

TU
TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN

D I S S E R T A T I O N

**Einfluss der Verkehrsmittelwahl auf Bevölkerungsdichte
und externe Agglomerationseffekte in Großstädten**

ausgeführt zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der
technischen Wissenschaften unter der Leitung von

Univ.-Prof. Mag. Dr. Wilfried SCHÖNBÄCK
E280

Department für Raumentwicklung, Infrastruktur- und Umweltplanung
Fachbereichsleiter Finanzwissenschaft und Infrastrukturpolitik

eingereicht an der Technischen Universität Wien
Fakultät für Architektur und Raumplanung

von

Dipl.-Ing. Wolfgang Rauh
7430604
Blechturm-gasse 8/20, A-1040 Wien

Wien, im Mai 2008

Kurzfassung

Positive Agglomerationseffekte („economies of agglomeration“) sind Triebkraft für die Bildung von Agglomerationen. Wenn kein Marktversagen auftritt, muss die Bevölkerungsdichte von Städten stets jenen optimalen Wert erreichen, bei dem der Ertrag aus positiven Agglomerationseffekten abzüglich Agglomerationskosten ein Maximum erreicht (Wheaton 1998, S. 259 und S. 266). Diese Optimierung der Bevölkerungsdichte durch den Markt ist nach dem derzeitigen Stand der Forschung nicht gegeben, denn externe Kosten des Verkehrs bewirken ein Marktversagen, durch das die Bevölkerungsdichte von Städten unter dem genannten Optimum liegt (Wheaton 1998, S. 269f.). Das bedeutet, dass externe Kosten des Verkehrs durch ihren Einfluss auf die Bevölkerungsdichte die Größe der positiven Agglomerationseffekte mindern.

In dieser Arbeit wird eine Hypothese darüber aufgestellt, wie stark sich eine Änderung des Modal-Split (und damit eine Änderung der Höhe externer Verkehrskosten) auf die Bevölkerungsdichte von Großstädten und in weiterer Folge auf die Größe der positiven Agglomerationseffekte auswirkt. Diese Wirkung externer Verkehrskosten (insbesondere Staukosten) auf die Größe von Agglomerationseffekten stellt einen zusätzlichen externen Effekt des Verkehrs dar, dessen Größe abgeschätzt wird.

Um das Wechselspiel von Verkehrsmittelwahl, Bevölkerungsdichte und positiven Agglomerationseffekten zu modellieren, werden die folgenden Annahmen getroffen:

- Positive Agglomerationseffekte sind proportional der Erreichbarkeit¹
- Agglomerationskosten bestehen ausschließlich in den Kosten durch gegenseitige Behinderung der Verkehrsteilnehmer („Staukosten“).

Je höher die Bevölkerungsdichte ist, desto höher ist einerseits die Erreichbarkeit; desto höher sind aber andererseits Staukosten, welche die Erreichbarkeit vermindern. Das Maximum der Erreichbarkeit ist gegeben, wenn der Grenzzuwachs an Erreichbarkeit durch weitere Verdichtung gleich dem Grenzverlust an Erreichbarkeit ist. Aus der Annahme, dass rational handelnde Akteure unter den gegebenen Bedingungen versuchen werden, die Erreichbarkeit zu maximieren, wird die folgende Hypothese abgeleitet:

Die Bevölkerungsdichte von Städten strebt jenem Wert zu, der beim jeweils gegebenen Modal Split ein Maximum der Erreichbarkeit ermöglicht.

Die Hypothese wird anhand eines Modells, das die Erreichbarkeit als Funktion von Bevölkerungsdichte und Modal-Split beschreibt, überprüft. Das Modell liefert für jeden Modal Split jene Bevölkerungsdichte, die laut Hypothese zu erwarten ist.

Empirische Daten zu Modal-Split und Bevölkerungsdichte von 46 internationalen Beispielstädten zeigen beim Vergleich von Ist-Wert und dem gemäß Modell erwarteten Wert ein Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,833$. Im Mittel liegt der Ist-Wert der Bevölkerungsdichte um 15 % unter dem erwarteten Wert. Besonders gute

¹ Dabei gilt, dass die Erreichbarkeit proportional jener Anzahl von Menschen ist, die einen bestimmten Punkt des Stadtgebietes innerhalb einer gegebenen Zeit von ihrer Wohnung aus erreichen können.

Übereinstimmung der tatsächlichen mit der erwarteten Dichte ist bei mittleren Dichten (europäische Städte) fest zu stellen. Deutliche Abweichungen der tatsächlichen Dichte unter den erwarteten Wert zeigen sich bei Städten geringer Dichte (USA, Australien). Beim Vergleich der zeitlichen Entwicklung der Bevölkerungsdichte von US-Großstädten zwischen 1950 und 1990 mit den laut Hypothese jeweils erwarteten Werten ergibt sich ein Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,98$.

Die zweite Hypothese dieser Arbeit betrifft die Auswirkungen der Verkehrsmittelwahl im Personenverkehr auf die Größe externer Agglomerationseffekte:

In Städten besteht der größte externe Effekt des Verkehrs in dem Einfluss, den die die Verkehrsmittelwahl im Personenverkehr auf die Produktivität der in der Stadt angesiedelten Betriebe ausübt.

Um Hypothese II zu prüfen, wird das Erreichbarkeitsmodell um die Änderung der Wertschöpfung erweitert, die laut vorliegenden Forschungsergebnissen (Prud'homme und Lee, 2001, S. 151) mit Änderungen der Erreichbarkeit verbunden sind. Bei Minimal-Annahmen ergibt sich für Wien für die Spitzenstunden des Tages ein negativer externer Grenz-Agglomerationseffekt pro Pkw-Fahrt, der je nach Verkehrsstärke zwischen 4,- und 8,- Euro liegt. Diese Höhe liegt in der Größenordnung der externen Grenz-Staukosten. Neben externen Staukosten sind es also auch negative externe Effekte durch Einbußen an Wertschöpfung, die in Städten korrigierende Eingriffe in den Verkehrsmarkt, wie etwa Stadtmauten, rechtfertigen könnten.

In vorliegenden stadtökonomischen Forschungsarbeiten werden sowohl Einflüsse des Personenverkehrs auf die Siedlungsdichte als auch Einflüsse auf externe Agglomerationseffekte behandelt. Durch vorliegende Forschungsergebnisse wird bestätigt, dass insbesondere externe Staukosten bewirken können, dass positive Agglomerationseffekte eingeschränkt werden und dass dadurch das erreichbare Produktivitätsniveau reduziert wird (Graham 2007, S. 116). Auch Auswirkungen der Internalisierung externer Staukosten auf die Bevölkerungsdichte von Städten wurden bereits theoretisch untersucht, wobei festgestellt wurde, dass erhebliche Zunahmen der Bevölkerungsdichte stattfinden könnten, die mit Wohlfahrtsgewinnen verbunden wären (Wheaton 1998, S. 271.). Die absolute Größe von Änderungen der Bevölkerungsdichte von Großstädten konnte bislang auf Grund von Änderungen der konventionellen ökonomischen Faktoren² nur unzureichend erklärt werden (McGrath 2005, S. 8). Im Allgemeinen ist auch eine Änderung des Modal-Split in den Berechnungsmodellen nicht als Option vorgesehen. Damit entfällt unter anderem die in dieser Arbeit genutzte Möglichkeit, externe Effekte der Verkehrsmittelwahl im Personenverkehr (d.h. dem Umstieg zwischen MIV und ÖV) zuzuordnen.

² Bevölkerung, Verkehrskosten, Einkommen und landwirtschaftliche Bodenrente

Inhaltsverzeichnis

1	EINLEITUNG	15
1.1	Einführung und Problemstellung.....	15
1.2	Erreichbarkeit.....	16
1.2.1	Erreichbarkeit nach dem Potentialansatz.....	16
1.2.2	Erreichbarkeit nach dem Isochronen-Ansatz.....	16
1.3	Hypothesen zum Zusammenhang zwischen Bevölkerungs-dichte und Modal-Split des Personenverkehrs sowie zum Agglomerationseffekt.....	18
1.3.1	Optimale Siedlungsentwicklung oder Marktversagen?.....	18
1.3.2	Hypothese I: Bevölkerungsdichte unter dem Einfluss externer Staukosten.....	19
1.3.3	Hypothese II: Größe des durch die Verkehrsmittelwahl verursachten externen Agglomerationseffektes	20
1.4	Überlegungen zu Verkehr und Stadtentwicklung	21
1.4.1	Erreichbarkeit als Funktion von Bevölkerungsdichte und Verkehrsmittelwahl.....	22
1.4.2	Wie Maxima der Erreichbarkeit zu Stande kommen.....	23
1.5	Überlegungen zu Grenzen der Anwendbarkeit der Hypothese I.....	25
1.5.1	Einfluss der Verteilung von Orten der Aktivität auf die Anwendbarkeit von Hypothese I	25
1.5.2	Einfluss von Verkehrsinfrastruktur und Größe des Stadtgebietes auf die Anwendbarkeit der Hypothese I.....	27
1.5.3	Zusammenfassende Schlussfolgerungen:	27
2	METHODE	29
2.1	Aufgabenstellung:.....	29
2.2	Modell-Annahmen für das Verkehrsnetz.....	29
2.2.1	Nieder- und hochrangige Netze.....	29
2.2.2	Bedeutung der Annahmen für die Lage der Maxima der Erreichbarkeit	31
2.2.3	Modell für Reisegeschwindigkeit und Erreichbarkeit sowie zugehörige Annahmen	32
2.2.4	Annahmen zur Verteilung von Bevölkerung und Orten außerhäuslicher Aktivitäten	33
2.3	Vorgangsweise.....	33
2.3.1	Übersicht der Schritte zur Überprüfung der Hypothesen	33
2.3.2	Zur Frage der Einführung weiterer Modellparameter	36
3	ERGEBNISSE	37
3.1	Abhängigkeit der Erreichbarkeit von Bevölkerungsdichte und Verkehrsmittelwahl .	37
3.1.1	Wie die Verkehrsmittelwahl die Erreichbarkeit beeinflusst.....	37
3.1.2	Vorgangsweise	37
3.1.3	Abhängigkeit der Verkehrsstärke von der Verkehrsmittelwahl	38

3.1.4	Bevölkerungsdichte und Verkehrsstärke	39
3.1.5	Bevölkerungsdichte und Reisegeschwindigkeit im öffentlichen Verkehr.....	40
3.1.6	Ermittlung der Erreichbarkeit aus den Reisegeschwindigkeiten	41
3.1.7	Abhängigkeit der Bevölkerungsdichte, die maximale Erreichbarkeit ermöglicht, vom Modal-Split	42
3.2	Überprüfung der Hypothese I	45
3.2.1	Einige mögliche Ursachen von Bevölkerungsdichten unter dem laut Hypothese I erwarteten Wert.....	48
3.2.2	Mögliche Ursachen von Dichte-Werten über dem laut Hypothese I erwarteten Wert.....	50
3.2.3	Auswirkung großer Dichte-Unterschiede innerhalb des Stadtgebietes	51
3.2.4	Zusammenfassung	53
3.2.5	Überprüfung von Hypothese I anhand der zeitlichen Veränderung von Modal-Split und Bevölkerungsdichte.....	55
3.2.6	Untersuchung von Zeitreihen der Bevölkerungsdichte und des Modal-Split in Städten der USA.....	55
3.2.7	Zusammenfassung der Ergebnisse der Überprüfung von Hypothese I:	57
3.3	Wirkung von Agglomerationseffekten auf die Produktivität	58
3.3.1	Positive und negative Agglomerationseffekte.....	58
3.3.2	Interne und externe Effekte von Standort-Entscheidungen.....	58
3.3.3	Klassifizierung unterschiedlicher Agglomerationseffekte	60
3.3.4	Ursachen von Agglomerationseffekten	61
3.3.5	Einfluss der Größe des Arbeitsmarktes auf die Produktivität	62
3.4	Einfluss von Bevölkerungsdichte und Reisegeschwindigkeit auf Agglomerationseffekte	64
3.4.1	Positiver externer Agglomerationseffekt und Dichte	64
3.4.2	Einfluss der effektiven Größe des Arbeitsmarktes auf die Brutto-Wertschöpfung pro beschäftigter Person	66
3.4.3	Effektive Größe der Arbeitsmärkte österreichischer Bundesländer	67
3.4.4	Effektive Größe der Arbeitsmärkte Wiens und Niederösterreichs	68
3.4.5	Wertschöpfung pro beschäftigter Person und effektive Größe des Arbeitsmarktes in Österreich.....	69
3.4.6	Elastizitäten der totalen Faktorproduktivität und der Wertschöpfung pro Erwerbperson bezüglich der effektiven Größe des Arbeitsmarktes	71
3.5	Verkehrsbedingte externe Agglomerationseffekte	72
3.5.1	Kurz- und langfristige externe Agglomerationseffekte	72
3.5.2	Ansatz für die Abhängigkeit der Wertschöpfung pro beschäftigter Person von der Erreichbarkeit des Betriebsstandortes	73
3.5.3	Durch die Verkehrsmittelwahl verursachter Grenz-Agglomerationseffekt.....	74
3.5.4	Für Arbeitsmarkt und Produktivität relevante Anteile des Personenverkehrs.....	76
3.5.5	Annahmen über relevante Verkehrsanteile und Elastizitäten.....	76
3.5.6	Kurzfristige externe Grenz-Agglomerationseffekte pro Pkw-Fahrt.....	77
3.5.7	Durch die Verkehrsmittelwahl verursachte langfristige externe Effekte	80

3.6	Überprüfung von Hypothese II: Übertreffen verkehrsbedingte Agglomerationseffekte andere externe Effekte des Verkehrs?.....	83
3.6.1	Externe Stau-Grenzkosten bei Variation von Bevölkerungsdichte und MIV-Anteil	83
3.6.2	Vergleich externer Staukosten mit externen Agglomerationseffekten.....	84
4	DISKUSSION DER ERGEBNISSE.....	86
4.1	Verkehr, Bevölkerungsdichte und externe Agglomerationseffekte in der Stadtökonomik.....	86
4.1.1	Aufbau des monozentrischen Stadtmodells.....	86
4.1.2	Bevölkerungsdichte und Verkehr im klassischen Stadtmodell	87
4.1.3	Einfluss des Verkehrs auf externe Agglomerationseffekte	89
4.1.4	Auswirkung der Internalisierung externer Effekte des Verkehrs auf die Bevölkerungsdichte.....	90
4.1.5	Zusammenfassende Schlussfolgerung:.....	91
4.2	Einfluss des durchschnittlichen Einkommens auf Verkehr und Stadtentwicklung.....	92
4.2.1	Bevölkerungsdichte bei Variation der Verkehrskosten.....	92
4.2.2	Bevölkerungsdichte bei Variation des Einkommens.....	93
4.3	Geschwindigkeit und Bevölkerungsdichte als Lenkungsmechanismen.....	95
4.3.1	Reisegeschwindigkeit und Siedlungsentwicklung	95
4.3.2	Richtung des Wirkungsmechanismus zwischen MIV-Anteil und Bevölkerungsdichte....	96
4.3.3	Hohe Dichte ist eine notwendige, aber keine hinreichende Bedingung für geringen MIV-Anteil.....	97
4.3.4	Zusammenfassende Schlussfolgerung:.....	98
5	SCHLUSSFOLGERUNGEN	99
5.1	Höhere Erreichbarkeit durch Internalisierung externer Kosten des Verkehrs	99
5.1.1	Das Verkehrsnetz effizient betreiben	99
5.1.2	Wirkung einer Internalisierung externer Staukosten und des kurzfristigen Agglomerationseffektes auf den Modal-Split	100
5.1.3	Langfristige Internalisierung externer Staukosten und Agglomerationseffekte.....	102
5.1.4	Bevölkerungsdichte bei MIV-Anteilen unter 0,25	103
5.1.5	Verwendung von Erträgen aus der Internalisierung externer Staukosten und verkehrsinduzierter externer Agglomerationseffekte.....	104
6	ANHANG	106
6.1	Modelldaten für das Wiener Straßennetz:	106
6.1.1	Zusammenfassung der Vorgangsweise	106
6.1.2	Auf das Netz der innerstädtischen Landes- und Gemeindestraßen entfallender Anteil der MIV- und Güterverkehrs-Wege	106
6.1.3	Auf das Netz der innerstädtischen Landes- und Gemeindestraßen entfallender Anteil der ÖV-Wege	108
6.1.4	Wege des Personen- und Güterverkehrs und deren Kapazitäts-beanspruchung	109

6.1.5	Öffentlicher Verkehr und nicht motorisierter Verkehr als gemeinsame Verkehrsart.....	111
6.1.6	Anteile der einzelnen Verkehrsarten an der Auslastung des niederrangigen Staßennetzes	111
6.1.7	Differenz der Zu- und Abgangszeiten zu Pkw und ÖV.....	112
6.1.8	Kosten der Reisezeit.....	113
6.1.9	Ermittlung der Zeitkosten pro PCU-Kilometer.....	114
6.2	Abhängigkeit der Reisezeit von der Verkehrsstärke.....	117
6.2.1	Zusammenfassung der Vorgangsweise.....	117
6.2.2	Zeitverlust an Kreuzungen in Abhängigkeit von der Verkehrsstärke.....	117
6.2.3	Abhängigkeit der Reisezeit von der Verkehrsstärke in Wien.....	118
6.2.4	Variable Dichte geregelter Kreuzungen (variable VLSA-Dichte).....	119
6.2.5	Berücksichtigung unregelmäßig auftretender Zeitverluste.....	119
6.3	Externe und private Grenzkosten pro Pkw-Einheit.....	121
6.3.1	Staukosten und Stau-Grenzkosten.....	121
6.3.2	Generalisierte private Grenzkosten.....	122
6.3.3	Generalisierte private Grenzkosten pro PCU-Kilometer und PCU-Weg.....	123
6.3.4	Private Grenzkosten pro Weg innerhalb und außerhalb des niederrangigen Straßennetzes	124
6.3.5	Externe Kosten durch Unfälle, Lärm und Umweltbelastung (sonstige externe Kosten).	125
6.3.6	Nachfragefunktion und Grenznutzenfunktion.....	127
6.3.7	Die Grenznutzenfunktion.....	128
6.4	Tagesgang und Häufigkeitsverteilung der Verkehrsstärke.....	129
6.4.1	Ableitung der Verkehrsstärke aus der Reisegeschwindigkeit.....	129
6.4.2	Zeitliche Häufigkeitsverteilung der Verkehrsstärke.....	129
6.4.3	Reisegeschwindigkeiten.....	131
6.4.4	Spitzenstunden.....	131
6.5	Preis-Elastizitäten.....	132
6.5.1	Elastizität der Verkehrsstärke in Bezug auf den Treibstoffpreis.....	132
3.3.1	Elastizität in Bezug auf Änderungen der generalisierten Kosten.....	133
6.6	Abschätzung des Modal-Split in den internationalen Beispielstädten.....	134
6.6.1	Verkehrsleistung des nicht motorisierten Verkehrs (NMV) abschätzen.....	134
6.6.2	Verringerte Kapazitätsbeanspruchung durch motorisierte Zweiräder berücksichtigen...	134
6.7	Erreichbarkeit im internationalen Städtevergleich.....	137
6.7.1	Empirische Daten zu Bevölkerungsdichte und Reisegeschwindigkeit.....	137
6.7.2	Korrelationen zwischen Kenngrößen des Verkehrs und der Bevölkerungsdichte.....	137
6.7.3	Korrelationen zwischen MIV-Fahrleistung pro Kopf der Bevölkerung und Jahr, Bevölkerungsdichte und MIV-Geschwindigkeit.....	140
6.7.4	Korrelation zwischen MIV-Fahrleistung pro Kopf der Bevölkerung und Erreichbarkeit	141
6.7.5	Korrelation zwischen Bevölkerungsdichte und MIV-Erreichbarkeit.....	142
6.8	Literatur.....	143

Verzeichnis der Abbildungen

Abb. 1: Übersicht der Zusammenhänge zwischen Verkehrs-Infrastruktur, Verkehrsmittelwahl, Bevölkerungsdichte und Erreichbarkeit	21
Abb. 2: Beispiel für Schwankungen der durchschnittlichen Reisegeschwindigkeit des Kfz-Verkehrs im Wiener Straßennetz (ohne Stadtautobahnen).	22
Abb. 3: Indikator der Erreichbarkeit als Funktion des MIV-Anteils bei konstanter Bevölkerungsdichte (Vorgriff auf Ergebnisse aus Kap. 3.1.6).....	24
Abb. 4: Indikator der Erreichbarkeit als Funktion der Bevölkerungsdichte bei konstantem MIV-Anteil (Vorgriff auf Ergebnisse aus Kap. 3.1.6)	24
Abb. 5: Bevölkerungsdichte bei polyzentrischer Verteilung von Orten der Aktivität im Ausgangszustand (······) und nach Anstieg des MIV-Anteils (—)	25
Abb. 6: Abhängigkeit der Autobahndichte vom MIV-Anteil der Verkehrsleistung	30
Abb. 7: Einfluss von Dichte und Modal-Split auf die Reisegeschwindigkeit in den Teilnetzen	31
Abb. 8: Schritte zur Überprüfung der Hypothesen.....	34
Abb. 9: Änderung der relativen Weglänge bei Variation der relativen Bevölkerungsdichte	39
Abb. 10: Auf Basis des Modells und empirischer Daten ermittelte durchschnittliche Reisezeiten pro Kilometer im MIV und im ÖV während der Verkehrsspitzen	41
Abb. 11: Indikator der Erreichbarkeit als Funktion der Bevölkerungsdichte und des MIV-Anteils an der Personenverkehrsleistung.....	42
Abb. 12: Maximum der Erreichbarkeit bei MIV-Anteilen über 0,6.....	43
Abb. 13: Abhängigkeit der Bevölkerungsdichte, die maximale Erreichbarkeit ermöglicht, vom Modal-Split des Personenverkehrs	44
Abb. 14: Abhängigkeit der Bevölkerungsdichte vom Anteil des MIV an der Verkehrsleistung	47
Abb. 15: Abweichung der tatsächlichen Bevölkerungsdichte von jener Bevölkerungsdichte, die maximale Erreichbarkeit ermöglichen würde (doppelt logarithmisch dargestellt)	48
Abb. 16: Abwägung von Grenzkosten und –ertrag steigender Dichte und Erreichbarkeit bei $AI \geq 0,8$	49
Abb. 17: Abwägung von Grenzkosten und –ertrag steigender Dichte und Erreichbarkeit bei $AI < 0,5$	49
Abb. 18: Hohe Straßenkapazitäten direkt außerhalb der Stadtgrenze von Brüssel (Mechelen).....	51
Abb. 19: Verzerrung durch Mittelwertbildung bei großen Unterschieden der Bevölkerungsdichte innerhalb des Stadtgebietes	52
Abb. 19a: Durchschnittliche Bevölkerungsdichte von US-Großstädten zwischen 1950 und 1990 und jeweils gemäß Hypothese I erwartete Bevölkerungsdichte	56
Abb. 20: Prinzip der Entstehung interner und externer Lokalisationseffekte	59
Abb. 21: Systematisierung von Agglomerationseffekten.....	60
Abb. 22: Wertschöpfung pro beschäftigter Person und effektive Größe des Arbeitsmarktes österreichischer Bundesländer.....	70
Abb. 23: Kurz- und langfristige Änderungen der Erreichbarkeit.....	72

Abb. 24: Kurzfristige externe Grenz-Agglomerationseffekte zur Verkehrsspitze bei Variation des MIV-Anteils an der Personenverkehrsleistung (es gilt Annahme 1 und $\varepsilon_A = 0,06$)	78
Abb. 25: Kurzfristige externe Grenz-Agglomerationseffekte in Abhängigkeit von der Verkehrsstärke (es gilt Annahme 1), $AI = AI_w$ und $\varepsilon_A = 0,06$)	79
Abb. 26: Kurz- und langfristige externe Grenz-Agglomerationseffekte zur Verkehrsspitze	81
Abb. 27: Gesamter externer Grenz-Agglomerationseffekt bei Spitzenverkehr bei Variation von MIV-Anteil und Bevölkerungsdichte entlang der Linie maximaler Erreichbarkeit.....	82
Abb. 28: Vergleich externer Stau-Grenzkosten und negativer externer Grenz-Agglomerationseffekte (Es gilt Annahme 1 und $\varepsilon_A = 0,06$, relative Dichte d im Ausgangszustand = 1).....	84
Abb. 29: Vergleich kurzfristiger Grenz-Staukosten und negativer Grenz-Agglomerationseffekte bei konstantem MIV-Anteil (Es gilt Annahme 1 sowie $\varepsilon_A = 0,06$, $I = 0,58$ und $d = 1$)	85
Abb. 30: Ableitung des Rentengebotes $p(x)$ aus Indifferenzlinien	87
Abb. 31: Pro-Kopf-Einkommen und Bevölkerungsdichte in 37 Weltstädten	94
Abb. 32: Mögliche Entwicklungspfade des Verkehrs und der Raumordnung von Großstädten in industriellen Schwellenländern	97
Abb. 33: Wirkung einer Internalisierung externer Staukosten und verkehrsinduzierter externer Agglomerationseffekte auf den Modal-Split bei Spitzenverkehr.	101
Abb. 34: Langfristige Wirkung einer Internalisierung externer Staukosten und verkehrsinduzierter externer Agglomerationseffekte auf den Modal-Split bei Spitzenverkehr.....	102
Abb. 35: Bilanz der Kosten und Erträge durch Internalisierung von externen Staukosten und Agglomerationseffekten aus Sicht der Stadt (noch ohne Langfrist-Effekte).....	105
Abb. 36: Summenhäufigkeit der Pkw-Weglängen in Wien	107
Abb. 37: Modal Split nach Weglänge in Wien – Komplementarität von ÖV und NMV.....	111
Abb. 38: Reisezeiten pro Kilometer mit und ohne Unsicherheitskomponente bei fixer und variabler Dichte geregelter Kreuzungen (VLSA-Dichte).....	120
Abb. 39: Durchschnittliche Zeitkosten und Stau-Grenzkosten	121
Abb. 40: Abweichung der Reisezeiten im niederrangigen Netz von jenen auf Stadtautobahnen ..	124
Abb. 41: Private und externe Grenzkosten des MIV (nur Staukosten) pro PCU-Weg	125
Abb. 42: Nachfragefunktion, Grenznutzen- und Grenzkostenfunktion	127
Abb. 43: Tagesgänge von Reisezeit und Verkehrsstärke.....	129
Abb. 44: Zeitliche Summenhäufigkeit der Verkehrsstärke	130
Abb. 45: Häufigkeit und mit der Verkehrsstärke gewichtete Häufigkeit der täglichen normierten Verkehrsstärken in Wien.	131
Abb. 46: Elastizität der Verkehrsstärke in Bezug auf den Treibstoffpreis.....	132
Abb. 47: Bevölkerungsdichte und MIV-Fahrleistung pro Kopf und Jahr in 46 Großstädten	140
Abb. 48: Korrelation von MIV-Fahrleistung und Reisegeschwindigkeit des MIV in 46 Großstädten	140
Abb. 50: Korrelation zwischen Bevölkerungsdichte und MIV-Erreichbarkeit in 46 Großstädten .	142

Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 1: Modal Split und Bevölkerungsdichte in 46 Großstädten	45
Tabelle 2: Übersicht einiger möglicher Ursachen für Abweichungen der Bevölkerungsdichte von dem gemäß Hypothese I erwarteten Wert	54
Tabelle 3: Entwicklung von Bevölkerungsdichten und Verkehrsleistungen in Städten der USA.....	56
Tabelle 4: Abschätzung der Agglomerationsvorteile aus Analysen von Produktionsfunktionen (Estimates of agglomeration economies from production function analyses.).....	63
Tabelle 5: Elastizität der gesamten Faktorproduktivität in Bezug auf die effektive Dichte für Regionen und Wirtschaftssektoren.....	65
Tabelle 6: Wertschöpfung pro beschäftigter Person und effektive Größe des Arbeitsmarktes österreichischer Bundesländer.....	70
Tabelle 7: Größe des kurzfristigen externen Netto-Grenz-Agglomerationseffektes je nach Annahmen über Agglomerations-Elastizität und relevante Anteile der Personenverkehrsleistung	80
Tabelle 8: Anteile öffentlicher Verkehrsmittel an der Verkehrsleistung des öffentlichen Verkehrs (Basis: alle Wege der Wohnbevölkerung Wiens 1993)	108
Tabelle 9: Wege nach Zweck und Verkehrsmittel in Prozent aller Personenverkehrswege ergänzt um Güterverkehrswege (Werktagsverkehr, Wien, 1995).....	109
Tabelle 10: Kapazitätsbeanspruchung und Weglänge nach Verkehrsmitteln	110
Tabelle 11: Anteile an der Auslastung des niederrangigen Straßennetzes nach Weg-Zweck und Verkehrsmittel in Prozent.....	110
Tabelle 12: Übersicht von Modelldaten für den öffentlichen Verkehr im Netz der Landes- und Gemeindestraßen einschließlich der Zu- und Abgangswege	113
Tabelle 13: Zeitkostensätze für eine Aktualisierung der RVS 2.22	114
Tabelle 14: Zeitkosten nach Wegezwecken in Euro pro Minute.....	114
Tabelle 15: Zeitkosten nach Wegezweck und Verkehrsart pro Einheit der Kapazitätsbeanspruchung (Angaben in Cent pro PCU-Minute)	115
Tabelle 16: Anteile der Weg-Arten an den Zeitkosten pro durchschnittlicher Pkw-Einheit des Verkehrs am innerstädtischen Straßennetz (Angaben in Cent pro PCU-Minute).....	115
Tabelle 17: Zeitkosten pro PCU für die Verkehrsarten MIV, ÖV+NMV und Lkw in Euro pro PCU-Minute	116
Tabelle 18: Sonstige externe Kosten in Cent pro Fahrzeugkilometer.....	126
Tabelle 19: Korrekturfaktor zur Berücksichtigung des Anteils motorisierter Zweiräder am MIV .	136
Tabelle 20: Verkehrsverhalten, Infrastruktur und Verkehrsleistungen in Großstädten im internationalen Vergleich	138

Definition verwendeter Begriffe und Abkürzungen

Begriffe aus den Bereichen Verkehr und Mobilität

Auslastung, Auslastungsgrad: siehe „normierte Verkehrsstärke“

Bevölkerungsdichte, relative Bevölkerungsdichte: Die Zahl der Einwohner pro Flächeneinheit ergibt die Bevölkerungsdichte. Das Verhältnis einer Bevölkerungsdichte zur Bevölkerungsdichte Wiens wird in dieser Arbeit als „relative Bevölkerungsdichte“ bezeichnet. Die Variable „relative Bevölkerungsdichte“ ist dimensionslos.

CBD: Stadtzentrum, das in klassischen Stadtmodellen vereinfachend als Standort sämtlicher Arbeitsplätze der Stadt angenommen wird (central business district).

Erreichbarkeit: Nach dem Isochronen-Ansatz ist die Erreichbarkeit aus Sicht eines Ortes \uparrow der Aktivität proportional der Anzahl der Personen, die diesen Ort von ihrer Wohnung aus innerhalb einer gegebenen Zeit erreichen können. Die Erreichbarkeit aus Sicht des Wohnortes einer Person bemisst sich nach Anzahl und Attraktivität von Orten \uparrow der Aktivität, die innerhalb einer gegebenen Zeit von der Wohnung aus erreicht werden können. In dieser Arbeit werden Modell-Annahmen getroffen, wonach innerhalb eines Stadtgebietes die Erreichbarkeit aus Sicht der Wohnorte immer proportional der Erreichbarkeit aus Sicht der Orte \uparrow der Aktivität ist. In dieser Arbeit wird nur eine relative Größe der Erreichbarkeit in Form eines Erreichbarkeits-Indikators verwendet.

Erreichbarkeits-Indikator, Indikator der Erreichbarkeit: In dieser Arbeit wird als Indikator der Erreichbarkeit jene Fläche in Quadratkilometer angegeben, die innerhalb eines zeitlichen Einzugsbereiches von einer Stunde liegt.³ Diese Fläche wird mit der relativen Bevölkerungsdichte \uparrow (Bevölkerungsdichte / Bevölkerungsdichte Wiens) multipliziert. Als Einheit der Variablen „Indikator der Erreichbarkeit“ geben sich km^2/h^2 .

Fahrleistung: zurückgelegte Fahrzeug-Kilometer.

Kapazität: Maximal mögliche Anzahl von Verkehrseinheiten, die einen Verkehrsweg pro Zeiteinheit passieren können. Die in dieser Arbeit verwendeten Standard-Verkehrseinheiten sind Pkw bzw. Pkw-Einheiten \uparrow (Abkürzung: PCU). Für Straßenfahrzeuge, die keine Pkw sind, wird über eine Äquivalenzziffer (Kapazitätsbeanspruchung \uparrow) eine äquivalente Zahl von Pkw-Einheiten \uparrow angegeben. Die Einheit der Kapazität ist Pkw-Einheiten pro Stunde.

Kapazitätsbeanspruchung (Rommerskirchen et al., 2002, S. 22): Äquivalenzziffer, die das Verhältnis zwischen der maximal möglichen Anzahl von Pkw (bzw. Pkw-Einheiten \uparrow) die einen Verkehrsweg pro Zeiteinheit passieren können und der maximal möglichen Anzahl anderer Verkehrseinheiten (z.B. Lkw) die den Verkehrsweg pro Zeiteinheit passieren können angibt. Einheit der Kapazitätsbeanspruchung ist Pkw-Einheiten \uparrow pro Verkehrseinheit.

MIV: Abkürzung für „motorisierter Individualverkehr“ (Pkw, motorisiertes 2-Rad)

Modal Split: Der Modal Split ist eine Kenngröße für die relative Bedeutung der einzelnen Verkehrsmittel. Im Personenverkehr sind drei Varianten für die Angabe des Modal Split eines Verkehrsmittels gebräuchlich (Marti und Waldvogel, 2004):

³ Da es sich um einen Indikator (nicht um eine absolute Größe) handelt, kann bei der Bestimmung des Einzugsbereiches ein als konstant angenommener Umwegfaktor des Straßennetzes vernachlässigt werden.

- der Anteil an der Verkehrsleistung in Personenkilometer,
- der Anteil an der Zahl zurückgelegter Wege,
- der Anteil an der Zahl zurückgelegter Weg-Etappen.

In dieser Arbeit wird unter „Modal Split eines Verkehrsmittels“ dessen Anteil an der Verkehrsleistung \uparrow verstanden. Wege von und zu Haltestellen und sonstige Wege, die zu Fuß oder per Fahrrad zurückgelegt werden, werden hier der Verkehrsleistung \uparrow des öffentlichen Verkehrs zugeschlagen.

NMV: Abkürzung für „nicht motorisierter Verkehr“ (Gehen, Radfahren).

ÖV: Abkürzung für „öffentlicher Verkehr“ (Bus, Straßenbahn, U- und S-Bahn)

Orte der Aktivität: Das sind Orte, an denen Aktivitäten stattfinden, denen Menschen außerhalb ihrer Wohnung nachgehen, wie zum Beispiel Arbeit, Einkauf, Erholung oder Bildung.

PKW-Einheit: Maß für die Kapazitätsbeanspruchung \uparrow (Pkw-Einheiten pro Fahrzeug).

PCU: Abkürzung für Pkw-Einheit (person car unit)

Reisegeschwindigkeit eines Fahrzeuges: Durchschnittliche Geschwindigkeit bezogen auf die gesamte Reisezeit zwischen Abfahrt und Ankunft des Fahrzeuges einschließlich allfälliger verkehrs- oder betriebsbedingter Zwischenhalte. Die verwendete Einheit ist Kilometer pro Stunde.

Reisegeschwindigkeit von Tür zu Tür: Reisegeschwindigkeit, die sich ergibt, wenn zur Reisezeit eines verwendeten Fahrzeuges noch jene Zeiten hinzugezählt werden, die für die Wege zwischen Fahrzeug und Haustüre am Abfahrts- und Zielort erforderlich sind und wenn die Weglänge auch die Wegstrecken zwischen Abfahrts- bzw. Ankunftsort des Fahrzeuges und der Haustüre umfasst. Die verwendete Einheit ist Kilometer pro Stunde.

Verkehrsleistung: Im Personenverkehr wird die Verkehrsleistung in zurückgelegten Personenkilometern gemessen.

Verkehrsstärke: Anzahl der Fahrzeuge, die pro Zeiteinheit einen Straßenquerschnitt passieren. In dieser Arbeit wird unter Verkehrsstärke die Zahl der Pkw-Einheiten \uparrow (PCU) pro Zeiteinheit verstanden. Dabei wird die Zahl der Fahrzeuge mit ihrer jeweiligen Kapazitätsbeanspruchung \uparrow in PCU \uparrow pro Fahrzeug gewichtet.

Normierte Verkehrsstärke: Verhältnis zwischen der aktuellen Verkehrsstärke \uparrow des Gesamtverkehrs oder einzelner Verkehrsarten (ÖV, MIV) und jener Verkehrsstärke, bei der die Kapazität \uparrow des betrachteten Verkehrsweges voll ausgelastet ist. Wird der Gesamtverkehr betrachtet (ÖV + MIV + Lkw-Verkehr) entspricht die normierte Verkehrsstärke dem Auslastungsgrad. Das ist jedoch nicht der Fall, wenn nur ein Teil des Verkehrs (z.B. normierte Verkehrsstärke des ÖV) betrachtet wird. In dieser Arbeit wurde daher generell der Begriff „normierte Verkehrsstärke“ verwendet.

Hochrangiges Verkehrsnetz: das Netz aus Stadtautobahnen und Schnellstraßen ist das hochrangige Netz des motorisierten Individualverkehrs. Das hochrangige Netz des öffentlichen Verkehrs ist das Netz der U- und S-Bahnen.

Niederrangiges Verkehrsnetz: Das niederrangige Netz besteht aus den Straßen mit niveaugleichen Kreuzungen beziehungsweise aus den dort verlaufenden Bus und Straßenbahnlinien. Die etwas sperrige Bezeichnung „niederrangiges Netz“ soll verdeutlichen, dass niederrangiges Netz und hochrangige Netze komplementär zueinander sind.

Begriffe aus dem Bereich der Wirtschaft:

Beschäftigungsdichte: Arbeitsplätze pro Flächeneinheit

Effektive Größe des Arbeitsmarktes: Anzahl aktueller und potentieller Arbeitskräfte, die einen Firmenstandort innerhalb einer gegebenen Zeit (z.B. 30 Minuten) erreichen können.

Agglomerationseffekt: Wirkung der Erreichbarkeit anderer Firmen und / oder potentieller Arbeitskräfte auf die totale Faktorproduktivität eines Betriebes

Elastizität bezüglich der effektiven Größe des Arbeitsmarktes: Diese ist das Verhältnis zwischen der relativen Änderung einer Kenngröße – etwa der gesamten Faktorproduktivität oder der Wertschöpfung pro beschäftigter Person – und einer relativen Änderung der effektiven Größe des Arbeitsmarktes, welche die Änderung der Kenngröße verursacht.

Externe Effekte: Erträge (positive externe Effekte) oder Kosten (negative externe Effekte, externe Kosten), die nicht in jene Entscheidungen der Marktteilnehmer einfließen, durch die diese externen Effekte verursacht werden.

Grenzkosten: Kosten, die durch eine zusätzlich ausgebrachte Leistungseinheit verursacht werden (z.B. Kosten durch einen zusätzlichen Pkw-Kilometer)

Interne Kosten: vom jeweiligen Marktteilnehmer selbst zu tragende Kosten, die als solche in jene Entscheidungen des Marktteilnehmers einfließen, durch die diese Kosten aus sachlichen Gründen⁴ verursacht werden.

Produktivität: Produktivität ist die Wertschöpfung relativ zum Faktoreinsatz. Die gesamte (totale) Faktor-Produktivität ist die Wertschöpfung relativ zum gesamten Faktoreinsatz.

Wertschöpfung: Die Wertschöpfung ist der Produktionswert abzüglich der Vorleistungen.

Die Brutto-Wertschöpfung ist die Summe von Netto-Wertschöpfung + Abschreibungen.

Die Summe der Brutto-Wertschöpfungen aller Wirtschaftseinheiten eines

Wirtschaftsraumes ergibt das Bruttoinlandsprodukt. Das Brutto-Inlandsprodukt eines

Wirtschaftsraumes geteilt durch die Zahl der Arbeitsplätze des Wirtschaftsraumes ergibt die Brutto-Wertschöpfung pro beschäftigter Person.

⁴ Die Ergänzung „aus sachlichen Gründen“ ist angebracht, weil Kosten auch durch gesetzliche Regulierung von einer bestimmten Entscheidung abhängig gemacht werden können, mit der sie sachlich nicht zusammenhängen (Beispiel: Durch die Bauordnung fallen Garagenkosten beim Hausbau – nicht bei der Entscheidung über aktuellen oder zukünftigen Autobesitz der Bewohner – an.

Verwendete Modell-Variablen und deren Einheiten

Formel-Zeichen	Beschreibung (siehe auch alphabetisch geordnete Definitionen und Erklärungen ab S.13)	Einheit
AI	Anteil des MIV an der Personenverkehrsleistung = = (MIV-Verkehrsleistung) / (gesamte Verkehrsleistung)	[-]
AÖ	Anteil des ÖV und des NMV an der Personenverkehrsleistung = = (ÖV+MIV-Verkehrsleistung) / (gesamte Verkehrsleistung)	[-]
BIP	Brutto-Inlandsprodukt pro Kopf und Werktag	[Euro / (Einw. * Tag)]
DB	Beschäftigungsdichte im Dauersiedlungsraum	[Erwerbstätige / km ²]
d	relative Bevölkerungsdichte = = Bevölkerungsdichte / (Bevölkerungsdichte Wiens)	[-]
DH	Haltestellendichte	[Haltestellen / km]
Δ	Differenz der Zugangszeit zwischen Pkw und ÖV = = ÖV-Zugangszeit minus Pkw-Zugangszeit	[min]
	Indikator der Erreichbarkeit = $V^2 * d$	[km ² /h ²]
ε _A	Agglomerations-Elastizität = (relative Änderung des BIP pro Einwohner) / (relative Änderung der Bevölkerungsdichte)	[-]
GA	Grenz-Agglomerationseffekt, positiver GA mit Index "pos", negativer GA mit Index "neg", Netto-Effekt ohne Index	[Euro pro Pkw-Fahrt]
GK	private Grenzkosten (auch „Nutzerkosten“)	[Euro / PCU-Fahrt]
GN	privater Grenznutzen	[Euro / PCU-Fahrt]
K _{SD}	Stau-Durchschnittskosten	[Euro / PCU-km]
K _{SG}	Stau-Grenzkosten	[Euro / PCU-km]
K _Z	Kosten der Reisezeit	[Euro / PCU-km]
L	durchschnittliche Weglänge im öffentlichen Verkehr	[km]
MR	Motorisierungsgrad mit motorisierten Zweirädern	[mot. Zweiräder / 1000 Einwohner]
MP	Pkw-Motorisierungsgrad	[Pkw / 1000 Einwohner]
PF	Pkw-Fahrten pro Einwohner und Werktag	[Pkw-Fahrten / (Einwohner * Tag)]
TI	normierte Verkehrsstärke des MIV = = (MIV-PCU-km / Zeiteinheit) / (PCU-km/ Zeiteinheit bei Vollausslastung)	[-]
TL	normierte Verkehrsstärke des Straßen-Güterverkehrs = = (Lkw-PCU-km / Zeiteinheit) / (PCU-km/ Zeiteinh. bei Vollausslastung)	[-]
TN	normierte Verkehrsstärke = Auslastungsgrad = = (MIV-PCU-km / Zeiteinheit) / (MIV-PCU-km/ Zeiteinh. bei Vollausslastung)	[-]
TÖ	normierte Verkehrsstärke des ÖV (Auslastungs-Beitrag des ÖV) = (MIV- PCU-km / Zeiteinheit) / (MIV-PCU-km/ Zeiteinh. bei Vollausslastung)	[-]
V	Durchschnittliche Reisegeschwindigkeit	[km / h]
KV	variable Fahrzeugkosten pro PCU und Kilometer	[Euro / (PCU * km)]
KT	Kosten der Reisezeit pro PCU und Minute	[Euro / (PCU * min)]
W	Der Index „W“ bezeichnet den Wert einer Verkehrsvariablen bei Verkehrsverhältnissen des Jahres 1993 in Wien	
ZH	Zeitverlust pro Haltestelle	[min]
Z	spezifische Reisezeit = Reisezeit pro Kilometer	[min / km]

1 Einleitung

1.1 Einführung und Problemstellung

Im Jahr 1950 lebten 29 % der Menschheit in Städten; im Jahr 2030 werden es etwa 61 % sein. Die Zahl der Millionenstädte hat sich weltweit von 86 im Jahr 1950 auf 387 im Jahr 2000 erhöht (United Nations, 2003 und 2004). Die Abwicklung des Verkehrs dürfte eine entscheidende Rolle für Produktivität und Lebensqualität in diesen Städten spielen.

Die private Motorisierung des Personenverkehrs hat Einfluss auf die durchschnittlichen Reisegeschwindigkeiten in den Städten und in deren Umland. Gleichzeitig zeigt die Siedlungsstruktur von Großstädten eine generelle Tendenz zu Suburbanisierung und zu sinkender Bevölkerungsdichte.

Ausgangspunkt der Problemstellung ist die Frage, wie weit bei der laufenden Verkehrs- und Siedlungsentwicklung in Großstädten Marktversagen durch externe Effekte – besonders durch externe Staukosten – auftritt. Zunächst ist eine Hypothese zum Einfluss der Verkehrsmittelwahl auf die Bevölkerungsdichte von Großstädten aufzustellen und zu überprüfen. Weiters ist zu untersuchen, ob aus der Verkehrsmittelwahl im Personenverkehr eine Auswirkung auf die Größe externer Agglomerationseffekte ableitbar ist. Schließlich ist abzuschätzen, wie sich die Internalisierung externer Staukosten auf die Bevölkerungsdichte und in weiterer Folge auf externe Agglomerationseffekte im Produktionsbereich auswirken würde.

Die im Abschnitt 1.4 aufgestellte Hypothese I besagt, dass die Bevölkerungsdichte von Großstädten jenem Wert zustrebt, bei dem maximale Erreichbarkeit gegeben ist. Diese Dichte ist von der jeweiligen Verkehrsmittelwahl abhängig. Es ist daher ein Modell der Erreichbarkeit als Funktion von Bevölkerungsdichte und Verkehrsmittelwahl zu erstellen. An Hand der Daten zu Bevölkerungsdichte und Verkehrsmittelwahl in 46 Großstädten ist mit Hilfe dieses Modells zu überprüfen, ob deren jeweilige Bevölkerungsdichte im Sinn von Hypothese I zu dem jeweiligen Modal-Split „passt“. Weiters ist zu überprüfen, ob auch bei zeitlicher Veränderung des Modal-Split eine zeitliche Änderung der Bevölkerungsdichte entsprechend der Hypothese I erfolgt. Auf Grund des Modells für die Erreichbarkeit in Abhängigkeit von der Bevölkerungsdichte und vom Modal-Split sind externe Staukosten zu ermitteln. Die kurzfristigen Wirkungen einer Internalisierung externer Staukosten auf den Modal-Split sind auf Basis einer Nachfrage-Funktion⁵ abzuschätzen. Die langfristige Wirkung - eine Änderung der Bevölkerungsdichte und eine damit verbundene Änderung externer Agglomerationseffekte im Produktionsbereich - ist auf Basis von Hypothese I und mit Hilfe vorhandener Forschungsergebnisse zur Agglomerations-Elastizität der totalen Faktorproduktivität zu beziffern.

⁵ abgeleitet aus empirischen Daten zur Preis-Elastizität von innerstädtischem Pkw-Verkehr.

1.2 Erreichbarkeit

1.2.1 Erreichbarkeit nach dem Potentialansatz

Nach dem Erreichbarkeitsbegriff der Regionalwissenschaft wird bewertet, wie leicht Orte relevanter Aktivitäten erreichbar sind und weiters, wie attraktiv diese Aktivitäten und damit diese Orte jeweils sind. Nach dem Potentialansatz ergibt sich die Erreichbarkeit der Orte E_i aus der Summe der Attraktivitäten der Orte A_j , die jeweils mit c_{ij} – einer Kenngröße für den Raumwiderstand zwischen E_i und A_j – gewichtet werden. Die Gewichtung erfolgt beispielsweise nach einer negativen Exponentialfunktion, deren Exponent einen Gewichtungsfaktor β enthält:

$$(1) \quad E_i = \sum_j A_j \cdot e^{-\beta \cdot c_{ij}}$$

Kenngrößen des Raumwiderstandes sind die Entfernung, die Reisezeit oder die generalisierten Kosten, die das Zurücklegen des Weges verursacht.

1.2.2 Erreichbarkeit nach dem Isochronen-Ansatz

Im Gegensatz zum Potentialansatz wird im Isochronen-Ansatz die Anzahl der Orte von Aktivitäten gezählt, die von einem bestimmten Punkt aus innerhalb einer bestimmten Reisezeit erreichbar sind. Da in dieser Arbeit näherungsweise davon ausgegangen wird, dass die Orte diverser Aktivitäten in ähnlicher Weise über das Stadtgebiet verteilt sind wie die Bevölkerung, wird hier der Isochronen-Ansatz der Erreichbarkeit gewählt.

Unter der Annahme, dass die durchschnittlich zurückgelegten Distanzen gegenüber den Abmessungen des Stadtgebietes klein sind und dass die Orte der Aktivitäten ebenso wie die Bevölkerung mit konstanter Dichte über das verbaute Stadtgebiet verteilt sind, steigt die Erreichbarkeit innerhalb des Stadtgebietes proportional zum Quadrat der Reisegeschwindigkeit. Das gleiche gilt für die Erreichbarkeit vom Ort der Aktivität aus gesehen. Die Anzahl der Personen, die einen bestimmten Ort – etwa einen Firmenstandort – in einer bestimmten Zeit erreichen können, steigt mit dem Quadrat der Reisegeschwindigkeit. Wenn gilt, dass die räumliche Dichte und Attraktivität von Orten der Aktivität proportional der Bevölkerungsdichte ist, verhält sich auch deren Erreichbarkeit proportional der Bevölkerungsdichte. Ebenso steigt die Erreichbarkeit aus Sicht des Ortes der Aktivität (Anzahl der Personen, die einen bestimmten Standort erreichen können) mit der Bevölkerungsdichte, so dass als Indikator der durchschnittlichen Erreichbarkeit das Produkt aus durchschnittlicher Bevölkerungsdichte mal Quadrat der Reisegeschwindigkeit V angesetzt werden kann. Dabei wird das Verhältnis der jeweiligen Bevölkerungsdichte zur Bevölkerungsdichte Wiens als relative Bevölkerungsdichte d eingeführt:⁶

$$(2) \text{ Indikator der Erreichbarkeit} = V^2 * d \text{ [km}^2/\text{h}^2\text{]}$$

⁶ Die Bevölkerungsdichte Wiens bildet einen anschaulichen Vergleichswert, weil sie etwa dem geometrischen Mittelwert der Dichten der internationalen Beispielstädte entspricht.

