

89. Jahrgang – Sonderausgabe (Heft 3) – 2018

ZEITSCHRIFT FÜR VERKEHRSWISSENSCHAFT

INHALTSVERZEICHNIS

Vorwort zu den drei in 2018 erscheinenden (Sonder-)Heften der ZfV	Seite 151
Nutzenmessung im Verkehr: Eine Nachlese Von Johannes Bröcker	Seite 154
Airline Market Power and Airport Regulation Von Christos Evangelinos und Zsolt Szilvay	Seite 171
Simulationsbasierte Analyse der Wirkungen von Flotten autonomer Fahrzeuge auf städtischen Verkehr Von Kai Nagel, Joschka Bischoff, Gregor Leich und Michał Maciejewski	Seite 202

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))
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 Verkehrsökonominnen 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)

Nutzenmessung im Verkehr: Eine Nachlese

VON JOHANNES BRÖCKER

1 Einführung

Im Bewertungsverfahren der BVWP hat man sich vor einigen Jahren entschlossen, in einigen Bewertungsansätzen von dem seit den 70er Jahren praktizierten Konzept der Ressourcenkonsum-Rechnung (RK) abzurücken und stattdessen zum Konsumenten-Surplus (CS) überzugehen, einem vom französischen Ingenieur-Ökonom Dupuit bereits Mitte des 19. Jahrhunderts vorgeschlagenen und heute weltweit und schon seit langem angewandten und anerkannten Verfahren. Um die Berechnung zu vereinfachen, wird CS approximiert, indem die Nachfrage nach Verkehrsleistung im relevanten Preisbereich als linear unterstellt wird. Das führt auf die Ein-Halb-Regel (RoH), eine gängige und gute Näherung an CS. Dass dieser Übergang nicht generell und konsequent vollzogen wurde, sondern dass die Bewertung nun einer Mischung aus RK und CS folgt, trägt nicht gerade zur Transparenz bei und ist schwer nachvollziehbar. Im Jahrgang 2015 dieser Zeitschrift wurde die Verfahrensrevision teils zustimmend, teils kritisch diskutiert. Die Diskussion könnte, so hoffe ich, an Klarheit gewinnen, wenn sie in den Zusammenhang der mikroökonomisch fundierten Wohlfahrtsökonomik eingeordnet wird. Dem sollen die folgenden Bemerkungen dienen; sie sollen daher eine Nachlese zur genannten Diskussion sein.

Nagel, Kickhöfer und Winter (2015), im Folgenden kurz NKW, äußern sich zustimmend zur Verfahrensrevision, indem sie einen sehr speziellen Fall erklären, nämlich den Übergang von einem Verkehrsmittel zu einem alternativen Verkehrsmittel, das in der Ausgangssituation ungenutzt ist. Aus dem Vergleich zwischen CS und RK leiten sie einen impliziten Benefit ab, der zu dem nach RK zu berechnenden Benefit hinzuzuzählen ist, um auf den Benefit nach CS zu kommen. Das ist freilich nur eine höfliche Art zu sagen: „Werft RK auf den Müll und verwendet stattdessen CS!“ Kommt man nämlich mit einem ungeeigneten Verfahren auf das Resultat A , mit einem geeigneten dagegen auf das Resultat B , kann man natürlich dieses harsche Verdikt durch die freundliche Empfehlung ersetzen, man solle A um einen Zuschlag der Höhe $B - A$ korrigieren, sodass $B = A + (B - A)$ herauskommt. An der Sache ändert das nichts.

Anschrift des Verfassers:

Prof. Dr. Johannes Bröcker
Institut für Regionalforschung, Umwelt- und Ressourcenökonomik
Wilhelm-Seelig-Platz 1
24115 Kiel
E-Mail: broecker@economics.uni-kiel.de

Die Darstellung von NKW deutet allerdings auf Kommunikationsbarrieren zwischen Ingenieuren und Ökonomen hin. Zum einen erscheint es vielleicht anschaulich, sich auf den genannten speziellen Fall zu beschränken, aber für das Verständnis des allgemeinen Konzeptes und seiner generellen Anwendbarkeit ist es eher hinderlich. Zum anderen – und das ist viel wichtiger – behindern die Autoren durch die Erfindung oder Neudefinition von Begriffen für Konzepte, die in der Ökonomik seit langem in Gebrauch sind, sowohl das Verständnis des Problems als auch den Rückgriff auf die einschlägige Literatur. In den Referenzen taucht sie deswegen auch nicht auf.

Es mag, weil es anschaulich ist, noch angehen, vom Reengineering des Nutzens zu sprechen. Aber man sollte doch erwähnen, dass es dabei um das in der Ökonomik wohlbekanntes Integrabilitätsproblem geht. Es heißt so, weil die Rekonstruktion (das Reengineering) der Präferenzen eines Konsumenten¹ aus seiner Nachfrageentscheidung auf die Integration einer Differentialgleichung hinausläuft. Beginnend mit Antonelli (1886) ist dieses Problem Gegenstand der ökonomischen Theorie, und seit mindestens einem halben Jahrhundert ist es gelöst. Es ist nicht nur im Prinzip gelöst, sondern praktisch in dem Sinne, dass man weiß, wie die Integration auch für große Nachfragesysteme numerisch vollzogen werden kann und welche Fehler zu erwarten sind, wenn man Näherungsverfahren benutzt.

Was dazu in mikroökonomischen Lehrbüchern steht, hielt man bei der Konzeption der Bewertungsmethodik für schraffierte Flächen in Diagrammen idealisierter Märkte, wie Rothengatter (2015) es ausdrückt, und damit offenbar für praxisfern. Das ist wohl weniger den Lesern als den Schreibern der Lehrbücher anzulasten, die es versäumt haben, den Leser von der Praxistauglichkeit der Konzepte zu überzeugen, anstatt ihn in der Axiomatik der Rationalentscheidungstheorie verloren gehen zu lassen. Das Folgende soll zeigen, dass es um Messkonzepte geht, die nicht nur operational, sondern auch intuitiv sind und ohne Rückgriff auf den für den Praktiker wenig erquicklichen Formalismus zu Präferenzordnungen und Nutzenmaximierung verstanden werden können. Man muss dabei weder an idealisierte Märkte glauben noch sich unrealistischen Annahmen fügen wie z.B. der Annahme konvexer Präferenzen. Weder ist diese bei diskreten Entscheidungen, wie sie in der Verkehrsnachfrage die Regel sind, erfüllt, noch braucht man sie, um die Messkonzepte herzuleiten. Was man braucht, ist ein ebenso intuitives wie nützliches Konzept, die sogenannte Ausgabenfunktion und ihre Ableitung, zu denen die Standardausbildung in VWL meist leider nicht durchdringt.

Die wirklich irreführende Neudefinition eines etablierten Begriffs in NKW ist der Producer-Surplus (PS). Jeder kann alles nennen, wie er will, aber einen derart etablierten Begriff wie den PS für etwas anderes zu verwenden als für das, wofür er in der Literatur geprägt wurde und seit jeher verwendet wird, geht zu weit. Analog zum CS gibt der PS an, wie sich der Gewinn einer mengenanpassenden, das heißt mit keinerlei Monopolmacht ausgestatteten Firma verändert, wenn die Preise sich ändern. Steigt z.B. der Outputpreis von einem Benchmarkpreis zu einem höheren Alternativpreis bei sonst unveränderten

¹ Männliche Formen sollen für alle Geschlechter stehen.

Preisen, dann ist der Anstieg des PS die von den beiden Preisen begrenzte Fläche links von der Angebotskurve der Firma. Der Outputpreis ist hier *gleich* den Grenzkosten, nicht darüber. Wenn, was wir wohl so verstehen sollen, mit Ressourcenkonsum bei NKW die Grenzkosten der Produktion gemeint sind, ist PS bei diesen Autoren der monopolistische Preisaufschlag. Wenn es einen solchen gibt, muss der CS tatsächlich um diesen Aufschlag korrigiert werden, wie NKW es korrekterweise tun, aber nicht unter einer der etablierten Terminologie widersprechenden Bezeichnung. Allerdings ist die Korrektur unvollständig; denn monopolistische (und andere) Preisaufschläge gibt es nicht nur in der Produktion der gegeneinander substituierten Verkehrsleistungen, sondern überall in der Ökonomie. Ändern sich die Mengen auch im Rest der Ökonomie, muss dort dieselbe Korrektur vorgenommen werden. Das ist das Wider-Effects-Problem, auf das wir im Abschnitt 4.2 zurückkommen.

Kritisch äußert sich im selben Heft dieser Zeitschrift Rothengatter (2015) zur Revision des Bewertungsverfahrens, zwar nicht zum Übergang zum CS, aber zurecht dazu, mit der Abschaffung von RK auch die Bewertung von weiteren Effekten sowie von Verteilungswirkungen über Bord geworfen zu haben. CS quantifiziert die in Geld gemessene Nutzenänderung, die einem Konsumenten aus Preisänderungen der konsumierten Leistungen erwächst. Summiert man CS über alle Konsumenten, wird daraus ein gesamtgesellschaftliches Benefitmaß nur unter zwei essentiellen und in der Praxis untragbaren Bedingungen: Erstens, jeder Euro zählt gleich, egal wer ihn verliert oder gewinnt, und zweitens, alle Preise stimmen mit den sozialen² Grenzkosten überein. Wir diskutieren in Abschnitt 4.2, inwiefern diese Bedingungen verletzt sind und wie man damit umgeht.

Im Folgenden erklären wir zuerst, was es mit CS auf sich hat. CS ist eine Approximation. Deswegen zeigen wir, was mit CS approximiert werden soll und dann, ob die Approximation für praktische Zwecke gut genug ist. Dabei bedienen wir uns neoklassischer Methodik, nämlich des Rationalitätspostulats und der Idee des Marktgleichgewichts, aber ohne kritiklos der von Rothengatter angeprangerten neoklassischen Glaubenslehre zu verfallen. Dann geht es darum, wie man von CS zur sozialen Wohlfahrt kommt (Abschnitt 4). Dies ist der Punkt, an dem man auf das falsche Gleis gerät, wenn man der Neoklassik nicht nur als methodisches Prinzip, sondern als gesellschaftspolitisches Dogma anhängt, welches übrigens mit dem methodischen Prinzip der Neoklassik unverträglich ist. Vor dem Hintergrund des Dargelegten kommen wir dann noch einmal auf RK zurück und zeigen, was dabei falsch läuft (Abschnitt 5). Vorauszuschicken ist ein Abschnitt über Begriffe und Notation.

2 Notation

Ein Konsument, in unserem Falle ein Verkehrsteilnehmer, erfährt Nutzenzuwächse oder -verluste durch Änderungen seiner monetären Ausgaben pro erbrachte Leistungseinheit

² Unter „sozial“ verstehen wir nicht wie im üblichen Sprachgebrauch etwas, das Benachteiligte begünstigt, sondern sozial steht für den sperrigen Begriff „gesamtgesellschaftlich“.

sowie Änderungen des Zeitaufwandes und von allerlei Annehmlichkeiten und Ärgernissen. Wir fassen all das in einer einzigen monetären Größe zusammen, den in Geldeinheiten gemessenen Preis p_i für das Gut i , von welchem die Menge x_i konsumiert wird. Da es viele Güter gibt, fassen wir die Preise und Mengen jeweils in einer Liste zusammen, den Preisvektor $p = (p_1, \dots, p_n)$ und den Mengenvektor $x = (x_1, \dots, x_n)$. Für den Wert der Konsumausgaben schreiben wir der Kürze halber $p \cdot x = p_1 x_1 + \dots + p_n x_n$; das ist das innere Produkt der Vektoren p und x . Im Folgenden vergleichen wir eine als Benchmark bezeichnete Ausgangssituation mit einem alternativen Planfall, kurz als Alternative bezeichnet. Benchmarkpreise und -mengen heißen p^b und x^b , Alternativpreise und -mengen heißen p^a und x^a . Wenn wir nur ein einzelnes Gut i aus der langen Liste meinen, heißen seine Preise und Mengen p_i und x_i , jeweils mit dem Superskript b oder a versehen.

Die wichtigste Preiskomponente außer den Out-of-Pocket-Costs (OPC) ist der spezifische Zeitaufwand, das heißt der Zeitaufwand pro konsumierte Mengeneinheit. Wie üblich wird er durch Multiplikation mit einem geschätzten Value of Time (VoT) in einen Geldbetrag übersetzt. Im Allgemeinen ist der VoT eine endogene Größe, die auf Änderungen von Preiskomponenten reagiert. Der Zeitaufwand kann selbst neben den Konsummengen auch ein Argument der Nutzenfunktion des Konsumenten sein, was wir hier der Einfachheit halber außer Acht lassen, und bei der Nachfrageentscheidung ist außer der monetären Budgetrestriktion auch eine Zeitrestriktion zu beachten. Um nicht zu viele Fässer gleichzeitig zu öffnen, wollen wir aber Gary Becker (1965) folgen, dem Vater der Theorie der Zeitallokation, der darauf hingewiesen hat, dass wir die Zeitrestriktion in die Budgetrestriktion integrieren können, wenn Zeit auf dem Markt durch Reduktion der Arbeitszeit gekauft bzw. durch Mehrarbeit verkauft werden kann. Damit ist der VoT der Nettolohn, das Budget y ist der Nettolohn multipliziert mit der verfügbaren Gesamtzeit plus sonstiges (d.h. nicht von der Arbeitszeit abhängiges) Einkommen, und der Preis ist OPC plus spezifischer Zeitaufwand, bewertet mit dem Nettolohn. Andere Annehmlichkeiten oder Unannehmlichkeiten vernachlässigen wir hier, ohne behaupten zu wollen, sie seien bedeutungslos. Preise sind – das ist zu betonen und wird weiter unten ausgeführt – im Allgemeinen nicht gleich den sozialen Grenzkosten, weil es Preiskomponenten gibt, die keine sozialen Grenzkosten sind, und soziale Grenzkosten, die keine Preiskomponenten sind.

3 Konsumentensurplus und Hicks-Variationen

Wir betrachten einen einzelnen Konsumenten, der seinen Konsumvektor x derart wählt, dass er mit seinem verfügbaren Budget y den größtmöglichen Nutzen erzielt. Das Resultat ist die Marktnachfrage x . Sie hängt natürlich von den Preisen und dem Budget ab. Wie ändert sich sein Nutzen, und zwar gemessen in Geldeinheiten, wenn sein Budget unverändert bei dem Betrag y^0 bleibt, während Preise sich vom Benchmark p^b zur Alternative p^a verändern? Die Nutzenveränderung selbst ist kein geeignetes Maß; denn vom Nutzen wissen wir nur: mehr ist besser. Aber wir können dem Nutzenzuwachs keinen metrischen, geschweige einen geldmetrischen Betrag zuordnen. Wir können jedoch angeben, um welchen Betrag sich das Budget unterscheiden müsste, wenn der Konsument bei einem irgendwie sinnvoll gewählten Vektor von Bewertungspreisen den in der

Alternative erreichten Nutzen u^a anstelle des Benchmarknutzens u^b erzielen will. Der Betrag ist positiv genau dann, wenn $u^a > u^b$, d.h. wenn der Konsument die Alternative dem Benchmark vorzieht. Um wie viel die Alternative besser ist, wird nun durch einen Geldbetrag angezeigt. Dieser Geldbetrag heißt Hicks-Variation, formal definiert als (siehe z.B. Mas-Colell, Whinston, und Green 1995, Abschn. 3.I)

$$V(\tilde{p}) = e(\tilde{p}, u^a) - e(\tilde{p}, u^b). \quad (1)$$

Hier ist $e(p, u)$ die angekündigte Ausgabenfunktion. Sie gibt den kleinstmöglichen Betrag eines Budgets an, der dem Konsumenten gerade eben erlaubt, bei Preisen p den Nutzen u zu erzielen.

Die Theorie sagt nichts darüber, wie wir \tilde{p} wählen sollen. Naheliegend ist, $\tilde{p} = p^a$ oder $\tilde{p} = p^b$ zu wählen. Das führt auf die Kompensatorische Variation CV und die Äquivalente Variation EV. Jene ist der Budgetabzug, der einen bei Alternativpreisen p^a auf den Benchmarknutzen zurückwirft.³ Diese ist die Zulage zum Budget, die man braucht, um bei Benchmarkpreisen auf den Alternativnutzen zu kommen.

Wegen $y^0 = e(p^a, u^a) = e(p^b, u^b)$ gilt

$$\begin{aligned} \text{CV} &= V(p^a) = e(p^a, u^a) - e(p^a, u^b) \\ &= e(p^b, u^b) - e(p^a, u^b) \end{aligned} \quad (2)$$

und

$$\begin{aligned} \text{EV} &= V(p^b) = e(p^b, u^a) - e(p^b, u^b) \\ &= e(p^b, u^a) - e(p^a, u^a). \end{aligned} \quad (3)$$

Dies liefert eine andere Interpretation der beiden Konzepte. Beide messen die Ausgabeneinsparung, die man beim Übergang der Preise vom Benchmark zur Alternative erzielt, wenn man den Nutzen konstant hält, bei EV auf dem Alternativ- und bei CV auf dem Benchmarkniveau.

Was soll uns all das helfen, wo wir doch diese schöne Ausgabenfunktion, die dazu noch nicht nur von einem, sondern von allen Preisen abhängt sowie vom unsichtbaren Nutzen, nicht kennen? Nun, wir wollen ja nicht die ganze Funktion kennen, sondern nur die Differenz der Funktionswerte, wenn einige Preise sich ändern, während die anderen alle konstant bleiben. Dafür gibt es ein praxistaugliches Verfahren. Es erschließt sich aus der als Hotelling-Theorem bezeichneten partiellen Ableitung von e nach einem Preis,

$$\frac{\partial e(p, u)}{\partial p_i} = x_i[p, e(p, u)]. \quad (4)$$

³ Die verbalen Erläuterungen formulieren wir immer für den Fall $u^a > u^b$. Die formalen Definitionen gelten indes allgemein. EV und CV haben beide dasselbe Vorzeichen wie $u^a - u^b$.

Die Nachfrage auf der rechten Seite der Gleichung ist die sogenannte einkommens-kompensierte oder Hicks-Nachfrage für das Nutzenniveau u . Sie gibt an, wie die Nachfrage auf die Preise reagiert, wenn man mit der Preisänderung zugleich das Budget derart anpasst, dass der Nutzen unverändert auf dem Niveau u verharrt (Mas-Colell, Whinston, und Green 1995, 3.G).

Intuitiv gesprochen ist das Hotelling-Theorem fast trivial: Wenn der Preis für Gut i ceteris paribus um den marginalen Betrag dp_i ansteigt, um wie viel müsste dann das zum Erreichen des unveränderten Nutzens erforderliche Budget ansteigen? Antwort: Um den Betrag $dp_i \cdot x_i[p, e(p, u)]$. Auf den ersten Blick ist dabei vergessen, dass die Mengen ja auch reagieren, dass also noch $p \cdot dx$ hinzuaddiert werden müsste. Aber da x ja ausgaben-minimal gewählt ist, ist $p \cdot dx$ gerade Null (Envelope-Theorem).

Beginnen wir mit dem einfachen Fall, dass nur einer der Preise sich ändert, p_1 . Er falle von p_1^b auf p_1^a , so dass der Konsument, sofern nicht $x_1 = 0$ in beiden Welten ist, gewinnt. Für CV suchen wir nach der Funktion $e(p, u^b)$, um die Differenz in Gl. (2) zu berechnen. Da nur p_1 variiert, haben wir es mit einer Funktion nur von p_1 zu tun. Nennen wir sie der Übersicht halber $f(p_1)$. Einen Funktionswert kennen wir schon, nämlich

$$f(p_1^b) = y^0. \quad (5)$$

Nach Gl. (4) muss ferner für die Ableitung gelten

$$f'(p_1) = x_1[p_1, \dots, f(p_1)]. \quad (6)$$

Die Punkte stehen für die unveränderten Preise. Gl. (6) ist eine gewöhnliche Differentialgleichung mit Randbedingung (5). In speziellen Fällen kennt man eine Lösung in geschlossener Form, aber wenn nicht, ist eine numerische Lösung mit moderner Standardsoftware ein Kinderspiel, sofern man die rechte Seite in Gl. (6) kennt. Die Lösung liefert $f(p_1)$ und damit

$$CV = f(p_1^b) - f(p_1^a) = y^0 - f(p_1^a).$$

Für EV verfährt man entsprechend. Ein Blick auf die Definitionen von EV und CV zeigt, dass EV für die Veränderung der Preise von p^b nach p^a dasselbe ist wie $-CV$ für eine Veränderung von p^a nach p^b . Man braucht also in der Operation nur die Superskripte a und b auszutauschen und das Vorzeichen umzukehren, um EV zu erhalten.

Aber kennt man die rechte Seite der Gl. (6)? Wenn nicht, ersetzt man näherungsweise f in Gl. (6) durch y^0 . Man vernachlässigt also die beim Übergang vom Benchmark zur Alternative nach Gl. (2) erforderliche Einkommensanpassung. Das liefert als Lösung

$$f(p_1^a) \approx y^0 + \int_{p_1^b}^{p_1^a} x_1(p_1, \dots, y^0) dp_1, \quad (7)$$

und demnach die Näherung

$$CV \approx CS = \int_{p_1^a}^{p_1^b} x_1(p_1, \dots, y^0) dp_1. \quad (8)$$

Für eine Preissenkung, also für $p_1^b > p_1^a$ ist CS die von den beiden Preisen begrenzte Fläche links von der Markt-Nachfragekurve, die Fläche A + B + C in Abbildung 1. CV ist die Fläche A + B links von der zu u^b gehörenden Hicks-Nachfrage, EV ist die Fläche A + B + C + D links von der zu u^a gehörenden Hicks-Nachfrage. In der Abbildung wird unterstellt, dass das Gut normal ist, d.h. dass der Einkommenseffekt positiv ist.

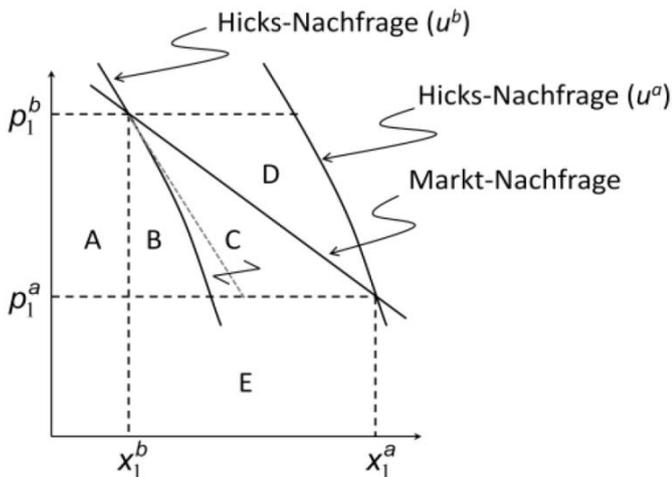


Abbildung 1. Benefitmaße für eine Preissenkung vom Benchmark-Preis p^b zum Alternativpreis p^a . $CV = A + B$, $CS = A + B + C$, $EV = A + B + C + D$, $RK = A - E$ (siehe unten).

Ist die Nachfrage linear, dann ist

$$CS = (p_1^b - p_1^a)(x_1^b + x_1^a) / 2.$$

Das ist die RoH. Ist sie konkav (bzw. konvex), wird CS mit RoH unterschätzt (bzw. überschätzt).

Der Fehler ist typischerweise unbedeutend.⁴ Zur Illustration betrachte man die Wahl zwischen zwei Verkehrsmitteln, die einem Logit-Modell folge. Im Benchmark seien beide Preise und Mengen gleich, und die Substitutionselastizität (relative Änderung der Mengenrelation durch relative Änderung der Preisrelation) sei eins. Im Übergang zur Alternative halbiere sich einer der beiden Preise. Das generiert einen Benefit nach RoH in Höhe von 28,06% und nach CS in Höhe von 28,09% der Benchmark-Ausgaben für beide Verkehrsmittel zusammengenommen, ein verschwindender Unterschied. Bei (unrealistischer) perfekter Substitutionalität wäre der Unterschied allerdings größer: Nach RoH ergäbe sich 37,5%, nach CS jedoch 50%, wie es sein soll, weil der oder die Nutzer gänzlich auf das billigere Verkehrsmittel wechseln würden, das jetzt für die Hälfte des Preises zu haben ist. Hier tritt der maximal denkbare Fehler auf, weil die Nachfrage nach dem Verkehrsmittel, das billiger wird, sozusagen maximal konkav ist, da es bei einem minimalen Preisvorteil ausschließlich gewählt wird. Ohne Substitution würden sich die Ausgaben natürlich nur um 25% (die Hälfte der Hälfte) verringern. Das ist weniger als im substitutionalen Fall, da der Nutzenzuwachs durch die Mengenanpassung wegfällt.

