4.8 %	+2.9 %	+4.2 %

Table 2: Policy Impacts

5.2 REFINANCING VIA LUMP-SUM TAX

Because lump-sum taxes do not distort prices, they should be a relatively efficient method of financing off-street parking.¹⁹ Table 2 shows that some effects coincide with the graphical reasoning in section 5.1. The effects on the land market are pretty clear: land rents increase more in the center (+5.7%) than in suburbs (+ 3.7%). This causes relocation to the suburbs and a decline in average land demand per household (−3.2% to −5.5%). The higher land rents induce an increase in road infrastructure costs (+4.8%) in addition to the parking infrastructure costs. This lowers lump-sum transfers by 27.2%.

There is strong decline in marginal congestion costs of 21 cents per km, i.e. about 61.8% despite the feedback effects that imply more traffic. Less congestion also lowers fuel consumption by 9.9%-23% per km. The decline in travel costs makes car travel more attractive. This explains the increase of the modal split of car use for commuting from 56% to 68%. This leads to more emissions from transport of yearly about 0.3% per household.

The strong decline in income caused by lump-sum tax funding implies a strong income effect strengthened by the wealth effect from more available time, hence, labor supply increases by 6 to 19 minutes per day. That raises the GDP and overall income increases despite lower wages.

One nice issue of our simulation results is that the calculated costs for parking infrastructure are close to the level of these costs found in the literature. The additional monthly expenses for parking add up to 123.77 € in our simulation compared to 127 \$ calculated by SHOUP (2011).

In order to assess the impacts of the different policies, equivalent variation (EV) was performed. This method monetarizes the different utility levels and therefore allows to gauge the differences (KLEINWEFERS, 2008, p. 216)

Table 3 displays the welfare effects, showing that the city's GDP increases by 2.4% and overall welfare by 0.46% of initial GDP. However, there is strong redistribution in favor of absentee landlords (+374€m) arising due to the increase in land rents. The higher rents in turn lowers welfare of households despite higher income and in total deteriorates welfare of the city by 259 million Euro (EV all households). Obviously, even though the travel speed for private motorized transport and income increases this cannot compensate for the welfare losses resulting from the lump-sum taxation and higher rents.

¹⁹ Some authors reason that the equality of the burden imposed on all households makes it a suboptimal measure (HINDRIKS and MYLES, 2006). SHOUP (2011) states that this form of refinancing shifts a higher burden to poorer households. His argument mainly stems from a reduced car ownership rate of poorer households. Some redistribution is included in the model because the marginal utility of income differs across household types. This affects welfare in this type of model as has been shown by HIRTE and TSCHARAKTSCHIEW (2013). In addition, we explicitly account for redistribution between landlords and working households.

	Lumpsum	Toll	Fee
Change in GDP [million €]	+600	-200	+300
EV per household [€]	-515	-1,076	-747
EV all households [million €]	-258	-538	-374
EV absentee landlords [million €]	+374	+222	+322
Benefit from emission cost reduction [million €]	-0.5	+44.5	+11.5
Total impact [million €]	+115.5	-271.5	-40.5
Total welfare change in % of GDP	0.46 %	-1.1 %	-0.16%
Change in GDP in %	2.4 %	-0.8 %	1.2 %

Table 3: Welfare Effects

5.3 REFINANCING VIA CONGESTION TOLL

The second funding scheme is a congestion toll as a mean to implement user financing. The congestion toll aims at internalizing the external congestion costs of traveling²⁰.

The spatial effects are similar to the previous scenario and follow the discussion in 5.1. In contrast to the case of lump-sum funding, the impact on labor supply is ambiguous. Labor supply of commuters declines due to mode switch in favor of public transport that lowers available time while labor supply of non-commuters increases due to the income effect of higher taxation.

²⁰ Mathematically, the congestion toll is the difference between social and private marginal costs (see e.g. VERHOEF, NIJKAMP and RIETVELD, 1995). We follow this definition to calculate the toll in the model. In reality, it would be more difficult to determine an efficient level for the toll and transaction costs would reduce its impact (LEHMANN, 2007).