Die Reisegeschwindigkeit hängt vom Verkehrsmittel ab. Die Erreichbarkeit eines Ortes von Aktivitäten – etwa eines Betriebsstandortes – durch verschiedene Verkehrsmittel ist die Summe der gewichteten Erreichbarkeiten. Das Isochronenmodell der Erreichbarkeit nimmt den Raumwiderstand proportional dem Aufwand an Reisezeit an. Zum Zeitaufwand kommen jedoch aus Sicht der Reisenden auch Fahrzeugkosten bzw. der Preis des öffentlichen Verkehrs. Das Problem ist, dass diese monetären Kosten bei ÖV und MIV unterschiedlich hoch sind, so dass diese Unterschiede sich auf das zu modellierende Verhalten der Marktteilnehmer auswirken. Eine einfache Korrektur des Erreichbarkeits-Modells kann aus dem Verhältnis der Reisegeschwindigkeiten von ÖV und MIV abgeleitet werden, indem der gemessen an der Verkehrsleistung gegenüber dem MIV höhere Zeitaufwand des ÖV als Indikator für die geringeren monetären Kosten des ÖV gewertet wird. Der Beitrag von MIV und ÖV zur Erreichbarkeit wird daher nicht mit deren Anteilen an der Verkehrsleistung sondern mit den jeweiligen Anteilen an der gesamten Reisezeit gewichtet. Wenn der Anteil des ÖV und jener des MIV an der Verkehrsleistung mit den Formelzeichen $A\ddot{O}$ bzw. AI bezeichnet wird und wenn $V_{\ddot{O}V}$ bzw. V_{MIV} die jeweiligen Durchschnittsgeschwindigkeiten in Kilometern pro Stunde sind, dann gilt, dass der Anteil des ÖV an der insgesamt verbrachten Reisezeit proportional $A\ddot{O}/V_{\ddot{O}V}$ und jener des MIV proportional AI/V_{MIV} ist. Durch Einsetzen dieser Ausdrücke ergibt sich der Anteil an der insgesamt verbrachten Reisezeit für ÖV und MIV:

$$(2a) \text{ ÖV-Anteil der gesamten Reisezeit} = A\ddot{O} * V_{MIV} / (A\ddot{O} * V_{MIV} + AI * V_{\ddot{O}V}) \quad [-]$$

$$(2b) \text{ MIV-Anteil der gesamten Reisezeit} = AI * V_{\ddot{O}V} / (A\ddot{O} * V_{MIV} + AI * V_{\ddot{O}V}) \quad [-]$$

Wird die Summe der Erreichbarkeiten gemäß (2) für ÖV und MIV gebildet, wobei die Gewichtungsfaktoren (2a) und (2b) verwendet werden, ergibt sich nach Umformung

$$(3) \text{ Indikator der Erreichbarkeit} = \\ = ((AI * V_{\ddot{O}V} * V_{MIV}^2 + A\ddot{O} * V_{MIV} * V_{\ddot{O}V}^2) / (A\ddot{O} * V_{MIV} + AI * V_{\ddot{O}V})) * d \quad [\text{km}^2/\text{h}^2]$$

Mit den spezifischen Reisezeiten $Z_{\ddot{O}V}$ und Z_{MIV} (Minuten pro Kilometer) ergibt sich

$$(3a) \text{ Indikator der Erreichbarkeit} = ((AI * Z_{MIV} * (60/Z_{MIV})^2 + A\ddot{O} * Z_{\ddot{O}V} * (60/Z_{\ddot{O}V})^2) / \\ / (A\ddot{O} * Z_{\ddot{O}V} + AI * Z_{MIV})) * d \quad [\text{km}^2/\text{h}^2]$$

und weiter mit Kürzungen

$$(4) \text{ Indikator der Erreichbarkeit} = \\ = 3600 * d * ((AI/Z_{MIV} + A\ddot{O}/Z_{\ddot{O}V}) / (A\ddot{O}*Z_{\ddot{O}V} + AI*Z_{MIV})) \quad [\text{km}^2/\text{h}^2]$$

1.3 Hypothesen zum Zusammenhang zwischen Bevölkerungsdichte und Modal-Split des Personenverkehrs sowie zum Agglomerationseffekt

1.3.1 Optimale Siedlungsentwicklung oder Marktversagen?

Das Phänomen der rückläufigen Siedlungsdichte, das in vielen Städten weltweit zu beobachten ist, wurde in Forschungsarbeiten zur Stadtökonomik mehrfach untersucht (Tabuchi, 1998; McGrath, 2005). Eine wesentliche Fragestellung der Arbeiten ist, ob es sich bei dieser Siedlungsentwicklung um eine Auswirkung erwünschter Marktkräfte oder um ein Ergebnis von Marktversagen handelt (Turner, 2006; McGrath, 2005; Kuntsler, 1996). Brueckner (Brueckner, 2001) gibt folgende Gründe für ein mögliches Versagen des Bodenmarktes an (McGrath, 2005, S. 3):

- 1) Versagen des Bodenmarktes, die soziale Wertschätzung von Freiflächen am Stadtrand zu internalisieren.
- 2) mangelnde Internalisierung der Staukosten im innerstädtischen Verkehr
- 3) das Versagen der Stadtverwaltung bei der Ermittlung der fiskalischen Belastung durch Erweiterung des Siedlungsgebietes

Es ist allgemein anerkannt, dass ein Marktversagen jedenfalls durch externe Staukosten in innerstädtischen Verkehrsnetzen eintritt (Graham, 2007, S. 104). Wenn kein Marktversagen vorliegt – in der „first best city“ (Wheaton, 1998, S. 266) - stellt der Markt sicher, dass sowohl die Aufteilung der Stadtfläche in Verkehrsfläche und Bauland als auch die Bevölkerungsdichte dem gesamtwirtschaftlichen Optimum entsprechen (Wheaton, 1998, S. 259). Externe Staukosten bewirken jedoch, dass die Bevölkerungsdichte um Größenordnungen unter diesem optimalen Wert liegen kann (Wheaton, 1998, S. 260).⁷

⁷ Even with very modest congestion, optimal central densities are shown to be orders of magnitude greater than market densities.

1.3.2 Hypothese I: Bevölkerungsdichte unter dem Einfluss externer Staukosten

Die Frage ist nun, welche Bevölkerungsdichte sich ergibt, wenn externe Staukosten bestehen, die das Gleichgewicht des Immobilienmarktes, wie Wheaton (Wheaton, 1998, S. 260 und 271) zeigt, sehr stark in Richtung niedriger Bevölkerungsdichten verschieben. Bei der dominierenden Wirkung externer Staukosten gegenüber anderen externen Effekten des Verkehrs liegt es nahe, einen relativ einfachen verkehrstechnischen Ansatz als Basis für die Modellbildung zu wählen: Es wird vereinfachend angenommen, dass Stau bedingte Zeitverluste durch ihren Einfluss auf die Erreichbarkeit das Rentengebot und damit die Bevölkerungsdichte alleine bestimmen.⁸ Konkret bedeutet diese Annahme, dass sich in Stadtgebieten das Gleichgewicht des Immobilienmarktes bei jener durchschnittlichen Bevölkerungsdichte⁹ einstellt, bei der die Erreichbarkeit und damit auch das Rentengebot ein Maximum erreicht.¹⁰ Daraus ergibt sich die Hypothese I:

Hypothese I: Durch Zu- und Abwanderung, Suburbanisierung oder Bildung von Subzentren strebt die Bevölkerungsdichte von Städten jenem Wert zu, durch den sich die bei gegebenem Modal-Split¹¹ und beim gegebenen Verkehrsnetz maximal mögliche Erreichbarkeit ergibt.

Ob und wie weit neben den Staukosten andere Kosten, die mit einer Zunahme der Bevölkerungsdichte verbunden sind, vernachlässigt werden dürfen, muss sich bei der Überprüfung von Hypothese I (siehe 3.2.2) dadurch zeigen, dass die tatsächliche Bevölkerungsdichte von Beispielstädten unter dem Wert liegt, der gemäß Hypothese I beim jeweiligen Modal-Split des Personenverkehrs in diesen Städten zu erwarten wäre. Zusätzliche Abweichungen sind zu erwarten, wenn die Bevölkerungsdichte sich einer relativ raschen Änderung des Modal-Split nur verzögert anpassen kann.

⁸ Das heißt, dass das Maximum der Erreichbarkeit und die zugehörige Bevölkerungsdichte deutlich unter jener Dichte liegt, bei der Faktoren wie zum Beispiel die Opportunitätskosten des Verzichtes auf große Wohn- und Grünflächen zu einem Marktgleichgewicht führen würden.

⁹ Der durchschnittlichen Bevölkerungsdichte überlagert ist jene Dichteverteilung, die sich, wie in den klassischen Stadtmodellen dargestellt, durch die jeweilige Verteilung von Orten der Aktivität innerhalb des Stadtgebietes (monozentrisch, polyzentrisch) ergibt.

¹⁰ Bei der Bevölkerungsdichte, die ein Maximum der Erreichbarkeit ermöglicht, würde weiterer Zuzug bewirken, dass die Erreichbarkeit und das Rentengebot wieder sinken.

¹¹ Aufteilung der Verkehrsleistung zwischen ÖV und IV

1.3.3 Hypothese II: Größe des durch die Verkehrsmittelwahl verursachten externen Agglomerationseffektes

Welche Verkehrsleistung von einem gegebenen Straßennetz bewältigt wird und welche Reisegeschwindigkeit dabei erreicht wird, hängt von der Kapazitätsbeanspruchung pro Leistungseinheit¹² ab. Im Personenverkehr gibt es große Unterschiede der Kapazitätsbeanspruchung zwischen dem öffentlichen Verkehr und dem motorisierten Individualverkehr (MIV). Daher hängt sowohl die Erreichbarkeit bei gegebener Dichte als auch - gemäß Hypothese I - die sich mittel- bis langfristig ergebende Bevölkerungsdichte und die daraus resultierende Erreichbarkeit vom Modal-Split ab. Externe Agglomerationseffekte (siehe 3.3.2), die von der Standort-Erreichbarkeit abhängen, sind damit sowohl direkt als auch indirekt – nämlich über den Einfluss des Modal-Split auf die Dichte - mit dem Modal-Split verknüpft. Daraus wird eine weitere Hypothese abgeleitet.

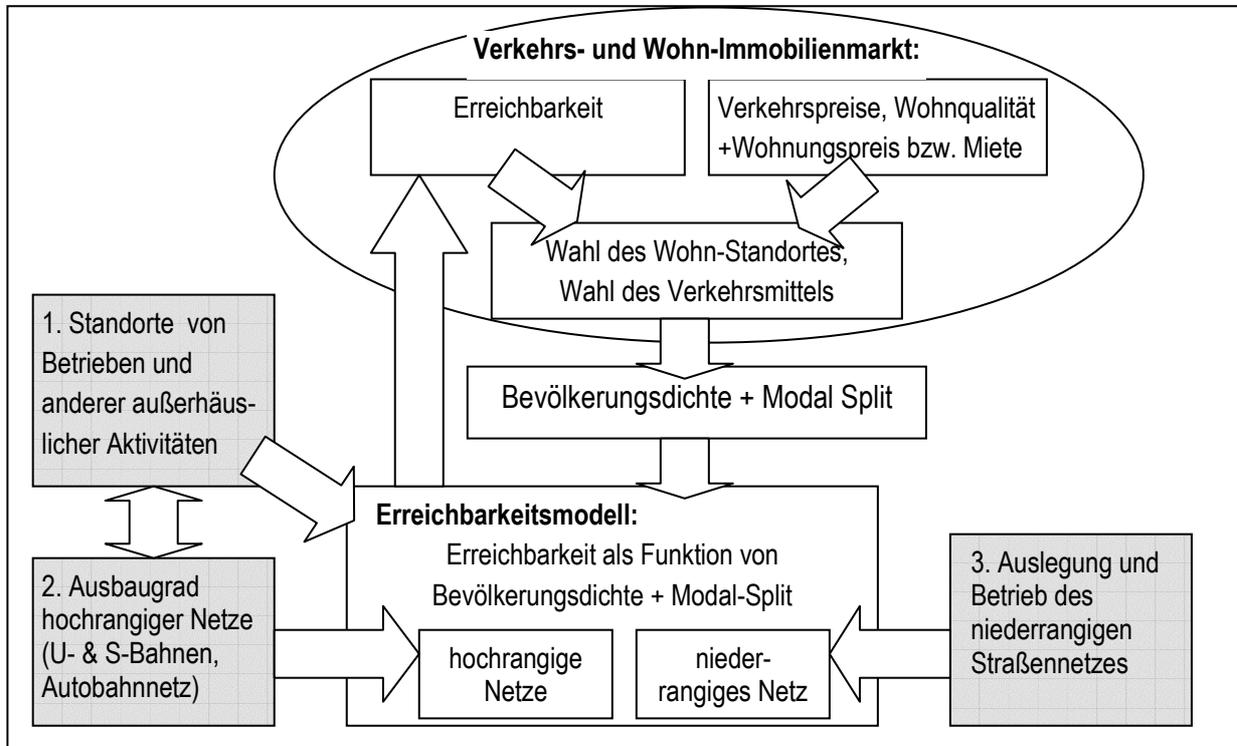
Hypothese II: In Städten besteht der größte¹³ externe Effekt des Verkehrs in dem Einfluss, den die Verkehrsmittelwahl im Personenverkehr direkt über die durchschnittlich erzielte Reisegeschwindigkeit und indirekt über eine verursachte Veränderung der Bevölkerungsdichte auf die Erreichbarkeit und in weiterer Folge auf die Produktivität der in der Stadt angesiedelten Betriebe ausübt.

¹² Personenkilometer, Tonnenkilometer

¹³ Mit der „Größe“ eines externen Effektes ist hier die Höhe des Betrages externer Kosten bzw. externer Erträge pro Leistungseinheit gemeint.

1.4 Überlegungen zu Verkehr und Stadtentwicklung

Abb. 1: Übersicht der Zusammenhänge zwischen Verkehrs-Infrastruktur, Verkehrsmittelwahl, Bevölkerungsdichte und Erreichbarkeit



Quelle: eigene Darstellung

Bevölkerungsdichte und Verkehrsmittelwahl der Wohnbevölkerung ergeben sich aus dem komplexen Zusammenspiel zahlreicher Faktoren:

- Als rational handelnde Akteure versuchen Menschen, die in der Stadt leben, durch geeignete Wahl des Verkehrsmittels und des Wohnviertels die Erreichbarkeit von Zielen außerhalb der Stadt zu optimieren, wobei sie Verkehrskosten¹⁴, Wohnkosten¹⁵ sowie allfällige Agglomerationskosten (etwa Belastung durch Verkehrslärm oder Verzicht auf große Wohn- und Grünflächen) gegen den Nutzen durch Erreichbarkeit¹⁶ abzuwägen haben.
- Bei welcher Bevölkerungsdichte und welchem Modal-Split sich die Gleichgewichte von Verkehrs- und Immobilienmarkt einstellen, hängt von den Eigenschaften des Verkehrsnetzes ab. Diese bestimmen, welche Erreichbarkeit sich in Abhängigkeit von Bevölkerungsdichte und Modal Split ergibt.
- Über die genannten Faktoren hinaus sind zahlreiche „Störgrößen“ zu berücksichtigen (siehe hinterlegte Kästchen in Abb. 1). Schon bei der Entscheidung über den Wohn-

¹⁴ Grenzkosten durch den Wechsel des Verkehrsmittels

¹⁵ Grenzkosten durch den Wechsel des Standortes der Wohnung

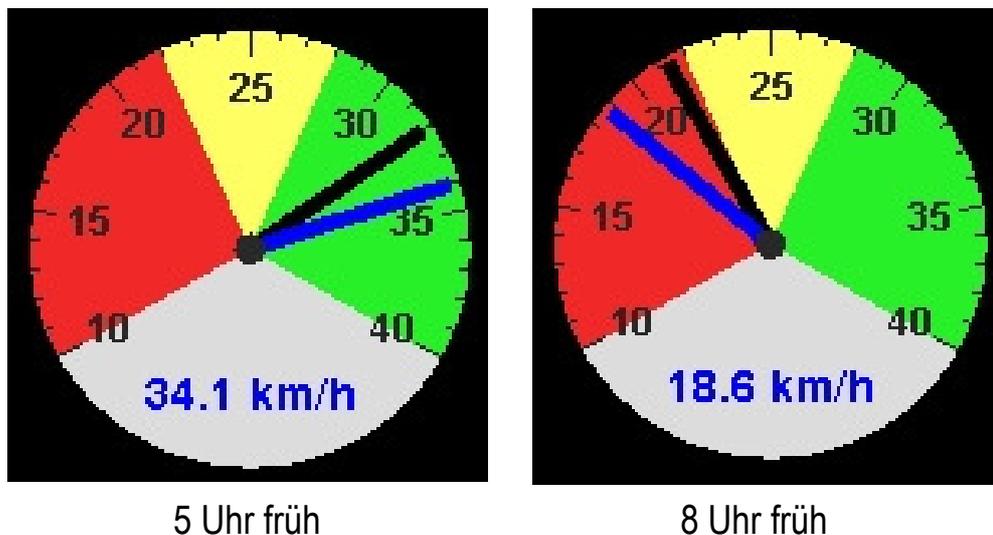
¹⁶ Grenz-Erträge durch Änderung der Erreichbarkeit

Standort spielt die räumliche Verteilung von Orten der Aktivität innerhalb des Stadtgebietes mit. Die Erreichbarkeit dieser Orte hängt ihrerseits wieder von politischen Entscheidungen über Dichte und Verlauf von U- und S-Bahnen sowie Stadtautobahnen ab (hochrangige Netze für ÖV und MIV), wobei Standort-Entscheidungen für Orte von Aktivitäten wechselweise mit politischen Entscheidungen über Investitionen in hochrangige Netze verbunden sind.

1.4.1 Erreichbarkeit als Funktion von Bevölkerungsdichte und Verkehrsmittelwahl

Um Hypothese I überprüfen zu können („...strebt die Bevölkerungsdichte ... jenem Wert zu, durch den sich die bei gegebenem Modal-Split ... maximal mögliche Erreichbarkeit ergibt.“) ist ein Modell erforderlich, das die Erreichbarkeit als Funktion der Bevölkerungsdichte und des Modal Split beschreibt. Ausgangsbasis, um ein handhabbares Modell der komplexen Zusammenhänge (siehe Abb. 1) zu erstellen, ist der empirisch ermittelte Zusammenhang von durchschnittlicher Geschwindigkeit des Kfz-Verkehrs und Verkehrsstärke im innerstädtischen Straßennetz.

Abb. 2: Beispiel für Schwankungen der durchschnittlichen Reisegeschwindigkeit des Kfz-Verkehrs im Wiener Straßennetz (ohne Stadtautobahnen).



Magistrat der Stadt Wien (2006)

Quelle:

Ausgangsbasis, um die komplexen Zusammenhänge zwischen Verkehrsmittelwahl, Bevölkerungsdichte und Erreichbarkeit zu modellieren, sind empirische Daten über durchschnittliche Geschwindigkeit des Kfz-Verkehrs und Verkehrsstärke in innerstädtischen Straßennetzen

Die weiteren Schritte, die in diesem Kapitel zunächst vereinfacht¹⁷ skizziert werden, basieren auf Annahmen, die sich auf Daten aus Mobilitätserhebungen stützen:

- 1) Auf Basis von empirischen Daten über Verkehrsstärke und Reisegeschwindigkeit des Kfz-Verkehrs in einem gegebenen Straßennetz kann die durchschnittliche Reisegeschwindigkeit der Verkehrsarten MIV und ÖV als Funktion der durchschnittlichen Verkehrsstärke¹⁸ beschrieben werden.¹⁹
- 2) Ist in einem Straßennetz die Personenverkehrsleistung pro Zeiteinheit gegeben, kann die Abhängigkeit der durchschnittlichen Verkehrsstärke im Straßennetz vom Modal-Split angegeben werden.
- 3) Sind die Personenverkehrsleistung pro Kopf²⁰ und Zeiteinheit sowie der Modal-Split gegeben, kann die durchschnittliche Verkehrsstärke als Funktion der Bevölkerungsdichte beschrieben werden.
- 4) Auf Basis der Schritte 1), 2) und 3) kann die durchschnittliche Reisegeschwindigkeit als Funktion der Bevölkerungsdichte und des Modal Split beschrieben werden.
- 5) Weil die Erreichbarkeit²¹ durch die Reisegeschwindigkeit und die Bevölkerungsdichte gegeben ist (siehe Formel (4)), kann die Erreichbarkeit nun als Funktion der Bevölkerungsdichte und des Modal-Split angegeben werden.

1.4.2 Wie Maxima der Erreichbarkeit zu Stande kommen

Wie ein Vorgriff auf die Ergebnisse des Kapitels 3.1.6 zeigt, ergibt sich ein Maximum der Erreichbarkeit immer bei bestimmten Kombinationen von Bevölkerungsdichte und Modal-Split. Folgende Wirkungsmechanismen führen zu diesem „nicht trivialen“ Ergebnis:²²

Variation des Modal-Split bei gegebener Bevölkerungsdichte: Von der Reisegeschwindigkeit²³ hängt es ab, wie viele Menschen bei gegebener Bevölkerungsdichte von ihrer Wohnung aus innerhalb einer gegebenen Zeit einen bestimmten Punkt im Stadtgebiet erreichen können. ÖV und MIV haben unterschiedliche Reisegeschwindigkeiten. Ändert sich der Modal-Split, ändert sich damit auch die durchschnittliche Reisegeschwindigkeit.

¹⁷ Genaueres dazu in den folgenden Kapiteln.

¹⁸ beschrieben als „normierte Verkehrsstärke“ = durchschnittlicher Auslastungsgrad der Engpässe innerhalb des Straßennetzes

¹⁹ Aus der Charakteristik von Kreuzungen wird der prinzipielle Zusammenhang von Reisegeschwindigkeit und Verkehrsstärke abgeleitet. Dieser wird an Hand der empirischen Daten kalibriert.

²⁰ Gemeint ist die Personenverkehrsleistung pro Kopf der innerhalb des Straßennetzes wohnhaften Bevölkerung.

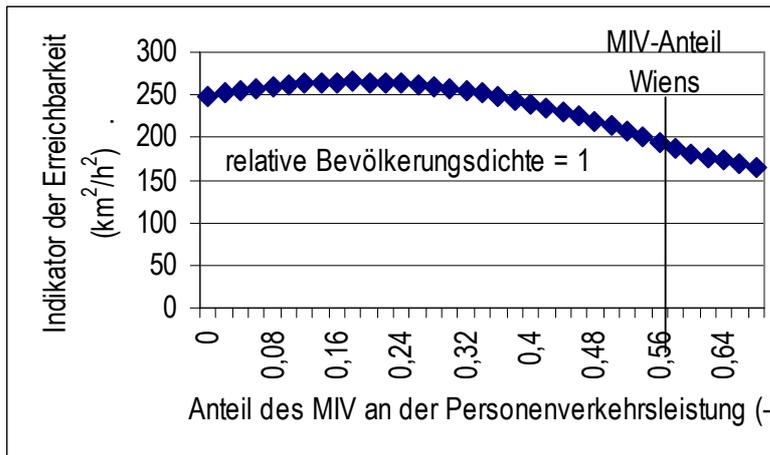
²¹ Verwendet wird ein Indikator der Erreichbarkeit nach dem Isochronen-Ansatz.

²² Trivial wäre das Ergebnis, wenn die Maxima der Erreichbarkeit jeweils bei maximaler Bevölkerungsdichte oder bei einem Modal Split von Null oder Eins auftreten würden; sie treten jedoch bei Zwischenwerten auf.

²³ genau genommen vom Quadrat der Reisegeschwindigkeit

ÖV und MIV haben jedoch auch unterschiedliche Kapazitätsbeanspruchung (Pkw-Einheiten pro beförderter Person). Bei gegebener Verkehrsleistung bestimmt der Modal-Split den Auslastungsgrad des Straßennetzes, was wiederum Einfluss auf die Reisegeschwindigkeit hat. Sind Straßennetz und Verkehrsleistung gegeben, ergibt sich bei Variation der Verkehrsmittelwahl bei einem bestimmten Modal-Split ein Maximum der Erreichbarkeit.