Die korrekte Berechnung der Hicks-Variationen nach Gl. (6) lässt sich auf die Veränderung vieler Preise verallgemeinern. Es ist naheliegend und möglich, die Preise nacheinander abzarbeiten. Wenn die Nachfrage Resultat einer Rationalentscheidung ist, was wir hier ja durchgehend unterstellen, ist das Resultat von der Reihenfolge, mit der man die Preise abarbeitet, unabhängig. Das folgt einfach daraus, dass jeder Schritt das korrekte Resultat für die Veränderung des jeweiligen Preises liefert. Eleganter ist es, den Preisraum z.B. diagonal zu durchlaufen. Sei $\pi(\tau) = (1-\tau)p^b + \tau p^a$, so dass $\pi(0) = p^b$ und $\pi(1) = p^a$, dann definieren wir $f(\tau) = e[\pi(\tau), u^b]$, so dass

$$f(0) = y^0 \quad (9)$$

und

$$f'(\tau) = x[\pi(\tau), f(\tau)] \cdot (p^a - p^b). \quad (10)$$

⁴ Der Absolutbetrag des relativen Fehlers ist das Verhältnis der Flächen $\frac{B+C}{A+B+C} = \frac{\varepsilon \hat{p}}{2 + \varepsilon \hat{p}}$ in Abbildung 1.

Darin bezeichnen ε die Nachfrageelastizität und \hat{p} die relative Preisänderung, jeweils in Absolutbeträgen. Das ist derselbe Fehler, den man macht, wenn man als Benefitmaß einfach die Menge mit der Preissenkung multipliziert und die Mengenänderung ignoriert. Es dürfte selten eine Maßnahme geben, bei der danach der maximale relative Fehler 10% übersteigt. Der tatsächliche relative Fehler verschwindet im Rauschen der Schätzungen.

⁵ Man beachte, dass hier Vektoren multipliziert werden; das Symbol „ \cdot “ steht wie in Abschnitt 2 für das innere Produkt.

Dies ist wieder eine gewöhnliche Differentialgleichung mit Randbedingung (9). Ihre Lösung liefert $f(\tau)$ und damit $CV = y^0 - f(1)$. Für EV verfährt man wieder entsprechend.

Für CS verallgemeinert man Gl. (8) zum Pfadintegral

$$CV \approx CS = \int_1^0 x[\pi(\tau), y^0] \cdot (p^a - p^b) d\tau. \quad (11)$$

Dieses Integral ist aber im Allgemeinen davon abhängig, welchen Pfad man wählt, es sei denn, der Einkommenseffekt ist wirklich Null.

Die Näherung CS anstelle von CV (oder EV) zu verwenden, wird üblicherweise mit der Behauptung gerechtfertigt, man könne die sogenannte Hicks-Nachfrage, d.h. die rechte Seite von Gl. (6) bzw. (10), nicht beobachten. Dieser Einwand ist irrig. Man kann sie ebenso gut oder ebenso wenig beobachten, wie die Markt-Nachfrage auf der rechten Seite von Gl. (8) bzw. (11). Die Marktnachfrage gibt ja an, wie die Menge reagiert, wenn der Preis sich ändert, das Einkommen (und die anderen Preise) aber konstant bleiben. Das kann man in keiner Statistik nachschauen, sondern nur aus der Schätzung einer Nachfragefunktion entnehmen. Selbst, wenn man sich für die RoH mit x_1^b und x_1^a zufriedengibt, kann man diese aus keiner Statistik entnehmen, weil mindestens x_1^a hypothetisch ist. x_1^a sagt, welche Menge nachgefragt *würde*, wenn man den Preis änderte, ceteris paribus. Selbst ex post steht das nicht in den Daten, da das Übrige nicht gleich bleibt. Die hypothetische Mengenänderung muss mit Hilfe eines geschätzten Nachfragesystems konstruiert werden. Für die Hicks-Nachfrage auf der rechten Seite in Gl. (6) bzw. (10) gilt dasselbe, nur mit dem Unterschied, dass die Schätzung nicht nur über den Einfluss des Preises, sondern auch den des Einkommens Aufschluss geben muss. Das aber wird jede vernünftige Schätzung tun. Denn in den Daten, ob Querschnitt oder Längsschnitt, variieren die Einkommen. Um den hypothetischen Fall unveränderter Einkommen zu ermitteln, muss man den Einkommenseffekt ohnehin schätzen. Schon eine einzige geschätzte Maßzahl, die Einkommenselastizität der Nachfrage, würde erlauben, die Formeln (6) oder (10) anzuwenden und damit die Hicks-Variation besser zu approximieren als mittels CS.⁶

Man könnte also auf CS ganz zugunsten der Hicks-Variationen verzichten. Aber diese haben einen Nachteil: Sie lassen sich nicht auf die aggregierte Nachfrage anwenden, wie wir im nächsten Abschnitt zeigen. CS jedoch ist aggregierbar: CS für die aggregierte Nachfrage ist gleich der Summe der CS der einzelnen Konsumenten. Deswegen lohnt es doch zu fragen, wie gut CS die Hicks-Variationen approximiert. Betrachten wir zuerst

⁶ Man erhält eine Korrekturformel in geschlossener Form, die von CS zu CV führt, $CV = y^0 \left[1 - (1 + (\eta - 1)CS / y^0)^{\frac{1}{1-\eta}} \right]$ (Willig 1976). η ist die Einkommenselastizität der Nachfrage. Man beachte, dass Willig die Maße mit umgekehrtem Vorzeichen definiert. Die quadratische Näherung dieser Formel liefert die unten genannte Fehlerabschätzung für die Annäherung von CV durch CS.

wieder die Variation nur des Preises p_1 . Sei \hat{p}_1 die relative Preisänderung, dann findet man für die prozentuale Abweichung von CS gegenüber CV oder EV die Näherung $\alpha\eta\hat{p}_1/2$ (Willig, 1976).⁷ Darin bezeichnet α den Anteil der Ausgaben für Gut 1 am Budget. Bei einer Preissenkung für ein normales Gut (d.h. eines mit $\eta > 0$) überschätzt CS die CV und unterschätzt die EV um diesen Prozentsatz. Wenn alle variierenden Preise vom Benchmark zur Alternative sinken (oder alle steigen)⁸, wie es bei Verkehrsprojekten üblicherweise der Fall ist, überträgt sich die Fehler-Abschätzung auf die Evaluation mehrerer Preise; da man die Preise sequentiell abarbeiten könnte, ist der relative Gesamtfehler die gewichtete Summe der relativen Fehler bei der Evaluation jeder einzelnen Preisänderung.

Der relative Fehler $\alpha\eta\hat{p}/2$ ist für typische praktische Fälle ein außerordentlich kleiner Prozentsatz. Nehmen wir als Beispiel eine sehr bedeutende Preissenkung, dass nämlich der Preis für die aggregierte Verkehrsleistung insgesamt um 10% sinkt. Die Verkehrsausgaben machten 2013 in Deutschland ungefähr 14% des BIP aus („Einkommens- und Verbrauchsstichprobe 2013“, 2015), und die Einkommenselastizität ist vermutlich kleiner als eins⁹. Daraus folgt ein relativer Fehler von weniger als einem Prozent! Zweifellos kann es einzelne Nachfragekomponenten mit höherer Einkommenselastizität geben, aber kaum zugleich mit hoher Einkommenselastizität und hohem Einkommensanteil.

Man muss auch noch bedenken, dass man in der Definition von CV und EV mit p^b oder p^a extreme Bewertungspreise \tilde{p} wählt, die die Endpunkte der Preispfade bilden, die von den Benchmarkpreisen zu den Alternativpreisen führen. Man könnte als Kompromiss eine mittlere Hicks-Variation $V(\bar{p})$ mit dem mittleren Preisvektor $\bar{p} = (p^b + p^a)/2$ wählen. Eine andere mittlere Variante einer Hicks-Variation ließe sich analog zu (2) bzw. (3) definieren als

$$MV = e(p^b, \bar{u}) - e(p^a, \bar{u}),$$

wobei das mittlere Nutzenniveau \bar{u} implizit durch $e(\bar{p}, \bar{u}) = y^0$ definiert ist. Diese mittleren Hicks-Variationen können für sich genauso Gültigkeit beanspruchen wie CV und EV. Man kann sie wie EV und CV explizit berechnen und findet, dass die Abweichung von CS praktisch ganz verschwindet.

Es ist abschließend noch zu bemerken, dass CS das korrekte Maß für den Fall ist, dass der Verkehrsnutzer nicht ein Konsument, sondern eine Firma ist, was ja für einen erheblichen Teil der Verkehrsnachfrage zutrifft. Ist die Firma Mengenanpasser auf den betrachteten Verkehrsmärkten, ist CS die Gewinnzunahme, weil die Nachfragefunktion die negative

⁷ Man kommt auf diese Formel auf einfache Weise, wenn man als relativen Fehler das Verhältnis der Flächen C/A in Abbildung 1 definiert und die Hicks-Nachfrage für u^b an der Stelle p_1^b linear approximiert, wie durch die blass gepunktete Gerade angedeutet. Für lineare Marktnachfrage, wie sie in der Abbildung angenommen ist, kann man die exakte Hicks-Nachfrage explizit berechnen. Sie verläuft leicht konkav.

⁸ Dieser Fall wäre für die Einführung einer Maut interessant.

⁹ Fouquet (2012) schätzt eine Elastizität von 0.8.

Ableitung des Gewinns nach dem Preis ist. Die Komplikation des Einkommenseffektes gibt es für Firmen nicht. Eine andere Frage ist, ob die Gewinnzunahme die Zunahme der sozialen Wohlfahrt misst. Das hängt davon ab, ob die Firma auf den anderen Märkten ebenfalls Mengenanpasser ist, ob dort die Preise die sozialen Grenzkosten widerspiegeln und wie die Verteilungswirkungen der Gewinnzunahme zu beurteilen sind. Dazu später.

4 Soziale Wohlfahrt

Im Bewertungsverfahren der BVWP werden wie selbstverständlich die individuellen Benefits zum sozialen Benefit aufsummiert. Dabei stellen sich drei Probleme. *Erstens* lässt sich die Summe der Hicks-Variationen nicht aus der aggregierten Nachfragefunktion rekonstruieren. Dies liefert wie gesagt einen guten Grund, sich mit CS zufriedenzugeben. *Zweitens* repräsentiert der individuelle Benefit nicht den individuellen Beitrag zum sozialen Benefit, weil Preise nicht die sozialen Marginalkosten repräsentieren. Und *drittens* setzt die Addition der geldmetrischen Benefits einen höchst zweifelhaften sozialen Wohlfahrtsbegriff voraus. Wir diskutieren die Probleme nacheinander.

4.1 AGGREGATION DER HICKS-VARIATIONEN

Möchte man, absehend von den weiteren genannten Problemen, den sozialen Benefit durch die Aggregation der individuellen Benefits, z.B. durch die Summe der individuellen CV_k quantifizieren, so geht das nur, indem man die individuellen CV_k wie oben berechnet und dann aufsummiert. Ein aggregiertes Analogon zu Gl. (6) derart, dass derselbe Formalismus auf die aggregierte Nachfrage angewendet wird, funktioniert nicht. Es ist wohl bekannt, dass sich die aggregierte Konsumnachfrage im Allgemeinen nicht als Nachfrage eines repräsentativen rationalen Agenten darstellen lässt. Die Eigenschaften, die die aus einer Rationalentscheidung resultierende Nachfrage eines Individuums kennzeichnet, überträgt sich nicht auf die Gesamtnachfrage¹⁰. Insbesondere ist sie keine Funktion des aggregierten Budgets. Individuelle Nachfragefunktionen ließen sich höchstens für Stichproben aus der Menge der Konsumenten schätzen und dann auf die Population hochrechnen – eine aufwändige Prozedur.

Ein Ausweg ist, von vornherein zu unterstellen, die individuelle Nachfrage sei einkommensunabhängig. Dann ist CS_k für alle Konsumenten k gleich den Hicks-Variationen und CS ist aggregierbar in dem Sinne, dass CS, berechnet durch Integration der aggregierten Nachfrage, gleich ist der Summe der CS_k , je berechnet durch Integration der individuellen Nachfragen.¹¹

¹⁰ Das ist das „Anything Goes“ Theorem (Mas-Colell, Whinston, und Green 1995, Abschn. 17.E).

¹¹ Aggregierbarkeit ist unter einer geringfügig allgemeineren, aber praktisch nutzlosen Bedingung, der sogenannten Gorman-Form möglich (Mas-Colell, Whinston, und Green 1995, Abschn. 4.D).

Man muss dabei allerdings beachten, dass nicht jede beliebige Nachfragefunktion mit der Annahme verträglich ist, Ergebnis einer Rationalentscheidung mit verschwindendem Einkommenseffekt zu sein. Der Nachfragevektor muss eine Monotonieeigenschaft haben, die die eindimensionale Monotonie (Nachfrage nicht-steigend im Preis) auf mehr Dimensionen verallgemeinert.¹² Ist sie für alle individuellen Nachfragen erfüllt, überträgt sie sich auf die aggregierte Nachfrage. Nachfrageentscheidungen werden häufig mit diskreten Entscheidungsmodellen vom AIRUM-Typ (McFadden und Manski 1981) (z.B. Logit oder Probit, auch verschachtelt) modelliert. Sie erfüllen die geforderte Eigenschaft; denn die derart modellierte Nachfrage kann ja als Aggregat der Nachfragen von Individuen aufgefasst werden, die Punkte in einem Wahrscheinlichkeitsraum sind. „AI“ in AIRUM heißt „Additive Income“ in der indirekten Nutzenfunktion. Das meint, dass die betrachtete Nachfrage der Individuen, und daher auch die des Aggregates, von Einkommensänderungen unberührt bleibt.

4.2 VERZERRTE PREISE

Abgesehen von den weiteren aufgezählten Problemen beim Übergang vom individuellen zum sozialen Benefit setzt die Aggregation der individuellen Benefits voraus, dass die bei ihrer Messung verwendeten Preise die sozialen Grenzkosten widerspiegeln. Tatsächlich enthalten Preise Komponenten, die keine sozialen Grenzkosten sind, und es gibt soziale Grenzkosten, die keine Preisbestandteile sind. Nennen wir jetzt, ohne in den Tiefen der allgemeinen Gleichgewichtstheorie zu versinken, X den Vektor der produzierten Mengen in der Ökonomie (im Unterschied zu x , das für den Konsum eines einzelnen Konsumenten steht), p nach wie vor den Vektor der Preise (aller Preise, nicht nur der für Transportleistungen) und c den Vektor der sozialen Grenzkosten, die sich zwischen Benchmark und Alternative unterscheiden können, aber als in den Mengen konstant unterstellt sind. Dann muss man von der Summe der wie oben berechneten individuellen Benefits eine Verzerrungskorrektur VK,

$$VK = (c^a - p^a) \cdot X^a - (c^b - p^b) \cdot X^b$$

subtrahieren. Verschieben sich z.B. die Produktionsmengen durch die evaluierte Maßnahme weg von Sektoren mit geringen externen (d.h. nicht in den Preisen reflektierten) Umweltkosten hin zu solchen mit hohen externen Umweltkosten, so vermindert sich der soziale Benefit. Verschieben sich andererseits die Mengen weg von Sektoren mit geringen Preisaufschlägen auf die Marginalkosten hin zu solchen mit hohen Preisaufschlägen, so erhöht sich der soziale Benefit. Preisaufschläge (bei NKW fälschlich als Producer Surplus bezeichnet) können insbesondere aus Monopolmacht oder Steuern resultieren oder daraus,

¹² Wenn die Nachfrage eine differenzierbare Funktion ist, muss ihre Jacobi-Matrix symmetrisch negativ-semidefinit sein. Allerdings ist sie bei diskreten Entscheidungen im allgemeinen keine Funktion, sondern eine mehrwertige Abbildung mit Sprungstellen bei Preisen, bei denen ein Konsument indifferent zwischen diskreten Optionen ist. Im allgemeinen muss sie zyklisch monoton sein (Rockafellar 2015, Kap. 24).

dass Angebot und Nachfrage nicht durch flexible Preise zum Ausgleich kommen. Dies ist für den Arbeitsmarkt essentiell; bei unfreiwilliger Arbeitslosigkeit sind die sozialen Grenzkosten der Arbeit kleiner als der Lohnsatz. Die Divergenz zwischen Preisen und sozialen Grenzkosten ist nicht allein im Verkehrssektor, sondern in der gesamten Ökonomie relevant.

Natürlich ist es in der Praxis außerordentlich schwierig, die Korrekturen zu quantifizieren. Was externe Umweltkosten betrifft, also den Fall $c_i > p_i$, gibt es etablierte, aber auch umstrittene Verfahren. Selten werden dabei allerdings induzierte Mengenänderungen auch außerhalb des Verkehrssektors in Betracht gezogen. Die Relevanz von Preisaufschlägen, also des umgekehrten Falles $p_i > c_i$, ist ein Aspekt der Diskussion über Wider Effects. Wider Effects können positiv oder negativ sein. Kommunikationsförderung durch Preissenkung im Personenverkehr führt zu Wider Benefits im Wachstum (Bröcker 2013). In der Literatur werden auch Wider Benefits durch Agglomerationsförderung postuliert. Die sind aber dubios, weil die Verluste in der Peripherie nicht gegengerechnet sind. Hier ist aber nicht der Ort, um zu diesem Thema in die Tiefe zu gehen (siehe z.B. Graham und Melo 2011).

4.3 DIE SOZIALE WOHLFAHRTSFUNKTION

Die soziale Wohlfahrt zu quantifizieren, indem man individuelle geldmetrische Benefits addiert, ist keine theoretisch begründete Forderung einer Effizienzanalyse, sondern eine gesellschaftliche Norm, und zwar eine höchst fragwürdige. Sie setzt nämlich den Beitrag eines Euros zur sozialen Wohlfahrt gleich, egal wer ihn verliert oder gewinnt. Kaum ein Mensch würde sich diese Norm zu eigen machen, sondern einen Euro in der Tasche eines Armen höher als einen Euro in der Tasche eines Reichen werten. Es widerspricht auch keinen wohlfahrtstheoretischen Prinzipien, Benefits in Rückstandsgebieten höher zu bewerten als solche in prosperierenden Regionen, um der Norm gleichwertiger Lebensbedingungen zu genügen. Die abwehrende Aussage, dies sei in der Bewertung irrelevant, da es nicht wohlfahrtstheoretischer sondern verteilungstheoretischer Natur sei (Intraplan und TUBS Berlin 2014), basiert auf der unhaltbaren Vorstellung, Wohlfahrt und Verteilung ließen sich separieren. Mit der Datenbasis, auf der die Bewertungen basieren (Origin-Destination-Ströme und deren Preise und Kosten) kann man die regionale Inzidenz der Maßnahmen schätzen¹³ und dann Gewichtungen der regionalen Benefits vornehmen, wenn die Norm es verlangt. Personelle Verteilungswirkungen zu identifizieren, ist allerdings schwierig, und die personellen sind anders als die regionalen Verteilungswirkungen diffus.

Versuche, eine strikte Trennung von Effizienz und Verteilung zu fundieren, können als gescheitert angesehen werden. Das Kaldor-Kriterium etwa, das einen Effizienzgewinn postuliert, wenn *potentiell* die Gewinner die Verlierer kompensieren könnten, ist ethisch

¹³ Zur Methodik siehe Bröcker und Rietveld (2009, Abschn. 7)

unhaltbar, ja geradezu eine Verhöhnung der Verlierer. Es induziert zudem keine konsistente Ordnung gesellschaftlicher Zustände. Ferner ist unklar, wie es getestet werden soll. Man müsste explizit ein Gleichgewicht mit Kompensation berechnen und auf diese Weise konstruktiv zeigen, dass es existiert. Das verlangt den Einsatz Allgemeiner Gleichgewichtsmodelle, die für routinemäßigen Einsatz in der Bewertung beim Stand der Dinge nicht in Frage kommen (Bröcker und Mercenier 2011).

Man könnte denken, das Kriterium sei erfüllt, wenn die Summe der CV_k positiv ist. Das ist aber nicht korrekt. Das Boadway-Paradox sagt, dass diese Summe immer positiv (oder im Spezialfall Null) ist, wenn man durch Umverteilung der Anfangsausstattung von einem Pareto-Optimum zu einem anderen übergeht. Dabei sind aber die Verlierer definitionsgemäß *nicht* kompensierbar (Blackorby 1990). Die ungewichtete Addition individueller Geldbeträge lässt sich nur pragmatisch rechtfertigen mit der Hoffnung, Umverteilungseffekte seien vernachlässigbar. Das ist eine empirische Frage und bedarf der Analyse. Resultate sind gemischt (siehe z.B. Valerio Mendoza 2017).

5 Ressourcenkonsum-Rechnung

Nach RK misst man den sozialen Benefit als Abnahme der Ressourcenkosten beim Übergang vom Benchmark zur Alternative, also

$$RK = c^b \cdot X^b - c^a \cdot X^a.$$

Eigentlich hätte das für die gesamte Ökonomie zu erfolgen, aber man erfasst in den Vektoren X und c tatsächlich nur die Verkehrsleistungen. In c stehen alle spezifischen Kosten einer Verkehrsleistung, gleich ob sie intern oder extern sind, also ob sie sich in den Preisen widerspiegeln oder nicht. Betrachten wir eine Verkehrsleistung (Gut 1), sehen vorerst von Verzerrungen ab und unterstellen, dass es keine Auswirkungen auf die Nachfrage anderer Verkehrsleistungen gibt, dann misst RK die Fläche A – E in Abbildung 1¹⁴. Also ist das korrekte Maß $CS = RK + E + B + C$. Die Fläche $E + B + C$ ist der geldmetrische Nutzenzuwachs, der aus der Expansion der Menge von X_1^b nach X_1^a resultiert. Das Dreieck $B + C$ (das sogenannte Harberger-Dreieck) zu vernachlässigen, ist dabei nicht das Problem. Es ist ein Effekt zweiter Ordnung. Wie oben dargelegt verschwindet es in Relation zu A, wenn die Preisänderung klein wird. Die fälschlich abgezogene Fläche E jedoch ist ein Effekt erster Ordnung. E/A ist $(dX_1 \cdot p_1) / (X_1 \cdot dp_1)$. Das ist ε , die Preiselastizität der Nachfrage (alles in Absolutbeträgen). Sie verschwindet nicht mit verschwindender Preisänderung. Ist die Nachfrage elastisch, dann ist E sogar größer als A und der Benefit wird kurioserweise negativ, obwohl kein Preis gestiegen ist, p_1 aber gesunken ist und es annahmegemäß keine Verzerrung gibt. RK zählt die Kosten

¹⁴ Auf der Abszisse denken wir uns jetzt nicht die individuelle, sondern die Gesamtnachfrage abgetragen.

der Mengenexpansion als Verlust, aber vergisst, dass man für die Kosten ja auch etwas bekommt. Das ist schlicht abwegig.

Nimmt man Auswirkungen auf die Nachfrage X_2 nach einem substitutiven Verkehrsmittel hinzu, wird der Fehler durch einen anderen Fehler reduziert, nämlich den, die Kosteneinsparung $p_2(X_2^b - X_2^a)$ hinzuzuaddieren. Nur zufällig würde er gerade ausgeglichen, z.B. wenn X_2 im gleichen Umfang reduziert wird, in dem X_1 erhöht wird, und $p_1^a = p_2$ ist. Wäre eine andere Leistung jedoch komplementär, so würde der Fehler sogar vergrößert.

Lassen wir nun wieder Verzerrungen zu. Sind die Mengen konstant, also $X^b = X^a = X$, dann ist CS einfach die Fläche A, oder allgemein $CS = X \cdot (p^b - p^a)$. Der soziale Benefit ist in diesem Falle $CS - VK = RK = X \cdot (c^b - c^a)$. Ohne Mengenänderung gibt es keinen Unterschied der Methoden. Ließe man allerdings die Verzerrungskorrektur weg, läge man mit CS allein falsch, mit RK jedoch richtig. Gibt es Verzerrungen und man vernachlässigt Mengenänderungen, obwohl sie in Wahrheit relevant sind, dann unterschlägt man in RK die Änderungen externer Kosten durch die Mengenänderungen. Die sind von erster Ordnung, also nicht zu vernachlässigen.

Abstract

In a non-distorted economy with rational decision makers one would ideally measure the benefits from transport infrastructure improvements by adding up compensating variations (CV) of individuals, provided one Euro has equal weights, irrespective of who gains or loses it. Contrary to commonly held wisdom, CV can well be quantified using the information provided by typical estimates of demand systems. The problem with CV is, however, that its aggregation cannot be inferred on from aggregated demand systems. Hence, consumer surplus (CS), can be used as an approximation and estimated from aggregate demand, provided individual demand is not affected by income changes in the relevant range. Fortunately, the relative error emerging from the use of CS instead of CV is negligible in practice. Furthermore, CS itself can be approximated by the rule of a half (RoH), and the approximation error is also typically small. As real markets are severely distorted, aggregate CS needs to be corrected for distortion by subtracting the net increase of external costs. Marginal external costs are marginal social costs not covered by the prices the individual decisions are based on. "Net increase" means that price components that are not social marginal costs count like negative external cost. It can furthermore well be argued that Euros should not count one to one and distributional impacts should be taken into account, without getting into conflict with the principles of neoclassical welfare economics. Finally, given that methods perfectly consistent with this approach are well established, the traditional German Resource Cost approach must be regarded as a historical oddity.