What are the consequences for transportation? The congestion toll only applies to commuting trips causing a strong decrease of car usage for commuting. The modal share of commuters drops from 56% to 32% leaving 65% of all commuting trips to public transport. Accumulated over both trip purposes this leads to a modal share of private motorized transport of 53% that is 18% below the benchmark level. Considering existing research on city tolls this seems to be a realistic effects. London and Stockholm, for example, faced a decrease of modal split of car usage up to 25% (ELIASSON ET AL., 2009; TRANSPORT FOR LONDON, 2008). Together with the reduction of the traveled kilometers, we calculate an immense decrease of emissions by 27.6% in our scenario.

Yet, it has to be put forward that the toll revenue does not equate the additional expenses stemming from the parking infrastructure and the increased costs of road infrastructure and so, the lump-sum transfer is reduced by 38.2%.

All in all, we find a clear welfare loss of 1.1% in terms of GDP compared to the benchmark despite the unchanged GDP and the positive decline in congestion and emissions (see Table 3). The city welfare declines by 538 million € (-2.2% of GDP) while there is strong redistribution in favor of absentee landlords. The welfare effect of the congestion toll is negative compared to positive effect of lump-sum tax funding. The reason is the strong wealth effect caused by the huge time loss arising on account of the model switch to public transport. This effect more than offset the internalizing effect on congestion and emissions.

5.4 REFINANCING VIA PARKING FEES

The second form of user financing examined is parking fees. The literature considers parking fees as a transport-planning tool. GLAZER and NISKANEN (1992) and VERHOEF ET AL. (1995) see parking fees as a substitute for congestion tolls. CLATHROP ET AL. (2000) state that a combination of policies delivers the most efficient results. If only one policy is to be applied, parking fees should be implemented. We should, however, note that in our case where commuting and shopping is considered, parking fees tax shopping as well as commuting while a congestion toll is only levied on commuting. In addition a parking fees is a price per trip while the congestion toll taxes distance that is endogenous on account of relocation in our approach.

In this scenario, the fees were modeled in order to equal the additional costs caused by the parking infrastructure. Hereby, the parking fee for commuters add up to four times that of shopping. This resulted in a fee of 4.26€ for a working day and 1.07€ for shopping. Compared to literature values of more than 1€ per 30 minutes (STATISTA, 2017b) this is rather cheap. However, our model city has a very low rent level.

Once more, the policy results in a clearly increasing price for housing which again results in the same spatial trends as the other policies and a strong redistribution in favor of absentee landlords. The higher land price causes additional infrastructure cost that leads to an increase of the lump-sum tax, higher housing costs and relocation of household to the suburbs.

Due to congestion toll and parking fee, both being user financed scenarios, one would assume that the impacts of both scenarios are very similar. This, however, is not the case. The change in the modal split is very small. The car usage for commuting even increases while it decreases a bit for shopping trips leading to an overall decrease of car usage from 63% to 62%. These developments have different reasons. First of all, the congestion toll only applies for commuting traffic, while both trip purposes are influenced by parking fees. Furthermore, the congestion toll strongly depends on the travel distance, as it is a kilometer based toll. In contrast, every car user has to pay the same parking fee no matter how far he travels.

Overall the influence on the transport sector is not as strong as in the case with the congestion toll. Still the emissions are strongly reduced, mainly due to a decrease in traveled kilometers per year. Overall welfare and the GDP slightly decline and city's (households') welfare declines while absentee landlords benefit. Overall, the effects are comparable to the lump-sum funding case on account of two effects: first, there is a slight increase in public transport use that lowers time available for leisure and working; second, there is a substitution effect because parking fees increase the consumer price for shopping.

Next, we summarize the results as follows: all policies make the average city household worse off compared to the benchmark while the absentee landlords always are better off. Regarding the total impact, the lump-sum policy is the most efficient because it stimulates labor supply implying also an increase in GDP and income. However, due to redistribution to the landlords worker households lose. They lose even more with parking-fee funding despite additional labor supply. Because labor supply of commuters declines congestion tolling imposes the strongest welfare loss to worker households and, eventually, diminishes social welfare. In addition, to offset the decline in income tax revenue, lump-sum taxes increases even more than with lump-sum tax funding. This imposes an additional income effect on labor supply. Further, lump-sum tax funding is rather unlikely to be implemented on account of redistribution issues. The second best alternative concerning overall welfare is refinancing via parking fees.