Abb. 3: Indikator der Erreichbarkeit als Funktion des MIV-Anteils bei konstanter Bevölkerungsdichte (Vorgriff auf Ergebnisse aus Kap. 3.1.6)

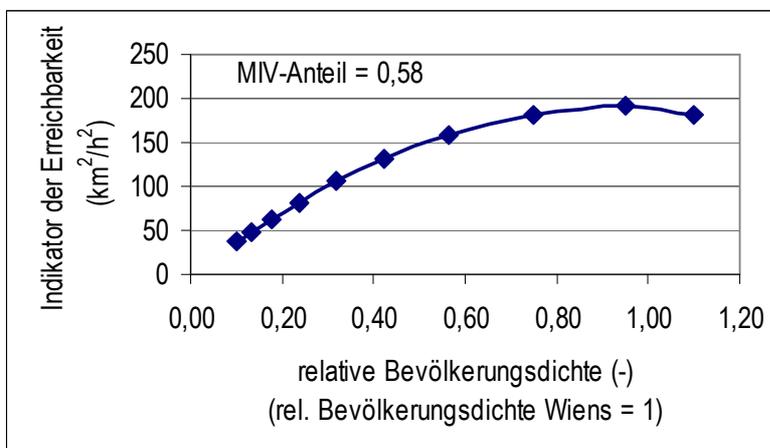


Sind Straßennetz und die darin erbrachte Verkehrsleistung gegeben, ergibt sich bei Variation der Verkehrsmittelwahl bei einem bestimmten Modal-Split ein Maximum der Erreichbarkeit.

Quelle: eigene Darstellung

Variation der Bevölkerungsdichte bei gegebenem Modal-Split: Von der Bevölkerungsdichte hängt es ab, wie viele Menschen von ihrer Wohnung aus bei gegebener Reisegeschwindigkeit innerhalb einer gegebenen Zeit einen bestimmten Punkt im Stadtgebiet erreichen können. Die Bevölkerungsdichte hat jedoch Rückwirkungen auf den Auslastungsgrad des Straßennetzes und damit auf die Reisegeschwindigkeit. Sind Straßennetz, Modal-Split und Verkehrsleistung pro Kopf gegeben, ergibt sich bei Variation der Bevölkerungsdichte bei einer bestimmten Bevölkerungsdichte ein Maximum der Erreichbarkeit.

Abb. 4: Indikator der Erreichbarkeit als Funktion der Bevölkerungsdichte bei konstantem MIV-Anteil (Vorgriff auf Ergebnisse aus Kap. 3.1.6)



Sind Straßennetz, Modal-Split und Verkehrsleistung pro Kopf gegeben, ergibt sich bei einer bestimmten Bevölkerungsdichte ein Maximum der Erreichbarkeit.

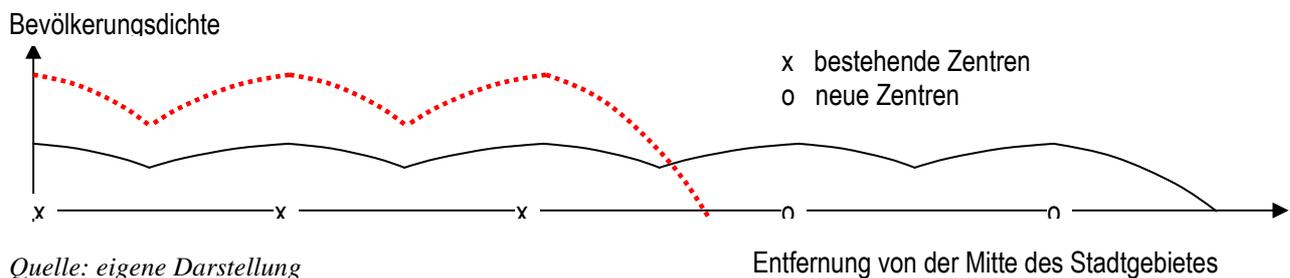
Quelle: eigene Darstellung

1.5 Überlegungen zu Grenzen der Anwendbarkeit der Hypothese I

1.5.1 Einfluss der Verteilung von Orten der Aktivität auf die Anwendbarkeit von Hypothese I

In Kapitel 1.2.2 wurde angenommen, dass die Orte der Aktivität innerhalb des Gebietes einer Großstadt etwa gleiche räumliche Verteilung aufweisen wie die Bevölkerung. Das bedeutet, dass die Erreichbarkeit von Orten der Aktivität²⁴ bei gegebener Reisegeschwindigkeit proportional der Bevölkerungsdichte ist. Nur unter dieser Bedingung besteht für die Wohnbevölkerung der notwendige Anreiz, ihren Wohnort innerhalb des Stadtgebietes so zu wählen, dass sich die Bevölkerungsdichte entsprechend der Hypothese I einstellen kann, denn Einfluss auf die Wahl des Wohnortes innerhalb eines Stadtgebietes kann nur jene Erreichbarkeit haben, die sich aus Anzahl und Attraktivität der tatsächlich innerhalb einer gegebenen Zeit erreichbaren Orte von Aktivitäten ergibt.²⁵ Im Folgenden ist zu untersuchen, wie sich Abweichungen zwischen der Verteilung von Orten der Aktivität und der Verteilung der Bevölkerung auf die Anwendbarkeit von Hypothese I auswirken:

Abb. 5: Bevölkerungsdichte bei polyzentrischer Verteilung von Orten der Aktivität im Ausgangszustand (.....) und nach Anstieg des MIV-Anteils (—)



In der Regel sollte Hypothese I auch dann anwendbar sein, wenn Orte der Aktivität auf Stadtteil-Zentren konzentriert sind: Steigt beispielsweise der MIV-Anteil, dann liegt die bis dahin optimale Bevölkerungsdichte bestehender Stadtteile über dem Wert, der maximale Erreichbarkeit ermöglicht. Die Stadt dehnt sich bei sinkender Bevölkerungsdichte durch Suburbanisierung und Bildung neuer Subzentren ins Umland aus.

Wenn in einer polyzentrisch strukturierten Großstadt Produktionsbetriebe, Geschäfte und Dienstleister der einzelnen Stadtviertel in Stadtteil-Zentren konzentriert sind, ist anzunehmen, dass die Proportionalität zwischen der Erreichbarkeit von Orten der Aktivität und der Bevölkerungsdichte im Wesentlichen bestehen bleibt. Je höher die

²⁴ Z.B. Erreichbarkeit von Arbeitsplätzen: Anzahl der Arbeitsplätze, die innerhalb einer gegebenen Zeit erreichbar sind.

²⁵ Diese relevante Erreichbarkeit ist nur unter der getroffenen Annahme (etwa gleiche Verteilung von Bevölkerung und Orten der Aktivität) proportional jenem Indikator der Erreichbarkeit, der gemäß Gleichung (4) von der Bevölkerungsdichte abhängt.

Bevölkerungsdichte und damit bei gegebener Reisegeschwindigkeit die Erreichbarkeit des Stadtteil-Zentrums durch die Wohnbevölkerung des Stadtteils ist, desto mehr potentielle Arbeitskräfte und Kunden stehen lokalen Betrieben und Dienstleistern zur Verfügung und desto attraktiver sollte der jeweilige Stadtteil bzw. dessen Zentrum als Betriebsstandort gegenüber den anderen Stadtteilen werden. Ein besseres Angebot an Orten der Aktivität ist seinerseits geeignet, die Attraktivität des Stadtviertels für die Wohnbevölkerung zu erhöhen.²⁶ So wie beim Modell der gleichmäßigen Verteilung von Orten der Aktivität stehen in der polyzentrischen Großstadt die einzelnen Siedlungsgebiete – in diesem Fall die Stadtteile und ihre jeweiligen Stadtteilzentren – im „Wettbewerb“ um Bevölkerung und Orte der Aktivität. Der skizzierte Mechanismus der wechselseitigen Abhängigkeit der Bevölkerungsdichte und der Erreichbarkeit von Orten der Aktivität sollte daher unter bestimmten Bedingungen²⁷ auch in der polyzentrischen Großstadt zu der laut Hypothese I vorhergesagten Bevölkerungsdichte führen.²⁸

Werden Orte der Aktivität – insbesondere Arbeitsplätze – räumlich noch stärker konzentriert, nämlich im Wesentlichen auf ein einziges zentrales Geschäftszentrum (central business district – CBD) der gesamten Großstadt, muss der beschriebene Marktmechanismus, der die Grundlage von Hypothese I bildet, versagen. Ein kausaler Zusammenhang zwischen der Bevölkerungsdichte eines Stadtviertels als Ursache und Erreichbarkeit von Orten der Aktivität als Wirkung – wie oben beschrieben - ist nicht mehr gegeben. Weil damit ein wichtiger Anreiz zur Verdichtung entfällt, sollte in vorwiegend monozentrischen Großstädten mit geringerer Bevölkerungsdichte zu rechnen sein als gemäß Hypothese I zu erwarten wäre. Dagegen sollte in polyzentrischen Großstädten eine Bevölkerungsdichte gemäß Hypothese I erreicht werden, wenn die im folgenden Unterkapitel 1.5.2 erläuterten Bedingungen bezüglich der Größe des Stadtgebietes und bezüglich des hochrangigen Verkehrsnetzes gegeben sind.

²⁶ Begrenzt wird die wechselweise Verstärkung der Agglomeration von Bevölkerung und Orten der Aktivität durch das Sinken der Reisegeschwindigkeit in Folge steigender Verkehrsstärke welche schließlich die Kapazitätsgrenze des untergeordneten Straßennetzes erreicht.

²⁷ Das sind die Bedingungen bezüglich hochrangiger Verkehrsinfrastruktur, die unter 1.5.2 erörtert werden.

²⁸ Der hier skizzierte Marktmechanismus kann als Erklärung für die Suburbanisierung und die Bildung von Subzentren („edge cities“) dienen: Wird in bestehenden zentralen Stadtvierteln durch steigenden MIV-Anteil am Personenverkehr die für die Erreichbarkeit optimale Bevölkerungsdichte überschritten, verbessert sich die Wettbewerbsposition von Stadtgebieten, die geringere Bevölkerungsdichte aufweisen bzw. von noch nicht besiedeltem Bauhoffnungsland am Stadtrand. Als „Kristallisationskeim“ neuer Subzentren dienen Punkte mit besonders hoher Erreichbarkeit, wie etwa Kreuzungspunkte radialer und tangentialer Autobahnen oder die Stationen eines ins Umland erweiterten U- und S-Bahnnetzes.

1.5.2 Einfluss von Verkehrsinfrastruktur und Größe des Stadtgebietes auf die Anwendbarkeit der Hypothese I

In den bisherigen Überlegungen fehlt der wichtige Aspekt der Verkehrsinfrastruktur. Damit eine Großstadt mit überwiegend monozentrischer Anordnung von Orten der Aktivität bestehen kann, sind hochrangige Verkehrsnetze – je nach MIV-Anteil Stadtautobahnen, U- oder S-Bahnen – erforderlich, um akzeptable Reisezeiten von etwa 30 Minuten von Stadtrandgebieten bis ins Zentrum sicher zu stellen (Lehner, 1966, S. 10). Ist ein solches hochrangiges Verkehrsnetz in relevanter Dichte²⁹ vorhanden, bedeutet dies in bestimmten Fällen, dass Hypothese I auch bei polyzentrischer Anordnung von Orten der Aktivität nur eingeschränkt anwendbar ist. Zum Beispiel hängt bei dicht ausgebautem Autobahnnetz die Reisezeit zu vielen Orten der Aktivität weniger von der Gesamtdistanz, sondern in erster Linie von der Reisezeit bis zur nächsten Autobahnauffahrt ab. Die einfache Wechselbeziehung zwischen lokaler Bevölkerungsdichte und der Erreichbarkeit von Orten der Aktivität, auf der die Hypothese I beruht, wird dadurch aufgelöst. Wie attraktiv ein Standort für die Ansiedlung von Betrieben ist, hängt in diesem Fall weniger von der Bevölkerungsdichte in der Umgebung des Standortes, sondern überwiegend von der Erreichbarkeit im hochrangigen Netz ab. Das gilt bis zu einer bestimmten Größe des Stadtgebietes unabhängig davon, ob Orte der Aktivität im Stadtgebiet vorwiegend monozentrisch oder vorwiegend polyzentrisch angeordnet sind. Erreicht die Großstadt bzw. Metropole eine Ausdehnung, bei der auch jene Durchschnitts-Distanzen, die im hochrangigen Netz gefahren werden, deutlich unter den Abmessungen des Siedlungsgebietes liegen, sollte die Anwendung von Hypothese I wieder möglich sein. In diesem Fall macht es wieder einen Unterschied, in welchem Teil des Stadtgebietes ein Betriebs- oder Wohnungsstandort gewählt wird. Es hängt von der Bevölkerungsdichte in den einzelnen Teilen des Stadtgebietes ab, wie viele Menschen bei gegebenem Modal-Split innerhalb einer gegebenen Reisezeit die Zugänge zum hochrangigen Netz und über dieses Netz die Orte der Aktivität erreichen. Das bedeutet, dass die Bevölkerungsdichte wieder Einfluss darauf hat, wie attraktiv der jeweilige Teil des Stadtgebietes gegenüber anderen Gebieten der selben Stadt als Standort für Betriebe oder sonstige Aktivitäten ist.

1.5.3 Zusammenfassende Schlussfolgerungen:

Die Frage nach der Anwendbarkeit von Hypothese I bei unterschiedlicher Verteilung von Orten der Aktivität und bei unterschiedlichem Ausbaugrad der hochrangigen Verkehrsnetze entpuppt sich letztlich als eine Art Maßstabsfrage. Sind die Abmessungen des Stadtgebietes groß in Relation zur durchschnittlichen Länge der täglichen Wege, sollte die Bevölkerungsdichte dem gemäß Hypothese I errechneten Wert zustreben; andernfalls ist

²⁹ Ein Indikator, wie relevant die Dichte des hochrangigen Netzes ist, ist am ehesten die Netzlänge pro Kopf der Bevölkerung. Da hochrangige Verbindungen nur ab einer bestimmten Auslastung gebaut werden, liefert dieser Indikator eine Aussage über die Verkehrsleistung, die pro Kopf auf diesen Netzen erbracht wird.

mit Bevölkerungsdichten unter dem erwarteten Wert zu rechnen.³⁰ Dieses Größenkriterium ist mit ein Grund dafür, dass die Aussagen dieser Arbeit bezüglich verkehrsbedingter Agglomerationseffekte sich generell nur auf Großstädte beziehen.

Großstädte, für die Hypothese I auf Grund der bisherigen Überlegungen wahrscheinlich versagen wird, sind jene mit relativ geringer Einwohnerzahl und hoher durchschnittlicher Reisegeschwindigkeit. Hohe durchschnittliche Reisegeschwindigkeit ergibt sich durch hohen MIV-Anteil und hohen Ausbaugrad des hochrangigen Verkehrsnetzes. Alle genannten Bedingungen fördern überdies die die Entwicklung einer monozentrischen Stadtstruktur, die ebenfalls zum Versagen von Hypothese I führt. Die Voraussetzungen dafür, dass Hypothese I versagt, sind daher in erster Linie für Großstädte Australiens und Nordamerikas gegeben und zwar besonders für jene Großstädte, deren Bevölkerungszahl relativ gering ist und / oder die sehr stark monozentrisch sind. Auch in Nordamerika sollte jedoch in sehr großen polyzentrischen Metropolregionen – etwa Los Angeles – eine Bevölkerungsdichte gemäß Hypothese I erreicht werden.

³⁰ Übersteigt der Durchmesser des Stadtgebietes deutlich die durchschnittliche Länge täglicher Wege, ist ein Konkurrenzverhältnis zwischen den einzelnen Stadtvierteln als Wohn- und Wirtschaftsstandort im vollen Ausmaß gegeben. Nur dann sind rational handelnde Akteure veranlasst, ihre Standort-Entscheidungen gemäß Hypothese I zu treffen.

2 Methode

2.1 Aufgabenstellung:

Es gilt, den Zusammenhang der Erreichbarkeit mit den Variablen Bevölkerungsdichte und Modal Split in einem möglichst einfachen, aber für die Aufgabenstellung ausreichenden Modell darzustellen. An Hand dieses Modells muss die Hypothese über den Zusammenhang der Bevölkerungsdichte mit dem Modal-Split überprüfbar sein. Des Weiteren muss mit einer erweiterten Variante des Modells eine Abschätzung über die Größe jener externen Agglomerationseffekte gegeben werden können, die sich aus der Wirkung der Erreichbarkeit bzw. der effektiven Größe des Arbeitsmarktes auf die Produktivität ergeben.³¹

Es geht um die Erreichbarkeit nach dem Isochronen-Ansatz innerhalb des Stadtgebietes von Großstädten³² ab einer Bevölkerungszahl von etwa einer Million. Gefragt ist die Erreichbarkeit innerhalb einer Reisezeit, die der typischen Dauer eines Weges entspricht (ca. 25 Minuten). Das bedeutet, dass sich die Fahrten im Wesentlichen innerhalb des Stadtgebietes abspielen. Es geht nicht um die absolute Größe der Erreichbarkeit sondern darum, wie sich die Erreichbarkeit durch die unabhängigen Variablen Bevölkerungsdichte und Modal-Split verändert.

2.2 Modell-Annahmen für das Verkehrsnetz

2.2.1 Nieder- und hochrangige Netze

Wie sich die Erreichbarkeit in einem gegebenen Straßennetz bei Variation von Bevölkerungsdichte und Modal-Split verändert, lässt sich auf Grund relativ einfacher Zusammenhänge der Verkehrsstärke mit Bevölkerungsdichte und Modal-Split sowie aus dem verkehrstechnischen Zusammenhang von Verkehrsstärke und Reisegeschwindigkeit ableiten. Allerdings sind Annahmen darüber zu treffen, welche verkehrspolitischen und planerischen Entscheidungen bei unterschiedlichen Konstellationen von Dichte und Modal-Split wahrscheinlich sind. Dazu werden zunächst die Verkehrsnetze des öffentlichen Verkehrs³³ (ÖV) und des motorisierten Individualverkehrs (MIV) untergliedert:

Gegeben sei ein großstädtisches Verkehrsnetz, bestehend aus folgenden Teilnetzen:

- niederrangiges Straßennetz, gekennzeichnet durch niveaugleiche Kreuzungen mit und ohne Ampelregelung
- hochrangiges Straßennetz aus Autobahnen und Schnellstraßen ohne niveaugleiche Kreuzungen

³¹ Siehe dazu Kapitel 3.4

³² Da Städte bereits ab einer Bevölkerungszahl von 100.000 als Großstädte gelten, wäre zumindest bei Städten im zweistelligen Millionenbereich eher der Ausdruck „Metropolen“ angebracht.

³³ Mit dem öffentlichen Verkehr wird hier auch der nicht motorisierte Verkehr (NMV) mitgezählt.

- Netz hochrangiger Verbindungen des öffentlichen Verkehrs, gekennzeichnet durch eigene Trassen ohne niveaugleiche Kreuzungen mit dem Straßenverkehr (U- und S-Bahn)

Die Kapazität des niederrangigen Straßennetzes teilen sich der Straßen-Güterverkehr, der Motorisierte Individualverkehr MIV (im Wesentlichen Pkw-Verkehr), der nicht motorisierte Verkehr NMV (im Wesentlichen Fußgängerverkehr) und die niederrangigen Linien des öffentlichen Verkehrs ÖV (Bus und Straßenbahn).

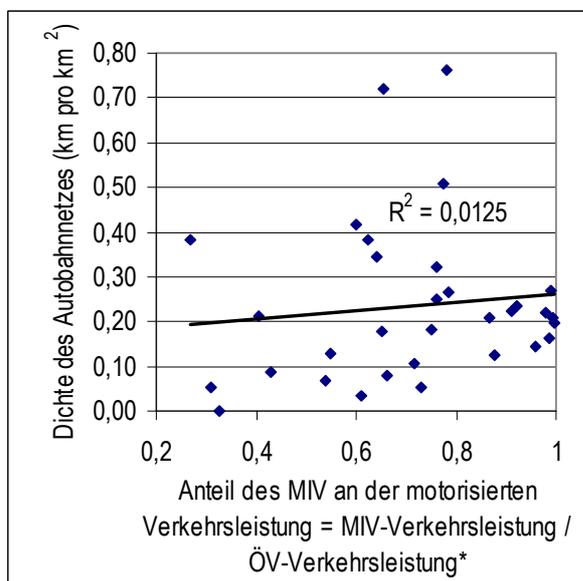
Es werden folgende Annahmen getroffen, wie sich das Verkehrsnetz bei Variation der Dichte verändert:

- In den hochrangigen Netzen von ÖV und MIV wird ohne wesentliche Änderung der Netzdichte³⁴ die Kapazität der Netzelemente der geänderten Nachfrage angepasst, so dass sich eine unveränderte Angebotsqualität ergibt. Im niederrangigen Netz sind durch Platz-Restriktion im Großen und Ganzen keine Änderungen der Kapazität zu erwarten.

Annahmen, wie sich das Verkehrsnetz bei Variation des Modal-Split verändert:

- Je nach Änderung des Modal-Split werden Ressourcen zwischen dem hochrangigen Netz des ÖV und jenem des MIV verlagert, um die jeweilige Kapazität der geänderten Nachfrage anzupassen. Im niederrangigen Netz sind ebenso wie bei Variation der Dichte im Großen und Ganzen keine Änderungen der Kapazität zu erwarten.

Abb. 6: Abhängigkeit der Autobahndichte vom MIV-Anteil der Verkehrsleistung



Unterschiede des Modal-Split scheinen wenig Einfluss auf die räumliche Dichte des hochrangigen Straßennetzes zu haben. Dies legt die Annahme nahe, dass in erster Linie die Kapazität der Netzelemente der jeweiligen Nachfrage angepasst wird.

Quelle: eigene Darstellung nach Daten von 32 Großstädten aus Kenworthy J. et al, 2005

*Anmerkung: Hier wurde die MIV-Verkehrsleistung nicht der ÖV-Verkehrsleistung zugeschlagen

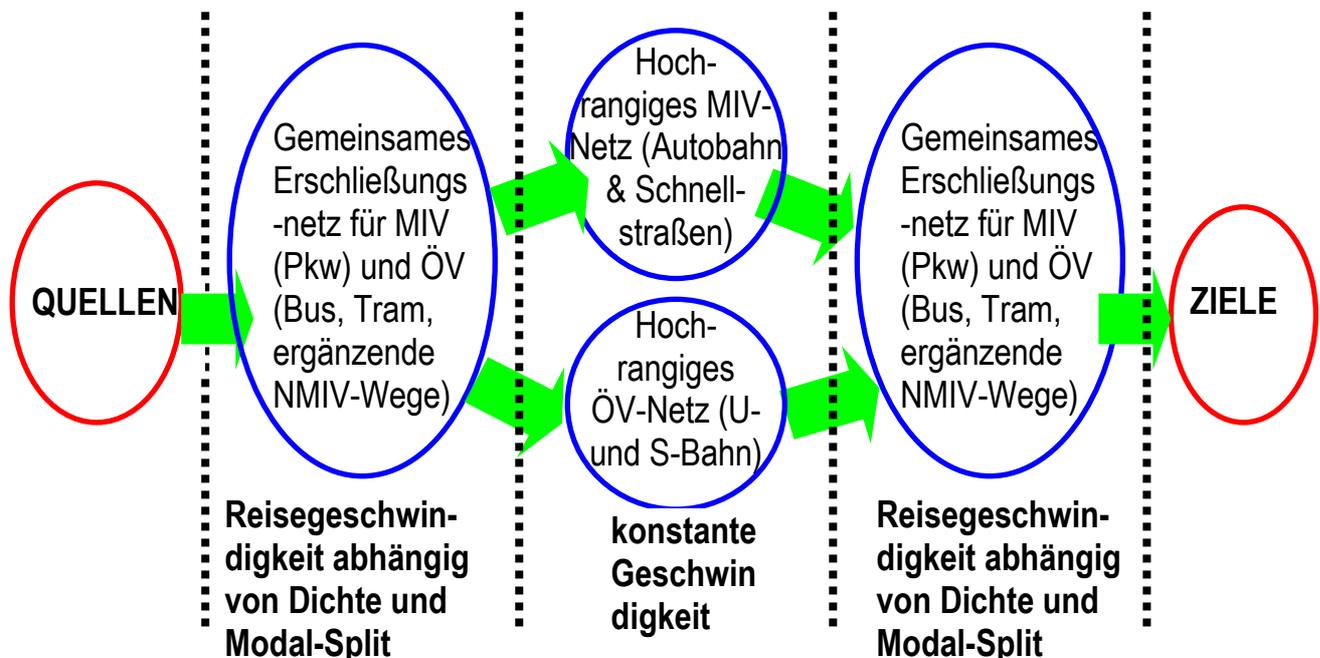
Nennenswerte Kapazitätsanpassungen des niederrangigen Netzes an steigende Verkehrsstärken erscheinen schon deshalb unwahrscheinlich, weil der Flächenbedarf des

³⁴ Die Netzdichte ändert sich allerdings dann, wenn das hochrangige Netz verschwindet, weil der Anteil der jeweiligen Verkehrsart gegen Null geht, wie das in einigen Großstädten der USA beim ÖV der Fall ist.

niederrangigen Netzes ungleich höher ist als jener des hochrangigen und weil daher jede prozentuelle Erweiterung ungleich kostspieliger wäre (Barter 2005, S.17).³⁵

2.2.2 Bedeutung der Annahmen für die Lage der Maxima der Erreichbarkeit

Abb. 7: Einfluss von Dichte und Modal-Split auf die Reisegeschwindigkeit in den Teilnetzen



Quelle: eigene Darstellung

Auf Grund der getroffenen Annahmen ändert sich die Reisegeschwindigkeit durch Änderung von Dichte und/oder Modal-Split nur im niederrangigen Straßennetz (Erschließungsnetz). Ein Unterschied der Erreichbarkeit resultiert dadurch nur aus der unterschiedlichen Belastungsart des niederrangigen Netzes.