Literatur

- Antonelli, Giovanni Battista. 1886. *Sulla teoria matematica della economia politica*. Pisa: Tipografia Del Folchetto.
- Becker, Gary S. 1965. „A Theory of the Allocation of Time“. *The economic journal* 75 (299): 493–517.
- Blackorby, Charles. 1990. „The case against the use of the sum of compensating variations in cost-benefit analysis: a review article“. Herausgegeben von David Donaldson. *The Canadian journal of economics* 23 (3): 471–94.
- Bröcker, Johannes. 2013. „Wider economic benefits from communication-cost reductions: an endogenous growth approach“. *Environment and Planning B: Planning and Design* 40 (6): 971–86.
- Bröcker, Johannes, und Jean Mercenier. 2011. „General equilibrium models for transportation economics“. In *A handbook of transport economics*, herausgegeben von André de Palma, Robin Lindsey, Emil Quinet, und Roger Vickerman, 21–45. Cheltenham, UK: Edward Elgar.
- Bröcker, Johannes, und Piet Rietveld. 2009. „Infrastructure and regional development“. In *Handbook of regional growth and development theories*, herausgegeben von Roberta Capello und Peter Nijkamp, 152–181. Cheltenham, UK: Edward Elgar.
- „Einkommens- und Verbrauchsstichprobe Aufwendungen privater Haushalte für den Privaten Konsum 2013“. 2015. Heft 5. Fachserie 15, Wirtschaftsrechnungen. Wiesbaden: Statistisches Bundesamt.
- Fouquet, Roger. 2012. „Trends in Income and Price Elasticities of Transport Demand (1850–2010)“. *Energy Policy* 50 (November): 62–71. .
- Graham, Daniel, und Patricia Melo. 2011. „Assessment of wider economic impacts of high-speed rail for Great Britain“. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Nr. 2261: 15–24.
- Intraplan, Planco, und TUBS Berlin. 2014. „Grundsätzliche Überprüfung und Weiterentwicklung der Nutzen-Kosten-Analyse im Bewertungsverfahren der Bundesverkehrswegeplanung“.
- Mas-Colell, Andreu, Michael Dennis Whinston, und Jerry R. Green. 1995. *Microeconomic theory*. New York, NY [u.a.]: Oxford Univ. Press.
- McFadden, Daniel, und Charles F. Manski. 1981. *Structural Analysis of Discrete Data with Econometric Applications*. Cambridge, Mass.: MIT Press.
- Nagel, Kai, Benjamin Kickhöfer, und Martin Winter. 2015. „Reverse-engineering of the rule-of-half in order to retrofit an assessment procedure based on resource consumption“. *Zeitschrift für Verkehrswissenschaft : ZfV* 86 (3): 219–39.

- Rockafellar, Ralph Tyrell. 2015. *Convex Analysis*. Princeton, New Jersey: Princeton University Press.
- Rothengatter, Werner. 2015. „BVWP-Bewertungsverfahren: volle Fahrt zurück in die orthodoxe Neoklassik“. *Zeitschrift für Verkehrswissenschaft : ZfV* 86 (3): 181–204.
- Valerio Mendoza, Octasiano M. 2017. „Infrastructure Development, Income Inequality and Urban Sustainability in the People’s Republic of China“. 713. ADBI Working Paper. Asian Development Bank Institute.
- Willig, Robert D. 1976. „Consumer’s surplus without apology“. *American Economic Review* 66 (4): 589–97.

Airline Market Power and Airport Regulation

VON CHRISTOS EVANGELINOS UND ZSOLT SZILVAY

1 Introduction

An airport is generally considered to be in a situation to exploit market power especially if no comparable airport is located in the appropriate surrounding area. This assumption has posed a basic principle in recent literature discussing airport pricing and regulation as for instance in OUM ET AL. (2004), ZHANG & ZHANG (2006) and ZHANG & ZHANG (2010).¹ Airports are treated as monopolies and airlines are presumed to view the airport's landing fee to be parametric.

Market power could, however, shift from the airport to airlines as pointed out in BUTTON (2010). The author points out that the basic principle in current research in airport pricing principles, to treat the airport as a monopoly, could be considered to be the upper limit. Prices and fees discussed in recent literature on airport regulation would apply only if the airport is indeed able to exploit market power and set monopolistic prices. But how would the airport behave if it was stripped of its market power? By how much is the airport willing to reduce the landing fee i.e. what is the lower limit of the airport charge?

This paper aims to relax the assumption of airport market power and bestows airlines monopsony power. Airlines are able to compel the airport to enter into negotiations on the landing fee. After reviewing the classic monopoly-outcome discussed in OUM ET AL. (2004) in section 2, their model is altered in section 3 to suit the new setting. The airport's pricing behaviour concerning the landing fee and the prices for concession services as well as the airport's capacity decision is studied in four different market situations. The first case is a classic monopsony where only one airline with market power operates to and from the airport in question. Next, the airport serves two airlines with monopsony power. On the lines of BRUECKNER & VAN DENDER (2008) two duopoly-cases and a fourth case with

Anschrift der Verfasser:

Prof. Dr. Christos Evangelinos
International University of Applied Sciences
Bad Honnef Bonn
Aviation Department
Mülheimer Str. 38
D-53604 Bad Honnef
E-Mail: c.evangelinos@iubh.de

Zsolt Szilvay
AviAlliance GmbH
Klaus-Bungert-Str. 5
D-40468 Düsseldorf
E-Mail: zsolt.szilvay@gmx.net

¹ Since this paper deals with a certain regulatory framework, we refrain from giving an overview on airport regulation. An recent in depth literature review is provided by ZHANG & CZERNY (2013).

many airlines are considered. First a Cournot-duopoly is discussed followed by a case where the two airlines compete in Stackelberg fashion. The last case involves a large number of airline companies. The Stackelberg-follower is now considered to be a group of many airlines operating to and from the given airport. These four cases will see a gradual decrease in the airlines possibilities to exploit monopsony power as the number of airlines increase.

Finally, section 4 discusses possible consequences of airline monopsony power for airport regulation. Two forms of regulation are considered, namely the rate-of-return regulation and the price-cap regulation each in both single-till and dual-till layout. As both forms are designed to countervail monopoly power on the part of the airport, inverting the basic setting might possibly reduce the need for regulatory actions. This paper finds that a general reduction in regulatory measures in the airport industry, however, would by no means offer the appropriate solution. Quite the contrary: Regulators have to be rather well informed about the market situation on the given airport prior to any decision on whether and how to take regulatory actions.

2 Airport as Monopolist: Model by Oum, Zhang & Zhang

In general, an airport catering for commercial airlines operates two sectors: aeronautical services and concession services. Aeronautical services are mainly infrastructure related such as the use of runways, terminals, technical services and air traffic controlling facilities which are essential for a fully functional airport. Concessions are mostly granted to private operators in order to provide passengers with retail services. These services generate both operating and capital costs which the airport seeks to cover by collecting landing fees from the airlines and by setting suitable prices for concessions which are in effect paid by the passengers. Passengers are willing to pay a fixed “full price” for their flight which contains the airline fare and the cost of delay due to congestion. Passengers and airlines incur higher expenditures due to extra time spent on the ground or in the air. The level of congestion is determined by the flight volume and the capacity which implies congestion can reach zero with an appropriately low flight volume and/or high capacity. Expenditures for concession services are not part of the total generalised travel costs of the passengers but are considered a separate expenditure. Consequently the full price ρ perceived by the passengers determines the demand for airport facilities or the flight volume Q with the following property:

$$\frac{\partial Q}{\partial \rho} < 0$$

The authors in OUM ET AL. (2004) assume that the airlines can fully pass landing fees on to their passengers; hence, any alteration of the landing fee is fully reflected in the airline fare. The perceived full price is then determined by the airline fare excluding the airport charge, landing fees and costs of congestion.

The authors consider the other airline charges to be exogenous and since the model considers only airport pricing they reckon the flight volume can be determined by the

landing fee for one flight P and the sum of both airline delay cost and passenger delay cost due to congestion D .

The level of delay cost is determined by the flight volume Q and the capacity of the airport K so that $D = D(Q, K)$ applies. The cost of capital of the airport is denoted by r and the operating costs of aeronautical services by $C(Q)$. The delay cost function is differentiable in Q and K and the airport operating cost function in Q .

$$\frac{\partial D}{\partial Q} > 0 \qquad \frac{\partial D}{\partial K} < 0 \qquad C' > 0$$

The price for concession services u determines the per flight demand X for those services so that $X = X(u)$ and the cost for providing the concession services is denoted by $c(X)$. The following properties apply:

$$X' < 0 \qquad c' > 0$$

In order to simplify, the profits from concession services per flight are denoted by R and the per flight consumer surplus from concession purchases plus concession profits by V in appropriate cases.

2.1 WELFARE-MAXIMISING AIRPORT

The authors first introduce an airport maximising social welfare. It serves as a benchmark and allows comparisons with a profit-maximising airport. As described in relevant literature social welfare is considered to be the sum of consumer surplus and producer surplus:

$$SW = \int_{\rho}^{\infty} Q(\rho) d\rho + PQ - C(Q) - Kr + Q \left[\int_{-u}^{\infty} X(u) du + uX - c(X) \right]$$

The first integral represents the consumer surplus passengers gain from the flight itself and the second integral is the consumer surplus passengers gain from purchasing concession services. The authors presume the airport to be subject to a budget constraint preventing it to post any losses. In this case the airport will calculate as follows:

$$\begin{aligned} \max_{P, u, K} \int_{\rho}^{\infty} Q(\rho) d\rho + PQ - C(Q) - Kr + Q \left[\int_{-u}^{\infty} X(u) du + uX - c(X) \right] \\ \text{s. t. } PQ - C(Q) - Kr + Q[uX - c(X)] = 0 \end{aligned}$$

The corresponding Lagrangean function is then differentiated with respect to the landing fee P , the price for concession services u and the cost of capital of the airport r . In case of

the differentiation with respect to P and K the terms associated with concession services are substituted with V and R :

$$V = \int_u^{\infty} X(u)du + uX(u) - c(X(u))$$

$$R = uX(u) - c(X(u))$$

The first-order conditions yield the following pricing principles:

$$P_W = C' + Q \frac{\partial D}{\partial Q} + \frac{\lambda}{1 + \lambda} \frac{P}{\varepsilon} - \frac{V + \lambda R}{1 + \lambda} \quad (1)$$

$$u_W = c' + \frac{\lambda}{1 + \lambda} \left(\frac{X}{-X'} \right) \quad (2)$$

$$r_W = -Q \frac{\partial D}{\partial K} \quad (3)$$

where subscript W indicates a welfare maximising airport.

Concerning the landing fee (1), the welfare maximising airport imposes a markup and a markdown term to the social marginal cost of one flight. The first term represents the marginal operating cost of the airport and the second the marginal congestion cost that all other flights incur. These two terms represent the social marginal cost of one flight. The third term contains the elasticity of demand for air travel with respect to the landing fee.

A monopoly would shift its prices to a point where demand is elastic. An airport which aims to maximise social welfare, however, is not expected to exploit its market power. The third term involving demand elasticity is indeed bounded by $\frac{\lambda}{1+\lambda}$. Whether the multiplier λ - set to ease the effect of the third term - is positive or negative depends on the budget constraint. OUM ET AL. (2004, P. 224) state that an unconstrained welfare-maximisation leading to financial losses for the airport would yield a positive λ and an unconstrained welfare-maximisation leading to financial surplus yields a negative λ . The authors, however, consider only the case where $\lambda > -1$ as the opposite would lead to counterintuitive pricing principles. Finally, the markdown term involving the concessions sector is the weighted average of the concession welfare V and the concession profits R .

The price for concession services (2) also includes the same term $\frac{\lambda}{1+\lambda}$ as the landing fee. The welfare maximising airport seems to ease the otherwise monopolistic prices to a level at which zero profits are expected, similar to the price for aeronautical services. The authors, nevertheless, believe the airport would still set profit maximising prices for concession services. They point out, that publicly owned airport authorities contract private, profit maximising companies to operate the concession services. By auctioning the

concessions the airport is able to capture locational rents and use these to subsidise airside operations, visible in the fourth term of the landing fee (1). Thus, the alleviating term is then expected to drop and resemble the notion of a profit-maximising airport (6).

Finally, the welfare maximising airport sets the capacity (3) at a socially efficient level where the marginal benefit of capacity expressed as reduction in congestion costs equates to the marginal cost of capacity r .

2.2 PROFIT-MAXIMISING AIRPORT

In their second case the authors consider an unregulated airport which aims to maximise the total profit from both the aeronautical and concession services.

$$\max_{P,u,K} PQ - C(Q) - Kr + Q[uX - c(X)] \quad (4)$$

Differentiating the profit maximisation with respect to the landing fee P , price for concession services u and the capacity K yield the following pricing principles:

$$P_{\pi} = C' + Q \frac{\partial D}{\partial Q} + \frac{P}{\varepsilon} - R \quad (5)$$

$$u_{\pi} = c' + \left(\frac{X}{-X'} \right) \quad (6)$$

$$r_{\pi} = -Q \frac{\partial D}{\partial K}, \quad (7)$$

where subscript π denotes a profit maximising airport.

The authors point out that the landing fee (5) set by the profit maximising airport is socially inefficient. The two first terms still form the social marginal cost for one flight as in the case of a social welfare-maximising airport (1). It is the third term which reflects the airport's market power. The fourth and last term is a markdown equal to per-flight concession profits which reflects the complementarity between aeronautical and concession services even in the case when the airport seeks to maximise profits.

STARKIE & YARROW (2000, p. 2) point out in this respect, that concession services can shift the potentially monopolistic landing fees towards lower ones. Since an increased flight volume at the airport will yield a higher demand for concession services, the airport can gain from significantly higher profits from the concession sector because of locational

rents.² In order to attract more flights the airport will then have to lower the landing fees. Lower revenues from aeronautical services are, however, compensated by higher profits from concession services. According to the authors the unregulated profit maximising airport then has an incentive to lower landing fees towards a more socially efficient level due to the concession profits. Due to demand complementarity the airport would only be expected to set monopolistic prices for concession services. The pricing principle for the concession price (6) in OUM ET AL. (2004) is indeed higher than the marginal costs for providing the services.

Furthermore, the profit maximising airport will set its capacity (7) at a socially efficient level just as in the case of a welfare maximising airport. The authors, however, note that the efficient level of capacity is conditional on the flight volume Q . Where the equation for the level of capacity is socially efficient the landing fee set by a profit maximising airport is not. As a result the capacity levels of the two airports are different even though both follow the same capacity setting principles. The equations (3) and (7), nonetheless, imply that both airports achieve an efficient traffic/capacity ratio in order to satisfy the condition to keep capacity at level where the social marginal benefits equate the marginal cost of capacity.

The landing fee at an unregulated profit maximising airport is higher than at a welfare maximising airport. The extent of the difference is determined by three factors, namely the Lagrangean multiplier λ , the price elasticity of demand ε and by the proportion of concession profits R on total concession welfare V .

By definition, the total surplus from concession services V must be greater than the concession profits R . The smaller the difference between the surplus of the concessions and the profits is, the smaller the difference between the landing fees of each airport is going to be. In other words the difference depends on how well the concession operators can skim the surplus from the market.

An elastic demand will weaken the markup term bringing the two airport charges closer to each other. Similarly, the greater λ , the less power is left within the alleviating terms and the closer the two prices will be.

Nevertheless, the profit maximising airport is expected to set too high prices from a social viewpoint. Considering the pricing principles of a welfare maximising airport to be the desired benchmark and the one of a profit maximising airport to represent the top of the possible price spectrum, the question is how low the airport will set its prices when it is stripped of its market power and confronted with only one customer, a monopsonist.

² This argument is also shared by STARKIE (2002, p.70).

3 Airline Market Power and Airport Pricing

In this chapter an altered model of the one set up by OUM ET AL. (2004) is introduced in order to account for the assumption that market power has shifted from the airport to the airlines. The model of airline and airport behaviour is based on a sequential game with two stages. During the first stage the airlines decide on their flight volume which is no longer determined by the perceived full price $\rho = P + D$ but is in fact determined on the market for air travel and particularly due to competition between the airlines. In the second stage the airport charge is determined. The airport can no longer ask for monopolistic prices as airlines are willing to consider alternative airports should they find the landing fee to be too high. The airport is aware of the airlines' outside option and is therefore willing to enter into negotiations with each of them.³ The airlines will stress their flight volume as the main factor in determining the airport charge and the airport has to consider how efficiently it is able to operate under the current capacity level. Hence, the landing fee P is determined by the flight volume Q and capacity K . The function to determine the landing fee is differentiable in Q and K .

$$\frac{\partial P}{\partial Q} > 0 \qquad \frac{\partial^2 P}{\partial Q^2} \geq 0 \qquad \frac{\partial P}{\partial K} > 0$$

With these alterations the model is going to be applied to four different market situations. First an airport which serves only one airline followed by a case where two airlines fly to and from the airport and compete in a Cournot fashion. Next an airport with two airlines competing in Stackelberg manner is discussed and finally airport pricing is analysed with the assumption that the Stackelberg follower is a group of many competitive airlines.

3.1 MONOPSONY

In contrast to a competitive market with many players a monopsonist is the only buyer of a specific good. The quantity the monopsonist buys is the total amount traded in the market. Any further output will remain unsold and therefore the producers will adjust their supply to the needs of the monopsonist. This is where the monopsonist can utilise its position as it dictates the output level of the suppliers. The price paid by the monopsonist is determined by the quantity it purchases, since generally suppliers will have to adjust their prices according to the cost they incur for producing the demanded amount of goods. The problem a monopsonist faces is the question on how many units to purchase in order to maximise the net benefit, the value of the good less the price it pays. In his attempt to maximise the net benefit the monopsonist will purchase a lower quantity in order to obtain a lower price.

³ Further arguments are provided by STARKIE (2012).

By how much the price will be pushed is determined inversely by η , the elasticity of supply. In the context of this paper η would represent the elasticity of supply for airside services with respect to the total flight volume.

$$\eta = \frac{P(Q) \Delta Q}{Q \Delta P} \quad (8)$$

The supply elasticity can be found in the marginal expenditure ME which determine the quantity purchased by the monopsonist.

$$ME = \frac{\Delta E}{\Delta Q}$$

$$\frac{\Delta E}{\Delta Q} = P(Q) + Q \frac{\Delta P}{\Delta Q} \quad (9)$$

$$\frac{\Delta E}{\Delta Q} = P(Q) \left[1 + \frac{1}{\eta} \right]$$

If the supply curve is elastic, -implying a moderately upward slope-, the markdown will remain small. In that case the monopsonist has only limited market power. If the supply elasticity is infinite, meaning η is infinitely large, the supply curve is again flat reducing the case to the one of a competitive market. The monopsonist will have no market power whatsoever. Should the elasticity of supply, however, be inelastic, represented by a small η and an accordingly ascending supply curve, considerable market power would be granted to the monopsonist and the markdown would be significant.

Whether an airline could exploit its position as the only one operating to and from the airport in question is then determined by the supply elasticity of an airport. Supply is determined by the ascending section of the marginal cost curve above the average cost. How steep or flat is the supply curve of an airport? Runways and terminals are surely dominating elements of total costs. Both represent at least partially sunk costs since an already paved runway cannot really be sold to another airport. The same applies for the terminal building. Elements such as runway lighting, ILS-facility, security infrastructure and computer hardware for terminal operations and air traffic control may possibly be able to be sold but they do not represent the highest part of total cost. Supply curve then seems to be rather elastic considering the runway and terminal building only. Operating an airport, however, is far from limited to paving runways and constructing terminals. Both are not as much affected by altering flight volumes, but the extent of the already mentioned security services, air traffic control, as well as emergency facilities such as fire stations and fire engines, fuelling facilities, apron management services, baggage operations, de-icing facilities, bus transfers and much more are indeed influenced by the flight volume. Custom-made equipment and the necessity for specially trained staff in many of these services and operations means the flight volume will have a significant impact on the size of these

expenditures. Operating close to the capacity limit could also potentially imply high cost dependent on the flight volume as managing large numbers of passengers and aircraft demands for personnel and facilities in the appropriate quantity and quality.

As much as the runway and the terminal imply a strongly elastic supply all the factors mentioned above point out, that supply does not seem to be infinitely elastic. The supply curve could indeed feature an at least moderately ascending shape, possibly increasing with the flight volume. Exploitation of monopsony power can therefore not be ruled out.

The alterations to the original model by OUM ET AL. (2004) discussed in the introduction of this chapter yield the following optimisation problem for the airport:

$$\pi_{AP} = P(Q, K)Q - C(Q) - Kr + Q[uX(u) - c(X(u))] \quad (10)$$

The subscript AP denotes the airport's profit function in order to distinguish the airport's optimisation problem from the one of the airlines. Differentiating π_{AP} with respect to the flight volume Q , the price for concession services u and the capacity K yields:

$$\frac{\partial \pi_{AP}}{\partial Q} = \frac{\partial P}{\partial Q} Q + P(\cdot) - C' + R = 0$$

$$\frac{\partial \pi_{AP}}{\partial u} = QuX' + QX - Qc'X' = 0$$

$$\frac{\partial \pi_{AP}}{\partial K} = \frac{\partial P}{\partial K} Q - r = 0$$

The first order conditions can then be transposed to deliver the following pricing principles:

$$P_m(\cdot) = C' - R - \frac{\partial P}{\partial Q} Q \quad (11)$$

$$u_m = c' + \left(\frac{X}{-X'} \right) \quad (12)$$

$$r_m = \frac{\partial P}{\partial K} Q \quad (13)$$

The subscript m is to identify the pricing principle to be the one of an airport dealing with one airline utilising its monopsony power.

The two first terms - the extra cost of one additional flight less the concession profits - of the landing fee (11) are similar to the case where the airport utilises market power. The airport seems, however, to grant a discount determined by the marginal revenues. By how much the landing fee changes with one extra flight is strongly connected to the outcome of the negotiations between the airport and the airline. The discount is conditional to the total

flight volume Q . The decision of the airline on how many flights to offer to and from the airport in question is going to determine the discount, since it defines the appropriate point along the supply curve of the airport. As pointed out in the introduction to this section, the extent of the monopsony power is connected to η , the supply elasticity. Moving the last term in (11) to the left hand side yields a comparable outcome to (9) and consequently the supply elasticity can be shown in the landing fee.

$$P_m(.) = \frac{C' - R}{1 + \frac{1}{\eta}} \quad (14)$$

Depending on the shape of the supply curve the discount then can vary from non-existent to significant. If supply is elastic the discount will remain small and if supply happened to be infinitely elastic the discount would vanish altogether. Where the supply curve bears a low η , namely where supply is inelastic, the airline can skim a substantial discount. The shape of the supply curve depends on the flight volume and the current capacity level as discussed earlier.

The price for concession services (12) remains unchanged. Setting the price at the profit maximising level will enable the airport to skim maximal profits, which it uses to subsidise the airport charge to keep it as low as possible. Concerning the concession services, all three airports, the social welfare maximising (2), the profit maximising (6) and the current airport follow the same pattern.

The capacity is kept at an efficient level where marginal benefit for the airport is equal to the marginal cost. The pricing principle for capacity (13) indicates that at an airport serving one airline with market power additional revenue gained from expanding the capacity shall not exceed the cost of capital r . Should the airport, however, experience pressure from outside, for example politics, to lower its landing fee in order to attract as many flights as possible it will probably underinvest in capacity. The saved funds out of omitted investments are then used to lower the landing fee even further which implies that at some point subsidies are inevitable in order to balance out the needed but previously dropped investments. The politicians' decision whether to push airport charges even further or not, will possibly be determined by the gain of popularity due to the increased flight level compared to the loss of popularity when the airport needs public funding in order to remain operational. This outcome, however, cannot be recreated in this model and is subject of positive economic theory.

The possibility of a deadlock in the negotiations is, however, not a realistic outcome. In MYERSON & SATTERTHWAIT (1983) the authors introduce a case where the trading parties in bilateral negotiations cannot reach an equally efficient solution for both when the valuation intervals of the two players overlap. An implicit assumption in the discussed model is the inability of both trading parties to prove their valuations to the other party. In this paper, however, the airline is expected to be able to convince the airport of the outside

option the airline has to its disposal and the two parties are able to reach a conclusion through negotiations.

3.2 COURNOT DUOPOLY

In the following subsections, two airlines are operating to and from the airport. The question is whether or how the airport is going to adjust its pricing policy. As the flight volume is a key parameter in determining the landing fee it is necessary to analyse how the two airlines will interact. In this subsection the two airlines are assumed to compete in Cournot fashion. Both airlines offer a homogeneous good and have a similar cost structure. Each airline considers the flight volume of its competitor as fixed and both airlines decide simultaneously how many flights to offer. In order to examine the interaction between the two airlines an appropriate model needs to be introduced.

BRUECKNER & VAN DENDER (2008) examine how airlines behave on congested airports. Compared to road traffic, airline operators may internalise some of the congestion cost since every flight not only imposes delay cost on flights by competing carriers but also on other flights of the same carrier. The extent of internalisation may vary depending on the players on the market and their interaction. Tolls are then needed in order to reach a socially efficient level of congestion. Therefore the authors assemble a model to describe an airport which serves two airlines which compete in Cournot fashion and Stackelberg fashion as well as a case where one airline is a Stackelberg leader and the follower is considered to be a group of airlines competing in Cournot fashion. These insights are incorporated in our model.