Concerning environmental issues, emission decline the most with congestion tolls. But parking fees imply also a clear reduction of emissions at much less welfare costs. Therefore, parking-fee funding seem to be a more efficient policy than congestion tolling when moving from on-street to off-street parking. This is the reason why we study different levels of parking fees in the following. This shows us the trade-off between emissions, congestion and welfare. In particular, we are interested in the optimal level of parking fees.

5.5 IN SEARCH OF AN OPTIMAL PARKING FEE

In order to find out whether there is an optimal parking fee level, we vary the parking fees in the following.

Figure 4: Utility Change with Varying Parking Fees depicts the effects of parking fees on average household utility. It shows that there is an almost linear relationship between average utility and average parking fee, indicating that a higher parking fee always results

in lower average utility. Accordingly, the maximum average utility of city households is achieved at zero parking fees implying that parking fees always reduce urban welfare. Therefore, switching to off-street parking makes the average household always worse off and, thus, may not be accepted in the city. Even households not traveling by car will lose because rents increase.

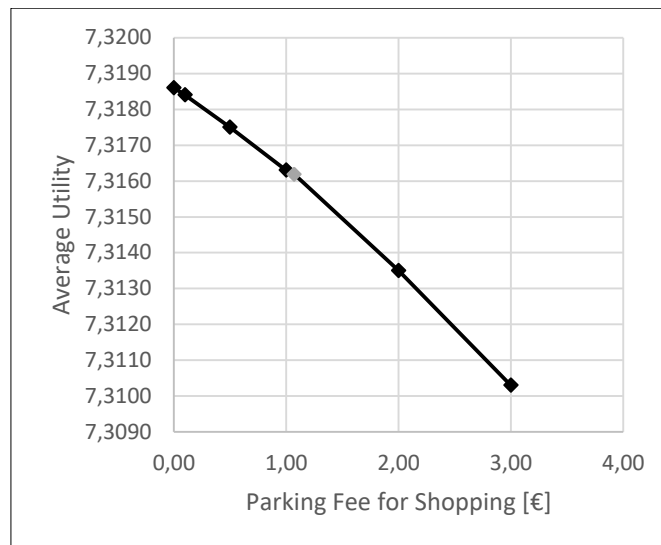


Figure 4: Utility Change with Varying Parking Fees

From the perspective of society, the benefits of landlords and from reduced emission costs have to be compared to the losses of urban households. Hence, from the society's perspective a modified version of the parking-fee funded switch to off-street parking could be to set the fees at a level where the overall welfare equals that of the benchmark, i.e. a welfare-neutral policy. This case is achieved with parking fees for shopping of 0.82 € and for commuting of 3.28 €. However, this would lead away from pure user financing.

6 Conclusion and Discussion

The switch from on-street to off-street parking generates benefits due to the reduction of congestion made possible from less cruising for parking and the increase in road capacity made possible by prohibiting on-street parking. On the other hand, costs arise due to additional infrastructure costs, higher land prices and relocation of households to the suburbs. The main reason for these costs is the huge amount of land required for offering off-street parking that reduces land available for other purposes and, thus, implies a strong increase in land prices. As we have shown above, the costs exceed the benefits from the perspective of the city households independent from the funding scheme. In contrast, social

welfare that additionally accounts for absentee landlords' utility and the decline in emission costs improves if off-street parking is financed by an efficient-neutral lump-sum tax.

We have further shown that in our second-best world user-financing worsens the case for city households but also implies a loss of social welfare. This is interesting, given the idea that user financing is well-suited to internalize externalities and, thus, should improve the case compared to lump-sum tax financing. However, because we model a general equilibrium with endogenous labor supply, this positive internalizing effect is more than offset by the negative effect of user-financing on labor supply²¹. This latter effect is stronger for congestion tolls that are a pure tax on commuting while parking fees also tax shopping. As a consequence, imposing parking fees is more efficient than congestion toll for funding off-street parking.

The main outcome of our study is, thus: switching from on-street to off-street parking is welfare deteriorating in the absence of lump-sum tax funding even from the society's point of view due to the distortionary effects of funding schemes. If, however, the reduction of congestion and emission is the most important aim parking fees might be more efficient than congestion tolls on account of lower welfare costs. But to study whether this holds if both measures are compared at the same level of changes in congestion and emissions is left to future research.