Die Annahme, dass die Kapazität der hochrangigen Netzelemente bei gleich bleibender Netzdichte jeweils so ausgebaut bzw. reduziert wird, dass deren Kapazitätsauslastung unabhängig von Bevölkerungsdichte und Modal-Split konstant bleibt, bedeutet, dass auch die Reisegeschwindigkeit innerhalb dieser Netze unverändert bleibt. Eine Änderung der Erreichbarkeit durch Variation von Dichte und/oder Modal-Split resultiert dadurch nur aus der unterschiedlichen Belastungsart des niederrangigen Netzes. Anschaulich ausgedrückt: Passagiere beider Verkehrsarten sind gemäß dieser Annahme zwischen den Knotenpunkten ihrer hochrangigen Netze unabhängig von der jeweils betrachteten Kombination von Dichte und Modal-Split immer gleich schnell unterwegs. Der Einzugsbereich der Knoten, bzw. der

³⁵ Schätzung für Wien: Einem niederrangigen Netz mit etwa 25 Quadratkilometern steht ein hochrangiges Straßennetz von etwa 3 Quadratkilometern gegenüber, wobei das hochrangige Straßennetz eher kostengünstigere Flächen beansprucht.

Bereich, der von den Knoten aus innerhalb einer gegebenen Zeit abzudecken ist, ist hingegen von der Verkehrsmittelwahl und der daraus resultierenden Belastungsart des niederrangigen Netzes abhängig. Jene optimalen Wertepaare von Bevölkerungsdichte und Modal-Split, bei denen eine maximale Erreichbarkeit gegeben ist, sind daher unter den getroffenen Annahmen nur von den verkehrstechnischen Eigenschaften des niederrangigen Netzes abhängig. Ob und wie weit mit diesen Annahmen die tatsächlichen Verhältnisse abzubilden sind, zeigt sich beim Vergleich der errechneten Erwartungswerte für die Bevölkerungsdichte³⁶ mit den tatsächlichen Bevölkerungsdichten der Beispielstädte (siehe Kap. 3.2). Für die Überprüfung der Hypothese II (relative Größe externer Grenz-Agglomerationseffekte) haben die hier getroffenen Annahmen über die Art der Anpassung der hochrangigen Netze an Änderungen der Nachfrage keine Bedeutung, weil der gesuchte Grenz-Agglomerationseffekt nur für jene Weg-Anteile berechnet wird, die auf das niederrangige Netz entfallen.

2.2.3 Modell für Reisegeschwindigkeit und Erreichbarkeit sowie zugehörige Annahmen

Es gilt die Annahme, dass der Zusammenhang von Reisegeschwindigkeit und Verkehrsstärke im niederrangigen Teil der städtischen Straßennetze durch die verkehrstechnischen Eigenschaften der Engpässe des Netzes – nämlich der niveaugleichen Kreuzungen - bestimmt wird und dass alle Straßennetze dieses Typs im Wesentlichen gleiche Charakteristiken aufweisen. Das heißt, dass sie etwa die gleiche maximale flächenbezogene Verkehrsdichte (PCU-Kilometer pro Quadratkilometer und Zeiteinheit) bewältigen können und dass bei Variation der flächenbezogenen Verkehrsdichte zwischen Null und der maximal bewältigbaren flächenbezogenen Verkehrsdichte etwa der gleiche Zusammenhang zwischen Verkehrsdichte und Reisegeschwindigkeit des Kfz-Verkehrs bzw. des MIV auftritt. Als empirische Grundlage zur Bestimmung dieser Charakteristik werden die Daten zum Tagesgang der durchschnittlichen Reisegeschwindigkeit im Wiener Straßennetz herangezogen (Magistrat der Stadt Wien, 2006).

Die Reisegeschwindigkeit des ÖV wird durch Zuschläge für Zeitverluste bei Haltestellen aus der des MIV abgeleitet. Aus Mobilitätsdaten der Wiener Bevölkerung (Socialdata, 1995) werden die Zu- und Abgangszeiten zum Fahrzeug bzw. zur Haltestelle bei MIV und ÖV ermittelt, um zu den durchschnittlichen Tür-zu-Tür-Reisegeschwindigkeiten zu gelangen. Aus Reisegeschwindigkeiten und Dichte (siehe Annahmen zur Verteilung potenzieller Ziele im folgenden Kap. 3.2.3) ergibt sich ein Indikator der Erreichbarkeit entsprechend den Gleichungen (3) und (4).

Bei der Variation des Modal-Split des Personenverkehrs wird die Stärke des Güterverkehrs (Lkw, Lieferwagen) als konstant angenommen.³⁷ Weiters gilt die Annahme, dass die

³⁶ Dichte, bei der laut Berechnungsmodell maximale Erreichbarkeit gegeben ist.

³⁷ Diese Annahme ist zu hinterfragen, wenn es um asiatische Städte mit extrem niedrigen MIV-Anteilen geht. Hier könnte auch die Stärke des Güterverkehrs abnehmen. Die Annahme konstanter Güterverkehrsstärke

Gesamtzahl der zurückgelegten Wege und deren Weglänge vom Modal-Split unabhängig bleiben (gegebene Personenverkehrs-Mobilität).³⁸

2.2.4 Annahmen zur Verteilung von Bevölkerung und Orten außerhäuslicher Aktivitäten

Für die Erreichbarkeit nach dem Isochronen-Ansatz ist die Lage potentieller Ziele relativ zur Lage der Wohnorte entscheidend. Traditionell hat bei der Analyse der städtischen Siedlungsstruktur das monozentrische Stadtmodell dominiert (Alonso, 1974, S. 36-42). Es zeigt sich jedoch, dass dieses Modell ungeeignet ist, die disperse Ausrichtung von Verkehrsströmen innerhalb von Großstädten sowie Suburbanisierung und Bildung von Subzentren ausreichend zu erklären (Bertaud, 2002, S.3; McGrath 2005, S. 8 sowie Erklärungen zu Abb. 5). In dieser Arbeit wird daher von der Bildung zahlreicher kleiner Subzentren innerhalb des Stadtgebietes ausgegangen, die eine annähernd homogene Durchmischung von Wohnbevölkerung und Orten außerhäuslicher Aktivitäten – den Zielen täglicher Wege – ergeben. Dabei wird angenommen, dass die durchschnittliche Dichte an potentiellen Zielen proportional der Bevölkerungsdichte ist. Wie weit diese Annahme den tatsächlichen Verhältnissen entspricht, wurde bereits in Kapitel 1.5 erörtert.

2.3 Vorgangsweise

2.3.1 Übersicht der Schritte zur Überprüfung der Hypothesen

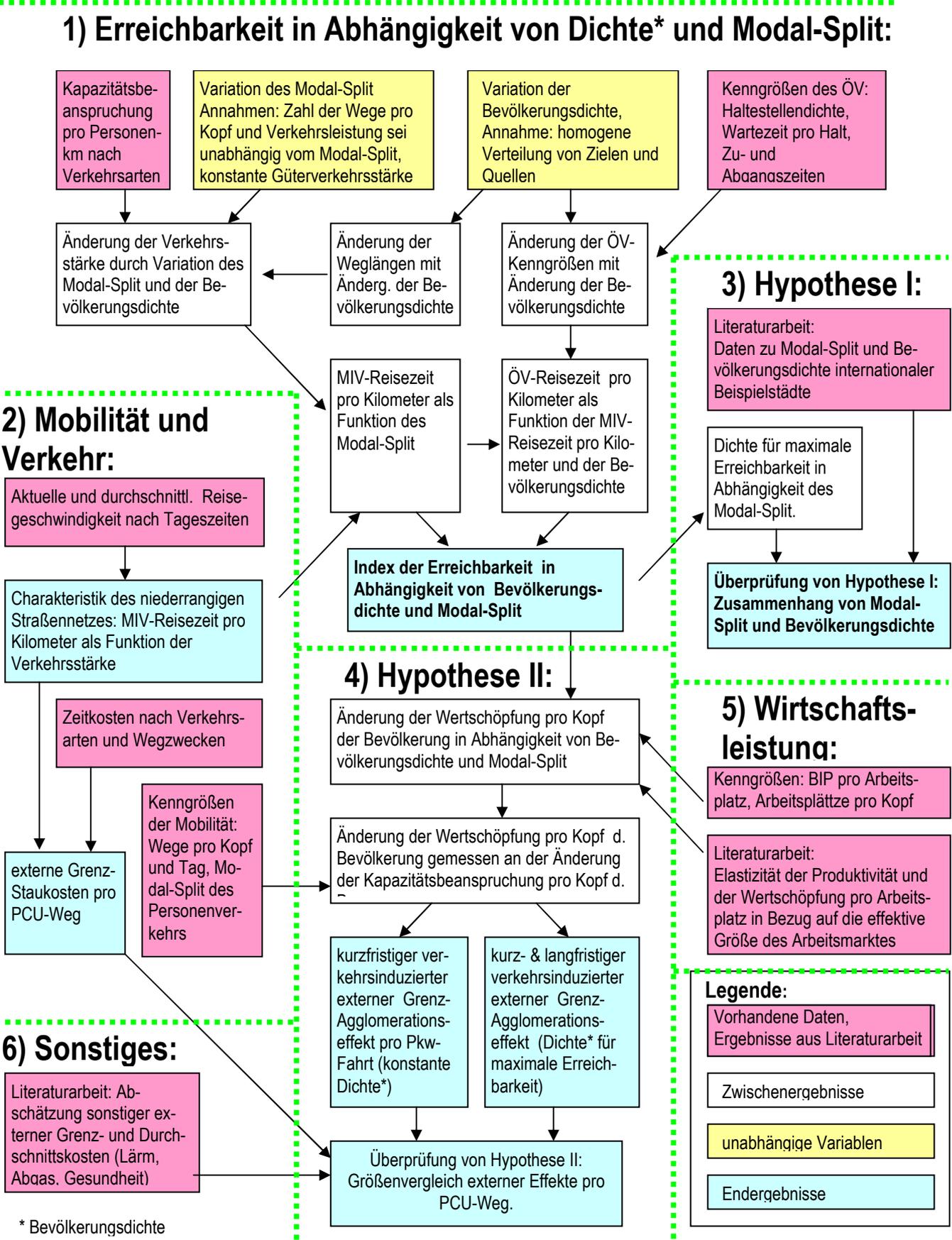
Die nachfolgende Abbildung 8 zeigt die Vorgangsweise auf Basis der unter 2.2 erläuterten Modellannahmen:

- 1) Abbildung 8, Schritt 1): Das wichtigste Werkzeug zur Überprüfung beider Hypothesen ist das Modell, das die Erreichbarkeit von Standorten innerhalb eines großstädtischen Verkehrsnetzes als Funktion von Bevölkerungsdichte und Modal-Split (zwei unabhängige Variable) darstellt. Mit Hilfe dieses Modells wird unter anderem die Funktion (Gleichung (14)) ermittelt, die beschreibt, welche Bevölkerungsdichte beim jeweiligen Modal-Split die maximale Erreichbarkeit ermöglicht (Input für Schritt 3)).
- 2) Abbildung 8, Schritt 2): Maßgeblich für die Erreichbarkeit ist die Reisegeschwindigkeit im niederrangigen Netz in Abhängigkeit von der Verkehrsstärke, die ihrerseits vom Modal-Split abhängt (= Input für Schritt 1)). Aus der Änderung der Reisegeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Verkehrsstärke werden die externen Staukosten pro PCU-Weg ermittelt (Input für Schritt 4)).

könnte unter Umständen eine überhöhte Verkehrsstärke vorspiegeln, welche die Dichte gegenüber Hypothese I als zu hoch erscheinen lässt.

³⁸ Die Weglänge variiert jedoch mit der Dichte.

Abb. 8: Schritte zur Überprüfung der Hypothesen



Quelle: eigene Darstellung

- 3) Abbildung 8, Schritt 3): Daten zur Bevölkerungsdichte von Großstädten aus verschiedenen Kontinenten werden mit jener Bevölkerungsdichte verglichen, die laut Berechnung beim jeweiligen Modal-Split dieser Städte die höchstmögliche³⁹ Erreichbarkeit ergibt. Das ist jene Bevölkerungsdichte, der sich die Bevölkerungsdichte dieser Städte laut Hypothese I annähern sollte.
- 4) Abbildung 8, Schritt 4): Eine Erweiterung des Modells von Schritt 1) mit Hilfe von Inputs aus Schritt 5) beschreibt die Abhängigkeit der Wertschöpfung pro Kopf der Bevölkerung⁴⁰ bei sonst gleichen Bedingungen von der jeweiligen Erreichbarkeit (externer Agglomerationseffekt). Eine Änderung des Modal-Split bewirkt eine Änderung der Kapazitätsbeanspruchung (PCU-Kilometer pro Kopf und Zeiteinheit), die eine Änderung der Erreichbarkeit und in weiterer Folge der Wertschöpfung pro Kopf der Bevölkerung nach sich zieht. Änderung der Wertschöpfung bezogen auf Änderung der Kapazitätsbeanspruchung ergibt den durch Änderung des Modal-Split verursachten⁴¹ externen Grenz-Agglomerationseffekt. Dieser kann mit und ohne der laut Hypothese I durch die Verkehrsmittelwahl verursachten Änderung der Bevölkerungsdichte berechnet werden (kurzfristig, kurz- & langfristig). Der externe Grenz-Agglomerationseffekt wird mit externen Staukosten (Input von Schritt 2)) und mit sonstigen externen Kosten des Verkehrs verglichen, um deren relative Bedeutung im innerstädtischen Verkehr abzuschätzen (Überprüfung von Hypothese II).
- 5) Abbildung 8, Schritte 5) und 6): Auf Basis vorhandener Untersuchungen zu externen Agglomerationseffekten wird eine Abschätzung der Agglomerations-Elastizität der Produktivität und der Wertschöpfung pro beschäftigter Person bezüglich der effektiven Größe des Arbeitsmarktes getroffen (Input für Schritt 4)).
Auf Basis vorhandener Untersuchungen zu externen Kosten des Verkehrs wird eine Abschätzung der sonstigen externen Effekte des Verkehrs (externe Lärm-, Abgas- und Unfallkosten) getroffen (Input für Schritt 4)).

³⁹ höchstmöglich bei der als gegeben angenommenen Kapazität des untergeordneten Straßennetzes

⁴⁰ Unter der Annahme, dass das Verhältnis der Zahl Erwerbstätiger zur Bevölkerungszahl konstant bleibt, wird mit den Daten aus Schritt 5 das BIP pro Arbeitskraft auf ein BIP pro Kopf der Bevölkerung umgerechnet (Hinweis: Die Größe der Agglomerationseffekte wird nur auf Basis der derzeitigen Wiener Produktivitätsdaten und Erwerbsquoten berechnet.)

⁴¹ über den Einfluss des Modal-Split auf die Erreichbarkeit.

2.3.2 Zur Frage der Einführung weiterer Modellparameter

Vor allem bei hohen MIV-Anteilen (siehe Abb. 15 im Kapitel „Ergebnisse“) treten Abweichungen zwischen den laut Hypothese I errechneten Werten der Bevölkerungsdichte und den empirisch vorliegenden Werten auf. Diese Abweichungen könnten es nahelegen, das Berechnungsmodell zu verbessern und allenfalls weitere Verhaltensvariable einzuführen. Eine solche Vorgangsweise erscheint jedoch für die gewählten Fragestellungen nicht geeignet. Es ist gerade die Besonderheit der zentralen Hypothese dieser Arbeit, dass nur die Erreichbarkeit, nicht aber sonstige, das Verhalten beeinflussende Variablen als bestimmend für die Entwicklung der Bevölkerungsdichte von Großstädten angenommen werden. Dass es sehr wohl weitere Einflussgrößen geben kann, die die Entscheidung der Wohnungssuchenden beeinflussen, steht dabei außer Zweifel. Solche Einflussgrößen sind jedoch schon alleine auf Grund der Datenlage nicht im Modell enthalten. Ob sonstige Einflussgrößen relativ zur Erreichbarkeit tatsächlich relevant sind, soll daher anhand der Abweichung der gemäß der Hypothese errechneten von den empirischen Werten beurteilt werden (siehe vorletzter Satz im Abschnitt 1.3.2). Durch Einführung weiterer Parameter⁴² in die Funktion, die den Zusammenhang von Bevölkerungsdichte und Erreichbarkeit beschreibt (Gleichung (13)) wäre es zweifellos möglich die Abweichungen der Erreichbarkeits-Maxima bzw. der daraus abgeleiteten Bevölkerungsdichten mit den empirisch beobachteten Bevölkerungsdichten deutlich zu verringern. Eine solche Erweiterung dürfte jedoch keinen Erkenntnisgewinn bringen, da es völlig offen ist, ob die beobachteten Abweichungen durch eine Unvollkommenheit des Erreichbarkeitsmodells zustande kommen oder deshalb, weil die Hypothese I unter bestimmten Bedingungen nicht anwendbar ist. Im Kapitel 1.5 zu „Grenzen der Anwendbarkeit von Hypothese I“ wurden Gründe für mögliche Nicht-Anwendbarkeit der Hypothese I erörtert. Beispielsweise sollte Hypothese I für stark monozentrisch geprägte Großstädte nicht anwendbar sein (Kap. 1.5.1, vorletzter Satz).⁴³

⁴² Verfügbar sind Daten zum Wohlstandsniveau, von dem in der Regel ein Einfluss auf die Bevölkerungsdichte erwartet wird (siehe Kap. 4.2.2). Wird das kaufkraftbereinigte BIP pro Einwohner probeweise als zusätzliche Variable für die Vorhersage der Bevölkerungsdichte eingeführt, dann liegt die Irrtumswahrscheinlichkeit (p-Wert) für den Beitrag dieser Variablen bei 0,055 (zum Vergleich: Der p-Wert der Variablen „laut Hypothese I errechnete Bevölkerungsdichte“ liegt bei $6,8 \cdot 10^{-5}$). Die F-Signifikanz (Wahrscheinlichkeit, dass das Bestimmtheitsmaß $R^2 = 0$) wird durch die zusätzliche Variablen geringfügig höher ($3,8 \cdot 10^{-5}$ statt $3,04 \cdot 10^{-5}$). Es ist daher zu vermuten, dass die Qualität des Modells durch diese Variable beeinträchtigt wird.

⁴³ Unter Städten der USA und Australiens ist der monozentrische Typ stark vertreten. Unter diesen Städten ist als Ausnahme auch Los Angeles als klassischer Fall einer polyzentrischen Metropole zu finden. Ohne dass dieser Aussage Beweiskraft zukäme, ist es immerhin interessant, dass die Abweichung zwischen der laut Hypothese I berechneten und der tatsächlichen Bevölkerungsdichte im Fall von Los Angeles lediglich 0,58 % beträgt.

3 Ergebnisse

3.1 Abhängigkeit der Erreichbarkeit von Bevölkerungsdichte und Verkehrsmittelwahl

In den beiden Kapiteln 3.1 und 3.2 soll gezeigt werden, dass die Korrelation von MIV-Anteil, Bevölkerungsdichte und Erreichbarkeit weitgehend durch die verkehrstechnischen Eigenschaften des untergeordneten Straßennetzes vorgegeben ist. Das bedeutet, dass es bei gegebenem Verkehrsnetz für jeden Modal-Split (und die sich daraus ergebende Verkehrsstärke) eine bestimmte Bevölkerungsdichte gibt, bei der ein Maximum der Erreichbarkeit auftritt. An Hand der Beispielstädte soll untersucht werden, ob die Bevölkerungsdichte im Wesentlichen der Dichte beim Erreichbarkeits-Maximum entspricht.

3.1.1 Wie die Verkehrsmittelwahl die Erreichbarkeit beeinflusst

Es gilt die Annahme, dass die Gesamtzahl der zurückgelegten Wege sowie deren Ziele und Quellen konstant bleiben (gegebene Personenverkehrs-Mobilität).⁴⁴ Die Erreichbarkeit in einem gegebenen städtischen Straßennetz hängt von den Wechselwirkungen zwischen Modal-Split (und daraus resultierender Kapazitätsbeanspruchung) und Dichte ab. Eine Verschiebung des Modal-Split vom öffentlichen Verkehr zum Auto bedeutet, dass die Reisegeschwindigkeit der Umsteigenden zunimmt. Damit steigt einerseits die Anzahl der Personen, die einen bestimmten Standort innerhalb einer bestimmten Reisezeit erreichen können; andererseits bewirkt jeder Umstieg zum Auto zusätzliche Zeitverluste und damit ein Sinken der Erreichbarkeit. Zunehmende Bevölkerungsdichte erhöht einerseits die Erreichbarkeit; andererseits bewirkt sie durch zunehmende Verkehrsdichte ein Sinken von Reisegeschwindigkeit und Erreichbarkeit.

3.1.2 Vorgangsweise

Erstes Ziel ist es, den Einfluss der Verkehrsmittelwahl auf die Erreichbarkeit innerstädtischer Orte von Aktivitäten bei gegebener Bevölkerungsdichte und gegebener Verkehrs-Infrastruktur zu modellieren. In einem zweiten Schritt wird eine Variation der Bevölkerungsdichte in das Modell eingeführt.

Als Referenz-Zustand bezüglich Verkehrsstärke, Verkehrsmittelwahl und Verkehrs-Infrastruktur sowie Bevölkerungsdichte wird der Ist-Zustand dieser Größen in Wien zur Spitzenstunde der Verkehrsstärke angenommen.⁴⁵ Die Abhängigkeit der

⁴⁴ Allerdings verschiebt sich – wie weiter unten erläutert – die Lage von Zielen und Quellen bei Variation der Dichte.

⁴⁵ Da die Verkehrsspitzen durch den Pendelverkehr zur Arbeit bewirkt werden, ist die Erreichbarkeit zur Spitzenstunde relevant für die Erreichbarkeit von Arbeitsplätzen bzw. für die effektive Größe des Arbeitsmarktes, die sich theoretisch auf die Durchschnittseinkommen (siehe Kapitel 3.3) und damit auf das Rentengebot (siehe Kap. 4.1.1) und in weiterer Folge auf die Bevölkerungsdichte auswirken sollte.

Reisegeschwindigkeit von Bevölkerungsdichte und Verkehrsmittelwahl (Modal-Split) wird durch folgende Schritte ermittelt:

- 1) Durch die unterschiedliche Kapazitätsbeanspruchung der Verkehrsmittel hängt die Verkehrsstärke (PCU pro Zeiteinheit im Zählquerschnitt) bei gegebener Verkehrsleistung von der Verkehrsmittelwahl ab.
- 2) Bei Infrastrukturnetzen mit gegebener Dichte von Verbindungen ergibt sich die Verkehrsstärke aus dem Verkehrsaufkommen pro Flächeneinheit und dieses ist proportional der Bevölkerungsdichte.
- 3) Durch Einsetzen der Ergebnisse von Schritt 1 und 2 in den Zusammenhang von Verkehrsstärke und Reisegeschwindigkeit (siehe Anhang, Kapitel 6.2) ergibt sich die Abhängigkeit der Reisegeschwindigkeit von Bevölkerungsdichte und Verkehrsmittelwahl.⁴⁶ Beim öffentlichen Verkehr ist zusätzlich die Abhängigkeit der Wegzeiten von und zu Haltestellen von der Dichte der Nachfrage zu berücksichtigen
- 4) Mit Hilfe der Ergebnisse von Schritt 3 kann ein Indikator der Erreichbarkeit in Abhängigkeit von Verkehrsmittelwahl und Bevölkerungsdichte angegeben werden.

3.1.3 Abhängigkeit der Verkehrsstärke von der Verkehrsmittelwahl

Im Referenz-Zustand (Verkehrsmittelwahl in Wien, gekennzeichnet durch den Index „W“) liegt der Anteil des MIV an der Verkehrsleistung in Personenkilometern bei einem Modal-Split $AI_w = 58,3 \%$. Die Kenngrößen des Referenz-Zustandes werden in Kapitel 6.1 beziffert. Folgende Anteile haben die einzelnen Verkehrsarten an der Verkehrsstärke in Pkw-Einheiten (PCU) pro Zeiteinheit: Der Güterverkehr hat einen Anteil von $18,9 \%$, der öffentliche Verkehr einschließlich NMV einen Anteil von $6,9 \%$ und die des MIV einen Anteil von $74,2 \%$ (siehe Kapitel 6.1). Bei einer normierten Verkehrsstärke von $TN = 0,9$ zur Spitzenstunde ergibt sich die normierte Verkehrsstärke des MIV mit $TI_w = 0,668$, die des öffentlichen Verkehrs (einschließlich NMV) mit $TÖ_w = 0,062$ und die des Güterverkehrs mit $TL = 0,170$.⁴⁷ Unter der Annahme konstanter Personen- und Güterverkehrsleistung ergibt sich die folgende Abhängigkeit der normierten Verkehrsstärke TN zur Spitzenstunde vom Modal-Split (definiert als Anteil des MIV an der Verkehrsleistung in Personenkilometern, die im niederrangigen innerstädtischen Straßennetz erbracht wird):

$$(5) TN(AI) = TI(AI) + TÖ(AI) + TL \quad [-]$$

$$(6) TN(AI) = TI_w * AI / AI_w + TÖ_w * (1 - AI)/(1 - AI_w) + TL \quad [-]$$

Die normierte Verkehrsstärke TL des Güterverkehrs ist unabhängig von der Verkehrsmittelwahl. Die normierten Verkehrsstärken sind dimensionslos.