Two airlines operate to and from the airport in question. The flight volume of airline 1 is denoted with Q_1 and Q_2 is the flight volume of carrier 2. Passengers are willing to pay a full fixed price ϕ which includes the airline fare and the delay costs passengers incur. These costs per passenger due to extra time spent in congestion is denoted by $t(Q_1+Q_2)$. Delays cause extra time cost for airlines as well, namely $g(Q_1+Q_2)$ per flight. Congestion is determined by the total flight volume Q_1+Q_2 and therefore both functions (t and g) function are subject to the total flight volume. The combined delay cost per flight of passengers and airlines are united as $M(Q_1+Q_2)$. The following properties apply:

$$M' > 0$$

$$M'' \geq 0$$

Thus, increasing traffic will increase delay cost and the effect is possibly more pronounced when the flight volume increases even further.

The profits of airline 1 are marked by π_1 and the profits of carrier 2 by π_2 . The seat capacity per aircraft is denoted with s and the operating cost with τ . For simplicity the authors assume that every aircraft operating to and from the airport in question bear an identical seat capacity and identical operating cost. The two airlines negotiate simultaneously and separately with the airport. The airport will consider its current capacity and the flight volume of each airline when negotiating with each of them. The landing fee for airline 1 is

consequently not only determined by its own flight volume Q_1 and the capacity of the airport but also by the flight volume Q_2 of its competitor. $P_1(Q_1, Q_2, K)$ is then the landing fee paid by airline 1 and $P_2(Q_1, Q_2, K)$ the airport charge paid by carrier 2. It is crucial to note, however, that the landing fee is not determined by the total flight volume but both flight volumes separately. These characteristics will have an effect if the flight volumes of the two airlines differ. The profit function of airline 1 takes the following form:

$$\pi_1 = \varphi s Q_1 - M(Q_1 + Q_2) Q_1 - \tau s Q_1 - P_1(Q_1, Q_2, K) Q_1 \quad (15)$$

Differentiating (15) with respect to the own flight volume Q_1 yields:

$$\frac{\partial \pi_1}{\partial Q_1} = \varphi s - [M' Q_1 + M(\cdot)] - \tau s - \left[\frac{\partial P_1}{\partial Q_1} Q_1 + P_1(\cdot) \right] = 0 \quad (16)$$

This first order condition can then be transposed to deliver the pricing principle of airline 1.

$$\varphi_{1Cournot} = \tau + \frac{M' Q_1 + M(\cdot) + \frac{\partial P_1}{\partial Q_1} + P_1(\cdot)}{s} \quad (17)$$

Carrier 2 follows an analogous condition.

Both airlines seem to internalise the delay cost they impose on themselves and both airlines appear to take into account how their output decision will affect their own airport charge but neither considers how their actions will affect the competitor's delay cost nor the level of the landing fee. The flight volume is indefinable but as stated in the setup both act simultaneously, both incur identical cost and both offer a homogeneous good. Under these conditions the outcome is a symmetric equilibrium. Both set identical airline fares, both offer the same number of flights and therefore both will operate 50% of the total flight volume.

As stated earlier the main factor the airlines will highlight in their negotiations with the airport to determine the landing fee is their flight volume. If both, carrier 1 and 2, offer the same number of flights, neither of the two will have an advantage during the negotiations. The airport will treat both equally as both will have an equal flight volume. They will pay identical landing fees and consequently the landing fee is not determined by the two flight volumes separately but by the total flight volume. Furthermore, an increase or reduction in either of the two flight volumes is going to have the same effect on the price of both airlines regardless which airline made the alteration in their number of flights.

The profit function of the airport is as follows:

$$\pi_{AP} = P(Q_1 + Q_2, K)(Q_1 + Q_2) + (Q_1 + Q_2)[uX(u) - c(X(u))] - Kr - C(Q_1 + Q_2) \quad (18)$$

In the case of the price for concession profits and the capacity, the airport is not going to distinguish between the two flight volumes but only considers the total number of flights simplifying the profit function to:

$$\pi_{AP} = P(Q_1 + Q_2, K)(Q_1 + Q_2) + (Q)[uX(u) - c(X(u))] - Kr - C(Q)$$

Differentiating π_{AP} with respect to the flight volume of airline 1, the price for concession services u and the capacity K derives:

$$\frac{\partial \pi_{AP}}{\partial Q_1} = \frac{\partial P}{\partial Q} Q_1 + P(\cdot) + R - C' = 0$$

$$\frac{\partial \pi_{AP}}{\partial u} = QuX' + QX - Qc'X' = 0$$

$$\frac{\partial \pi_{AP}}{\partial K} = \frac{\partial P}{\partial K} Q - r = 0$$

Differentiating the profits with respect to the flight volume of carrier 2 yields an analogous condition.

The first order conditions lead to the following pricing principles:

$$P_{1Cournot}(\cdot) = C' - R - \frac{\partial P}{\partial Q} Q_1 \quad (19)$$

$$u_{Cournot} = c' + \left(\frac{X}{-X'} \right) \quad (20)$$

$$r_{Cournot} = \frac{\partial P}{\partial K} Q \quad (21)$$

The subscript *Cournot* is added to indicate that the above pricing principles derive from an airport serving two airlines which compete in Cournot fashion and the subscript 1 marks the landing fee to be the one for airline 1.

The landing fee (19) for airline 1 and an analogous for carrier 2 is similar to the one derived in the previous case with one single airline. The airport sets its prices at the level of the marginal cost of one additional flight less the concession profits and grants a discount. This discount, however, seems to be reduced by 50%. The discount in the landing fee in the previous case (11) is conditional to the total flight volume Q . In this case (19) the discount is conditional to the flight volume of only one of the two airlines. As both operate half of

the total flight volume the pricing principle can be simplified to accommodate either of the two.

$$P_{Cournot}(\cdot) = C' - R - \frac{\partial P}{\partial Q} \frac{1}{2} Q$$

Both airlines are priced according to the above principle. The question remains whether the airlines are still able to exert any kind of buying power. Shifting the last term to the left hand side and introducing the supply elasticity η as in the monopsony case (14) does not seem as manageable in this case. Opposed to the monopsony case (14) where η denoted the elasticity of supply for aeronautical services with respect to the total flight volume, the supply elasticity in this case would only be with respect to 50% of the total flight volume. Controlling only the other half of the number of flights will definitely limit the market power each airline can impose on the airport, possibly even more than 50%. Furthermore, the fact that two airlines operate to and from the airport in question could imply that due to competition the total flight volume is higher than in the previous case with only one airline. A monopsonist keeps the quantity it buys artificially low in order to exploit its market power. As soon as there are two airlines, monopsony power will be limited to a certain extent and the incentive to keep the purchased number of goods artificially low will decrease. As stated earlier the flight level is indefinable but just as the output of a monopoly is generally considered to be lower as of a duopoly competing in Cournot fashion, the number of goods purchased by a monopsonist is likely to be lower than the number purchased by an oligopsony. This could also contribute to reduced market power of the two airlines. Still, each of them operates half of the total flight volume after all which will likely ensure that at least limited buying power remains and the discount will not vanish completely.

The price for concession services (20) remains unchanged. This appears to be reasonable as it allows the airport to lower the landing fee as much as possible. The capacity decision (21) is unaltered as well. The airport still keeps capacity at a level where the cost of capital r equates to the increase in landing fees originating from the last carried out expansion of capacity.

Next to the above symmetric equilibrium outcome the airport might allow only one airline to utilise its runways and terminals. The airport could offer one of the two airlines an exclusive contract. The situation is comparable to the upstream and downstream merger discussed in HART & TIROLE (1990) as the contract would effectively resemble a vertical merger. The airport and for instance airline 1 would agree on an exclusive contract preventing carrier 2 from flying to and from the airport in question. The collaboration between the airport and airline 1 could go as far as a profit-sharing scheme. According to HART & TIROLE (1990) the two together could skim high profits due to double marginalisation and remove conflicts of interest over pricing principles. The downside, however, might be lower incentives to improve efficiency on behalf of the subordinate unit. Additionally, it is questionable, whether such an exclusive contract is going to be even approved by competition authorities or if an airport would be in the position to pursue such

an approach since in this paper not the airport but the airlines are expected to have market power. Nevertheless vertical mergers or acquisitions are not entirely theoretical as according to MILMO (2012) Ryanair has stated its interest in buying London Stansted from BAA.

3.3 STACKELBERG-DUOPOLY

Opposed to the previous subsection where the airlines decided simultaneously on their flight volume, this subsection discusses a Stackelberg-duopoly where one airline acts first and the other will respond in the next season.

Again the model by BRUECKNER & VAN DENDER (2008) is used in altered form to investigate the behaviour of the two airlines. Airline 1 is the Stackelberg leader and carrier 2 the follower. The follower will consider the output of the leader as parametric and will choose a suitable flight volume to maximise its own profit in response. Therefore, the profit function of carrier 2 is differentiated with respect to Q_2 .

$$\begin{aligned}\pi_2 &= \varphi s Q_2 - M(Q_1 + Q_2)Q_2 - \tau s Q_2 - P_2(Q_1, Q_2, K)Q_2 \\ \frac{\partial \pi_2}{\partial Q_2} &= \varphi s - [M'Q_2 + M(\cdot)] - \tau s - \left[\frac{\partial P_2}{\partial Q_2} Q_2 + P_2(\cdot) \right] = 0\end{aligned}\quad (22)$$

It is important to keep in mind that the landing fee of either airline is no longer determined by the total flight volume. In a Stackelberg duopoly the leader is expected to produce more than the follower. The outcome is thereby not symmetric and therefore the airport will not treat the two airlines equally in the negotiations to determine the landing fee. Both flight volumes will still have an impact on the landing fee either of the two airlines will pay but due to the inequality the function determining the landing fee will transform to $P_1(Q_1, Q_2, K)$ for airline 1 and $P_2(Q_1, Q_2, K)$ for carrier 2.

Next the first order condition (22) is totally differentiated yielding the following:

$$\frac{\partial Q_2}{\partial Q_1} = - \frac{M' + M''Q_2 + \frac{\partial^2 P_2}{\partial Q_2 \partial Q_1} Q_2 + \frac{\partial P_2}{\partial Q_1}}{2M' + M''Q_2 + \frac{\partial^2 P_2}{\partial Q_2^2} Q_2 + 2 \frac{\partial P_2}{\partial Q_2}}\quad (23)$$

The sign of (23) is negative implying that any increase in the flight volume by airline 1 leads to a reduction of flights for carrier 2. In order to determine the lower bound of the offsetting behaviour, the second order derivatives in (23) are set to be zero as implied in assumptions earlier. The extent of the compensation is then at least going to take the following form:

$$\frac{\partial Q_2}{\partial Q_1} = -\frac{M' + \frac{\partial P_2}{\partial Q_1}}{2M' + 2\frac{\partial P_2}{\partial Q_2}} \quad (24)$$

Now the question arises which dimensions $\frac{\partial P_2}{\partial Q_2}$ and $\frac{\partial P_2}{\partial Q_1}$ have. The first term is more comprehensible as it denotes the change in the airport charge of carrier 2 when altering the flight volume of carrier 2. The second, though, indicates the change in the landing fee of carrier 2 when airline 1 chooses to shift its number of flights. Both are positive but while the airport does indeed consider the flight volume of airline 1 when negotiating with carrier 2, the number of flights conducted by carrier 2 will likely play a greater role than the flight volume of its competitor. Though the difference will possibly be relatively small, the following will nevertheless apply:

$$\frac{\partial P_2}{\partial Q_2} > \frac{\partial P_2}{\partial Q_1} \quad (25)$$

The denominator in (24) will thereby be more than twice as large as the numerator. Carrier 2 will then offset any alteration in the flight volume of airline 1 by less than 50% at its minimum and by less than 100% at its maximum where the second order derivatives in (23) are positive and nonzero.

Airline 1 anticipates the offsetting attitude of carrier 2 and will account for it in its own profit calculations as shown below.

$$\pi_1 = \varphi s Q_1 - M[Q_1 + Q_2(Q_1)]Q_1 - \tau s Q_1 - P_1[Q_1, Q_2(Q_1), K]Q_1$$

The above is differentiated with respect to Q_1 .

$$\frac{\partial \pi_1}{\partial Q_1} = \varphi s - M' \left[1 + \frac{\partial Q_2}{\partial Q_1} \right] Q_1 - M(\cdot) - \tau s - \left[\frac{\partial P_1}{\partial Q_1} + \frac{\partial P_1}{\partial Q_1} \frac{\partial Q_2}{\partial Q_1} \right] Q_1 - P_1(\cdot) = 0 \quad (26)$$

Comparing the first order condition (26) with the outcome of the Cournot duopoly (16) airline 1 will internalise even less congestion cost and likewise consider even less what impact its output decision has on airport charges. The extent is determined by $\frac{\partial Q_2}{\partial Q_1}$. The terms which used to restrict the flight volume of airline 1 in the Cournot case are weakened by the offsetting term of carrier 2 as shown below. The right hand side shows the related term in the Cournot case and the left hand side the corresponding term in the Stackelberg case.

$$M' \left[1 + \frac{\partial Q_2}{\partial Q_1} \right] Q_1 < M' Q_1$$

$$\left[\frac{\partial P_1}{\partial Q_1} + \frac{\partial P_1}{\partial Q_1} \frac{\partial Q_2}{\partial Q_1} \right] Q_1 < \frac{\partial P_1}{\partial Q_1} Q_1$$

As already stated $\frac{\partial Q_2}{\partial Q_1}$ is negative and the terms on the left hand side are therefore reduced by less than 50% at the least and less than 100% at the most in comparison to the right hand side. The outcome complies with the intuition that airline 1 will have less incentives to internalise congestion cost and likewise have less interest in keeping landing fees low by restricting its own flight volume as carrier 2 will always offset every attempt made by airline 1 to do so. Monopsony power then seems to decline to some extent as the key factor in utilising market power, the total flight volume, is not controlled by one airline any more. Any change by one airline will always be offset to some extent, but not entirely by the other which will have an impact on the negotiations to determine the landing fee.

The airport is neutral concerning the leader/follower constellation. Which airline operated during the previous season and which enters the market in the current season does not affect its profit calculation.

$$\begin{aligned} \pi_{AP} = P_1(Q_1, Q_2, K)Q_1 + P_2(Q_1, Q_2, K)Q_2 + (Q_1 + Q_2)[uX(u) - c(X(u))] \\ - Kr - C(Q_1 + Q_2) \end{aligned} \quad (27)$$

The two flight volumes Q_1 and Q_2 jointly make up the total flight volume Q . This fact is used when differentiating with respect to the concession prices and the capacity. In case of the concession services and the capacity the airport will not distinguish whether the customers shopping in the transfer area are flying with airline 1 or carrier 2 since this model assumes an equal behaviour of both customer groups. The average demand for concession services per flight is identical for both airlines. The same applies to capacity, since both airlines operate with the same aircraft type and the same seating capacity in the model by BRUECKNER & VAN DENDER (2008). Therefore the airport will only consider the total number of flights when deciding on its capacity. Concerning the landing fee, however, the airport does indeed differentiate between the two flight volumes as in a classic Stackelberg case, the two outputs are different. Unequal flight volumes will inevitably influence negotiations on landing fees and they will likely grant an advantage for the customer with the higher output, namely airline 1. The above factors influence the airport's pricing behaviour yielding a different profit function than in the Cournot case (18).

$$\pi_{AP} = P_1(Q_1, Q_2, K)Q_1 + P_2(Q_1, Q_2, K)Q_2 + (Q)[uX(u) - c(X(u))] - Kr - C(Q)$$

Differentiating with respect to the flight volume of airline 1, the price for concession services and the capacity derives the following three conditions:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \pi_{AP}}{\partial Q_1} &= \frac{\partial P_1}{\partial Q_1} Q_1 + P_1(\cdot) + \frac{\partial P_2}{\partial Q_1} Q_2 + R - C' = 0 \\ \frac{\partial \pi_{AP}}{\partial u} &= QuX' + QX - Qc'X' = 0 \end{aligned}$$

$$\frac{\partial \pi_{AP}}{\partial K} = \frac{\partial P}{\partial K} Q - r = 0$$

The prices for aeronautical services and concession services as well as the capacity decision then are given by the following equations:

$$P_{1Stackelberg}(\cdot) = C' - R - \frac{\partial P_1}{\partial Q_1} Q_1 - \frac{\partial P_2}{\partial Q_1} Q_2 \quad (28)$$

$$u_{Stackelberg} = c' + \left(\frac{X}{-X'} \right)$$

$$r_{Stackelberg} = \frac{\partial P}{\partial K} Q$$

The subscript *Stackelberg* indicates that the above pricing principles are derived from an airport which serves two airlines competing in Stackelberg fashion and the subscript 1 marks the landing fee to be the one for airline 1. Carrier 2 follows an analogous condition.

While the price for concession services and the capacity decision remain unchanged compared to the monopsony and the Cournot case the landing fee (28) bears two alleviating terms instead of one. The discount granted to airline 1 does not only concern its own flight volume and landing fee but the one of the competitor as well. Next to the alleviation of the price conditional to its own flight volume, the airport rewards airline 1 for its effect on the landing fee of carrier 2. As the airport charge increases with the number of flights, an increase in Q_l would not only increase the price for aeronautical services for airline 1 but also the one for carrier 2. This correlation leads the airport to grant this discount as well and therefore gives an incentive to increase the number of flights.

Assuming the airport is aware of the compensating behaviour between the airlines it will probably reduce the extent of the discount even further. As any alteration in the flight volume by one airline is offset by less than 50% at the least and less than 100% at the most by the other carrier the airlines will lose negotiating power. Their possibilities to influence the level of the airport charge through their output decisions seem to be limited even further. In the Cournot case the market power of the two airlines was believed to be smaller than in the standard monopsony case due to the increased output. In the Stackelberg case - next to the higher output than in the pure monopsony case - the offsetting behaviour is assumed to be known to the airport and likely strips the airlines of their negotiating power even further.

Then again, airline 1 might try to signal carrier 2 to cooperate with it through quantity leadership. Similar to price leadership where one company announces a rise in its prices and hopes the other companies will follow accordingly, airline 1 would announce a reduction in its flight volume and hope that carrier 2 would understand the invitation to jointly exert bying power through lower output. Whether carrier 2 will lower its flight volume as well would vary from case to case. If lower expenditures due to lower landing

fees generate higher profits than increased ticket sales, due to the offsetting behaviour described above and an appropriately increasing market share, carrier 2 will act in a similar fashion to airline 1. If the opposite applies, carrier 2 will not participate in the attempt of airline 1.

A third possible outcome is airline 1 negotiating a long term contract with the airport in order to protect its benefits even if another carrier enters the market at the given airport. In such a case airline 1 will have to consider whether the obligations from a long term contract are too risky or whether the price stability alleviates that threat.

3.4 STACKELBERG OLIGOPOLY WITH A COMPETITIVE FRINGE

Finally, the above Stackelberg case is altered to accommodate more than only two airlines. Similar to the original model by BRUECKNER & VAN DENDER (2008) airline 1 remains the Stackelberg leader but carrier 2 is now considered to act competitively. This appears to be plausible if carrier 2 is considered to be a group of many airlines operating to and from the given airport. The flight volume at the given airport of each of the airlines in carrier-group 2 is very small. The airline companies themselves operating the flights, however, need not be small in size. Only their share of the total number of flights at the discussed airport remains very limited. Thus, a fringe airline of carrier-group 2 could be a small charter airline, a large flag carrier that operates only few flights to and from the hub of airline 1 or anything between those two.

Due to the atomistic behaviour and the small flight volume of each airline in carrier-group 2, none of them can negotiate with the airport on landing fees and therefore consider the airport charge to be parametric. The delay costs are also seen as parametric since no airline in carrier-group 2 can influence the level of congestion. The profit function then takes the following form:

$$\begin{aligned}\pi_2 &= \varphi s Q_2 - M Q_2 - \tau s Q_2 - P_2 Q_2 \\ \pi_2 &= [\varphi s - M - \tau s - P_2] Q_2\end{aligned}$$

Considering the landing fee P_2 and the delay cost due to congestion M as parametric, the above profit function for each of the airlines in carrier-group 2 is proportional to Q_2 with the proportionality factor equal to $\varphi s - M - \tau s - P_2$. The proportionality factor must satisfy the following condition:

$$\varphi s - M - \tau s - P_2 = 0$$

A positive proportionality factor would imply infinite profits if the carrier increased its number of flights infinitely. A negative factor would then in contrast generate losses for carrier 2 independent from the flight volume which would lead carrier 2 to stop flying to the airport in question. Therefore, the proportionality factor must be zero which implies zero profits for each airline in carrier-group 2.

Although the landing fee P_2 is considered to be parametric by each airline of carrier group 2, the airport charge is still determined by the flight volume Q_2 . Single airline activity within carrier 2 cannot have an impact on the level of congestion or the landing fee but the collective behaviour of the airlines does indeed have one. The price for aeronautical services and the cost of delay are then no longer parametric. The proportionality factor can then be totally differentiated in order to obtain a behavioural pattern how carrier 2 should react to changes in the flight volume of airline 1.

$$\frac{\partial Q_2}{\partial Q_1} = - \frac{M' + \frac{\partial P_2}{\partial Q_1}}{M' + \frac{\partial P_2}{\partial Q_2}} \quad (29)$$

Bearing in mind that its own output has a stronger impact on its own landing fee than the output of the competitor as stated in the previous chapter (25), the denominator in the above fraction (29) is then only slightly greater than the numerator. This implies that any shift in the flight volume by airline 1 is nearly completely offset by the airlines within carrier 2. Due to this behaviour airline 1 has no substantial possibility to exert any kind of bying power as any attempt to do so in terms of decreasing the number of flights is countervailed by carrier 2. This is probably going to remove any remaining incentive to restrain the flight volume on the part of airline 1 and forces it to behave in an atomistic manner as well. The diminishing interest of airline 1 to control its flight volume can be shown in its profit calculation.

$$\pi_1 = \varphi s Q_1 - M[Q_1 + Q_2(Q_1)]Q_1 - \tau s Q_1 - P_1[Q_1, Q_2(Q_1), K]Q_1$$

Differentiating the above profit function with respect to the flight volume Q_1 yields the following condition:

$$\frac{\partial \pi_1}{\partial Q_1} = \varphi s - M' \left[1 + \frac{\partial Q_2}{\partial Q_1} \right] Q_1 - M(\cdot) - \tau s - \left[\frac{\partial P_1}{\partial Q_1} + \frac{\partial P_1}{\partial Q_1} \frac{\partial Q_2}{\partial Q_1} \right] Q_1 - P_1(\cdot) = 0$$

Both terms, which used to restrict the flight volume of airline 1 in the Cournot case (16) will now almost completely disappear. Bearing in mind that $\frac{\partial Q_2}{\partial Q_1}$ is in fact nearly -1 the two terms in the square brackets are close to zero and will therefore alleviate the incentive to restrict the flight volume by airline 1 accordingly.

The airport, however, is not going to change its approach from the previous subsection. It is neutral concerning the leader/follower constellation. The profit function will still be (27).

$$\begin{aligned} \pi_{AP} = & P_1(Q_1, Q_2, K)Q_1 + P_2(Q_1, Q_2, K)Q_2 + (Q_1 + Q_2)[uX(u) - c(X(u))] \\ & -Kr - C(Q_1 + Q_2) \end{aligned}$$

The airport will again only distinguish between the two flight volumes in the case of the price for aeronautical services as discussed earlier. When determining the price for

concession services and the capacity it considers the total flight volume $Q = Q_1 + Q_2$. The profit function is differentiated with respect to the output of airline 1, the price for concession services and the cost of capital and naturally the first order conditions resemble the ones in the previous subsection.

$$\frac{\partial \pi_{AP}}{\partial Q_1} = \frac{\partial P_1}{\partial Q_1} Q_1 + P_1(\cdot) + \frac{\partial P_2}{\partial Q_1} Q_2 + R - C' = 0$$

$$\frac{\partial \pi_{AP}}{\partial u} = QuX' + QX - Qc'X' = 0$$

$$\frac{\partial \pi_{AP}}{\partial K} = \frac{\partial P}{\partial K} Q - r = 0$$

The price for concession services and the capacity decision of the airport will not change in spite of the different market situation.

$$u_{atomistic} = c' + \left(\frac{X}{-X'} \right)$$

$$r_{atomistic} = \frac{\partial P}{\partial K} Q$$

The subscript *atomistic* denotes that these pricing principles are derived from the case where the airlines behave in atomistic manner. The airport still sets the prices for concession operations at the profit maximising level and the capacity should still reach the level where the cost of capital is equal to the additional revenue gained from the last expansion in capacity.