Refinancing via congestion toll is only in parts user financing, as the toll revenue does not balance the infrastructure expenses, extra revenue from the lump-sum tax have to be added. Nevertheless, the user financing characteristics of the policy are dominant enough to lead to large-scale displacements concerning the mode choice and the transport sector. As the policy solely affects commuting traffic changes can only be seen on these trips. Yet, the impact is so strong that it induces the most drastic environmental improvements.

Parking fees, in contrast, completely balance the additional expenses for parking infrastructure and therefore the policy is totally user financed. Furthermore, this policy affects commuting and shopping and therefore, does not favor some trip purposes. Therefore, the modal share changes occur for commuting trips and the increasing travel speed is only due to higher capacities on the road.

This research leaves room for further investigation. Parking at home as well as privately financed off-street parking have been fully disregarded. Furthermore, scenarios with a mixture of on- and off-street parking would be interesting to be evaluated, too.

²¹ Concerning distortions in the labor market, the specific modeling of labor supply may be relevant (HIRTE and TSCHARAKTSCHIEW, 2015). This can be considered in further research. However, the case considered here imposes the least negative effect because substitution effects through a change in the value of time are not implemented. If one would endogenize workdays, the value of time would depend on congestion tolls and parking fees. In that case, congestion tolling or parking fees would reduce the VOT and, thus, causes a further decline in labor supply. In that case, the welfare would decline even more (HIRTE and TSCHARAKTSCHIEW 2015).

Additionally, this model only considers commuting and shopping trips while leisure trips and work-related shopping travel stay completely unobserved.

Literature

- ADAC. (2016). Spritverbrauch. Retrieved June 20, 2017, from <https://www.adac.de/infotestrat/adac-im-einsatz/motorwelt/Spritverbrauch.aspx>
- Anas, A., and Rhee, H.-J. (2006). Curbing excess sprawl with congestion tolls and urban boundaries. *Regional Science and Urban Economics*, 36(4), 510–541.
- Anas, A., and Xu, R. (1999). Congestion, Land Use, and Job Dispersion: A General Equilibrium Model. *Journal of Urban Economics*, 45(3), 451–473.
- Anderson, S. P., and de Palma, A. (2004). The economics of pricing parking. *Journal of Urban Economics*, 55(1), 1–20.
- Arnott, R. (2006). Spatial competition between parking garages and downtown parking policy. *Transport Policy*, 13(6), 458–469.
- Arnott, R., and Inci, E. (2006). An integrated model of downtown parking and traffic congestion. *Journal of Urban Economics*, 60(3), 418–442.
- Arnott, R., Inci, E., and Rowse, J. (2015). Downtown curbside parking capacity. *Journal of Urban Economics*, 86, 83–97.
- Arnott, R., and Rowse, J. (2009). Downtown parking in auto city. *Regional Science and Urban Economics*, 39(1), 1–14.
- Brueckner, J. K., and Franco, S. F. (2017). Parking and urban form. *Journal of Economic Geography*, 17(1), 95–127.
- Bundesministerium für Verkehr und Digitale Infrastruktur. (2015). *Methodenhandbuch zum Bundesverkehrswegeplan 2030*.
- Calthrop, E., and Proost, S. (2006). Regulating on-street parking. *Regional Science and Urban Economics*, 36(1), 29–48.
- Calthrop, E., Proost, S., and van Dender, K. (2000). Parking Policies and Road Pricing. *Urban Studies*, 37(1), 63–76.
- Delucchi, M. A. (1997). The Annualized Social Cost of Motor-Vehicle Use in the U.S., 1990-1991: Summary of Theory, Data, Methods, and Results. *University of California Transportation Center*.
- Destatis. (2014a). Durchschnittlich tatsächlich geleistete Arbeitsstunden. Retrieved June 20, 2017, from

<https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/GesellschaftStaat/EinkommenKonsumLebensbedingungen/EinkommenEinnahmenAusgaben/EinkommenEinnahmenAusgaben.html>