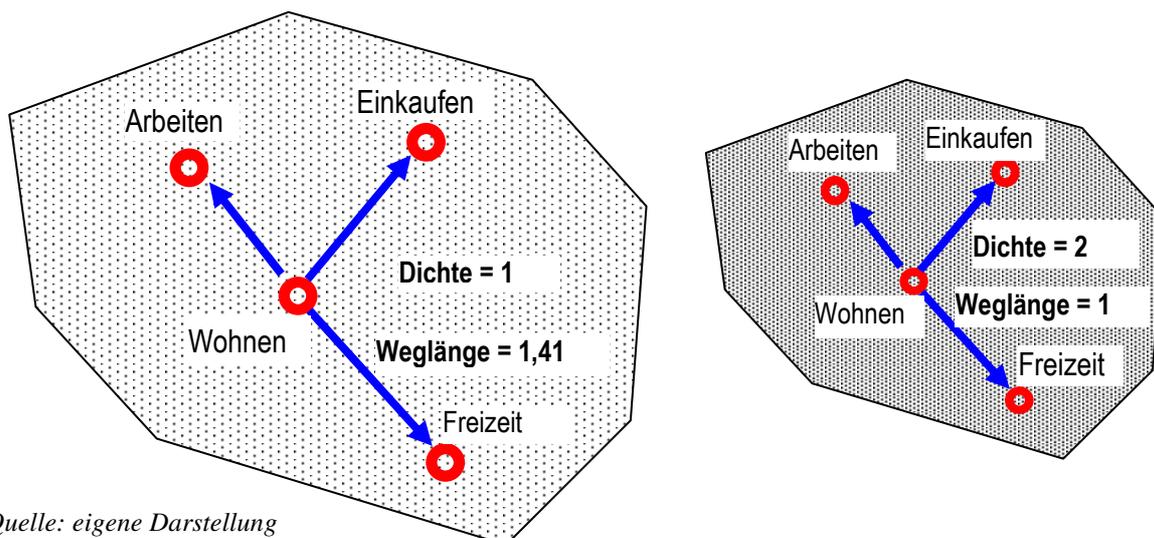
⁴⁶ Zunächst ergibt sich die MIV-Reisegeschwindigkeit. Ausgehend von dieser ist die Reisegeschwindigkeit des ÖV abzuschätzen.

⁴⁷ = Prozent-Anteile * 0,9/100

3.1.4 Bevölkerungsdichte und Verkehrsstärke

Um die Variation der Bevölkerungsdichte und die daraus resultierende Veränderung der Verkehrsstärke zu modellieren wird angenommen, dass innerhalb eines Verkehrsnetzes gegebener Dichte die Dichte der Besiedlung schwankt. Proportional der Dichte der Besiedlung steigt die Ziel- und Quelldichte des Verkehrs (Zahl der Wege, die pro Zeit- und Flächeneinheit Ziel- oder Ausgangspunkt haben). Die Veränderung der Dichte besteht darin, dass gegebene Ziele und Quellen des Verkehrs über eine jeweils unterschiedlich große Fläche „ausbreitet“ werden.

Abb. 9: Änderung der relativen Weglänge bei Variation der relativen Bevölkerungsdichte



Quelle: eigene Darstellung

Wenn die Lage der Ziele und Quellen sich gemäß der unterschiedlichen Dichte verändert, verändert sich die Länge der Wege zwischen Zielen und Quellen proportional dem Kehrwert der Wurzel aus der relativen Bevölkerungsdichte d :

$$(7) \quad \text{Quelldichte}(d) \sim d \quad \text{Weglänge} \sim d^{-1/2}$$

Wenn die Verkehrsstärke proportional der Quelldichte(d) mal der Weglänge(d) ist, verhält sich die vom Modal-Split abhängige normierte Verkehrsstärke TN (AI) zur Spitzenstunde proportional der Wurzel aus der Dichte. Wird eine relative Bevölkerungsdichte d eingeführt, die für Wien den Wert 1 hat ($d = \text{Bevölkerungsdichte} / \text{Bevölkerungsdichte Wiens}$), dann gilt

$$(8) \quad TN(AI,d) = TN(AI) * d^{1/2} \quad [-]$$

Für die spezifische Reisezeit Z des Kfz-Verkehrs pro Kilometer in Abhängigkeit von der durchschnittlichen Verkehrsstärke zur Spitzenzeit in einem gegebenen Straßennetz wird der im Anhang 6.2 in Gleichung (44) ermittelte Zusammenhang eingesetzt. Diese spezifische Reisezeit ist gleichzeitig die spezifische Reisezeit des Pkw-Personenverkehrs Z_{MIV} :

$$(9) \quad Z_{MIV}(AI,d) = 1,157 + 2,23 * (TN(AI,d)/0,9) / (2-TN(AI,d))^2 + 0,23 * TN(AI,d) \quad [\text{min/km}]$$

Die Reisezeit $Z(AI,d)$ pro Kilometer des Kfz-Verkehrs entspricht der Reisezeit pro Kilometer im motorisierten Individualverkehr $Z_{MIV}(AI,d)$. Ausgehend von der Reisezeit des MIV muss eine Abschätzung für die Reisezeit des ÖV getroffen werden.

3.1.5 Bevölkerungsdichte und Reisegeschwindigkeit im öffentlichen Verkehr

Die Annahme über Änderung der Weglängen bei Dichte-Variation (Gleichung (7)) bedeutet für den öffentlichen Verkehr, dass sich Zugangszeiten zu Haltestellen, Wartezeiten und Haltestellenabstände jeweils etwa proportional $d^{-1/2}$ verändern.⁴⁸ Den gleichen Effekt, den eine Zunahme der Dichte auf die Kenngrößen Zugangszeit, Wartezeit und Haltestellendichte hat, hat auch eine Zunahme des Anteils des öffentlichen Verkehrs an den zurückgelegten Strecken.⁴⁹

Es gelten folgende Formelzeichen und Dimensionen:

- AÖ Anteil des öffentlichen Verkehrs an der Personenverkehrsleistung
($AÖ = 1 - AI$) [-]
- d relative Bevölkerungsdichte, Verhältnis der Bevölkerungsdichte zur Bevölkerungsdichte Wiens⁵⁰ [-]
- Δ die Differenz der Zugangszeit zwischen Pkw und ÖV (ÖV-Zugangszeit minus Pkw-Zugangszeit) [min]
- DH Haltestellendichte [Haltestellen pro km].
- L Weglänge im öffentlichen Verkehr [km]
- ZH Zeitverlust pro Haltestelle [min]
- $Z_{IV}, Z_{ÖV}$ Reisezeit pro Kilometer im Pkw-Verkehr und die Reisezeit pro Kilometer im öffentlichen Verkehr. [min]
- $\Delta_w, L_w, DH_w, AÖ_w$ Wenn die Variablen den für Wien gültigen Wert annehmen, erhalten sie den Index „W“. Die Zahlenwerte sind in Tabelle 12 zu finden.

Die für die Erreichbarkeit maßgebliche effektive spezifische ÖV-Reisezeit in Minuten pro Kilometer errechnet sich aus der Summe von spezifischer Pkw-Reisezeit⁵¹ plus Differenz von Pkw- und ÖV-Zugangszeit pro Kilometer plus Zeitverluste durch Haltestellen:

$$(10) Z_{ÖV} = Z_{MIV} + \Delta/L + DH*ZH \quad [\text{min/km}]$$

⁴⁸ In der Praxis wird bei abnehmender Bevölkerungsdichte die Abnahme der Haltestellendichte (senkt Reisezeit) etwas geringer ausfallen. Dafür wird die Zunahme der Wartezeit (erhöht Reisezeit) nicht ganz so hoch sein, weil Fahrgäste bei geringer Taktfrequenz anfangen, sich nach dem Fahrplan zu richten.

⁴⁹ Es handelt sich in beiden Fällen um eine Zunahme der Kundendichte.

⁵⁰ Laut Kenworthy und Laube 2002 beträgt die Bevölkerungsdichte Wiens 69 Personen/ha

⁵¹ Die angegebenen PKW-Reisezeiten pro Kilometer enthalten keine Wegzeiten zwischen Wohnungstür und Fahrzeug. Für einen Vergleich der Erreichbarkeiten nach dem Isochronen-Ansatz spielt es keine Rolle, wenn bei beiden verglichenen Verkehrsarten ein gleich großer Teil der Reisezeit - in diesem Fall die Pkw-Zugangszeiten - pro Weg abgezogen wird.

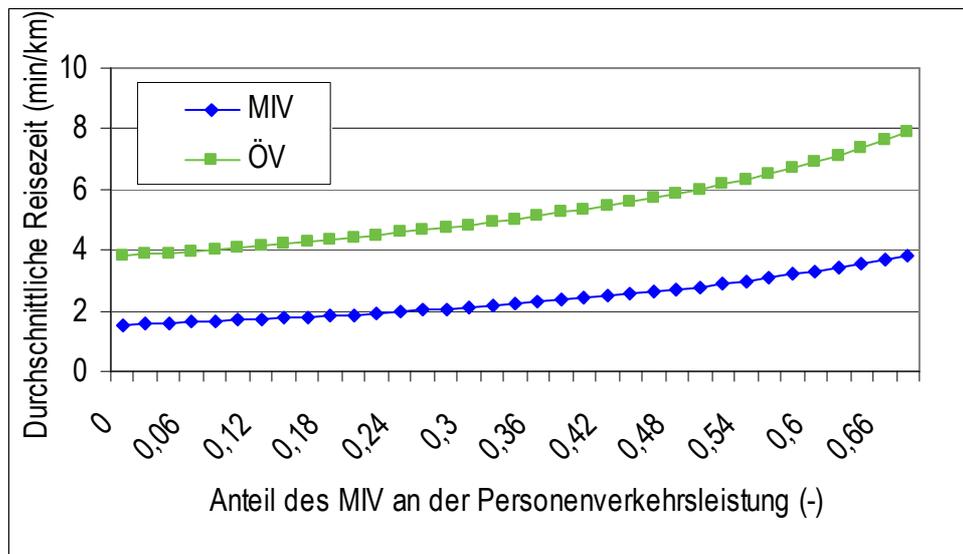
Mit den Abhängigkeiten der Zugangszeit, der Wartezeit und des Haltestellenabstandes von der relativen Bevölkerungsdichte d und vom Verkehrsanteil ÖV ergibt sich

$$(11) Z_{\text{ÖV}}(\text{AÖ}, d) = Z_{\text{MIV}} + (\Delta_w * d^{-1/2} * (\text{AÖ} / \text{AÖ}_w)^{-1/2}) / (L_w * d^{-1/2}) + \text{DH}_w * d^{-1/2} * (\text{AÖ} / \text{AÖ}_w)^{-1/2} * \text{ZH} \text{ [min/km]}$$

$$(12) Z_{\text{ÖV}}(\text{AÖ}, d) = Z_{\text{MIV}} + (\Delta_w * (\text{AÖ} / \text{AÖ}_w)^{-1/2}) / L_w + \text{DH}_w * d^{-1/2} * (\text{AÖ} / \text{AÖ}_w)^{-1/2} * \text{ZH} \text{ [min/km]}$$

Durch Einsetzen von $(1 - \text{AI})$ für AÖ ergibt sich aus (12) die Funktion $Z_{\text{ÖV}}(\text{AI}, d)$

Abb. 10: Auf Basis des Modells und empirischer Daten ermittelte durchschnittliche Reisezeiten pro Kilometer im MIV und im ÖV während der Verkehrsspitzen



Quelle: eigene Berechnungen

Die angegebenen Reisezeiten gelten für ÖV und MIV im innerstädtischen Straßennetz (ohne Autobahnen, U- und S-Bahnen).

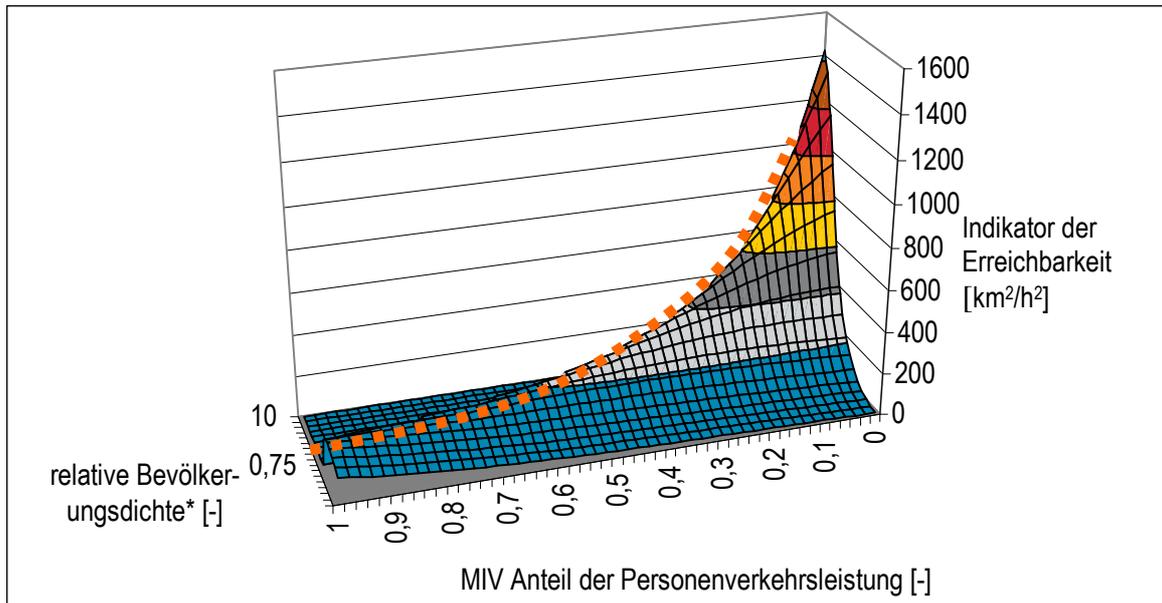
3.1.6 Ermittlung der Erreichbarkeit aus den Reisegeschwindigkeiten

Aus den Reisezeiten pro Kilometer für MIV und ÖV – das sind $Z_{\text{ÖV}}(\text{AI}, d)$ und $Z_{\text{MIV}}(\text{AI}, d)$ – kann nach dem Isochronen-Ansatz ein Indikator der Erreichbarkeit errechnet werden (siehe Kapitel 1.1.2). Für den gewählten Indikator der Erreichbarkeit $E(\text{AI}, d)$ nach dem Isochronen-Ansatz gilt nach Gleichung (4):

$$(13) E(\text{AI}, d) = 3600 * d * ((\text{AI} / Z_{\text{MIV}}(\text{AI}, d) + \text{AÖ} / Z_{\text{ÖV}}(\text{AI}, d)) / (\text{AÖ} * Z_{\text{ÖV}}(\text{AI}, d) + \text{AI} * Z_{\text{MIV}}(\text{AI}, d))) \text{ [km}^2/\text{h}^2]$$

Mit Gleichung (13) ist der Indikator der Erreichbarkeit als Funktion der beiden unabhängigen Variablen relative Dichte d und Verkehrsleistungs-Anteil des MIV dargestellt. Für die Darstellung der Ergebnisse bietet sich ein dreiaxsiges („räumliches“) Diagramm an.

Abb. 11: Indikator der Erreichbarkeit als Funktion der Bevölkerungsdichte und des MIV-Anteils an der Personenverkehrsleistung.



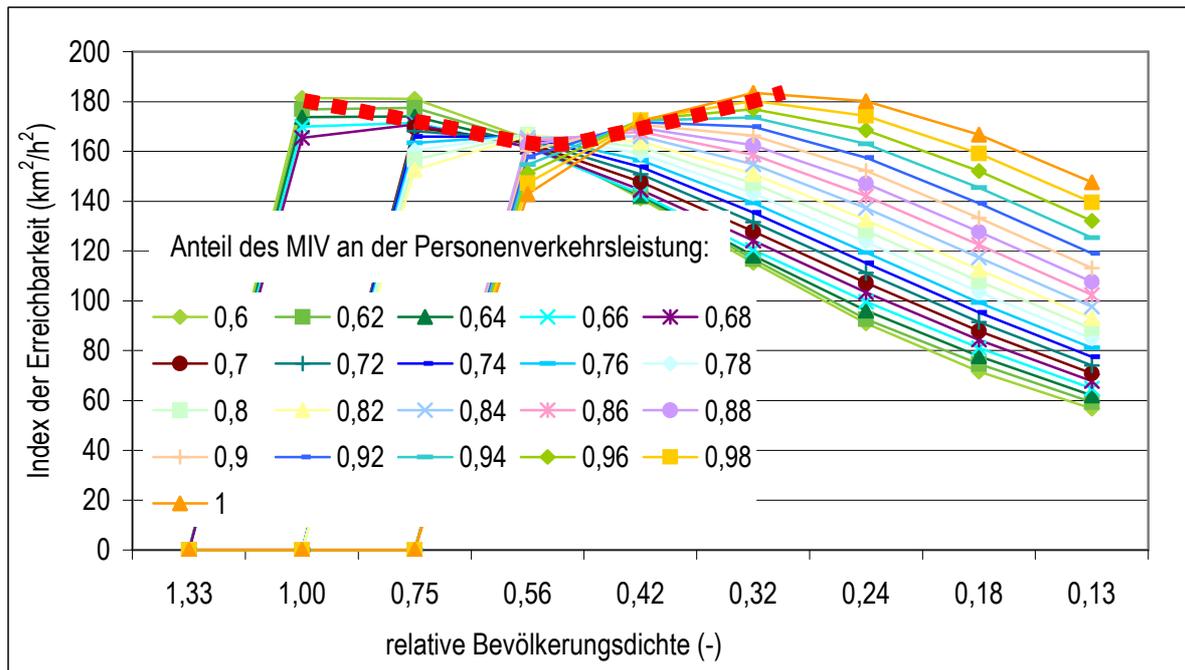
*relative Bevölkerungsdichte = Bevölkerungsdichte / Bevölkerungsdichte Wiens

Quelle: eigene Berechnungen

Der gültige Wertebereich für die Verkehrsstärke TN ist $0 < TN < 1$. Wenn TN den Wert 1 erreicht (Kapazität hoch belasteter Kreuzungen ist voll ausgelastet), wird der Indikator der Erreichbarkeit gleich Null gesetzt. Die punktierte Linie maximaler Erreichbarkeit bezeichnet die Dichten, die beim gegebenen MIV-Anteil jeweils maximale Erreichbarkeit ermöglichen.

3.1.7 Abhängigkeit der Bevölkerungsdichte, die maximale Erreichbarkeit ermöglicht, vom Modal-Split

Bei einem Anteil des MIV am Personenverkehr von 0 bis etwa 0,6 steigert sich die Erreichbarkeit bis knapp an jene Dichte, bei der die Verkehrsstärke die Kapazitätsgrenze des Straßennetzes erreicht (Normierte Verkehrsstärke = 1). Bei MIV-Anteilen zwischen etwa 0,6 und 1 ist ein Maximum der Erreichbarkeit bereits deutlich vor Erreichen der Kapazitätsgrenze fest zu stellen. Das wird in einer Detailansicht (Abb.12) erkennbar.

Abb. 12: Maximum der Erreichbarkeit bei MIV-Anteilen über 0,6

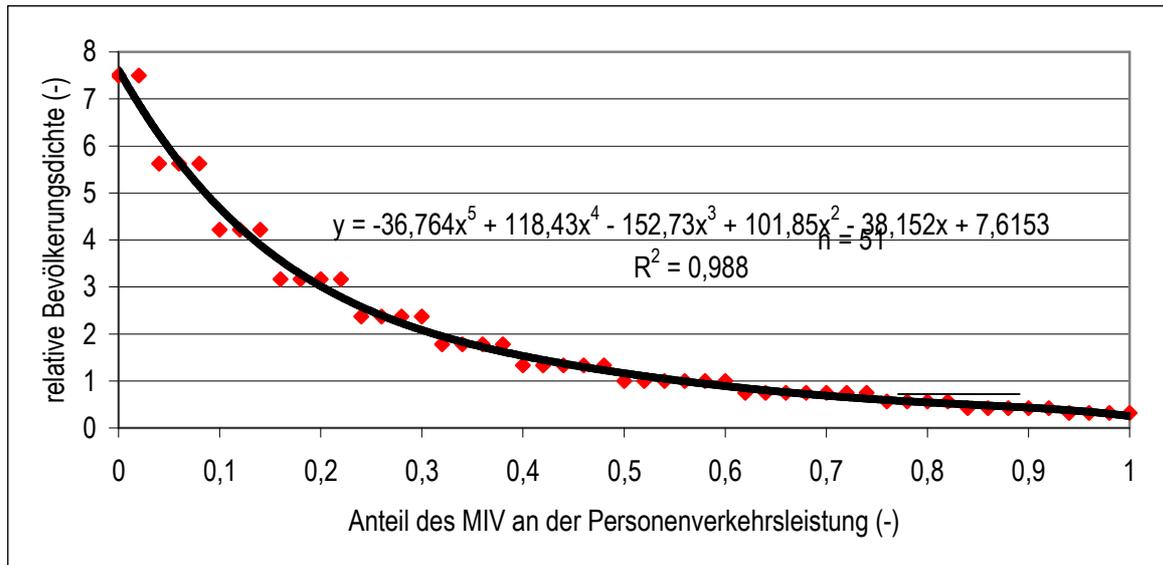
Quelle: eigene Berechnungen

Die dicke punktierte Linie bezeichnet die Punkte des Maximums der Erreichbarkeit als Funktion des MIV-Anteils an der Personenverkehrsleistung. Bei MIV-Anteilen unter 0,6 rückt das Erreichbarkeits-Maximum in die Nähe der Vollauslastung. Bei einem MIV-Anteil über 0,6 liegt das Maximum der Erreichbarkeit bei Verkehrsstärken deutlich unter der vollen Kapazitätsauslastung.

Im Folgenden soll überprüft werden, wie weit die Bevölkerungsdichte von Städten tatsächlich jenem Wert zustrebt, der beim jeweils gegebenen Modal-Split ein Maximum an Erreichbarkeit ermöglicht. Dazu ist die Abhängigkeit jener Dichte, welche die maximale Erreichbarkeit ermöglicht, vom Anteil des MIV an der Verkehrsleistung darzustellen. Auf der durch Gleichung (13) gegebenen und in Abb. 11 dargestellten „Erreichbarkeitsfläche“ werden numerisch die Maxima der Erreichbarkeit gesucht. Die numerische Lösung für die Bevölkerungsdichte, bei der die Erreichbarkeit ihr Maximum erreicht, liefert eine Reihe von Punkten, die durch ein Polynom 5. Grades (siehe Abb. 13) als Ausgleichsfunktion verbunden werden können:

$$(14) \text{ Relative Bevölkerungsdichte mit maximaler Erreichbarkeit als Funktion von AI} = -36,764 * AI^5 + 118,43 * AI^4 - 152,73 * AI^3 + 101,85 * AI^2 - 38,152 * AI + 7,6153 [-]$$

Abb. 13: Abhängigkeit der Bevölkerungsdichte, die maximale Erreichbarkeit ermöglicht, vom Modal-Split des Personenverkehrs



Anmerkung: in obiger Gleichung bedeutet y die relative Bevölkerungsdichte und x den MIV-Anteil der Personenverkehrsleistung.

Quelle: eigene Berechnungen

Das durch Excel generierte Ausgleichspolynom beschreibt die relative Bevölkerungsdichte⁵², bei der die Erreichbarkeit beim jeweils gegebenen Modal-Split ein Maximum erreicht. Die roten Punkte sind die relativen Bevölkerungsdichten bei den numerisch ermittelten Erreichbarkeits-Maxima.

⁵² Relative Bevölkerungsdichte Wiens = 1

3.2 Überprüfung der Hypothese I

Auf Basis von Berechnungen der Verkehrsleistung des nicht motorisierten Verkehrs und von Korrekturfaktoren, mit denen die verringerte Kapazitätsbeanspruchung durch Zweiräder berücksichtigt wird (siehe Kapitel 6.6) können MIV-Anteile für 44 internationale Beispielstädte angegeben werden. Aus diesen MIV-Anteilen können gemäß Gleichung (14) die relativen Dichten angegeben werden, die laut Hypothese I zu erwarten sind, weil sie jeweils die maximale Erreichbarkeit beim gegebenen Modal-Split ermöglichen.