The price for aeronautical services also is the same as in the standard Stackelberg case. As both airline 1 and carrier 2 act equally, both will pay an airport charge according to the pricing principle below.

$$P_{1atomistic}(\cdot) = C' - R - \frac{\partial P_1}{\partial Q_1} Q_1 - \frac{\partial P_2}{\partial Q_1} Q_2$$

The landing fee, however, will probably be higher for both than in the standard Stackelberg case. On the one hand the number of flights is going to be higher as both disregard their output's influence on congestion and prices for aeronautical services. On the other hand due to the atomistic and the almost fully offsetting behaviour the airport may not grant any or only a very limited discount. If any variation in the flight volume of one airline will be compensated nearly entirely by the other(s), then the influence the shift previously had on the prices is going to be zero or very close to that. In the extreme case of the discount being zero, the following is going to apply:

$$\frac{\partial P_1}{\partial Q_1}, \frac{\partial P_2}{\partial Q_1} = 0$$

Regardless of the airline company the landing fee would then take the form of:

$$P_{atomistic}(\cdot) = C' - R$$

No monopsony power can be exerted as the main tool - the output - is not controllable by any airline operating to and from the given airport.

This model then shows that the landing fee seems to rise when the number of airline companies flying to and from the airport in question increases. This, however, strongly depends on the market constellation. In BASSO & ZHANG (2007) the authors set up a model with two airports competing with each other over the same airlines and passengers meaning the airlines could consider an outside option. They find that the entry of a new airline to any of the two airports pushes the landing fee down at both of them. In contrast to this paper, however, the number of airlines in BASSO & ZHANG (2007) is set to be exogenous and the carriers are not considered to have any monopsony power. In the case of maximising social welfare, however, a markdown term in the landing fee is present in order to subsidise the monopolistic or oligopolistic airline companies and to countervail thereby the exploitation of their market power. With an atomistic structure the markdown term becomes zero. The outcome in the social optimum in BASSO & ZHANG (2007) are similar to the one presented in this paper. The motive behind the markdown term, however, differs considerably. In this paper the airport is compelled to enter into negotiations to lower the landing fee due to the airlines' monopsony power whereas the partly similar outcome in BASSO & ZHANG (2007) originates from the central planners aim to maximise social welfare.

Although monopsony power in the fourth case seems decrease significantly, some market power might still be left due to other circumstances. Regardless of the its atomistic behaviour airline 1 still operates most of the flights as in this model it is assumed that according to a standard Stackelberg case the output of the leader is greater than the one of the follower. This constellation would allow the assumption that the airport in question is the hub airport for airline 1. This airport then serves the passengers of airline 1 as one of the main transfer point from one flight to the other. Previously the per flight demand for concession services was considered to be equal for all flights regardless of the airline company. This assumption might be thwarted by figures presented by GRAHAM (2009, p. 107), where the share of commercial revenues in total revenue is over 50% at airports with a high number of transfer passengers such as London Heathrow. At airports not serving as a transfer hub (such as Salzburg) the share is hardly over 20%. This implies that transfer passengers spend much more for commercial services than passengers who start or finish their journey at the airport in question. This would again imply that some negotiating power might be left on part of the home carrier. Examining official terms and conditions of airports suggest that such correlations are indeed considered. According to FINAVIA (2012, p. 14) airlines do not have to pay charges for passengers who transfer from domestic flights to international flights and vice versa at Helsinki airport. The main profiteer is the Finnish flag carrier Finnair and its partner for domestic flights Flybe. Discounts for transfer passengers are, however, comprehensible owing to the passengers not having to go through baggage claim and check in procedures and therefore causing less expenses for the airport.

A similar condition can be found in Vienna in the terms and conditions of FLUGHAFEN WIEN AG, (2012, p. 7). If the airline operates many flights to and from Eastern Europe the airport grants a discount of up to 40%. In addition, flights to long haul destinations pay up to 50% less according to the frequency. Both discounts are especially advantageous for Austrian Airlines, whose target markets are the long haul services from and to Vienna as well the Eastern European market.

Hence, inspite of losing monopsony power the home carrier might after all retain some market power even if it is by far not the only one operating at the given airport. Market power due to home carrier status is, however, not described in this model but seem to be worthwhile studying. Next to discounts based on transfer passengers and destination choices the position of a home carrier might emerge advantageous in questions of gate vs. ground arrivals, dedicated terminals and check-in facilities, grandfather-rights to slots and long term contracts with the airport.

4 Effects of Common Forms of Airport Regulation

In this section the effects imposed by common forms of airport regulation on an airport serving one airline are considered. Again, the approach is generally equal to the one discussed in OUM ET AL. (2004). The authors, however, consider the airport to have market power. Therefore, after reviewing briefly the effects of regulation on an airport with market power, the regulatory effects on an airport without market power are discussed. Market power shifts from the airport to the airline flying to and from the airport in question as discussed in section 3.1. Rate-of-return or RoR regulation is discussed first followed by the consideration of a price-cap regulation.

4.1 RATE-OF-RETURN REGULATION

Under single-till rate-of-return regulation the airport with market power is pushed to set its landing fee at a level where costs from both aeronautical and concession operations are covered including return on invested capital. The regulator sets an allowed rate of return s and the airport should then set its airport charges in order to satisfy the following condition:

$$P(Q, K)Q - C(Q) + QR = Ks$$

The aim of the airport is still to maximise profits but it has to operate under the above restriction.

$$\max_{P, u, K} P(Q, K)Q - C(Q) - Kr + QR$$

$$s. t. P(Q, K)Q - C(Q) + QR = Ks$$

The issues connected with RoR regulation are generally well known and do not remain unmentioned in OUM ET AL. (2004). The first difficulties already appear when the regulator should define what to determine as capacity K and particularly the current value of the used

capital. Whether regulation is based on the market value or the acquisition cost less depreciation, will yield different basic figures. Second, assessing the level of the allowed rate of return s is ultimately a decision made by authorities or politicians and therefore bears the corresponding challenges. Third, the regulator has to determine quite precisely which expenditures can be detracted from the profits and which cannot. If for instance expenses for advertising would be allowable, the airport could then start a campaign against regulation and use the generated cost to declare it has higher expenditures and could then set higher prices for aeronautical services. Fourth, in the event of the allowed rate of return s being greater or equal to the actual cost of capital r , the airport would have an incentive to oversize its investments in capital which leads to a productive inefficiency, i.e. “gold plating”. This overinvestment is commonly referred to as the A-J effect or A-J distortion referring to the authors of AVERCH & JOHNSON (1962). The RoR regulation in essence is then cost-based and a regulated airport with market power would not gain anything from cost reductions. Any incentive to improve productive efficiency is therefore lost.

The above mentioned issues, however, might not apply to an airport without market power serving only one airline with monopsony power. The difficulties in determining K and s remain regardless of any market situation, but the A-J distortion and the problems related to the question which expenses can be detracted from the profits seem to be alleviated. Since an airport serving one monopsonistic airline has an incentive to keep the landing fee as low as possible, it will most likely ensure as efficient services as possible and will not allow any unnecessary expenses as for counter-regulation campaigns to occur. Further, the authors OUM ET AL. (2004, p. 228) highlight, that the Averch-Johnson effect is only present if the allowed rate of return is greater or equal to the actual cost of capital. The given airport discussed in this paper, however, has an incentive to keep the landing fee as low as possible due to the market situation. It will most likely not make excessive investments in capital since it would only push the price for aeronautical services which would be counterproductive.

The resemblance of RoR regulation to the discussed market situation seem to be notably present when considering dual-till RoR regulation which applies only to the aeronautical sector whereas the concession services remain unregulated. Therefore the regulatory constraint takes the following form:

$$P(Q, K)Q - C(Q) = Ks$$

In OUM ET AL. (2004) the authors suppose that the allowed rate of return s is set to be equal to the actual cost of capital r . The airport then aims to fulfill the following:

$$\begin{aligned} \max_{P, u, K} & Q[uX(u) - c(X(u))] \\ \text{s. t. } & P(Q, K)Q - C(Q) = Kr \end{aligned}$$

The concession services are not a part of the restriction anymore, on the contrary, the airport sets to maximise its profits in the concessions sector. The airport will therefore look into ways to maximise the flight volume as more flights deliver more customers for

concession services. The only way the airport can influence the flight volume is by adjusting the landing fee. It will then keep the price for aeronautical services as low as possible and set monopolistic prices in concession services.

This behaviour out of RoR regulation seems to coincide with the behaviour of an airport with only one airline as a customer. Using its monopsony power the airline forces the airport to keep the airport charge as low as possible. The airport, meanwhile, sets monopolistic prices for concession services in order to maximise profits generated by those services. The profits are then used to lower the landing fee further. The resemblance between the dual-till RoR regulation and the first monopsony case discussed in this paper can be shown if the above objective from a regulated airport is further assessed.

$$L = Q[uX - c(X)] - \mu[P(Q, K)Q - C(Q) - Kr]$$

Differentiating the Lagrangean function with respect to the flight volume, price for concession services and capacity yield the following first order conditions:

$$\frac{\partial L}{\partial Q} = [uX - c(X)] - \mu \left[\frac{\partial P}{\partial Q} Q + P(\cdot) - C' \right] = 0$$

$$\frac{\partial L}{\partial u} = QuX' + QX - Qc'X' = 0$$

$$\frac{\partial L}{\partial K} = -\mu \frac{\partial P}{\partial K} Q + \mu r = 0$$

which lead to the corresponding pricing principles:

$$P_{RoR}(\cdot) = C' + \frac{R}{\mu} - \frac{\partial P}{\partial Q} Q \quad (30)$$

$$u_{RoR} = c' + \left(\frac{X}{-X'} \right) \quad (31)$$

$$r_{RoR} = \frac{\partial P}{\partial K} Q \quad (32)$$

The subscript *RoR* is to identify the pricing principle to be the one of an airport under rate-of-return regulation.

Both the price for concession services (31) and the capacity choice (32) are equal to the ones an airport would set or choose respectively if serving only one airline with market power, (12) and (13) respectively. The airport charge (30), however, includes the Lagrangean multiplier μ . Should the multiplier or the shadow price of the restriction be -1 , the landing fee (30) would be identical with monopsony result (11).

While the RoR regulation is cost based and a regulated airport would lose incentives to improve productive efficiency, monopsony power on the part of the airline would alleviate the distortion brought upon the regulation. In order to save the cost of regulation, it therefore would seem to be necessary to re-evaluate the necessity of RoR regulation on an airport which serves only one airline. It is, however, important to note, that monopsony power does not generate a socially efficient outcome. The flight volume and the airport charge for aeronautical services seem to be inefficiently low. The extent of the inefficiency depends primarily on the elasticity of supply of the airport. In order to alleviate the inefficiency, RoR regulation does not seem to be suitable.

4.2 PRICE-CAP REGULATION

The second form of regulation discussed in OUM ET AL. (2004) is the price cap. The regulator sets a specified price cap P^* which cannot be exceeded by the airport. The price cap is not static as it will be adjusted periodically depending on retail price index and how the airport is expected to improve efficiency in the forthcoming period. The regulator sets the price cap in light of the previously mentioned factors so that the expected profits would yield a fair rate of return on invested capital. Should the airport be able to outperform the expected efficiency level, then it will be able to keep any gains out of it which ensures the incentive for the airport to improve productive efficiency.

Under single-till price-cap regulation the pricing principle for aeronautical services then follows the rule:

$$P_{PC} = E \left\{ \frac{C(Q) + Kr}{Q} \right\} - R$$

where subscript PC indicates price-cap regulation.

Under single-till regulation total revenues airport including both aeronautical and concession services is expected to reach break-even. The incentive to improve efficiency, however, is preserved as the airport is allowed to keep any extra profits due to increased efficiency. Further, the landing fee is reduced by the concession profits meaning the airlines are charged below cost. This seems like a cross-subsidy from the viewpoint of airport operations. In OUM ET AL. (2004) the authors, however, point out that the concession services are mainly extracted from passengers meaning the cross-subsidy is rather a transfer from passengers to airlines. One of the assumptions in OUM ET AL. (2004) is that airlines will adjust airline fares accordingly to changes of landing fees. Therefore the transfer will not have negative welfare impact.

The dual-till price-cap regulation considers only the aeronautical services. Hence the pricing principle for the landing fee then reduces to:

$$P_{PC} = E \left\{ \frac{C(Q) + Kr}{Q} \right\}$$

The profits from concession services are not used to lower the landing fee. The airport charge under dual till is then higher than under single-till regulation. The extent of the increase is the amount of the concession profits resulting in a less restrictive price cap. It is, however, important to stress the fact, that the airport still has an incentive to increase productive efficiency as it is allowed to keep any profits generated by higher efficiency.

The price-cap regulation, though, also has its weaknesses as shown in OUM ET AL. (2004). While the RoR regulation was found to lead airports to over-invest in capacity the price-cap regulation leads to underinvestment. In contrast to the welfare-maximising (3) and profit-maximising airport (7) capacity is not chosen at its efficient level as shown by the authors.

$$-Q \frac{\partial D}{\partial K} > r$$

The shadow value of capacity seems to be larger than the cost of capital which leads the authors to conclude that the airport under-invests in capacity. Investments into capacity, e.g. new parking positions for aircraft, will lower congestion. Passengers will have to bear lower delay cost and their willingness to pay for air travel will increase. The airport with market power would then increase its landing fee in order to skim the higher willingness to pay, internalising the benefit out of a higher capacity. If, however, the airport is price cap regulated, then it cannot raise prices for aeronautical services and therefore cannot fully exploit the benefit from the reduction in congestion. It has therefore less incentives to invest into capacity and will set a socially inefficient level of capacity.

As shown above, the price cap under single-till is lower than under dual-till due to the inclusion of the concession profits. The dual-till price cap is therefore less restrictive which allows the authors to draw the conclusion that the problem with under-investment is less pronounced under dual-till regulation. Still, any binding price cap is going to influence the airport's capacity decision in a socially undesirable way.

Whether the price-cap regulation has an effect on an airport without market power and whether the given airport will under-invest into capacity is questionable. The aim of the price cap is to lower too high landing fees in order to increase the number of flights to a socially more efficient level. If, however, the airport serves one airline with monopsony power, the prices are most likely already low and the low flight volume originates from monopsony power on the part of the airline rather than from too high landing fees. The airport in question has already the incentive to keep the landing fee as low as possible due to the market situation. While the monopolistic airport under price-cap regulation is allowed to keep any extra profits from efficiency gains, the airport without market power will likely use those extra profits to lower the landing fee even further. In both cases the two kind of airports retain the incentive to explore any possible efficiency gains but out of a different motivation. The first one can keep the profits, the other will use it to lower the landing fee in order to attract more flights. If the price cap is binding, meaning the airport cannot go below the airport charge set by the regulator, then the airport without market power would still have an incentive to improve productive efficiency as it is able to keep the extra profits. Price-cap regulation then does not seem to have an effect on the behaviour

of the airport in question if the airport is allowed to go below the set price cap. The flight volume, however, will still remain inefficiently low from a social viewpoint due to the monopsony power of the airline regardless of the regulatory framework.

The earlier discussed issue of under-investment due to regulation does not seem to affect an airport without market power. While capacity investments would typically lower delay cost due to congestion it should be questioned whether an airport which serves only one airline will even have to deal with congestion due to a high flight volume. The model by BRUECKNER & VAN DENDER (2008) can be altered to accommodate only one airline.

$$\pi_{AL} = \varphi sQ - M(Q)Q - \tau sQ - P(Q, K)Q$$

The subscript *AL* is to differentiate the above profit function from the airport's profit function. Differentiating the above with respect to the flight volume *Q* yields the following first order condition:

$$\frac{\partial \pi_{AL}}{\partial Q} = \varphi s - [M'Q + M(\cdot)] - \tau s - [P'Q + P(\cdot)]$$

As expected, the airline seems to internalise the delay cost due to congestion. The flight volume on the given airport will therefore likely remain below the capacity limit. Furthermore, a highly congested airport which is only serving one airline appears to be unrealistic as a highly frequented market will probably attract other airline companies as well. When only one airline flies to and from the given airport, the investments on the part of the airport will then likely be limited to increase productive efficiency as it does not seem to need to increase capacity.

Consequently, an airport without market power under price-cap regulation does not seem to have a reason to change its pricing principles and capacity decision compared to the unregulated case. The entry of additional airlines into the market, however, will possibly change this outcome as monopsony power on the part of the first airline gradually decreases depending on the market structure and number of competitors as described in section 3.

Regulators then need to be well aware of the market situation at the airport in question. Next to the market situation at the given airport, however, the market situation at the destination could also influence the airline's output decision. Supposedly the airline plans to fly to ten destinations from the airport in question. Next to evaluating the market situation at the home base the airline has to consider the market situation or slot availability at each of the ten destinations. High level of congestion, market saturation or even monopsony power at the other airports might influence the airline's output decision and distort the behaviour described in this model.

5 Conclusion

This paper studied the pricing principles and capacity decisions generated at an airport where market power has shifted from the airport to the airlines. Consequently, and in

contrast to current research, airlines were given the power to compel the airport to enter into negotiations concerning the prices for aeronautical services. The airport's pricing principles were found to change according to the market situation.

As shown in OUM ET AL. (2004) a profit maximising airport with monopoly power will set higher prices than socially desirable according to the elasticity of demand for air travel. Altering the given model by OUM ET AL. (2004) to accommodate monopsony power on the part of the airlines shows how the airport adjusts its behaviour according to the market situation. If only one airline operates the airport, it is granted a discount according to the airport's elasticity of supply and the airline will exert its monopsony power by operating a correspondingly low number of flights. Monopsony power will weaken as soon as other airline companies start to fly to and from the airport in question. In symmetric Cournot competition the calculative discount is cut by half and the flight volume rises. In case of Stackelberg competition, the leader will offer more flights than the follower. The follower, however, will offset any change in the leader's flight volume by less than 50% at the least and below 100% at the most. This limits airline buying power further.

The remaining market power on part of the airlines seems to fade if the number of airlines is increased further. Considering the Stackelberg follower as a group of airlines will force this group to view the landing fee as parametric as the fragmented market structure does not allow them to bargain on the landing fee. Furthermore, any alteration of the leader's flight volume will be compensated by the follower by nearly 100%. This behaviour on the part of the follower forces the leader to act similarly. To exercise monopsony power by adjusting the flight volume is then impossible as one airline will always offset the reduction of another one. The leader, however, still operates the majority of the flights. It can be considered to be the home carrier and therefore other means of influence to the airport charge are likely.

Common regulatory options were also studied in this paper. The rate-of-return regulation and price-cap regulation in both single-till and dual-till layouts were reviewed and their impact on the pricing principles of the airport was considered. Both forms of regulation are geared towards lowering too high prices set by monopolistic airports. An airport with no market power serving a monopsonistic airline, however, has no incentive to set too high prices. Due to the airline's monopsony power the airport will use any efficiency gains to lower the landing fee even further in order to attract more flights. With decreasing monopsony power this incentive might be weakened. Regulators then should examine carefully whether any form of regulation is needed as potentially non-essential regulation would burden society. The slightest alteration in the structure of the market, however, might possibly necessitate the introduction of regulatory undertakings. Another factor to influence the airline's output decision could be the market situation or the availability of slots at the destinations operated from the given airport. Considering this, dual approach might result in an interesting area for future research.

References

- Averch, H., and Johnson, L. L. (1962). Behavior of the Firm Under Regulatory Constraint, *The American Economic Review*, 52 (5), 1052-1069.
- Bain, S. (2012): Ryanair warns Edinburgh Airport over landing fees, 21st May 2012, *The Herald*, Glasgow, Scotland, UK.
- Basso, L., and Zhang, A. (2007). Congestible Facility Rivalry in Vertical Structures, *Journal of Urban Economics*, 61 (1), 218-237.
- Brueckner, J., and Van Dender, K. (2008). Atomistic congestion tolls at concentrated airports? Seeking a unified view in the internalization debate, *Journal of Urban Economics*, 64 (2), 288-295.
- Button, K. (2010). Countervailing Power to Airport Monopolies. In P. Forsyth, D. Gillen, J. Müller, & H.-M. Niemeier, *Airport Competition: The European Experience*. Farnham, England: Ashgate Publishing Limited.
- Finavia. (2012). Terms of Service. General terms of airport and air navigation services for air carriers and other aircraft operators including air traffic charges. Vantaa, Finland.
- Flughafen Wien AG. (2012). Tariff Regulations of Vienna International Airport. Vienna.
- Graham, A. (2008). How important are commercial revenues to today's airports, *Journal of Air Transport Management*, 15 (3), 106-111.
- Hanhivaara, J. (2012). Ryanair lakkauttaa Tampereen reittejä, Retrieved December 12, 2012, from YLE Uutiset: http://yle.fi/uutiset/ryanair_lakkauttaa_tampereen_reitteja/6413744
- Hart, O., & Tirole, J. (1990). Vertical Integration and Market Foreclosure, MIT-Centre for Economic Policy Research 90-010WP.
- Milmo, D. (2012). Ryanair expresses interest in Stansted as BAA puts it up for sale, *The Guardian*. URL: <http://www.guardian.co.uk/business/2012/aug/20/ryanair-stansted-airport-interest>
- Myerson, R., & Satterthwaite, M. (1983, April). Efficient Mechanisms for Bilateral Trading, *Journal of Economic Theory*, 29, 265-281.
- Oum, T. H., Zhang, A., & Zhang, Y. (2004). Alternative Forms of Economic Regulation and their Efficiency Implications for Airports. *Journal of Transport Economics and Policy*, 38 (2), 217-246.
- Pindyck, R. S., & Rubinfeld, D. L. (2012). *Microeconomics*. New Jersey, USA: Pearson.
- Röben, A. (2012). Dreht die Europäische Union den Geldhahn zu? *AERO International*, 22-23.

-
- Starkie, D. (2012). European Airports and Airlines: Evolving relationships and the regulatory implications, *Journal of Air Transport Management*, 21, 40-49.
- Starkie, D. (2002). Airport regulation and competition, *Journal of Air Transport Management*, 8, 63-72.
- Starkie, D., & Yarrow, G. (2000, July). The Single-Till Approach to the Price Regulation of Airports.
- Varian, H. R. (2007). *Grundzüge der Mikroökonomik*. München: Oldenburg Wissenschaftsverlag GmbH.
- Zhang, A., Czerny, A.I. (2012). Airports and airlines economics and policy: An interpretive review of recent research, *Economics of Transportation*, 1 (1+2), 15-34.
- Zhang, A., & Zhang, Y. (2006). Airport capacity and congestion when carriers have market power, *Journal of Urban Economics*, 60 (2), 229-247.
- Zhang, A., & Zhang, Y. (2010, March). Airport capacity and congestion pricing with both aeronautical and commercial operations. *Transportation Research Part B*, 44 (3), 404-413.

Simulationsbasierte Analyse der Wirkungen von Flotten autonomer Fahrzeuge auf städtischen Verkehr

VON KAI NAGEL, JOSCHKA BISCHOFF, GREGOR LEICH UND MICHAŁ MACIEJEWSKI

1 Einleitung

Es ist inzwischen denkbar, dass vollständig autonome, also selbstfahrende Fahrzeuge im Straßenverkehr zugelassen werden. Der hier vorliegende Text betrachtet insbesondere so genannte “Level 5” Fahrzeuge, die also noch nicht einmal mehr über ein Lenkrad verfügen. Weiterhin geht der Text zunächst davon aus, dass diese Fahrzeuge sich weitgehend nicht in Privatbesitz befinden, sondern stattdessen von einem oder mehreren Unternehmen als Flotte(n) betrieben werden. In diesem Kontext werden solche Fahrzeuge oft auch als Robotaxis bezeichnet, wobei zunächst offenbleibt, wie viele Passagierplätze pro Fahrzeug angenommen werden.

Robotaxis haben das Potential, sowohl unser Verkehrssystem als auch unsere urbanen Systeme grundlegend zu verändern (LEVINSON & KRIZEK, 2015; AXHAUSEN, 2016). Möglicherweise werden sie die Leistungsfähigkeit des motorisierten Verkehrs deutlich erhöhen, möglicherweise werden sie kundenfreundlicheren und gleichzeitig preiswerteren öffentlichen Verkehr bereitstellen können als existierende Systeme, und wenn sie elektrisch betrieben werden, können sie dies möglicherweise weitgehend CO₂-neutral. Die Autoren

Anschrift der Verfasser:

Prof. Dr. Kai Nagel
Technische Universität Berlin
Fachgebiet Verkehrssystemplanung und
Verkehrstelematik
Salzufer 17-19
D-10587 Berlin
E-Mail: nagel@vsp.tu-berlin.de

Joschka Bischoff
Technische Universität Berlin
Fachgebiet Verkehrssystemplanung und
Verkehrstelematik
Salzufer 17-19
D-10587 Berlin
E-Mail: bischoff@vsp.tu-berlin.de

Gregor Leich
Technische Universität Berlin
Fachgebiet Verkehrssystemplanung und
Verkehrstelematik
Salzufer 17-19
D-10587 Berlin
E-Mail: leich@vsp.tu-berlin.de

Michał Maciejewski
Technische Universität Berlin
Fachgebiet Verkehrssystemplanung und
Verkehrstelematik
Salzufer 17-19
D-10587 Berlin
E-Mail: maciejewski@vsp.tu-berlin.de

sind solchen Fragen in den letzten Jahren mit Hilfe von mikroskopischen Simulationen nachgegangen. Diese Simulationen beschäftigen sich eher nicht mit Verhaltensaspekten, sondern vor allem mit “mechanischen” Aspekten eines solchen Systems – wie die Wartezeit von der Flottengröße abhängt, wie viele Ladestationen für elektrischen Betrieb notwendig sind und was sie kosten, zu welchen Kosten Zubringerbusse zur S-Bahn durch Robotaxis ersetzt werden können, etc.