- Destatis. (2014b). Pressemitteilungen - 58 % aller Paare mit Kindern leben in den eigenen vier Wänden - Statistisches Bundesamt (Destatis). Retrieved June 20, 2017, from https://www.destatis.de/DE/PresseService/Presse/Pressemitteilungen/2014/06/PD14_190_31.html
- Destatis. (2015). Kreisfreie Städte und Landkreise nach Fläche, Bevölkerung und Bevölkerungsdichte am 31.12.2015. Retrieved June 20, 2017, from <https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/LaenderRegionen/Regionales/Gemeindeverzeichnis/Administrativ/Aktuell/04Kreise.html>
- Destatis. (2016a). 62 % des Bruttoeinkommens stammen aus Erwerbstätigkeit - Statistisches Bundesamt (Destatis). Retrieved June 23, 2017, from https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/GesellschaftStaat/EinkommenKonsumLebensbedingungen/EinkommenEinnahmenAusgaben/Aktuell_Bruttoeinkommen.html
- Destatis. (2016b). Auszug aus dem Datenreport 2016 - Kapitel 11. Retrieved from https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Datenreport/Downloads/Datenreport2016Kap11.pdf?__blob=publicationFile
- Destatis. (2016c). Flächennutzung. Retrieved June 20, 2017, from <https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/Wirtschaftsbereiche/LandForstwirtschaftFischerei/Flaechennutzung/Tabellen/SiedlungsVerkehrsflaecheNutzung.html>
- Destatis. (2016d). Wirtschaftsbereiche - Flächennutzung - Flächennutzung - Statistisches Bundesamt (Destatis). Retrieved June 20, 2017, from <https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/Wirtschaftsbereiche/LandForstwirtschaftFischerei/Flaechennutzung/Tabellen/SiedlungsVerkehrsflaecheNutzung.html>
- Eliasson, J., Hultkrantz, L., Nerhagen, L., and Rosqvist, L. S. (2009). The Stockholm congestion? charging trial 2006: Overview of effects. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 43(3), 240–250.
- European Commission. (2017). Urban mobility - European Commission. Retrieved June 20, 2017, from https://ec.europa.eu/transport/themes/urban/urban_mobility_en
- Franco, S.F. (2016). Downtown parking supply, work-trip mode choice and urban spatial structure. *Transportation Research B* 101, 107-122.
- Gallo, M., D'Acerno, L., and Montella, B. (2011). A multilayer model to simulate cruising for parking in urban areas. *Transport Policy*, 18(5), 735–744.
- Glazer, A., and Niskanen, E. (1992). Parking fees and congestion. *Regional Science and Urban Economics*, 22(1), 123–132.
- Hindriks, J., and Myles, G. D. (2006). *Intermediate Public Economics*. MIT Press

- Hirte, G., and Tscharaktschiew, S. (2015). Does labor supply modelling affect findings of transport policy analysis? Dresden Discussion Paper Series in Economics 1/15, TU Dresden.
- Immowelt. (2017). Mietspiegel Deutschland 2017 – Mietpreise für Wohnungen. Retrieved June 20, 2017, from <https://www.immowelt.de/immobilienpreise/deutschland/mietspiegel>
- Inci, E. (2015). A review of the economics of parking. *Economics of Transportation*, 4(1–2), 50–63.
- Inci, E., and Lindsey, R. (2015). Garage and curbside parking competition with search congestion. *Regional Science and Urban Economics*, 54, 49–59.
- Inci, E., Ommeren, J. van, and Kobus, M. (2017). The external cruising costs of parking. *Journal of Economic Geography*, 1–23.
- Infas, and DLR. (2010). *Mobilität in Deutschland 2008*. Retrieved from http://www.mobilitaet-in-deutschland.de/pdf/MiD2008_Tabellenband.pdf
- Kleinewefers, H. (2008). *Einführung in die Wohlfahrtsökonomie: Theorie - Anwendung - Kritik*. Kohlhammer.
- Korda, M. (1999). *Städtebau*. (M. Korda, Ed.) (4th ed.). Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag.
- Lehe, Lewis (2017). Feedback and the use of land for parking. *The Journal of Transport and Land Use* 10, 463-476.
- Lehmann, J. (2007). *Volkswirtschaftliche Modelle zur Internalisierung externer Effekte - Jonas Lehmann - Google Books*. Retrieved from https://books.google.de/books/about/Volkswirtschaftliche_Modelle_zur_Interna.html?id=LrS2BMu70I8C&printsec=frontcover&source=kp_read_button&redir_esc=y#v=onepage&qandf=false
- Mankiw, N. G., and Taylor, M. P. (2012). *Grundzüge der Volkswirtschaftslehre*. Fachverlag für Wirtschafts- und Steuerrecht Schäffer Stuttgart.
- Martens, K., Benenson, I., and Levy, N. (2010). Geospatial Analysis and Modelling of Urban Structure and Dynamics, 99.
- Nitzsche, E. (2015). Analyse von verkehrs- und klimabezogenen Politikmaßnahmen in einer Stadtökonomie. Retrieved from http://www.qucosa.de/recherche/frontdoor/?tx_slubopus4frontend%5Bid%5D=urn:nbn:de:bsz:14-qucosa-202866.
- Ostrom, E. (1999). *Die Verfassung der Allmende: Jenseits von Staat und Markt*. Mohr Siebeck.
- Oum, T. H., Waters, W. G., and Yong, J.-S. (1992). Concepts of price elasticities of