Tabelle 1: Modal Split und Bevölkerungsdichte in 46 Großstädten

	MIV-Personenkilometer pro Kopf und Jahr	ÖV-Personenkilometer pro Kopf und Jahr	NMV-Personenkilometer pro Kopf und Jahr	Anteil des MIV an der Personenverkehrsleistung	Zweirad-Korrekturfaktor	bezüglich Zweirad-Anteil korrigierter MIV-Anteil	relative Bevölkerungsdichte	relative Dichte für maximale Erreichbarkeit (lt. Modell)
Städte in den USA								
Boston	17373	627	365	0,95	1,00	0,95	0,17	0,36
Chicago	14097	805	426	0,92	1,00	0,92	0,24	0,40
Denver	13515	199	612	0,94	1,00	0,95	0,23	0,36
Detroit	15846	171	448	0,96	1,00	0,97	0,18	0,33
Houston	19004	215	376	0,97	1,00	0,97	0,14	0,31
Los Angeles	16686	352	268	0,96	1,00	0,97	0,33	0,33
New York	11062	1334	517	0,86	1,00	0,86	0,29	0,48
Phoenix	15903	124	376	0,97	1,00	0,97	0,16	0,32
Portland	14665	286	420	0,95	1,00	0,96	0,17	0,35
Sacramento	19239	117	395	0,97	1,00	0,98	0,18	0,31
San Diego	18757	259	327	0,97	1,00	0,97	0,21	0,32
San Francisco	16229	899	339	0,93	1,00	0,93	0,30	0,39
Washington	16214	774	304	0,94	1,00	0,94	0,20	0,37
Durchschnitt	16045	474	387	0,95	1,00	0,95	0,21	0,36
Australische Städte								
Brisbane	11188	900	691	0,88	1,00	0,88	0,14	0,46
Melbourne	9782	844	677	0,87	1,00	0,87	0,20	0,47
Perth	12029	544	504	0,92	1,00	0,92	0,16	0,40
Sydney	9417	1769	627	0,80	1,00	0,80	0,30	0,54
Durchschnitt	10797	882	619	0,88	1,00	0,88	0,21	0,45

Kanadische Städte

Calgary	11078	775	614	0,89	1,00	0,89	0,29	0,44
Edmonton	10028	728	536	0,89	1,00	0,89	0,43	0,44
Montreal	6502	952	967	0,77	1,00	0,77	0,45	0,57
Ottawa	8236	850	704	0,84	1,00	0,84	0,45	0,49
Toronto	7027	2173	748	0,71	1,00	0,71	0,37	0,67
Vancouver	12541	871	380	0,91	1,00	0,91	0,31	0,42
Winnipeg	9620	635	463	0,90	1,00	0,90	0,30	0,43
Durchschnitt	9290	998	607	0,85	1,00	0,85	0,37	0,48

Europäische Städte

Amsterdam	6522	1061	765	0,78	1,00	0,78	0,83	0,57
Brüssel	6809	1428	835	0,75	1,00	0,75	1,03	0,61
Kopenhagen	7749	1607	1055	0,74	1,00	0,74	0,41	0,62
Frankfurt	8309	1149	552	0,83	1,00	0,83	0,69	0,51
Hamburg	7592	1375	605	0,79	1,00	0,79	0,50	0,55
London	5644	2405	922	0,63	1,00	0,63	0,94	0,82
Munich	5925	2463	992	0,63	1,00	0,63	0,81	0,82
Paris	4842	2120	874	0,62	1,00	0,62	0,69	0,85
Stockholm	6261	2351	816	0,66	1,00	0,66	0,42	0,75
Wien	5272	2430	772	0,62	1,00	0,62	1,00	0,84
Zürich	7692	2459	836	0,70	1,00	0,70	0,64	0,69
Durchschnitt	6602	1895	825	0,71	1,00	0,71	0,78	0,67

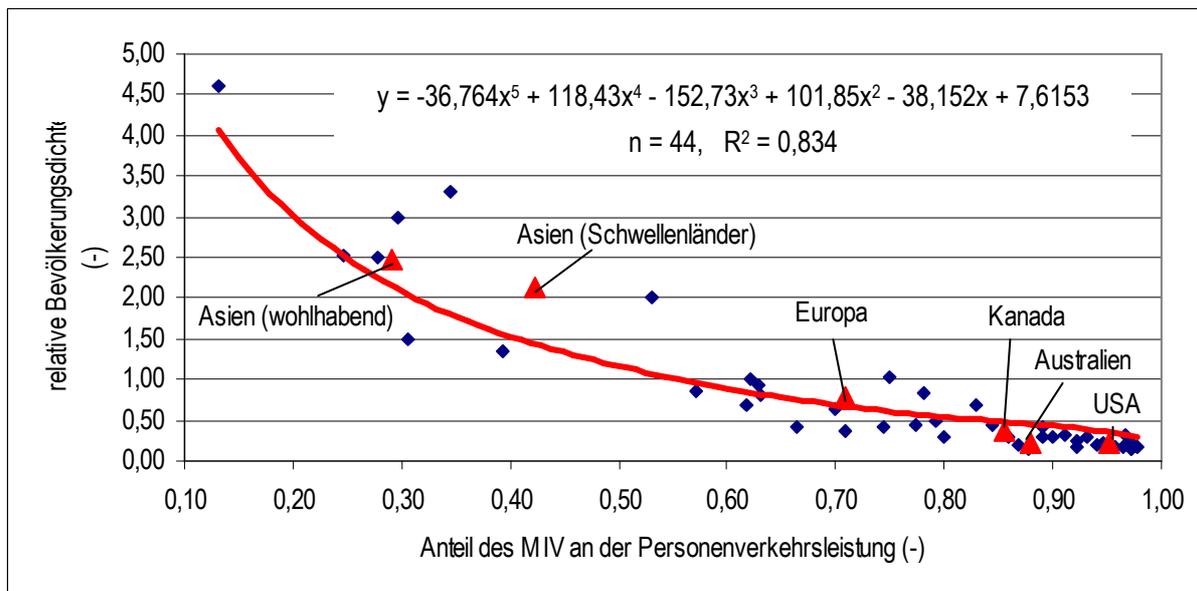
Wohlhabende Städte in Asien

Hongkong	813	3784	1496	0,13	0,98	0,13	4,61	4,06
Singapur	3169	2775	1136	0,45	0,88	0,39	1,34	1,56
Tokio	3175	5501	1257	0,32	0,96	0,31	1,49	2,04
Durchschnitt	2386	4020	1256	0,31	0,94	0,29	2,48	2,14

Städte in asiatischen Entwicklungsländern

Bangkok	4634	2313	382	0,63	0,84	0,53	2,00	1,07
Jakarta	1546	1323	1243	0,38	0,74	0,28	2,50	2,25
Kuala Lumpur	6299	1577	591	0,74	0,77	0,57	0,85	0,96
Manila	1582	2568	1074	0,30	0,98	0,30	2,99	2,10
Seoul	2464	2890	1106	0,38	0,91	0,35	3,31	1,80
Surabaya	1568	555	1682	0,41	0,60	0,25	2,53	2,52
Durchschnitt	3016	1871	862	0,52	0,80	0,42	2,14	1,44

Quelle: Kenworthy und Laube (2002) (1. und 2. Spalte) sowie eigene Berechnungen

Abb. 14: Abhängigkeit der Bevölkerungsdichte vom Anteil des MIV an der Verkehrsleistung

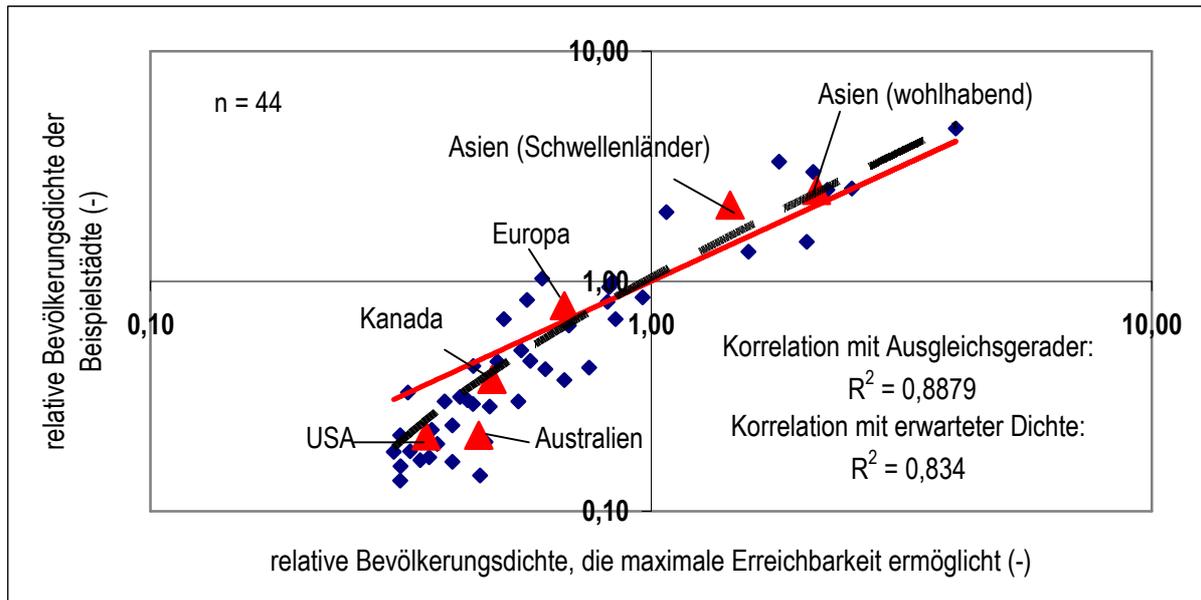
Anmerkung: in obiger Gleichung bedeutet y die relative Bevölkerungsdichte und x den MIV-Anteil der Personenverkehrsleistung.

Quelle: eigene Berechnungen

Die durchgehende Linie (Graph von Gleichung (14) zeigt jene Bevölkerungsdichte, die laut Erreichbarkeitsmodell maximale Erreichbarkeit ermöglichen würde, als Funktion des Anteils des motorisierten Individualverkehrs (MIV) an der Personenverkehrsleistung. Die Dreiecke stellen Durchschnittswerte für die einzelne Kontinente bzw. Staaten dar.

Die grafische Darstellung der Ergebnisse aus Tabelle 1 zeigt, dass die Dichte der Beispielstädte bei hohen MIV-Anteilen (USA, Australien, Kanada) tendenziell unter und bei geringen MIV-Anteilen (Asien) tendenziell über jener Dichte liegt, bei welcher der Indikator der Erreichbarkeit laut Berechnungsmodell ein Maximum erreicht. Um die Abweichungen deutlicher sichtbar zu machen, kann die Dichte der Beispielstädte mit der Dichte, die maximale Erreichbarkeit ermöglicht, direkt verglichen und in doppelt logarithmischem Maßstab dargestellt werden (siehe Abb.15). Beim direkten Vergleich von Ist-Wert und Erwartungswert ergibt sich in Bezug auf eine Ausgleichsgerade $y = ax + b$ ein Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,887$. Im Bezug auf die Ausgleichsgerade $y = x$ erreicht das Bestimmtheitsmaß $R^2 = 0,834$. Im Mittel liegt der Ist-Wert der Bevölkerungsdichte um 15 % unter dem gemäß Hypothese I erwarteten Wert. Die Übereinstimmung der errechneten (erwarteten) mit der tatsächlichen Bevölkerungsdichte ist hoch signifikant (p-Wert = $1,1 \cdot 10^{-25}$ bei Anzahl der Messwerte $n = 44$)

Abb. 15: Abweichung der tatsächlichen Bevölkerungsdichte von jener Bevölkerungsdichte, die maximale Erreichbarkeit ermöglichen würde (doppelt logarithmisch dargestellt)



Quelle: eigene Berechnungen

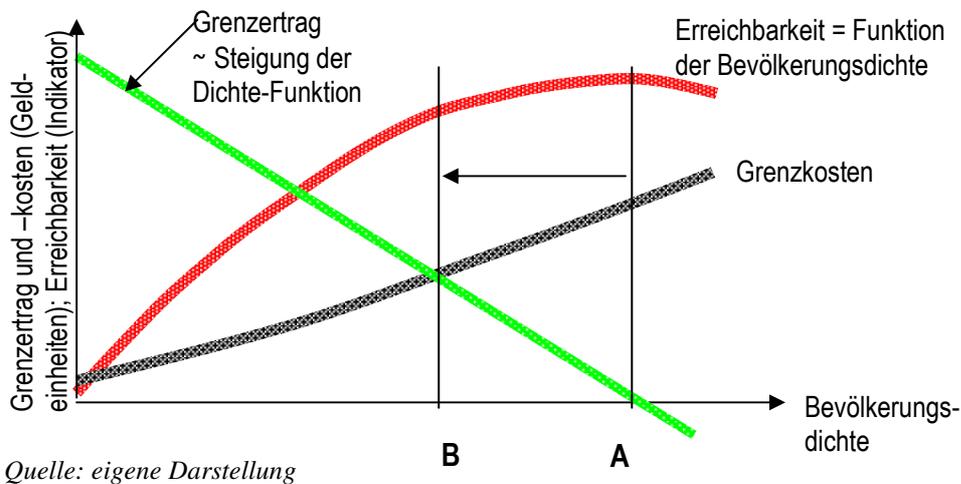
Die durchgezogene Linie gibt jene Bevölkerungsdichte an, bei der sich laut Erreichbarkeitsmodell jeweils die maximale Erreichbarkeit ergibt („erwartete Dichte“). Die strichlierte Linie ist eine lineare Ausgleichsfunktion („Ausgleichsgerade“) für die tatsächlichen Bevölkerungsdichten der Beispielstädte. Die Dreiecke sind Mittelwerte für die einzelnen Kontinente. Anmerkung: Nur die Gerade $x = y$ bleibt auch in der doppelt logarithmischen Darstellung eine Gerade.

3.2.1 Einige mögliche Ursachen von Bevölkerungsdichten unter dem laut Hypothese I erwarteten Wert

Im Immobilienmarkt werden Vorteile höherer Erreichbarkeit durch steigende Bevölkerungsdichte gegen Grenzkosten steigender Dichte – insbesondere Opportunitätskosten des Verzichtes auf größere Wohn- und Gartenflächen – abgewogen. Daher wäre zu erwarten, dass die Bevölkerungsdichte etwas unter dem Erwartungswert laut Hypothese I liegt. Neben jenen Effekten, die in bestimmten Städten Nordamerikas und Australiens dazu führen, dass Hypothese I nicht anwendbar ist (siehe Kapitel 1.5.3) könnte dies ein weiterer Grund für die unerwartet niedrigen Bevölkerungsdichten in Großstädten Nordamerikas sein, wie die folgenden Überlegungen zeigen:

Laut Modellrechnung ist bei MIV-Anteilen über 0,8 – also bei Städten in Nordamerika und Australien – in einem weiten Bereich um das Erreichbarkeits-Maximum ein flacher und stetiger Verlauf des Indikators der Erreichbarkeit als Funktion der Bevölkerungsdichte zu erwarten (siehe Abb. 12). Das heißt, dass der Grenzertrag bzw. die Grenzkosten geänderter Erreichbarkeit durch Änderungen der Bevölkerungsdichte sehr gering sind.

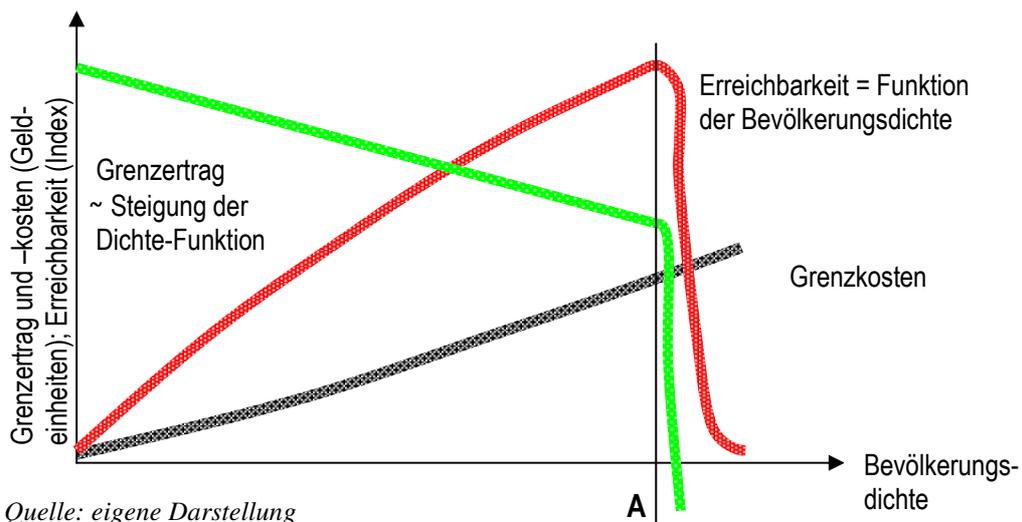
Abb. 16: Abwägung von Grenzkosten und –ertrag steigender Dichte und Erreichbarkeit bei $AI \geq 0,8$



Geht der Grenzertrag zunehmender Dichte beim Maximum der Erreichbarkeit gegen Null, fallen Grenzkosten zunehmender Dichte deutlich ins Gewicht. Die für Wohnungssuchende attraktivste Bevölkerungsdichte (B), bleibt unter jenem Wert (A), der maximale Erreichbarkeit ermöglicht.

Hingegen nimmt bei MIV-Anteilen unter etwa 0,5, wie sie in einigen asiatischen Großstädten auftreten, die Erreichbarkeit noch unmittelbar vor Erreichen der Maximum-Dichte stark zu. Das bedeutet, dass der Grenzertrag zunehmender Dichte bis zum Maximum relativ groß bleibt.

Abb. 17: Abwägung von Grenzkosten und –ertrag steigender Dichte und Erreichbarkeit bei $AI < 0,5$



Bleibt der Grenzertrag zunehmender Dichte auch beim Maximum der Erreichbarkeit höher als die Grenzkosten, erreicht die Bevölkerungsdichte jenen Wert (A), der maximale Erreichbarkeit ermöglicht.

Grenzkosten zunehmender Dichte können daher das Gleichgewicht des Immobilienmarktes bei MIV-Anteilen nordamerikanischer und australischer Städte vermutlich stärker in Richtung niedriger Dichte-Werte beeinflussen als bei asiatischen Städten. Abbildungen 16 und 17 zeigen, wie die individuelle Entscheidungssituation der Wohnungssuchenden durch die unterschiedlichen Verläufe der Erreichbarkeit als Funktion der Bevölkerungsdichte beeinflusst wird (Anmerkung: Die Abbildungen 16 und 17 dürfen nicht mit der klassischen Darstellung von Marktgleichgewichten verwechselt werden.)

3.2.2 Mögliche Ursachen von Dichte-Werten über dem laut Hypothese I erwarteten Wert

Generell wäre zu erwarten, dass Agglomerationskosten sowohl in Australien und Nordamerika als auch in Europa dazu führen, dass die Dichte unter dem Erwartungswert (Bevölkerungsdichte mit maximaler Erreichbarkeit) liegt. Eine wesentliche Ursache für eine gemessen an der Motorisierung hohe Bevölkerungsdichte europäischer Städte könnte sein, dass die Fahrleistung jener Pkw, die in der Stadt zugelassen sind, teilweise im Umland erbracht wird, während Pkw aus dem Umland nicht im gleichen Ausmaß in der Stadt unterwegs sind. Auch in Wien zum Beispiel besteht eine solche Unsymmetrie, die jedoch als Referenzfall in das Berechnungsmodell einfließt. Wenn durch eine über dem Referenzfall liegende Netto-Verkehrsverlagerung ins Umland die tatsächliche Verkehrsdichte im innerstädtischen Straßennetz geringer ist als jene, die der Berechnung der erwarteten Bevölkerungsdichte zu Grunde liegt, erscheint die Dichte gemessen an der Verkehrsstärke zu hoch.⁵³

Der genannte Verlagerungseffekt kann dann auftreten, wenn sich hohe Bevölkerungsdichte mit hohem Motorisierungsgrad zu einer hohen Dichte von Pkw-Zulassungen verbindet, so dass das entstehende Verkehrsaufkommen verstärkt ins Umland „überläuft“. Vor allem in westeuropäischen Städten mit dichten Autobahnnetzen im nahen Umland (z.B. Brüssel, oder Frankfurt) dürfte dieser Effekt stärker sein, als im Referenzfall Wien. Das könnte der Grund dafür sein, dass Dichten, die über dem Erwartungswert liegen, vorwiegend in einigen europäischen Städten auftreten, jedoch nicht bei den Beispielstädten in Nordamerika oder Australien.

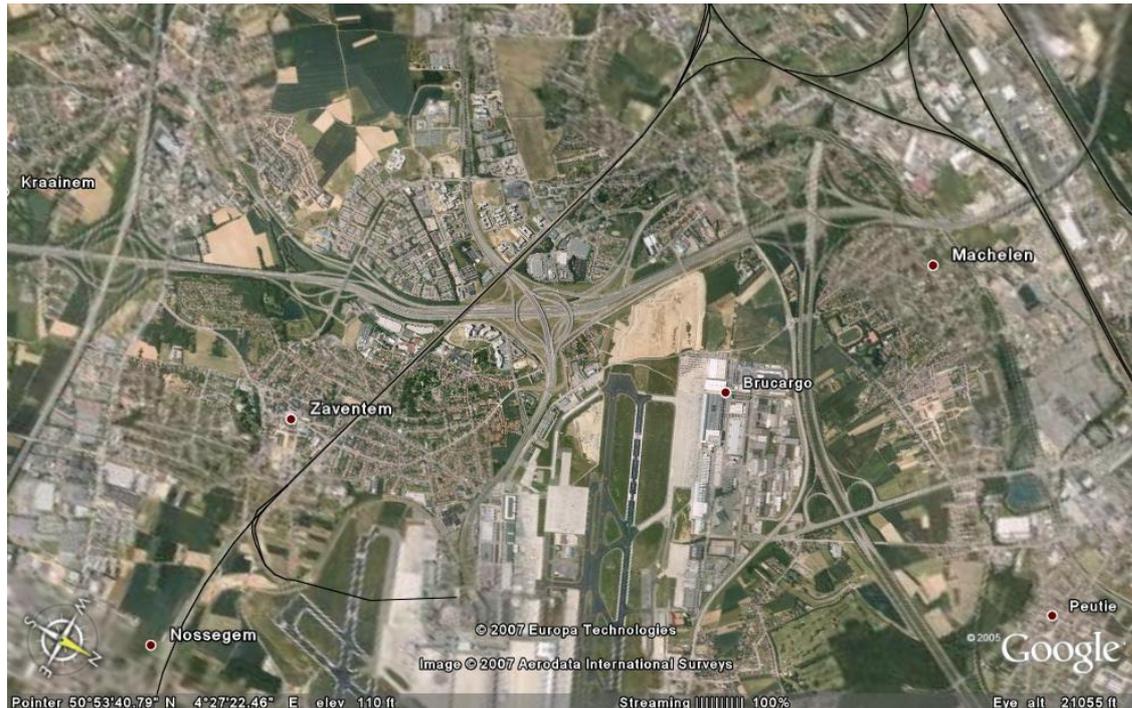
Eine weitere Ursache dafür, dass die Dichte mehrerer europäischer Städte und vor allem die Dichte asiatischer Städte über dem laut Hypothese I erwarteten Wert liegt, kann in der zeitlichen Verzögerung vermutet werden, mit der der Immobilienmarkt auf die wachsende Motorisierung in Städten reagiert. Bei dem raschen Anstieg der Motorisierung in Europa fällt diese Verzögerung stärker ins Gewicht als beim langsameren Anstieg in den USA.⁵⁴

⁵³ Da keine vergleichbaren Daten zum Austausch von Verkehrsleistungen zwischen Stadt und Umland in den Beispielstädten vorliegen, werden die Wiener Verhältnisse als Standard angenommen.

⁵⁴ In den USA waren im Jahr 1939 bereits 227 Pkw pro 1000 Personen zugelassen. Dieser Stand wurde in den meisten Staaten Westeuropas erst zwischen 1970 und 1975 erreicht (Quelle: Historical Statistics and Analysis,

Am stärksten wirkt sich die Verzögerung angesichts der raschen Motorisierung in asiatischen Städten aus. Zum Beispiel hat sich in Bangkok die Zahl der zugelassenen Pkw alleine zwischen 1970 und 1993 verneunfacht (Barter und Kenworthy 1997, Tabelle 3). Wenn die Motorisierung der Bevölkerungsdichte besonders stark „vorausieilt“, dann muss es zu hoher Überlastung des Straßennetzes kommen. In Bangkok war die Überlastung jedenfalls gegeben (siehe Kenworthy und Laube 2002, Tabelle 1, „Average traffic speed“).⁵⁵

Abb. 18: Hohe Straßenkapazitäten direkt außerhalb der Stadtgrenze von Brüssel (Mechelen)



Quelle: Google Earth

Bei der Bevölkerungsdichte Brüssels (72 Personen pro Hektar) erschiene der Pkw-Verkehr der Brüsseler Bevölkerung (Anteil des MIV an der Personenverkehrsleistung = 0,75) innerhalb der Stadt nicht abwickelbar. Dieser Modal-Split erscheint nur dadurch möglich, dass Pkw-Verkehr in überdurchschnittlichem Ausmaß auf Autobahnen außerhalb der Stadtgrenzen verlagert wird. (Mechelen liegt nur ca. 5 Kilometer von Stadtvierteln mit bis zu 220 Personen pro Hektar.)