Der folgende Text wird über diese Simulationen zusammenhängend berichten. Er startet mit einem Abschnitt über die verwendete Technologie der mikroskopischen Simulation urbanen Verkehrs (Abschnitt 2), gefolgt von einem Abschnitt über die Integration von Robotaxis in das Simulationssystem (Abschnitt 3). Abschnitt 4 diskutiert den Dispatch dieser Fahrzeuge, und sich daraus ergebende Leistungsfähigkeiten. Abschnitt 5 untersucht die Konsequenzen eines vollständigen Ersatzes aller privaten Autos innerhalb der Stadtgrenzen von Berlin durch eine Flotte von Robotaxis. Dies führt, da zusätzlich zu den Passagierfahrten nun auch noch die Zubringerfahrten von einer Kundin zur nächsten abgewickelt werden müssen, auf jeden Fall zunächst zu mehr Fahrzeugkilometern und damit mehr Stau; Abschnitt 6 diskutiert, wie sich die vermutete höhere Flußkapazität der Straßen hier auswirkt. In Abschnitt 7 werden die Konsequenzen einer vollständigen Elektrifizierung dieser Flotte untersucht. Abschnitte 8 und 9 diskutieren den Einsatz von Sammeltaxis, also wenn mehrere Kunden ein Fahrzeug auf einem Teil der Strecke gemeinsam verwenden. Der Text endet mit einer Diskussion (Abschnitt 10) und sowie politisch relevanten Schlussfolgerungen und sich daraus ergebenden Fragen (Abschnitt 11).

2 Mikroskopische Simulation urbanen Verkehrs

Schon seit vielen Jahren finden mikroskopische Simulationen des Verkehrs von Städten und Regionen weltweit Anwendung. ‘Mikroskopisch’ bedeutet dabei, dass jede Person, jedes Fahrzeug, jede Kreuzung etc. durch einen synthetischen Avatar in der Simulation repräsentiert wird. Insbesondere bei den Personen handelt es sich dabei um synthetisch erzeugte Objekte, die nur im statistischen Mittel die Gesamtbevölkerung widerspiegeln. Jede synthetische Person erhält mindestens einen aktivitäten-basierten Tagesplan, z.B. “zu Hause – Arbeiten – Einkaufen – Freizeit – zu Hause”. Jede Aktivität enthält einen Ort und eine Uhrzeit, zu der sie beendet wird.¹ Aktivitäten an unterschiedlichen Orten werden durch Wege verbunden, die mit einem Verkehrsmittel durchgeführt werden. In der von uns

¹ Eine einfache Möglichkeit, solche Tagespläne zu erzeugen, besteht darin, sie aus Wegetagebüchern, wie in Deutschland z.B. SrV (System repräsentativer Verkehrsbefragungen, AHRENS ET AL., 2014) oder MiD (Mobilität in Deutschland, INFAS & DLR, 2010), zu übernehmen. In den Wegetagebüchern sind aus Datenschutzgründen die exakten Ortsangaben normalerweise durch relativ grobe Zonen ersetzt; es reicht oft, innerhalb der Zone einen Zufallspunkt zu wählen, wobei die Zufälligkeit optimalerweise durch die Flächennutzung (Strukturdaten) gewichtet wird.

verwendeten Software MATSim (Multi-Agent Transport Simulation, HORNI ET AL., 2016) sieht eine synthetische Bevölkerung mit solchen Tagesplänen in etwa wie folgt aus:

```
<population>
  <person id="1">
    <plan>
      <act type="home" x="5.0" y="8.0" end_time="08:00:00" />
      <leg mode="car" />
      <act type="work" x="1500.0" y="890.0" end_time="17:30:00" />
      <leg mode="car" />
      <act type="home" x="5.0" y="8.0" />
    </plan>
  </person>
  <person id="2">
    ...
  </person>
</population>
```

Im weiteren Verlauf der Simulation erzeugt MATSim die fehlenden Routen, und startet dann einen iterativen Prozess, der aus folgenden Schritten besteht:

1. Jede synthetische Person hat einen "ausgewählten" Plan (und vielleicht noch weitere, siehe unten).
2. **MobSim:** Eine Verkehrsfluss-Simulation, von uns auch oft MobSim = Mobilitätssimulation oder synthetische Realität genannt, führt für jede synthetische Person den ausgewählten Plan in der synthetischen Realität aus. Daraus ergeben sich z.B. Verkehrsstaus oder überfüllte Fahrzeuge des öffentlichen Verkehrs.
3. **Scoring:** Alle synthetischen Personen bewerten den daraus entstehenden simulierten Tag. Diese Bewertung entspricht meist einer ökonomischen Nutzenfunktion, und enthält positive Anteile für die Zeit, in der Aktivitäten durchgeführt werden, und negative Anteile für die Zeit, die im Verkehrssystem zugebracht werden. Falls es gewünscht ist, können z.B. die Effekte von Verkehrsstaus oder überfüllten Fahrzeugen des öffentlichen Verkehrs für jedes Individuum zusätzlich berücksichtigt werden.
4. **Replanning:** Allen synthetischen Personen wird die Möglichkeit gegeben, ihren ausgewählten Plan zu revidieren. Einige dieser erzeugen daraufhin neue Pläne, die z.B. eine andere Route, ein anderes Verkehrsmittel, andere Abfahrtszeiten, andere Aktivitätenorte oder andere Aktivitätenreihenfolgen enthalten. Diese neu

erzeugten Pläne werden dann “ausgewählt” im Sinne von Punkt 1; da sich die synthetischen Personen die vorher verwendeten Pläne weiterhin merken, entstehen so für jede synthetische Person mehrere Pläne/Alternativen. Diejenigen Personen, die sich in einer Iteration keinen neuen Plan ausdenken, wählen einen gut bewerteten vorhandenen Plan, oft mit einem Logit-Modell (z.B. BEN-AKIVA & LERMAN, 1985).

Anschließend kehrt die Simulation zu Schritt 2 zurück.

Die Iterationen werden beendet, wenn ein Großteil der synthetischen Bevölkerung nur noch selten bessere Alternativen entdeckt.

3 Integration von Robotaxis

Auf der Nachfrageseite ist die Integration von Robotaxis denkbar einfach; es wird einfach entweder schon zu Beginn oder in Schritt 4 das Verkehrsmittel (*mode*) auf *robotaxi* gesetzt. Auf der Angebotsseite ist es aufwändiger: Wenn in der Verkehrsfluss-Simulation, Schritt 2, eine synthetische Person ihre Aktivität beendet und als nächstes einen Weg per Robotaxi vorgesehen hat, so fordert sie an dieser Stelle das Robotaxi an, und wartet auf dessen Ankunft.² Eine Taxizentrale enthält die Anforderung des Robotaxis, wählt ein Fahrzeug aus, und schickt es zur Kundin. Das Robotaxi fährt zur Kundin, lässt diese einsteigen, fährt zum Fahrziel, und lässt die Kundin aussteigen. In der einfachsten Implementierung bleibt das Robotaxi dann an diesem Ort stehen, bis es von der Taxizentrale wieder angefordert wird.

4 Dispatch

Es stellt sich heraus, dass die Zuordnung von Fahrzeugen zu Kunden von zentraler Bedeutung für die Leistungsfähigkeit des Systems ist. Hier soll es zunächst um Fahrten mit höchstens einem Passagier gehen. Dabei wurden durch die Autoren unterschiedliche Algorithmen untersucht (MACIEJEWSKI & NAGEL, 2012, 2013a, 2013b); einige davon sind:

- **Räumlich nächstes freies Fahrzeug** – Hier wird bei einer neu hereinkommenden Fahrtenanforderung unter den freien Fahrzeugen dasjenige ausgewählt, welches schnellstmöglich beim Kunden sein kann.

Dieser auf den ersten Blick plausible Algorithmus ist auf den zweiten Blick sehr schlecht unter hoher Belastung: Wenn gar keine freien Fahrzeuge mehr zur Verfügung stehen, dann kommen die hereinkommenden Anforderungen in eine Warteschlange, und werden in der Reihenfolge des Eingangs bearbeitet. Ein

² Vorbestellungen wurden bisher nicht untersucht; siehe dazu Abschnitt 10.1

gerade freiwerdendes Fahrzeug wird dann einfach der ältesten noch nicht zugeordneten Anforderung zugeordnet, wobei es leicht passieren kann, dass sich beide an unterschiedlichen Enden des Bedienegebietes befinden, und somit lange Zugangswege gefahren werden müssen.

- **Fahrzeug schnellstmöglich beim Kunden** – Hier werden im Gegensatz zum letzten Algorithmus auch die besetzten Fahrzeuge einbezogen, sowie eine Vorhersage über deren zukünftiges Verhalten. So kann z.B. ein besetztes Fahrzeug bereits in der Nähe der Anforderung sein, und nur noch einen kurzen weiteren Weg zum Fahrziel des derzeitigen Passagiers haben. Die erwartete Ankunftszeit bei der neuen Anforderung ergibt sich also aus der erwarteten Fahrzeit zum derzeitigen Ziel, der erwarteten Zeit für den Bezahl- und Aussteigevorgang, und der erwarteten Fahrzeit von dort zur neuen Anfrage. Es wird das nach dieser Metrik nächste Fahrzeug der Anfrage zugeordnet. Neue Anfragen werden mit diesem Algorithmus in der Reihenfolge des Eingangs abgearbeitet; einmal erfolgte Zuordnungen zwischen Fahrzeug und Kundin sind dann fest.
- **Nächste Anforderung (= opportunistisch)** – Hier erfolgt die Sortierung nicht in der Reihenfolge der Anfragen, sondern in der Reihenfolge der frei werdenden Fahrzeuge: Jedes gerade freiwerdende Fahrzeug wird der nächsten unbedienten Anfrage zugeordnet.

Es ist offensichtlich, dass dieser Ansatz Zubringerfahrten reduziert und somit effizient ist, und andererseits bzgl. der Anforderungen potentiell unfair ist: Anforderungen aus Gebieten, in denen aktuell wenige Fahrten enden, werden erst dann wieder bedient, wenn alle anderen Anforderungen abgearbeitet sind.

- **Optimale Zuordnung (optimal assignment)** – Man kann versuchen, die Optimierung recht häufig neu zu rechnen, z.B. wenn Fahrzeuge frei werden oder neue Anfragen hereinkommen, aber auch, wenn Fahrten schneller oder langsamer ablaufen als ursprünglich geplant. Immer noch eine Heuristik, aber mit einem optimal lösbaaren Teilproblem, ist hier die optimale Zuordnung aller Anforderungen zu allen Fahrzeugen. Dies lässt sich z.B. mit der so genannten ungarischen Methode (Kuhn, 1955) optimal lösen, wobei im Falle von weniger Fahrzeugen als Anforderungen die Fahrzeugseite mit “dummy vehicles”, und im Falle von weniger Anforderungen als Fahrzeugen die Anforderungsseite mit “dummy requests” aufgefüllt wird. Die Heuristik besteht hier insbesondere darin, dass im Falle hoher Nachfrage bei Fahrzeugen nur bis zum nächsten Kunden geplant wird und nicht weiter in die Zukunft. Alle unsere Versuche, hier mittels eines Mixed-Integer-Programms optimal weiter in die Zukunft zu planen, sind an zu hoher Rechenzeit gescheitert.

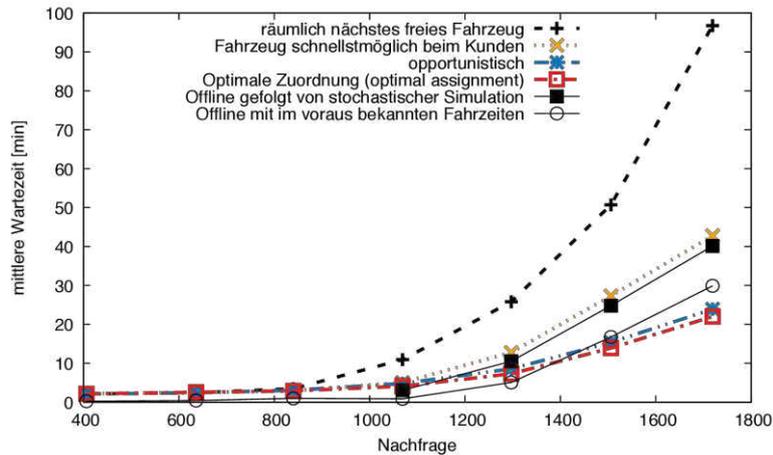


Abbildung 1: Mittlere Wartezeit auf ein autonomes Fahrzeug/Taxi in einer Simulation mit verschiedenen Dispatch-Algorithmen als Funktion der Nachfrage. Man sieht, bei hoher Nachfrage, deutlich die hohen Wartezeiten von “räumlich nächstes freies Fahrzeug” sowie die im Mittel niedrigen Wartezeiten von “opportunistisch” sowie “optimal assignment”. Vgl. MACIEJEWSKI & NAGEL (2013a, 2013b); MACIEJEWSKI (2014a, 2014b).

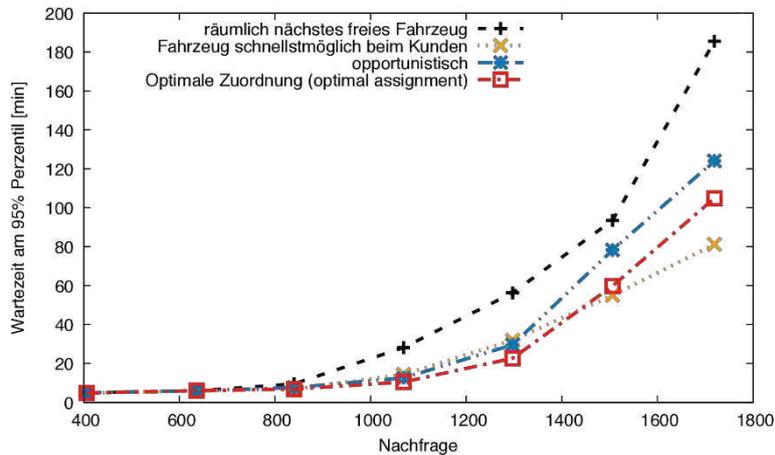


Abbildung 2: 95% Perzentil der höchsten Wartezeiten. Man sieht deutlich, dass “opportunistisch”, obwohl im Mittel sehr leistungsfähig (Abbildung 1), gleichzeitig sehr unfair ist, indem es für 5% der Kunden sehr lange Wartezeiten erzeugt. Nur “räumlich nächstes freies Fahrzeug” ist noch schlechter, allerdings deswegen, weil die Wartezeiten unter hoher Belastung hier insgesamt sehr lang sind. Vgl. MACIEJEWSKI (2014a).

Bei niedriger Belastung sind alle diese Algorithmen ungefähr gleich gut (Abbildung 1); die Anfahrtszeit zu einem Kunden hängt im Mittel einfach von der Dichte der Fahrzeuge ab. Bei hoher Belastung ist, wie erwartet, der Ansatz "räumlich nächstes freies Fahrzeug" sehr ineffizient, akkumuliert schnell eine große Menge nicht abgearbeiteter Anfragen, und ist darum im Mittel sehr langsam. Der Ansatz "Fahrzeug schnellstmöglich beim Kunden" ist hier deutlich besser, aber noch besser ist hier der opportunistische Ansatz. Dies ist auch intuitiv nachvollziehbar, da letzterer die Leerfahrten zwischen den Kunden kurzhält, und somit für hohen Durchsatz sorgt. Dies wird damit erkauft, dass der Algorithmus potentiell unfair ist – Kunden werden nicht in der Reihenfolge ihrer Anforderungen abgearbeitet. "Optimale Zuordnung" ist hier nur noch leicht besser, woraus man ableiten kann, dass die opportunistische Heuristik schon recht gut ist.

Es ist an dieser Stelle von Interesse, wie so genannte Offline-Ansätze abschneiden, also wenn alle Anfragen bereits im Voraus bekannt sind. Hier ergibt sich das kuriose Resultat, dass diese zunächst *schlechter* abschneiden als die besseren der obigen Online-Ansätze. Der Grund ist, dass die Fahrzeiten in der Simulation stochastisch sind, und eine vorausberechnete feste Zuordnung darauf nicht reagiert. Nur wenn auch die Fahrzeiten im Voraus bekannt sind, kann ein Offline-Ansatz nochmal deutliche Gewinne bringen, benötigt aber für optimale Lösungen deutlich mehr Rechenzeit, als im Echtzeit-Betrieb verfügbar ist (MACIEJEWSKI, 2014b). Insgesamt ergibt sich daraus, dass als Reaktion auf die fluktuierenden Fahrzeiten ein Online-Ansatz auf jeden Fall sinnvoll ist, selbst wenn Anfragen im Voraus bekannt sein sollten, und dass der Algorithmus "optimale Zuordnung" bereits ein guter Benchmark ist.

Basierend auf den obigen Erkenntnissen wird im Folgenden weitgehend der Algorithmus "Fahrzeug schnellstmöglich beim Kunden" eingesetzt, außer bei zu hoher Nachfrage, wo zum opportunistischen Algorithmus übergegangen wird. Dabei wird von realitätsnahen Nachfrage-Kurven ausgegangen, so dass die hohe Nachfrage irgendwann endet, und bisher nicht bediente Kunden abgearbeitet werden können. Alternativ könnte man solche Anfragen seitens des Betreibers auch ablehnen, oder die Kunden könnten sich umentscheiden.

5 Ersatz privater Autos in Berlin durch eine Flotte autonomer Fahrzeuge

Eine mögliche Frage ist nun, wie ein urbanes System mit einer Flotte autonomer Fahrzeuge aussehen würde. Wir haben daher für ein bereits vorhandenes Berlin-Modell alle privaten Autofahrten innerhalb der Stadtgrenzen durch Robotaxi-Fahrten ersetzt (BISCHOFF & MACIEJEWSKI, 2016b). Fahrten von oder nach außerhalb der Stadtgrenzen werden weiterhin durch konventionelle Fahrzeuge durchgeführt. Hierzu wurden mehrere Simulationen mit unterschiedlich großen Fahrzeugflotten durchgeführt, wobei im weiteren eine Flotte von 100 000 Fahrzeugen betrachtet wird. Ferner wird in dieser Untersuchung davon ausgegangen, dass es *keine* weiteren Verkehrsmittelwahleffekte gibt.

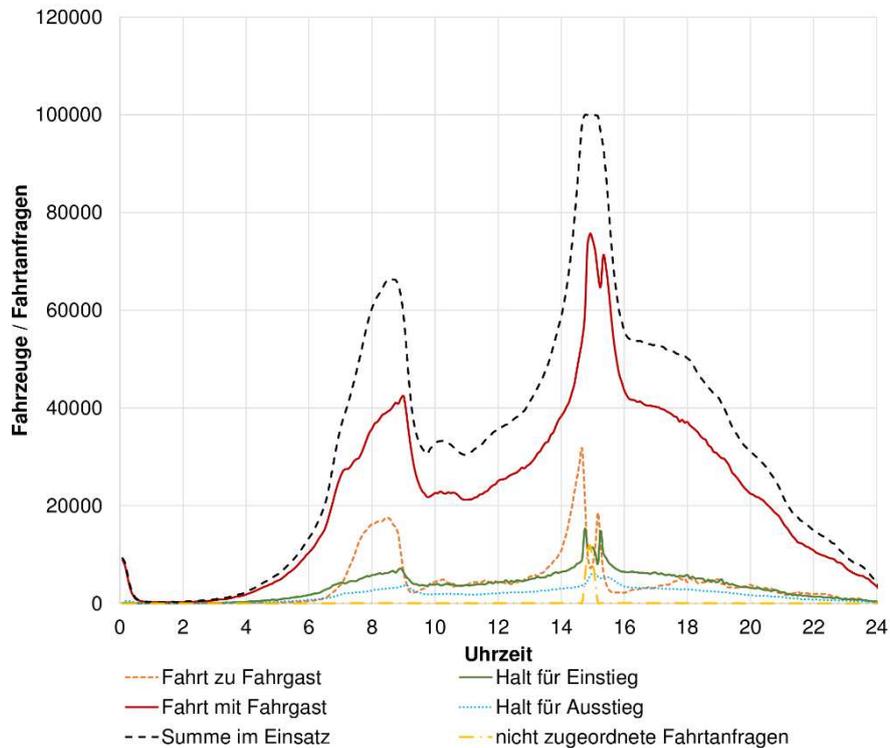


Abbildung 3: Fahrzeugzustände in Abhängigkeit von der Tageszeit. Vgl. BISCHOFF & MACIEJEWSKI (2016b).

Abbildung 3 zeigt die unterschiedlichen Fahrzeugzustände als Funktion der Tageszeit. Zu jeder Zeit werden die Fahrzeuge in den unterschiedlichen Zuständen “Fahrt zu Fahrgast”, “Halt für Einstieg”, “Fahrt mit Fahrgast” oder “Halt für Ausstieg” angegeben. Die Summe dieser vier Zahlen ergibt die Anzahl der Fahrzeuge “im Einsatz”; alle weiteren Fahrzeuge sind unbeschäftigt. Zusätzlich wird gegen 15 Uhr die Anzahl nicht zugeordneter Anfragen wegen hoher Belastung angegeben. Aus der Belastung zu diesem Zeitpunkt (in Berlin höher als die Morgenspitze) ergibt sich die schlussendlich gewählte Anzahl von Fahrzeugen: Weniger Fahrzeuge führen zu deutlich längeren Wartezeiten; mehr Fahrzeuge führen zu deutlich höheren Kosten für Fahrzeuge ohne entsprechende Gewinne bei den Wartezeiten.

Es ist deutlich erkennbar, dass große Teile der Flotte während großer Teile des Tages nicht beschäftigt sind. Hier ergeben sich also weitere Potentiale, z.B. für den kleinräumigen urbanen Güterverkehr. Weiterhin würde die Flotte mit 100 000 Fahrzeugen die derzeitig ca. 1 Million privater Autos ersetzen, womit auch die entsprechenden Parkflächen für andere Zwecke zur Verfügung stehen könnten.

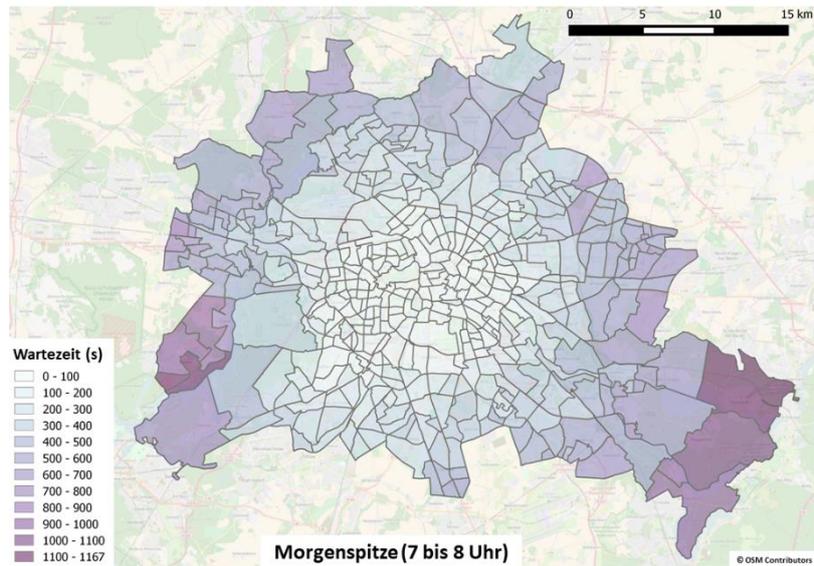


Abbildung 4: Wartezeiten nach Abfahrtsort (morgens). Vgl. BISCHOFF & MACIEJEWSKI (2016a).

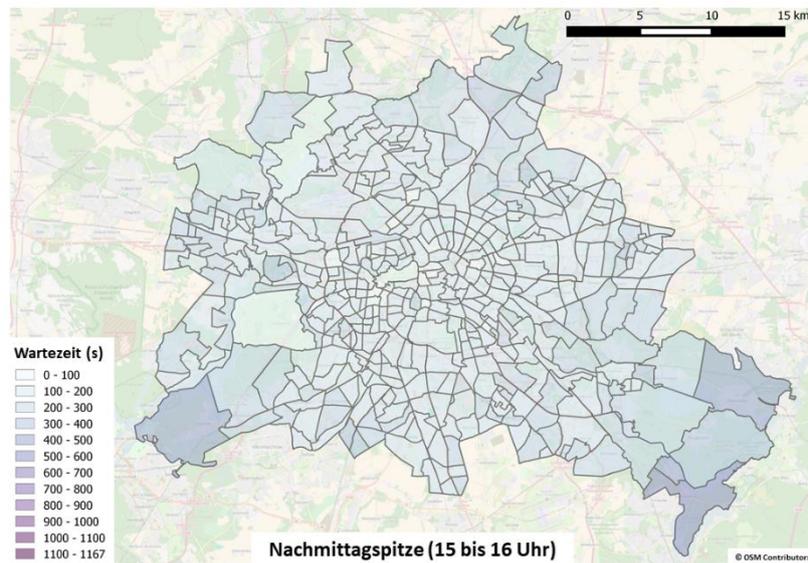


Abbildung 5: Wartezeiten nach Abfahrtsort (nachmittags). Vgl. BISCHOFF & MACIEJEWSKI (2016a).