- transport demand and recent empirical estimates: An interpretative survey. *Journal of Transport Economics and Policy*, 139–154.
- Pierce, G., Willson, H., and Shoup, D. (2015). Optimizing the use of public garages: Pricing parking by demand. *Transport Policy*, 44, 89–95.
- Shoup, D. (2011). *The High Cost of Free Parking*. Chicago: Planners Press.
- Shoup, D. C. (2006). Cruising for parking. *Transport Policy*, 13(6), 479–486.
- Small, K. A., and Verhoef, E. T. (2007). *The economics of urban transportation*. Routledge.
- Stadt Nürnberg. (2014). Wirtschaftsbericht 2014 Stadt Nürnberg Daten Konzepte Initiativen. Retrieved June 20, 2017, from https://www.nuernberg.de/imperia/md/wirtschaft/dokumente/wiv/wirtschaftsbericht_2014_stadt_nuernberg_fuer_web.pdf
- Statista. (2016). Durchschnittliche Anzahl der Haushaltsmitglieder in Deutschland nach Bundesländern 2015 | Statistik. Retrieved June 20, 2017, from <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/200374/umfrage/anzahl-der-haushalte-in-deutschland-im-jahr-2010-nach-bundeslaendern/>
- Statista. (2017a). Benzinpreis in Deutschland bis 2017 | Statista. Retrieved June 20, 2017, from <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/776/umfrage/durchschnittspreis-fuer-superbenzin-seit-dem-jahr-1972/>
- Statista. (2017b). Parkgebühren in deutschen Großstädten | Statistik. Retrieved June 20, 2017, from <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/254465/umfrage/preise-fuer-parkplaetze-in-deutschen-grossstaedten/>
- Statistisches Bundesamt. (2013). Preise Verbraucherpreisindex für Deutschland Wägungsschema für das Basisjahr 2010 Verbraucherpreisindex für Deutschland - Wägungsschema. Retrieved from www.destatis.de/kontakt/
- Thompson, R. G., and Richardson, A. J. (1998). A Parking Search Model. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 32(3), 159–170.
- Transport for London. (2008). Demand Elasticities for Car Trips to Central London. Retrieved from <http://content.tfl.gov.uk/demand-elasticities-for-car-trips-to-central-london.pdf>
- Tscharaktschiew, S., and Hirte, G. (2010). The drawbacks and opportunities of carbon charges in metropolitan areas - A spatial general equilibrium approach. *Ecological Economics*, 70(2), 339–357.
- Tscharaktschiew, S., and Hirte, G. (2012). Should subsidies to urban passenger transport be increased? A spatial CGE analysis for a German metropolitan area. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 46(2), 285–309.

- van Ommeren, J. N., Wentink, D., and Rietveld, P. (2012). Empirical evidence on cruising for parking. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 46(1), 123–130.
- van Ommeren, J. N., Wentink, D. (2012). The (hidden) cost of employer parking policies. *International Economic Review*, 53(3), 965–978.
- Varian, H. R. (2011). *Grundzüge der Mikroökonomik*. Oldenbourg, R.
- Verhoef, E., Nijkamp, P., and Rietveld, P. (1995). The economics of regulatory parking policies: The (IM)possibilities of parking policies in traffic regulation. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 29(2), 141–156.