Abbildung 4 zeigt die resultierenden Wartezeiten in Berlin zwischen 7 und 8 Uhr morgens. In den Außenbezirken treten dabei deutlich erkennbar Wartezeiten von 15 Minuten und länger auf. Eine erste Welle von Fahrten in die Innenstadt hat hier bereits stattgefunden, so dass die meisten der freiwerdenden Fahrzeuge in der Innenstadt sind, und erstmal wieder in die Außenbezirke fahren müssen. Nachmittags ergibt sich *nicht* der gleiche Effekt (Abbildung 5) – in der Innenstadt gibt es immer viele freiwerdende Fahrzeuge, selbst während der Nachmittags-Spitze.

6 Staueffekte

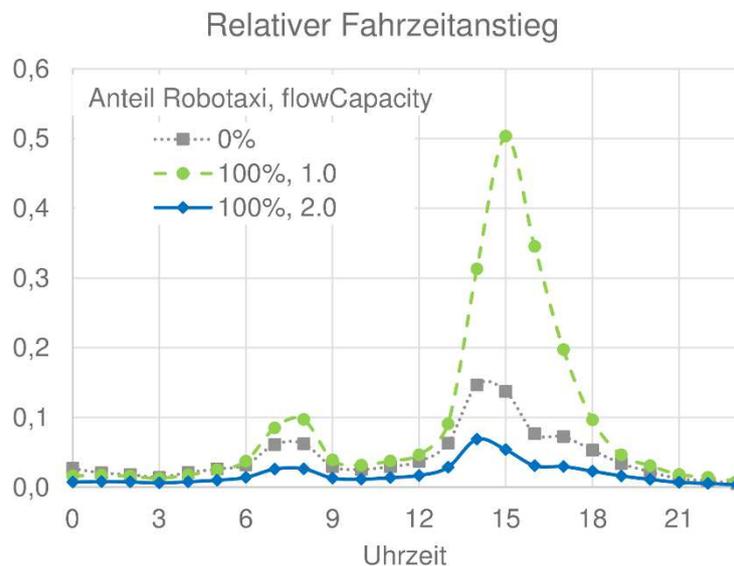


Abbildung 6: Relativer Fahrzeitanstieg im Abhängigkeit von der Tageszeit. Vgl. MACIEJEWSKI & BISCHOFF (2017).

Das Szenario von Abschnitt 5 erzeugt unzweifelhaft zusätzliche Fahrzeugkilometer, da die Fahrzeuge neben den Passagierfahrten, die die gleiche Nachfrage befriedigen wie bisher private Autos, auch noch die Leerfahrten von einem Passagierausstieg zum nächsten Passagiereinstieg zurücklegen müssen. Im genannten Szenario betrug dieser Wert 13% mehr Fahrzeugkilometer durch die Flotte im Vergleich zu privatem Fahrzeugbesitz (BISCHOFF & MACIEJEWSKI, 2016a, Abschnitt 4.2). Durch diesen Mehrverkehr ergibt sich

zunächst ein sehr deutliches Anwachsen der relativen Zeitverluste zur Spitzenstunde von ca. 15% auf ca. 50% (Abbildung 6, vgl. MACIEJEWSKI & BISCHOFF, 2017).³

Es ist allerdings auch zu vermuten, dass autonome Fahrzeuge weniger Kapazität verbrauchen als konventionelle Fahrzeuge. Offenbar muss dieser Kapazitätsgewinn mindestens 13% betragen, um obigen Effekt auszugleichen. Abbildung 6 zeigt auch die Wirkungen eines möglichen Kapazitätsgewinnes von 50%. Unsere Simulationen enthalten nicht genügend Details der Fahrdynamik, um solche Aspekte endogen abbilden zu können; wir sind hier also auf Input von anderen Arbeitsgruppen angewiesen. Immerhin sei darauf hingewiesen, dass es sich hier nicht um eine rein technische Fragestellung handelt. Z.B. könnte man eine Nachrüstung konventioneller Fahrzeuge z.B. mit RFID (radio frequency identification) Transpondern erzwingen, die weniger als 100€ pro Fahrzeug kosten würde und durch die Hauptuntersuchung innerhalb weniger Jahren durchzusetzen wäre. Als Konsequenz könnten sich fahrerlose Fahrzeuge den konventionellen Fahrzeugen von hinten bis auf wenige Meter nähern. Neben der technischen Machbarkeit stellt sich hier also eher die Frage, ob diese Nachrüstung erzwungen werden sollte, und falls ja, ob Fahrzeugführende solch kurze Abstände im Rückspiegel akzeptabel fänden. Ähnliche Fragen stellen sich bzgl. der Integration von Fahrrädern und Fußgängern in ein solches System. Auch hier sei darauf hingewiesen, dass inzwischen viele Erwachsene ohnehin ein Smartphone mitführen, und die flächendeckende Ausrüstung von Kindern zumindest in den Vereinigten Staaten nicht völlig unwahrscheinlich zu sein scheint.⁴

Insgesamt erscheint die Annahme plausibel, dass mit fahrerlosen Fahrzeugen höhere Flusskapazitäten möglich sein werden. Eine gesellschaftliche Diskussion ist nötig, in welchem Umfang wir diese realisiert sehen wollen, und welche kulturellen Veränderungen wir dafür akzeptieren wollen.

7 Elektrifizierung

Simulationsresultate für die Elektrifizierung liegen uns nur für Simulationen der Berliner Taxiflotte vor (BISCHOFF & MACIEJEWSKI, 2014, 2015); sie dürften aber auf eine Flotte autonomer Fahrzeuge übertragbar sein, da die Betriebscharakteristika sehr ähnlich sind. Für die Elektrifizierung der Taxiflotte stellt sich heraus, dass eine Ausrüstung von ca. 350 der insgesamt knapp 450 Taxistände mit je zwei Schnellladesäulen (50 kW) den Bedarf deckt.

An dieser Stelle ist die Überlegung relevant, dass die Flotte eine bestimmte Menge an kWh pro Tag benötigt, und diese durch Ladestationen unterschiedlicher Leistung zur Verfügung gestellt werden kann. Es stellt sich aber heraus, dass die Preise von Ladestationen ungefähr

³ Eine Zahl von 15% bedeutet hier, dass die Fahrten im Mittel 15% länger brauchen als im leeren Netz. Die Zahl ist hier relativ klein, weil die Simulation erhebliche Teile des Umlandes miteinbezieht.

⁴ Vgl. <https://www.safewise.com/resources/wearable-gps-tracking-devices-for-kids-guide>.

proportional zur Ladeleistung sind, und somit die Wahl zwischen vielen langsamen und weniger, aber schnelleren Ladestationen besteht. Offenbar bietet Schnellladeinfrastruktur mehr Flexibilität, da, z.B. bei mehreren gleichzeitig leer eintreffenden Fahrzeugen, das erste Fahrzeug bereits nach 1/2 h wieder einsatzbereit ist. Aus diesem Grund wurde nur eine Ausstattung mit Schnellladesäulen untersucht, da diese bei gleichen Kosten eine höhere Flexibilität bieten. Weltweit gesehen wird zudem in Städten, in denen bereits heute eine nennenswerte Anzahl an Elektrotaxis verkehrt, auf den Einsatz von Schnellladesäulen gesetzt (ZOU ET AL., 2016).

Für die Simulationen wurde neben dem Dispatch für die Kunden (Abschnitt 4) nun ein Dispatch für die Ladesäulen hinzugefügt. Mehrere Ansätze wurden durchgespielt; eine recht einfache Heuristik ist, dass ein Fahrzeug, bei dem beim Aussteigen des Passagiers der Ladezustand unterhalb von 30% ist, eine geeignete Ladesäule mit kurzfristig verfügbaren Kapazitäten anfährt. Es stellt sich heraus, dass dies kein größeres Problem ist, weil ein Taxi in Berlin im Durchschnitt nur 150 km pro Tag zurücklegt; das ist i.a. sogar mit einer einzigen Ladung pro Tag zu schaffen. Bei den Berechnungen in Abschnitt 5 liegt die tägliche Fahrleistung eher bei 280 km, aber selbst hierfür haben wir ja schon in Abbildung 3 gesehen, dass die Flotte meistens nicht sehr stark ausgelastet ist und somit genügend Zeit für Ladevorgänge zur Verfügung steht. Insofern reicht es einfach aus, die nötige Ladekapazität räumlich verteilt in der Stadt zur Verfügung zu stellen.

Basierend auf diesen Überlegungen wurden mehrere Kostenszenarien durchgerechnet (BISCHOFF & MACIEJEWSKI, 2015). Das für Berlin schwierigste Szenario war eines mit erhöhter Belastung (z.B. wegen Messe) verbunden mit sehr kalten Tagesdurchschnittstemperaturen von unter -10 Grad Celsius. Bei diesen Temperaturen halbiert sich wegen der kalten Batterien die Ladeleistung, gleichzeitig ist insgesamt die doppelte Leistung nötig, um auch noch die Fahrzeuge zu heizen, so dass sich ein insgesamt um einen Faktor vier erhöhter Bedarf an Ladestationen ergibt. Da dies für im Mittel wenige sehr kalte Tage pro Jahr übertrieben erscheint, empfiehlt sich stattdessen der Einsatz fossil betriebener Standheizungen, wie sie z.B. in Wohnwagen üblich sind. Perspektivisch könnte man z.B. auch die Fahrzeuge besser isolieren, oder die Batterien während der Fahrt und bis zum Laden warmhalten. In den aktuell auf dem Markt befindlichen Elektrofahrzeugen wurde zudem die Heizleistung durch den Einsatz von Wärmepumpen bereits erheblich verbessert. Klimatisierung während warmer Tage wurde auch berücksichtigt, stellte sich aber in Berlin als geringeres Problem heraus als das Heizen. Für andere geographische Regionen mag dies anders sein.

Aus solchen Überlegungen ergibt sich schlussendlich Tabelle 1. Dabei schließen die Energiekosten den Betrieb aller Aggregate einschl. Heizung und Klimaanlage ein, außerdem bei den Elektrofahrzeugen die anteiligen Kosten für die Ladesäulen. Für die Ersatzbatterie wurde angenommen, dass eine Batterie frühestens nach 100 000 km ausgetauscht wird. Als Resultat stellt man fest, dass für den hier diskutierten Anwendungsfall die jährlichen Betriebskosten für batterieelektrische bzw. hybrid-elektrische Fahrzeuge in etwa gleich hoch sind. Sicher gibt es andere Rechnungen, die zu anderen Werten führen. Schlussendlich ist aber zu vermuten, dass sowohl Strompreis als

auch Batteriepreise weiter fallen werden, so dass der ungefähre Gleichstand in den Kosten sich eher noch zugunsten der batterie-elektrischen Fahrzeuge verschieben dürfte.

	BEV	HEV
Fahrleistung [km/Jahr]	75 000	75 000
Energiekosten [€/Jahr]	4 620	6 390
Ersatzbatterie [€/Jahr]	2 500	0
Motorwartung [€/Jahr]	150	1 000
Summe [€/Jahr]	7 270	7 390

Tabelle 1: Jährliche Betriebskosten eines batterieelektrischen Fahrzeugs (BEV) und eines hybrid-elektrischen Fahrzeugs (HEV). Vgl. BISCHOFF & MACIEJEWSKI (2015).

Insgesamt ist also zu erwarten, dass die Betriebskosten einer batterieelektrisch motorisierten Flotte eher niedriger sein werden als die der bisherigen fossil angetriebenen Flotte. Es verblieben die Investitionskosten der Umstellung. Da aber die Investitionskosten für die Ladestationen bereits in der Kalkulation enthalten sind, handelt es sich nur um die Kosten für die Neufahrzeuge. Da der Preis für die Batterie auch bereits in obiger Kalkulation enthalten ist, verbleibt der Preis für ein solches Auto minus den Batteriepreis. Es ist zu erwarten, dass dieser unterhalb der Preise für fossile Fahrzeuge liegt, so dass dieser Ersatz des Fahrzeugparkes aus den ohnehin notwendigen Ersatzinvestitionen bestritten werden könnte.

Somit ergibt sich insgesamt das Bild, dass sowohl die Berliner Taxiflotte als auch eine potentielle Flotte für den gesamten innerstädtischen Autoverkehr, zu vermutlich niedrigeren Kosten als bisher, elektrisch betrieben werden könnten. Zugegebenermaßen geht diese Betrachtung davon aus, dass die nötigen Rohstoffe, z.B. Lithium für die Batterien, in den nötigen Mengen zu den bisherigen Preisen beschafft werden können; weiterhin werden z.B. Sozial- oder Umweltstandards ausgeblendet. Beides liegt außerhalb unserer Expertise. Zumindest wollen wir aber darauf hinweisen, dass auch fossile Brennstoffe oft aus Ländern mit niedrigeren Sozial- oder Umweltstandards importiert werden.

8 Sammeltaxis

Bisher wurden Fahrten mit maximal einem Passagier pro Fahrzeug betrachtet. Im Rahmen unserer Simulationen kann man sich dem Thema Sammeltaxis über einen Algorithmus nähern, wie er z.B. von UberPool (UBER, 2017) verwendet wird: Das Einfügen eines weiteren Passagiers in eine schon vorhandene Fahrt wird akzeptiert, wenn für keinen der Passagiere deren Fahrt dadurch länger wird als

$$\alpha \times t_{single} + \beta, \quad (1)$$

wobei t_{single} die Reisezeit als Einzelpassagier ist. Typische Werte sind $\alpha=1,7$ und $\beta=2min$; wenn also z.B. die Reisezeit als Einzelpassagier 10 min beträgt, dann darf die Reisezeit durch andere Passagiere nicht größer werden als

$$1,7 \times 10 \text{ min} + 2 \text{ min} = 19 \text{ min} . \quad (2)$$

Die Simulation entsprechend Abschnitt 5 kann dann also weiterhin voranschreiten, aber im Dispatch entsprechend Abschnitt 4 werden auch bereits zugeordnete Fahrzeuge einbezogen, solange sie für jeden bereits zugeordneten Passagier immer noch Bedingung (1) erfüllen. Dieser Sammeltaxi-Algorithmus wird in BISCHOFF ET AL. (2017) näher beleuchtet und auf einen Datensatz mit Taxifahrten an einem Werktag in Berlin angewendet. Aus dieser Studie stammen die folgenden Abbildungen in diesem Kapitel.

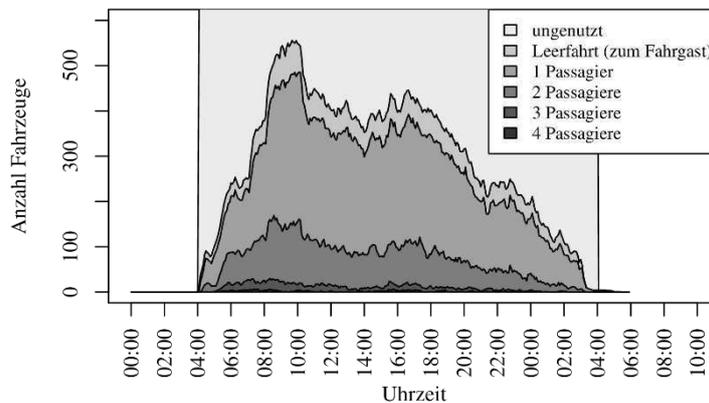


Abbildung 7: Besetzungsgrad (Kapazität 4 Personen pro Fahrzeug, $\alpha=1.7$ und $\beta=2min$). Vgl. BISCHOFF ET AL. (2017).

Dabei ergeben sich typischerweise Verläufe wie in Abbildung 7. Es ist erkennbar, dass zu jedem Zeitpunkt ca. 40% der Fahrzeuge mit Passagier mehr als einen Passagier an Bord haben. Man sieht aber auch, dass dies meist nur zwei Passagiere sind; drei oder mehr kommen selten vor, auch wenn man gar keine Sitzbegrenzung in den Fahrzeugen annimmt. Dies entspricht Resultaten wie z.B. von KNAPEN ET AL. (2013), welche besagen, dass Fahrgemeinschaften für beliebige Punkt-zu-Punkt Verbindungen nur schwierig zu finden sind, wenn man nicht allzu lange Umwege oder zeitliche Abweichungen in Kauf nehmen will.

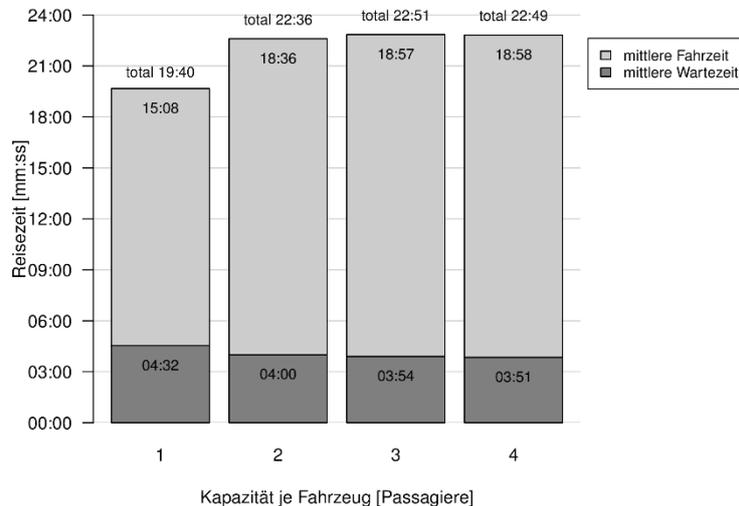


Abbildung 8: Warte- und Fahrzeiten der Sammeltaxis ($\alpha=1.7$ und $\beta=2min$).
Vgl. BISCHOFF ET AL. (2017).

Für das Berlin-Szenario steigt die mittlere Reisezeit (Abbildung 8) von ca. 20 auf ca. 23 Minuten an. Der Anteil geteilter Fahrten (mindestens ein weiterer Fahrgast auf einer Teilstrecke) beträgt 61% im Szenario mit 4 Plätzen je Sammeltaxi. Tendenziell werden eher längere als kürzere Fahrten geteilt, weil auf längeren Fahrten mit einer größeren Wahrscheinlichkeit eine Fahrtenbündelung möglich ist. Betrachtet man nur Fahrten mit einer direkten Distanz (ohne Umwege zur Fahrtenbündelung) von 2 bis 5 km, dann beträgt die Summe aus Warte- und Fahrzeit bei den ungeteilten Fahrten im Mittel knapp 10 min und bei den geteilten rund 14 min, wobei lt. Gleichung 1 bis zu 19 min zulässig sind. Den tatsächlichen Wert erfährt der Fahrgast erst nach der Bestellung, muss also entsprechend großzügig planen. Ob dies insgesamt attraktiv ist, mag jeder selbst entscheiden. Immerhin sinkt die Fahrleistung der Fahrzeuge damit selbst einschließlich der Leerfahrten auf ein Niveau unterhalb des derzeitigen Niveaus mit privaten Fahrzeugen, so dass ein solcher Ansatz auch ohne Kapazitätsgewinne durchführbar wäre. Für Betreiber ist das Anbieten von Sammeltaxifahrten im Punkt-zu-Punkt-Verkehr vermutlich nur innerhalb des Stadtzentrums rentabel (BISCHOFF ET AL., 2018b), hier werden in der Simulation auch mit Abstand die meisten Fahrten geteilt.

9 Sammeltaxis als Ersatz für herkömmlichen ÖPNV

Aufgrund der bisherigen Überlegungen liegt es nahe, auch darüber nachzudenken, im öffentlichen Verkehr potentiell schlecht ausgelastete Busse durch Robotaxis zu ersetzen. Allerdings ist im öffentlichen Verkehr die Komplexität höher als bei den bisher

beschriebenen Studien, so dass wir noch nicht so weit sind. Zwei Anhaltspunkte ergeben sich aus den folgenden zwei Studien, bei denen die Verkehrsmittelwahl fix war, das heißt nur bisherige Nutzer des ÖPNV konnten Sammeltaxis und ggf. den verbleibenden konventionellen ÖPNV nutzen.

9.1 ZU- UND ABGANG MASSENVERKEHRSSYSTEME

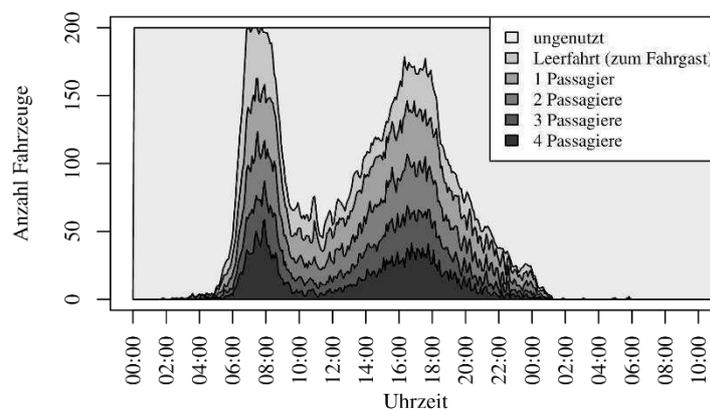


Abbildung 9: Besetzungsgrad in der Last-Mile-Studie. Vgl. LEICH & BISCHOFF (2018).

LEICH (2017) hat eine Studie durchgeführt, bei der für ein gut abgrenzbares Untersuchungsgebiet im Nordwesten von Berlin (im Bereich Heiligensee) das derzeitige Busangebot durch unterschiedliche Konstellationen von Sammeltaxis ersetzt wurde (siehe auch LEICH & BISCHOFF, 2018). Die Busse führen hauptsächlich Zugangs- und Abgangsfahrten nach Tegel durch, entweder zu den U-/S-Bahnstationen dort, oder zum Ortskern selber. Im Sinne unserer Simulation wurde neben den bisherigen ÖV-Router, welcher ÖV-Routen mit Zu- und Abgang zu Fuß generiert, ein weiterer gestellt, welcher ÖV-Routen mit Zu- und Abgang mit Sammeltaxis vorsieht.

Die Bündelung gelingt hier besser (Abbildung 9): Knapp 96 % aller Fahrten sind geteilt und 80% der besetzten Fahrzeuge haben mindestens 2 Passagiere, und immerhin 50% drei oder mehr. Eine mögliche Ursache für die bessere Bündelung ist die Konzentration der Nachfrage in einem kleinen Gebiet am Rand des Untersuchungsraums, dem Zentrum von Tegel, wo sich die wichtigsten Umstiegsmöglichkeiten zur U- und S-Bahn sowie Schulen und Einkaufszentren befinden. Dagegen konzentriert sich die Taxinachfrage in BISCHOFF ET AL. (2017) zwar zum Teil am Flughafen Tegel, jedoch ist diese Konzentration deutlich schwächer ausgeprägt. Zudem ist die Taxinachfrage deutlich dünner, es gibt also weniger Nachfrage pro Flächen- und Zeiteinheit, als in LEICH (2017), wo alle ÖPNV-Nutzer im Untersuchungsgebiet die Sammeltaxis nutzen konnten.

Bzgl. der Kosten wurden in LEICH (2017) hypothetisch fahrerlose Linienbusse mit hypothetisch fahrerlosen Minibussen verglichen; für alle untersuchten Konfigurationen sind die Linienbusse leicht bis deutlich preiswerter. Offenbar gelingt es dem Betreiber, einen hohen Auslastungsgrad der Linienbusse zu erreichen.

Bzgl. der Fahrzeiten ergibt sich ein komplexes Bild. Die reinen Fahrzeiten steigen leicht, was sich durch die (zusätzlichen) Fahrten von und zu den Haustüren und durch die Umwege zur Bedienung anderer Fahrtwünsche durch das gleiche geteilte Robotaxi erklärt. Hingegen gehen die Gehzeiten durch den Haustürbetrieb deutlich zurück. Insgesamt gehen die Gesamtfahrzeiten nur leicht, durchschnittlich um 100 Sekunden pro Fahrt, zurück. Dies erklärt sich durch Wartezeiten von ca. 400 Sekunden pro Sammeltaxi-Fahrt, die dadurch entstehen, dass der Sammeltaxi-Algorithmus die Anzahl der beteiligten Fahrzeuge niedrig hält, anstatt freie Fahrzeuge in bessere Bedienung zu investieren. Es stellt sich aber auch die Frage, ob Wartezeit am Wohnort vielleicht weniger stark negativ bewertet werden sollte als Wartezeit an den Haltepunkten.

9.2 VOLLSTÄNDIGER ERSATZ DES FAHRPLANGEBUNDENEN ÖFFENTLICHEN VERKEHRS IN EINER MITTELGROßEN STADT

FÜHRER (2018); BISCHOFF ET AL. (2018a) haben ähnliches für eine Simulation von Cottbus durchgeführt, wobei der gesamte ÖPNV (überwiegend Busse und Straßenbahnen) durch unterschiedliche Konstellationen von Sammeltaxis ersetzt wurden. Die Arbeit zeigt, dass ein Verzicht auf einen Haustürservice und stattdessen Bedienung an den bisherigen Haltepunkten zu erheblich geringeren Kosten führt. Allerdings sinkt dann auch der Nutzen deutlich, da durch Laufwege von und zu Haltestellen die Wegdauern ansteigen. Basierend auf einer Abschätzung von Kosten für das konventionelle Angebot erscheint es, dass Sammeltaxis bei Bedienung an den bisherigen Haltepunkten weniger Kosten erzeugen als das konventionelle Angebot, im Haustürbetrieb aber nicht. Diese Rechnung enthält beim konventionellen Angebot die Lohnkosten für die Fahrer, wohingegen diese im Sammeltaxibetrieb entfallen. Dies basiert auf der Annahme, dass eine Automatisierung eines herkömmlichen ÖPNV-Fuhrparks auch auf absehbare Zeit nicht erfolgt. Die Resultate sind nicht direkt mit der Arbeit von LEICH (2017) vergleichbar, da z.B. Auslastungsgrade und Anschlusswartezeiten in Cottbus deutlich anders sind als in Berlin und der herkömmliche ÖPNV vollständig entfernt wurde, sodass keine Wartezeiten auf Anschlusszüge anfallen.

9.3 IMPLIKATIONEN FÜR DEN ÖPNV

Es gibt weitere Studien von anderen Arbeitsgruppen. Z.B. hat ISV (2016, S. 42f.) den Ersatz aller Pkws und aller konventionellen Linienbusse in der Region Stuttgart durch autonome Fahrzeuge mit 6 Sitzplätzen mit einem anderen Simulationsmodell untersucht. Im am besten zu vergleichenden Szenario, dem mit 100 % geteilten autonomen Fahrzeugen und unverändert weiter betriebenen schienengebundenen ÖPNV (Szenario 2), sind bei über der Hälfte der Abfahrten zwischen 6:00 und 19:00 Uhr alle 6 Plätze des Fahrzeugs besetzt,

es wird somit offenbar eine große Bündelung erreicht. Diese Studie unterscheidet sich von vielen Hinsichten von unseren, z.B. durch die Kombination von MIV- und ÖPNV-Nachfrage zu einer größeren kombinierten Nachfrage, einer a priori Bündelung der Nachfrage auf Verkehrszellen und 15-Minuten-Intervalle, oder einen anderen Fahrtenbündelungs- und Umlaufplanungsalgorithmus.

Von den Autoren wurden bisher noch keine Verkehrsmittelwahleffekte durch das mögliche Angebot von fahrerlosen Sammeltaxis in Konkurrenz zum ÖPNV untersucht. HÖRL ET AL. (2018) gehen in ihrer Studie für Zürich davon aus, dass der Preis einer Sammeltaxifahrt in etwa den Vollkosten der Pkw-Nutzung entsprechen, jedoch deutlich über den subventionierten Preisen des ÖPNV liegen wird. Insofern wären Sammeltaxis preislich nur zu konventionellen Taxis und Pkw konkurrenzfähig. Während FÜHRER (2018) für Cottbus eine Reduktion der Reisezeit um ein Drittel für Haltestellenbetrieb bzw. um mehr als die Hälfte für Haustürbedienung berechnet hat, fiel der Reisezeitgewinn in der Last-Mile-Studie von LEICH (2017) trotz Haustürbedienung eher gering aus. Autonome Sammeltaxis bieten also nicht per se immer große Reisezeitgewinne, zudem können die Betreiber über verschiedene Flottengrößen und Dispatch-Algorithmen das angebotene Serviceniveau variieren. Trotzdem nennen heutige Ridesharing-Kunden in einer Umfrage von CLEWLOW & MISHRA (2017) zu hohe Reisezeiten als wichtigsten Grund für die Nutzung von Ridesharing-Dienstleistern anstelle des ÖPNV.

Insgesamt ergibt sich, natürlich nicht ganz unerwartet, dass die Bewertung von Sammeltaxis als Ersatz oder Ergänzung des bisherigen Systems des öffentlichen Verkehrs komplexer ist als beim System Auto. Eine zu diskutierende Frage ist, ob man die durch den potentiellen Wegfall des Fahrers eingesparten Kosten lieber in reduzierte Preise/Subventionen oder in verbesserte Bedienqualität investieren will. Falls letzteres gewünscht ist, so lassen sich Verbesserungen vor allem in Gegenden erreichen, wo die bisherigen Linienbusse selbst zur Hauptverkehrszeit nicht voll ausgelastet sind. Weiterhin muss ein Gleichgewicht zwischen Pooling auf der einen Seite, und dadurch verlängerte Fahrzeiten auf der anderen Seite gefunden werden. Möglicherweise sollte auf Haustürbedienung während der Hauptverkehrszeit verzichtet werden. Hier ergibt sich für uns derzeit noch kein verallgemeinerbares Bild; stattdessen sollten weitere Szenarien für unterschiedliche Regionen durchgerechnet werden.

10 Diskussion

10.1 BETREIBERMODELLE, VORBESTELLUNGEN, UND PREISE

Es sollte deutlich geworden sein, dass zur Beurteilung von Varianten die Betreibermodelle genau spezifiziert sein müssen. Unsere Simulation geht derzeit davon aus, dass Reisende bei Beendigung ihrer Aktivität eine Art Knopf drücken, worauf sich dann ein Robotaxi in Bewegung setzt. Im Berliner Taxisystem erweist sich dies als weitgehend ausreichend; Wartezeiten von mehr als ca. 5 Minuten sind selten, und rechtfertigen nicht den Aufwand von Vorbestellungen, zumal diese typischerweise auch nicht ohne gelegentliche Fehler

abgewickelt werden. Im dünn besiedelten Raum hingegen wird es ohne Vorbestellungen nicht gehen, da ansonsten selbst das nächste verfügbare Fahrzeug zu weit weg sein wird. Vorbestellungen werden endgültig notwendig, wenn eine bestimmte Ankunftszeit, z.B. für einen Arbeitsbeginn oder eine Zugabfahrt, eingehalten werden soll: Hier muss ein Betreiber zu spät hereinkommende Anfragen auf jeden Fall ablehnen, woraus sich eine Mindestvorbestellzeit ergibt. Ansonsten ergibt sich die Möglichkeit der Ablehnung eher aus dem Bedienkonzept: will man lieber die Anzahl der Fahrzeuge knapphalten und dafür bestimmte Anfragen ablehnen, oder garantiert man die Bedienung aller Anfragen und hat dafür eine größere Flotte? Weiterhin könnte man preislich differenzieren, z.B. quasi sofortige Abholung für einen höheren Preis vs. Abholung "wenn es am Weg liegt" zu einem niedrigeren Preis.

BÖSCH ET AL. (2018) haben die Kostenstrukturen von autonomen Fahrzeugen untersucht und gehen in urbanen Gebieten von nur geringen Kostenvorteilen geteilter Fahrzeuge (Ridesharing sowie Carsharing) gegenüber ungeteilten autonomen Fahrzeugen in Privatbesitz aus, da sie bei geteilten fahrerlosen Fahrzeugen von hohen Overhead- und Reinigungskosten ausgehen. Nur in ländlichen Räumen erwarten sie deutlich niedrigere Preise für geteilte Fahrzeuge, die jedoch immer noch über den variablen Kosten eines Pkw in Privatbesitz liegen würden.

Insofern bleibt abzuwarten, wie viele Menschen tatsächlich kein eigenes Auto mehr besitzen werden und welchen Modal Split Betreiber autonomer Flotten erreichen werden. Falls der Modal Split letzterer gering ausfällt, könnte es schwierig sein, eine ausreichend große Flotte zu finanzieren, um auch in Gebieten mit schwacher Nachfrage ein attraktives Angebot zu gewährleisten.

10.2 PREEMPTIVES VERLEGEN DER FAHRZEUGE

Betreiber können Fahrzeuge dort stehen lassen, wo der letzte Passagier ausgestiegen ist; sie können aber auch "auf Verdacht" dorthin fahren, wo in der Vergangenheit eine starke Nachfrage war. Dies ist z.B. im Berufsverkehr sinnvoll. In diesem Zusammenhang wird auch immer mal wieder die Frage gestellt, ob leere Fahrzeuge "cruisen" sollten, so wie es Taxifahrer auf der Suche nach Kunden machen. Unsere Intuition ist, dass dies nur dann sinnvoll ist, wenn die Anforderung nicht-elektronisch (also z.B. durch Winken) erfolgen soll. Bei Anforderung durch Smartphone oder ähnlich ist mit dem preemptiven Verlegen eines Fahrzeuges bereits das Optimum erreicht; jede weitere Fahrzeugbewegung erzeugt nur Kosten, ohne den mittleren Abstand zum nächsten Kunden zu verkleinern.

Von den Autoren wurden bereits erste Rebalancing-Strategien für geteilte (Sammel-)Taxis implementiert, jedoch noch nicht publiziert. Für ungeteilte Taxis haben HÖRL ET AL. (2017) in MATSim bereits verschiedene Dispatch- und Rebalancing-Strategien untersucht und in einem Zürich-Modell angewendet. Um eine mittlere Wartezeit von 5 min zur Hauptverkehrszeit zu erreichen, sind ohne Rebalancing 10 000 Fahrzeuge nötig, während es mit Rebalancing nur 8 700 sind. Dafür sind jedoch zusätzliche Leerfahrten nötig, die zu einem Anstieg der gefahrenen Kilometer in der Größenordnung von 10 % bis 15 % und

damit zu höheren Kosten führen. Es zeigte sich, dass im untersuchten Zürich-Modell für eine angestrebte mittlere Wartezeit unter 5 min der Einsatz einer Rebalancingstrategie zu geringeren Kosten je Passagierkilometer führt, während es für ein niedrigeres Serviceniveau mit mittleren Wartezeiten über 5 min günstiger ist, kein Rebalancing durchzuführen (und eine entsprechend größere Flotte vorzuhalten).

10.3 INDUZierter VERKEHR UND REGULIERUNG

Es steht zu erwarten, dass solche Systeme sehr attraktiv sind, und daher zusätzliche Wege erzeugen. Unserem Eindruck nach noch wichtiger dürften Verkehrsmittelwahl-Reaktionen sein: Personen, die von zu Fuß, vom Fahrrad oder vom konventionellen öffentlichen Verkehr auf eine autonome Flotte wechseln. Wenn man alle Argumente dieses Textes – einschließlich der zu erwartenden Kapazitätserhöhung – zusammennimmt, dann kann man durchaus damit rechnen, dass wir dann doppelt so viele fahrende automobile Fahrzeuge auf den urbanen Straßen haben werden wie jetzt. Im Extremfall werden Lichtsignalanlagen an den Kreuzungen nicht mehr nötig sein, so dass der Verkehrsfluss auch nicht mehr durch diese unterbrochen wird. Hier stellt sich dann die Frage, ob wir als Gesellschaft dies wollen. Falls nicht, so müssten wir eingreifen, z.B. durch Maut, oder regulativ, z.B. durch eine restriktive Lizenzvergabe. Eine Möglichkeit wäre ein Verbot privater Autos, zusammen mit einer Lizenzvergabe an wenige Betreiber, verbunden mit der Auflage, auch die dünn besiedelten Randbezirke zu bestimmten Standards zu versorgen. Dies wäre analog zu Modellen z.B. im Telekommunikationsbereich.

10.4 MÖGLICHE ÜBERGANGSSZENARIEN

Wir simulieren vor allem Szenarien, bei denen angenommen wird, dass eine Umstellung bereits stattgefunden hat. Natürlich ist es sinnvoll, über Übergangsszenarien auf dem Weg dorthin nachzudenken. Generell würden wir erwarten, dass sich autonome Fahrzeuge aus (mindestens) drei Richtungen etablieren:

Szenario “Kalifornische Autobahn” Autobahnen sind weniger komplex als Stadtverkehr, und im Vergleich zu Landstraßen auch relativ sicher. Es ist mit einem geeigneten Auto bereits jetzt möglich, das Lenkrad loszulassen, auch wenn die Verantwortung derzeit noch beim Fahrer liegt. Eventuell noch problematische Bereiche können vermutlich durch ein Nachziehen der Fahrbahnmarkierungen oder notfalls durch ein paar elektronische Baken entschärft werden.

Szenario “Flotte im Stadtverkehr” Dies entspricht dem in diesem Beitrag hauptsächlich diskutierten Szenario: Eine Flotte autonom fahrender Fahrzeuge im urbanen Bereich, die entweder ergänzend zu konventionellen Fahrzeugen agiert, oder diese ersetzt.

Szenario “Ländlicher Verkehr” Als drittes Szenario könnte man sich ein Verkehrssystem vorstellen, welches den ländlichen Raum bedient. Hier würden die autonomen Fahrzeuge selten und oft recht leer fahrende Busse ersetzen.

Für jedes dieser Szenarien wären andere Fahrzeugtypen sinnvoll: für die "kalifornische Autobahn" vielleicht Fahrzeuge, die den heutigen ähneln, für die "Flotte im Stadtverkehr" vermutlich für niedrigere Geschwindigkeiten ausgelegte und somit deutlich leichtere Fahrzeuge als heutige Pkws, und für den "ländlichen Verkehr" vielleicht Fahrzeuge, die auch größere Gruppen und/oder Lasten transportieren können.

Zudem sind auch Übergangsvarianten vorstellbar, z.B. eine Variante des derzeitigen free floating car sharing, bei dem ein fahrerloses Fahrzeug zunächst recht langsam zum Kunden fährt, der Kunde es dann selbst mit normaler Geschwindigkeit zu seinem Ziel fährt und dort aussteigt, woraufhin das Fahrzeug sich dann wieder mit niedriger Geschwindigkeit einen Parkplatz sucht oder zum nächsten Kunden fährt. Ein solcher Ansatz hätte den Vorteil, dass solche Fahrzeuge den fahrerlosen Betrieb zunächst nur mit niedrigen Geschwindigkeiten durchführen würden.

Während manche Befürworter autonomer Fahrzeuge vorhersagen, dass fahrerlose Autos ab 2030 bezahlbar und (technisch) geeignet genug sein werden, um die meisten von Menschen gesteuerten Autos ersetzen, erwartet LITMAN (2018) einen deutlich langsameren Übergang. Zunächst blieben autonome Fahrzeuge in den 2020er und möglicherweise 2030er Jahren teuer und ungeeignet für schlechte Wetter- und Straßenverhältnisse. Erst ab den späten 2030er und 2040er Jahren würden sie für die Mittelklasse erschwinglich werden. In der langen Übergangszeit mit einem Parallelbetrieb manuell und autonom gesteuerter Fahrzeuge ließen sich viele erwartete Vorteile autonomer Fahrzeuge insbesondere im Bereich Straßenkapazität nicht realisieren. Robotaxi- und Sammeltaxifahrerdienste, wie wir sie in den vorhergehenden Kapiteln betrachtet haben, könnten ab den 2020er und 2030er Jahren in vielen Ballungsräumen angeboten werden. Aufgrund des fehlenden Fahrers würden Vandalismus und Verschmutzung durch Fahrgäste jedoch zu recht geringer Servicequalität führen, sodass der Modal Split dieser geteilten Fahrzeuge recht gering bliebe und viele Haushalte weiterhin private Pkw anschaffen würden.

11 Schlussfolgerungen

Insgesamt ergibt sich eine durchaus komplexe Situation. Für Berlin ergeben sich folgende Schlussfolgerungen:

1. Eine Umstellung des gesamten privaten Autoverkehrs innerhalb der Stadtgrenzen auf eine Flotte autonomer Fahrzeuge (mit zunächst einem Passagier pro Fahrzeug) wäre verkehrlich möglich.
2. Diese Fahrzeuge würden unzweifelhaft mehr Fahrleistung erbringen, da neben den Passagierfahrten die Leerfahrten von einem Passagierausstieg zum nächsten Passagiereinstieg hinzukommen. In unserem Szenario beträgt dieser Anstieg 13%.
3. Die Literatur geht davon aus, dass sich durch autonome Fahrzeuge zusätzliche Kapazität für den Verkehrsfluss ergibt. Dieser Anstieg müsste offenbar mindestens 13% betragen, um den Effekt von Punkt 2 auszugleichen. Dies setzt

somit auch einem von menschlichen Fahrern betriebenen (also nicht autonom fahrenden) Flottensystem Grenzen.

4. Eine mögliche Elektrifizierung einer solchen Flotte ist im Betrieb im Vergleich zur heutigen fossilen Antriebstechnik mindestens kostenneutral und könnte somit bereits zu heutigen Preisen durchgeführt werden.
5. Die Verwendung von autonomen Fahrzeugen für den Zugang zu und Abgang von Massenverkehrssystemen scheint plausibel, insbesondere dort, wo die Nachfrage nicht ausreicht, konventionelle Busse zu füllen.

Folgende Fragen sollten politisch diskutiert werden:

- Wollen wir die zu erwartende deutliche Erhöhung der Zahl der fahrenden Fahrzeuge im urbanen Bereich?
- Was machen wir mit den frei werdenden Parkflächen?
- Wollen wir entweder sehr niedrige Preise oder hoch profitable Anbieter im urbanen Kern bei gleichzeitiger Subvention entsprechender Angebote im ländlichen Raum, oder eher eine implizite Quersubvention durch entsprechende Lizenzvergabe?
- Wollen wir, dass autonome Fahrzeuge beliebige Punkt-zu-Punkt Verkehre anbieten, oder sollten sie sich auf Zugang zu/Abgang von Massenverkehrssystemen konzentrieren? Falls ersteres, wie halten wir die Anzahl der Fahrzeuge trotzdem klein (falls so gewünscht, s.o.)?

Literatur

- Ahrens, G.-A., F. Ließke, R. Wittwer, S. Hubrich, & S. Wittig. *Mobilität in Städten – SrV* 2013. 2014. URL <http://www.tu-dresden.de/srv/>.
- Axhausen, K. W. Sind wir bald alle Passagiere? *Neue Züricher Zeitung*, 4.10.2016, 2016.
- Ben-Akiva, M. & S. R. Lerman. *Discrete choice analysis*. The MIT Press, Cambridge, MA, 1985.
- Bischoff, J., Führer, K., & M. Maciejewski. Impact assessment of autonomous DRT systems. VSP Working Paper 18-04, TU Berlin, Fachgebiet Verkehrssystemplanung und Verkehrstelematik, 2018a. URL <http://www.vsp.tu-berlin.de/publications>.
- Bischoff, J., I. Kaddoura, M. Maciejewski, & K. Nagel. Simulation-based optimization of service areas for pooled ride-hailing operators. *Procedia Computer Science*, 130, 816, 2018b. doi:10.1016/j.procs.2018.04.069.
- Bischoff, J. & M. Maciejewski. Agent-based simulation of electric taxicab fleets. *Transportation Research Procedia*, 4, 191, 2014. doi:10.1016/j.trpro.2014.11.015.
- Bischoff, J. & M. Maciejewski. Electric taxis in Berlin – Analysis of the feasibility of a large-scale transition. In J. Mikulski, ed., *Tools of Transport Telematics*. Springer International Publishing, 2015. doi:10.1007/978-3-319-24577-5.
- Bischoff, J. & M. Maciejewski. Autonomous taxicabs in Berlin – a spatiotemporal analysis of service performance. *Transportation Research Procedia*, 19, 176, 2016a. doi:10.1016/j.trpro.2016.12.078.
- Bischoff, J. & M. Maciejewski. Simulation of city-wide replacement of private cars with autonomous taxis in Berlin. *Procedia Computer Science*, 83, 237, 2016b. doi:10.1016/j.procs.2016.04.121.
- Bischoff, J., M. Maciejewski, & K. Nagel. City-wide shared taxis: A simulation study in Berlin. In *2017 IEEE 20th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*. IEEE, 2017. doi:10.1109/itsc.2017.8317926.
- Bösch, P. M., F. Becker, H. Becker, & K. W. Axhausen. Cost-based analysis of autonomous mobility services. *Transport Policy*, 64, 76, 2018. doi:10.1016/j.tranpol.2017.09.005.
- Clewlow, R. & G. S. Mishra. *Disruptive transportation: The adoption, utilization, and impacts of ride-hailing in the United States*. Institute of Transportation Studies, University of California, Davis, 2017. URL https://itspubs.ucdavis.edu/wp-content/themes/ucdavis/pubs/download_pdf.php?id=2752, letzter Zugriff 12.04.2018.

- Führer, K. *Simulation-based assessment of demand responsive transport systems*. Bachelor's thesis, TU Berlin, Fachgebiet Verkehrssystemplanung und Verkehrstelematik, Berlin, 2018.
- Horni, A., K. Nagel, & K. W. Axhausen, eds. *The Multi-Agent Transport Simulation MATSim*. Ubiquity, London, 2016. doi:10.5334/baw.
- Hörl, S., C. Ruch, F. Becker, E. Frazzoli, & K. W. Axhausen. Fleet control algorithms for automated mobility: A simulation assessment for Zurich. Annual Meeting Preprint 18-02171, Transportation Research Board, Washington, D.C., 2017.
- infas & DLR. *Mobilität in Deutschland 2008 – Ergebnisbericht*. Schlussbericht für Forschungsprojekt FE Nr. 70.801/2006, Institut für angewandte Sozialwissenschaft, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, 2010. URL <http://daten.clearingstelle-verkehr.de/223/>.
- ISV. *Modellergebnisse geteilter autonomer Fahrzeugflotten des öffentlichen Nahverkehrs*. Abschlussbericht, Institut für Straßen- und Verkehrswesen, Universität Stuttgart, 2016. URL https://www.isv.uni-stuttgart.de/vuv/publikationen/downloads/MEGAFON_Abschlussbericht_V028_20161212.pdf.
- Knapen, L., D. Keren, A.-U.-H. Yasar, S. Cho, T. Bellemans, D. Janssens, & G. Wets. Estimating scalability issues while finding an optimal assignment for carpooling. *Procedia Computer Science*, 19, 372, 2013. doi:10.1016/j.procs.2013.06.051.
- Kuhn, H. W. The Hungarian method for the assignment problem. *Naval research logistics quarterly*, 2(1-2), 83, 1955.
- Leich, G. *Agentenbasierte Simulation autonom fahrender Rufbusse im Nordwesten Berlins*. Masterarbeit, TU Berlin, Fachgebiet Verkehrssystemplanung und Verkehrstelematik, Berlin, 2017.
- Leich, G. & J. Bischoff. Should autonomous shared taxis replace buses? A simulation study. VSP Working Paper 18-05, TU Berlin, Fachgebiet Verkehrssystemplanung und Verkehrstelematik, 2018. URL <http://www.vsp.tu-berlin.de/publications>.
- Levinson, D. M. & K. J. Krizek. *The end of traffic and the future of transport*. Amazon Digital Services LLC, 2. Auflage, 2015.
- Litman, T. *Autonomous vehicle implementation predictions*. Victoria Transport Policy Institute, 2018. URL <http://www.vtpi.org/avip.pdf>.
- Maciejewski, M. Benchmarking minimum passenger waiting time in online taxi dispatching with exact offline optimization methods. *Archives of Transport*, 30(2), 67, 2014a. doi:10.5604/08669546.1146978.

- Maciejewski, M. Online taxi dispatching via exact offline optimization. In *7th International Conference on Logistic Systems – Theory and Practice*. 2014b. Siehe auch VSP WP 14-14 <http://www.vsp.tu-berlin.de/publications>.
- Maciejewski, M. & J. Bischoff. Congestion effects of Autonomous Taxi fleets. *Transport*, 0, 1, 2017. doi:10.3846/16484142.2017.1347827.
- Maciejewski, M. & K. Nagel. Towards multi-agent simulation of the dynamic vehicle routing problem in MATSim. In R. Wyrzykowski et al, ed., *Parallel Processing and Applied Mathematics (PPAM), Revised Selected Papers, Part II*, Lecture Notes in Computer Science. Springer, Berlin, 2012. doi:10.1007/978-3-642-31500-8_57.
- Maciejewski, M. & K. Nagel. The influence of multi-agent cooperation on the efficiency of taxi dispatching. In R. Wyrzykowski et al., ed., *10th International Conference Parallel Processing and Applied Mathematics (PPAM) Part II*, no. 8385 in LNCS. Warschau, Polen, 2013a. doi:10.1007/978-3-642-55195-6_71.
- Maciejewski, M. & K. Nagel. A microscopic simulation approach for optimization of taxi services. In T. Albrecht, B. Jaekel, & M. Lehnert, eds., *3rd International Conference on Models and Technologies for Intelligent Transportation Systems 2013*, pp. 1–10. TUDpress, 2013b. Siehe auch VSP WP 13-12, see <http://www.vsp.tu-berlin.de/publications>.
- Uber. uberPOOL – Sharing is saving, 2017. URL <https://www.uber.com/nyc-riders/products/uberpool/>, letzter Zugriff 12.05.2017.
- Zou, Y., S. Wei, F. Sun, X. Hu, & Y. Shiao. Large-scale deployment of electric taxis in Beijing: A real-world analysis. *Energy*, 100, 25, 2016. doi:10.1016/j.energy.2016.01.062.