3.2.3 Auswirkung großer Dichte-Unterschiede innerhalb des Stadtgebietes

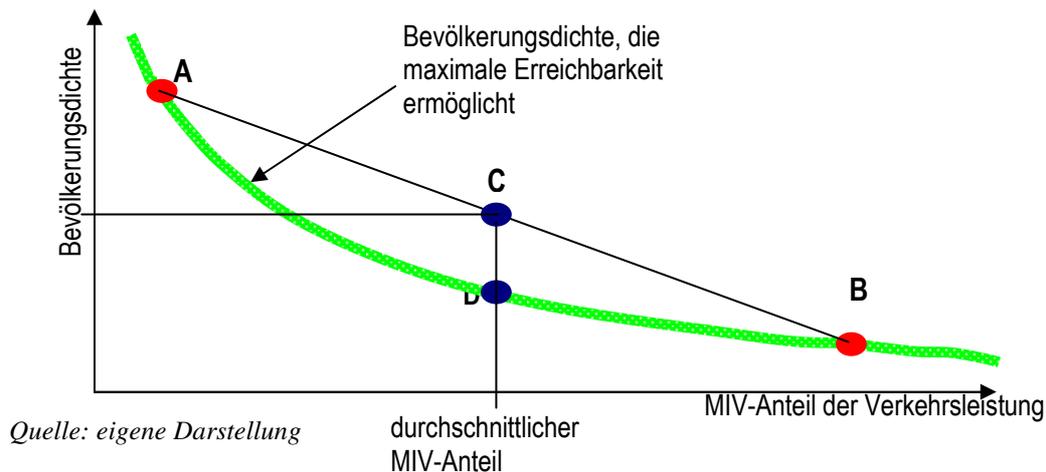
Die verwendeten Angaben für die internationalen Beispielstädte sind Durchschnittswerte für das gesamte Stadtgebiet. Entsprechend der aufgestellten These sollte die

<http://www.friesian.com/stats-2.htm>). Die Verdopplung dieses Bestandes dauerte in den USA etwa 40 und in Westeuropa etwa 20 Jahre.

⁵⁵ Die durchschnittliche Reisegeschwindigkeit im Straßenverkehr wird für Bangkok mit 13,1 km/h angegeben, das entspricht etwa der Hälfte der in Europa und Asien üblichen Durchschnittsgeschwindigkeit.

Bevölkerungsdichte in jedem einzelnen Stadtteil durch die Wirkung der dort herrschenden Verkehrsdichte auf die Erreichbarkeit beeinflusst werden. Wenn die Unterschiede zwischen den MIV-Anteilen an der Verkehrsleistung in den einzelnen Stadtteilen gering sind, entspricht der Durchschnittswert jener Dichten, die in den einzelnen Stadtteilen jeweils maximale Erreichbarkeit ermöglichen, näherungsweise jener Dichte, die beim durchschnittlichen MIV-Anteil der Gesamtstadt maximale Erreichbarkeit ermöglicht.

Abb. 19: Verzerrung durch Mittelwertbildung bei großen Unterschieden der Bevölkerungsdichte innerhalb des Stadtgebietes



Wenn sich die Bevölkerung zu gleichen Teilen auf zwei Teile des Stadtgebietes A und B mit extrem unterschiedlichen Dichten und MIV-Anteilen verteilt, dann liegt der Durchschnittswert der Dichte C deutlich über jener Dichte D, die beim durchschnittlichen MIV-Anteil maximale Erreichbarkeit ermöglichen würde.

Wenn eine Stadt beispielsweise einen großen und dicht verbauten Stadtkern mit überwiegend fußläufiger Erschließung und relativ dazu dünn besiedelte Vorstädte hat, wobei auf beide Siedlungstypen etwa die selbe Einwohnerzahl entfällt, dann wird die durchschnittliche Bevölkerungsdichte der Stadt über dem errechneten Optimum der Bevölkerungsdichte beim durchschnittlichen MIV-Anteil liegen. Wenn also die Unterschiede zwischen den Dichten und MIV-Anteilen innerhalb der Stadt groß sind, ergeben sich durch die Verwendung von Durchschnittswerten erhebliche Verzerrungen (siehe Abb.19). Dieser Fall könnte z.B. auf asiatische Großstädte zutreffen, in denen einzelne große Stadtviertel eine Dichte aufweisen, die den Durchschnittswert der Bevölkerungsdichte um ein Vielfaches übersteigt.⁵⁶

⁵⁶ Beispiel Hongkong: der Stadtteil Gao Lung (engl. „Kowloon“) hat etwa 2000 Einwohner pro Hektar (abgerufen am 10.3.2007 unter <http://cpavirtual.org/hongkong.htm>) gegenüber dem Hongkonger Durchschnitt von 323 Einwohnern pro Hektar.

3.2.4 Zusammenfassung

Hypothese I, wonach die Siedlungsdichte jenem Wert zustrebt, bei dem in Abhängigkeit des jeweiligen Modal-Split die höchstmögliche Erreichbarkeit gegeben ist, ergibt in den meisten Fällen gute Näherungswerte für die tatsächlich bestehende Bevölkerungsdichte. Hypothese I ist allerdings nur anwendbar, wenn Abmessungen des verbauten Stadtgebietes groß gegenüber der durchschnittlichen Weglänge sind und wenn die Orte der Aktivität im Stadtgebiet möglichst gleichmäßig verteilt sind. Weiters können Agglomerationskosten, die außerhalb des Verkehrssystems anfallen, nicht völlig vernachlässigt werden.⁵⁷ Dies dürfte nach den vorliegenden Daten von Beispielstädten jedenfalls bei hohen MIV-Anteilen (0,8 bis 1,0) gelten. Agglomerationskosten dürften hier ins Gewicht fallen, weil der Grenz-Zuwachs an Erreichbarkeit und damit auch die daraus resultierenden Grenzerträge durch zunehmende Dichte in diesem Bereich mit flachem Verlauf gegen Null gehen, wenn sich die Dichte dem Punkt der maximalen Erreichbarkeit nähert.

Bei MIV-Anteilen der Verkehrsleistung unter 0,8 liegt die laut Hypothese I erwartete Bevölkerungsdichte etwa in der Mitte des Streubereiches. Der Grenz-Zuwachs an Erreichbarkeit und damit auch die daraus resultierenden Grenzerträge gehen hier in der Nähe des Erreichbarkeits-Maximums nicht stetig gegen Null. Der Einfluss von Agglomerationskosten ist dadurch geringer. Die Streuung der Dichte-Werte kann in bestimmten Fällen dadurch erklärt werden, dass der Durchschnittswert des MIV-Anteils der Verkehrsleistung ein verzerrtes Ergebnis für den Erwartungswert der Dichte liefert, wenn die MIV-Anteile der Verkehrsleistung in den einzelnen Stadtvierteln sich sehr stark unterscheiden. Ein weiterer Erklärungsansatz ist, dass Autoverkehr, der laut Modell-Ansatz in die Berechnung des Erwartungswertes der Dichte einfließt, aus der Stadt ins Umland verlagert wird.

⁵⁷ Zeitverluste durch gegenseitige Behinderung sind Agglomerationskosten, die innerhalb des Verkehrssystems anfallen. Ihr Einfluss auf die Erreichbarkeit und damit – gemäß Hypothese I – auf die Bevölkerungsdichte wird berücksichtigt.

Tabelle 2: Übersicht einiger möglicher Ursachen für Abweichungen der Bevölkerungsdichte von dem gemäß Hypothese I erwarteten Wert

Tatsächliche Bevölkerungsdichte liegt über dem erwarteten Wert:
Ein wesentlicher Teil des MIV, der dem städtischen Straßennetz zugerechnet wurde, findet auf Straßen - speziell auf Autobahnen - im Umland statt.
Der Rückgang der Bevölkerungsdichte erfolgt wegen des raschen Anstieges der Motorisierung verzögert (Nebeneffekt: starke Überlastung des städtischen Straßennetzes)
Hohe Unterschiede von Modal-Split und Bevölkerungsdichte zwischen einzelnen Stadtvierteln. Der auf Basis des durchschnittlichen MIV-Anteils errechnete Erwartungswert der Dichte muss unter der durchschnittlichen Bevölkerungsdichte der Gesamtstadt liegen.
Fehler bei Modal-Split-Angabe (tatsächlicher MIV-Anteil ist geringer) oder Fehler bei Dichte-Angabe (tatsächliche Dichte ist geringer)
Tatsächliche Bevölkerungsdichte liegt unter dem erwarteten Wert:
Durch stark monozentrische Anordnung von Orten der Aktivität und / oder durch zu geringe Abmessungen des Stadtgebietes relativ zur durchschnittlichen Weglänge ist Hypothese I nicht anwendbar (siehe Kapitel 1.5.2)
Agglomerationskosten überwiegen gegenüber den Vorteilen höherer Erreichbarkeit (typischerweise bei MIV-Anteilen über 0,8)
vorläufiges Zurückbleiben hinter der geplanten Bevölkerungsdichte durch besonders rasches Wachstum der Stadt ⁵⁸
Sonderfälle wie z.B. Bauordnungen, die Hochbauten wegen Erdbebengefahr verboten haben (mögliche Erklärung für relativ geringe Bevölkerungsdichte Tokios) ⁵⁹
Fehler bei Modal-Split-Angabe (Tatsächlicher MIV-Anteil ist höher)
Fehler bei Dichte-Angabe (tatsächliche Dichte ist höher)

Quelle: eigene Darstellung

⁵⁸ Die Bevölkerungszahl der USA hat zwischen 1950 und 2000 um 86 % zugenommen und jene Australiens sogar um 131 % (Gittins und Tiffen 2004, S.4). Dies könnte mit ein Grund dafür sein, dass 43 % der Bauparzellen im Umkreis von einem Quadratkilometer um bestehende Wohngebäude vorläufig ungenutzt sind (Burchfield et al. 2005, S.1). In den ebenfalls rasch wachsenden Großstädten asiatischer Schwellenländer dürfte die niedrigere durchschnittliche Reisegeschwindigkeit bewirken, dass der „Wachstumsgürtel“ relativ zur Größe der Stadt schmaler ist. Zudem werden hier häufig freie Grundstücke für extrem dichte, ungeplante Besiedlung durch zuziehende Landbevölkerung genutzt.

⁵⁹ Until the 1960s, it was very rare to find a building above six or eight stories anywhere in Japan. The country was so plagued by earthquakes that construction technology and the law prohibited tall buildings. (Nummi und Sistonon 2006, Folie 3)

3.2.5 Überprüfung von Hypothese I anhand der zeitlichen Veränderung von Modal-Split und Bevölkerungsdichte

Gemäß Hypothese I sollte sich die Bevölkerungsdichte von Städten bei Änderung des MIV-Anteils der Personenverkehrsleistung den neuen Erreichbarkeitsverhältnissen anpassen. Ob dieser Zusammenhang tatsächlich gegeben ist, sollte nicht nur durch eine Querschnittsbetrachtung (Vergleich einer Anzahl von Städten zu einem bestimmten Zeitpunkt), sondern auch anhand von Zeitreihen über die zeitliche Veränderung des Modal-Split und der Bevölkerungsdichte untersucht werden. Es erweist sich als schwierig, kontinuierliche Zeitreihen von Daten aus vergleichbaren Mobilitätserhebungen für eine repräsentative Anzahl von Großstädten zu erhalten. Immerhin liegt für die Großstädte der USA eine Zeitreihe für die Entwicklung des Modal Split vor. US-Großstädte haben zudem den Vorteil, dass hier ein Einfluss der Änderung des Modal-Split auf die Bevölkerungsdichte deutlich zu beobachten sein müsste, da die gesamte Entwicklung von einem hohen Anteil des öffentlichen Verkehrs bis zu einer nahezu vollständigen Dominanz des MIV bereits durchlaufen wurde.

3.2.6 Untersuchung von Zeitreihen der Bevölkerungsdichte und des Modal-Split in Städten der USA

In einer Studie (Wedell Cox Consultancy, 2007a) werden Angaben zu Entwicklung der Verkehrsleistungen des öffentlichen Verkehrs und des MIV in Städten der USA in den Jahren 1950 bis 1990 gemacht. Um eine Vergleichbarkeit mit den bisher verwendeten Mobilitätsdaten zu ermöglichen, muss eine Abschätzung für die Leistung des nicht motorisierten Verkehrs getroffen werden.⁶⁰ Weitere Studien (Wedell Cox Consultancy 2007b) liefern Daten zur Entwicklung der Bevölkerungsdichte in Großstädten der USA. Beim Vergleich der Entwicklung der Bevölkerungsdichte von US-Großstädten zwischen 1950 und 1990 mit den jeweiligen Dichte-Werten, die sich auf Basis von Hypothese I ergeben (Dichte, die bei gegebenem Modal-Split maximale Erreichbarkeit ermöglicht), zeigt sich die bereits bei der Überprüfung von Hypothese I (Kapitel 3.2.2) beobachtete Abweichung. Diese Abweichung hat jedoch eine stetige Abhängigkeit von der Änderung der Bevölkerungsdichte. Es besteht daher eine sehr starke Korrelation zwischen den tatsächlichen Bevölkerungsdichten und den Erwartungswerten (siehe Abbildung 19a, Bestimmtheitsmaß = 0,974).

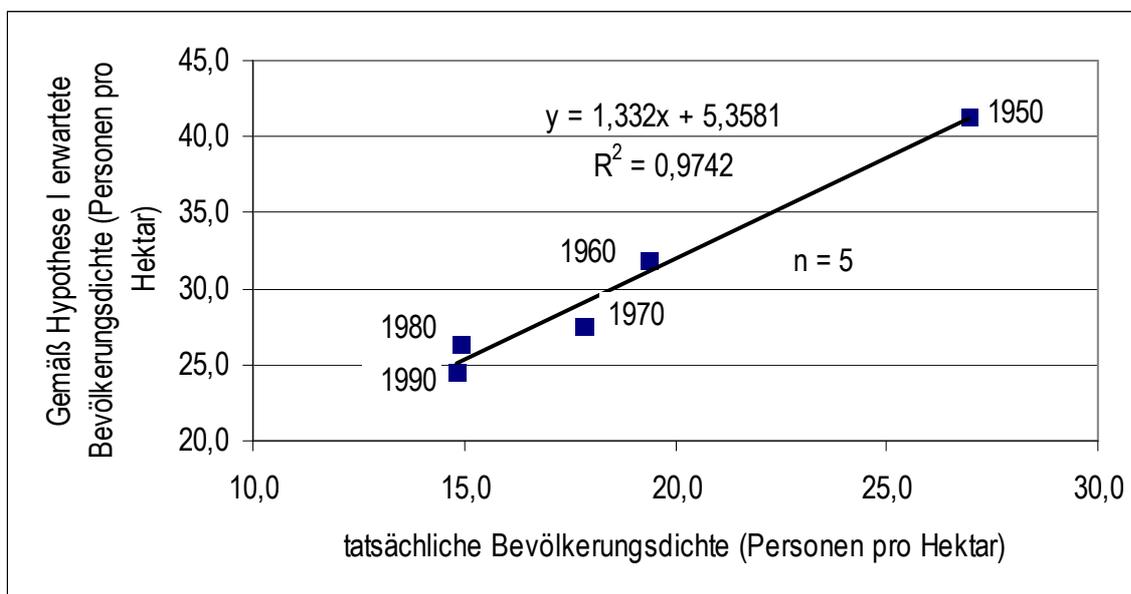
⁶⁰ Bei der Abschätzung der NMV-Verkehrsleistung wird davon ausgegangen, dass es einen NMV-Anteil gibt, der proportional zur ÖV-Verkehrsleistung ist (5 % der ÖV-Verkehrsleistung) und einen ÖV-unabhängigen Anteil, der sich proportional zur Gesamtbevölkerung entwickelt (96 Mrd. Personen-km im Jahr 1990). Die Werte sind so gewählt, dass sie mit der bereits getroffenen Abschätzung des NMV für das Jahr 1990 übereinstimmen.

Tabelle 3: Entwicklung von Bevölkerungsdichten und Verkehrsleistungen in Städten der USA

Jahr	Motorisierter Individualverkehr	Öffentlicher Verkehr	nicht motorisierter Verkehr*	MIV-Anteil an der Personenverkehrsleistung	Bevölkerungsdichte (34 größte Metropolregionen)**	Bevölkerungsdichte (34 größte Metropolregionen)***	gemäß Hypothese I erwartete Bevölkerungsdichte
	Mrd. Personenkilometer	Mrd. Personenkilometer	Mrd. Personenkilometer	-	Personen pro Hektar	Personen pro Hektar	Personen pro Hektar
1950	648,5	144,8	64,8	0,76	24,0	26,9	41,3
1960	1009,0	77,2	71,1	0,87	17,2	19,3	31,9
1970	1752,5	66,0	80,1	0,92	15,9	17,8	27,6
1980	2211,0	64,2	89,6	0,93	13,3	14,9	26,4
1990	3152,6	61,2	99,1	0,95	13,2	14,8	24,5

Anmerkungen: *eigene Berechnung der NMV-Leistung / ** nach Wedell Cox Consultancy / *** Zwecks Vergleichbarkeit mit bisher verwendeten Daten um +12,4 % korrigierte Dichte-Werte⁶¹

Quelle: Wedell Cox Consultancy 2007a (Mobilitätsdaten) und 2007b (Bevölkerungsdichte), eigene Umrechnung von Größen mit Meilen-Bezug in solche mit Kilometer-Bezug,

Abb. 19a: Durchschnittliche Bevölkerungsdichte von US-Großstädten zwischen 1950 und 1990 und jeweils gemäß Hypothese I erwartete Bevölkerungsdichte

Quelle: eigene Berechnungen auf Basis von Daten aus Wedell Cox Consultancy, 2007a und 2007b

⁶¹ Die Durchschnittswerte der Bevölkerungsdichte, die von Wedell Cox auf Basis von Flächendaten des US Census Bureau bestimmt wurden, wurden mit dem Faktor 1,124 multipliziert, um für das Jahr 1990 genau den von Kenworthy und Laube 2002 angegebenen Durchschnittswert von US-Großstädten zu erhalten.

3.2.7 Zusammenfassung der Ergebnisse der Überprüfung von Hypothese I:

Die Berechnung gemäß Hypothese I liefert über einen weiten Bereich von MIV-Anteilen brauchbare Vorhersagewerte für die Bevölkerungsdichte. Treten große Unterschiede zwischen den MIV-Anteilen einzelner Stadtgebiete auf, ergeben sich Verzerrungen durch die die tatsächliche Bevölkerungsdichte über der gemäß Hypothese I erwarteten liegt. Bei MIV-Anteilen über 0,8 zeigt sich an Hand der Daten der Beispielstädte, dass die Erreichbarkeit entscheidend für die Wahl des Wohnstandortes ist, wobei hier neben der Erreichbarkeit auch Agglomerationskosten und Effekte durch zu geringe Stadtgröße berücksichtigt werden müssen. Insgesamt ergibt sich für die Korrelation zwischen der tatsächlichen Dichte und dem laut Hypothese I erwarteten Wert ein Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,83$.⁶² Die beobachtbare Korrelation zwischen der zeitlichen Entwicklung des Modal-Split und der Bevölkerungsdichte steht grundsätzlich im Einklang mit der Hypothese I, wenn die Einschränkung berücksichtigt wird, dass es gerade unter den nordamerikanischen Großstädten viele gibt, auf die die Hypothese nach dem „Größenkriterium“⁶³ nur mehr teilweise anwendbar ist und dass im Fall nordamerikanischer Großstädte zusätzliche Faktoren besonders ins Gewicht fallen, die zu einer geringeren Bevölkerungsdichte führen als gemäß Hypothese I zu erwarten wäre.⁶⁴

⁶² Dieses Bestimmtheitsmaß gilt bei einer Ausgleichsgeraden durch den Nullpunkt. Wird eine Ausgleichsgerade der Form „ $Y = a + b * X$ “ verwendet, beträgt das Bestimmtheitsmaß 0,89.

⁶³ Siehe Kapitel 1.5.2: Die durchschnittliche Weglänge muss klein gegenüber dem Durchmesser des Stadtgebietes sein.

⁶⁴ siehe Tabelle 2: Tatsächliche Bevölkerungsdichte liegt unter dem Erwartungswert

3.3 Wirkung von Agglomerationseffekten auf die Produktivität

3.3.1 Positive und negative Agglomerationseffekte

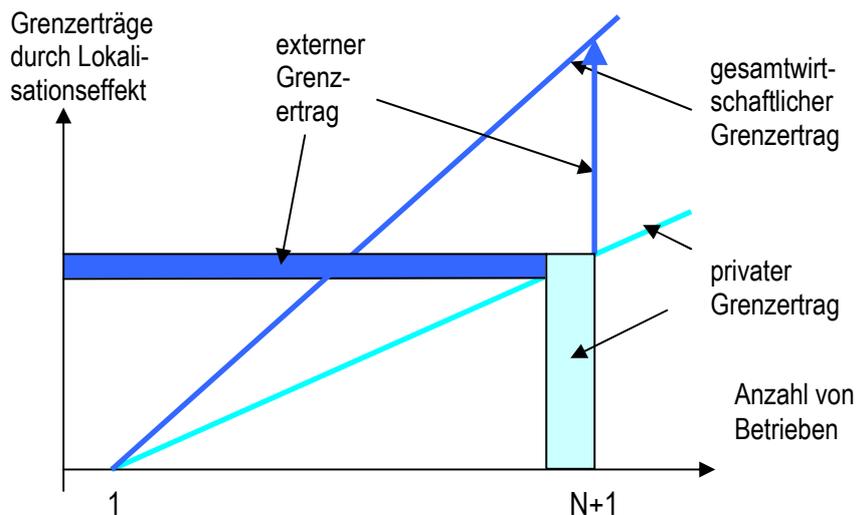
Agglomerationstendenzen sind wahrscheinlich die auffälligste Erscheinung im Rahmen der räumlichen Organisation ökonomischer Aktivitäten (Zitat Krugman (1991), S.5: „Step back and ask, what is the most striking feature of the geography of economic activity? The short answer is surely concentration.“). Agglomerationseffekte sind sowohl weltweit zu beobachten („Erste Welt“) als auch innerhalb von Kontinenten („Blaue Banane“) sowie innerhalb von Staaten, Regionen und Stadtgebieten. Agglomerationseffekte entstehen durch die räumliche Nähe bzw. durch geringe Kosten des physischen Verkehrs zwischen Standorten von Betrieben untereinander sowie zwischen Betriebsstandorten und Wohnorten potentieller Arbeitskräfte und Konsumenten. Schon hier wird erkennbar, dass Agglomerationseffekte auf das Engste mit dem Verkehrssystem verknüpft sein müssen. Agglomerationseffekte sind jene Kräfte, mit denen sowohl das Entstehen von Städten als auch das Entstehen von „Clustern“ bestimmter Betriebe erklärt werden können. Agglomeration kann sowohl zu positiven als auch negativen Agglomerationseffekten (Agglomerationskosten) führen. Als treibende Kraft hinter den Agglomerationstendenzen müssen positive Agglomerationseffekte angenommen werden, die rational handelnde Akteure zur Bildung von Agglomerationen veranlassen. Die Wachstumsgrenze von Agglomerationen ist erreicht, wenn marginale positive und marginale negative Agglomerationseffekte einander aus Sicht der Marktteilnehmer die Waage halten.

3.3.2 Interne und externe Effekte von Standort-Entscheidungen

Interne Größenvorteile ergeben sich durch Konzentration der Produktion auf wenige große Produktionseinheiten. Größenvorteile können sich durch bessere Ausnutzung von Maschinen oder Grund und Boden, bessere Nutzung von Verwaltungseinrichtungen, gemeinsame Beschaffungs- und Vertriebsorganisationen ergeben (Maier/Tödting 1992, S.110). Es handelt sich hierbei um interne Effekte, weil sie nach bewusster Abwägung von Kosten und Erträgen der Schaffung größerer Produktionseinheiten entstehen. Im Gegensatz dazu entstehen durch Agglomeration externe Größenvorteile (external scale economies, siehe: Marcon & Puech 2003, S.3). Die Entscheidung, einen bestimmten Betriebsstandort zu wählen, ist zwar durch positive interne Effekte der Standortwahl motiviert, sie bewirkt jedoch zusätzlich positive externe Effekte für andere Betriebe, die sich in der Nähe des gewählten Standortes befinden. Der positive Effekt der Standortwahl eines einzelnen Betriebes für andere Betriebe im Umfeld des gewählten Standortes ist aus Sicht der relevanten Akteure, der einzelnen Betriebe, extern (Graham D.J., 2005, S.3; Maier/Tödting, 1992 S. 111). Diese externe Komponente ist gemeint, wenn von speziellen Agglomerationseffekten wie dem Lokalisationseffekt („economies of localisation“) oder dem Urbanisationseffekt („economies of urbanisation“) die Rede ist (Anas, Arnott und Small, 1998, S. 29; Maier und Tödting, 1992, S. 111). Der positive externe Agglomerationseffekt entsteht durch die Wechselwirkungen zwischen allen Firmen einer

Agglomeration. Um die Entstehung interner und externer Agglomerationseffekte anhand eines Beispiels darzustellen, kann angenommen werden, dass der interne Grenzertrag, der Betriebsinhaber veranlasst ihren Betriebsstandort in einer Agglomeration mehrerer gleichartiger und gleich großer Betriebe zu wählen, etwa linear mit der Anzahl der bereits angesiedelten Betriebe ansteigt. In diesem Fall ergibt sich durch Ansiedlung eines zusätzlichen Betriebes ein Lokalisationseffekt (externer Grenzertrag der Ansiedlung), der etwa gleich groß ist, wie der private Grenzertrag der zuletzt angesiedelten Firma:

Abb. 20: Prinzip der Entstehung interner und externer Lokalisationseffekte

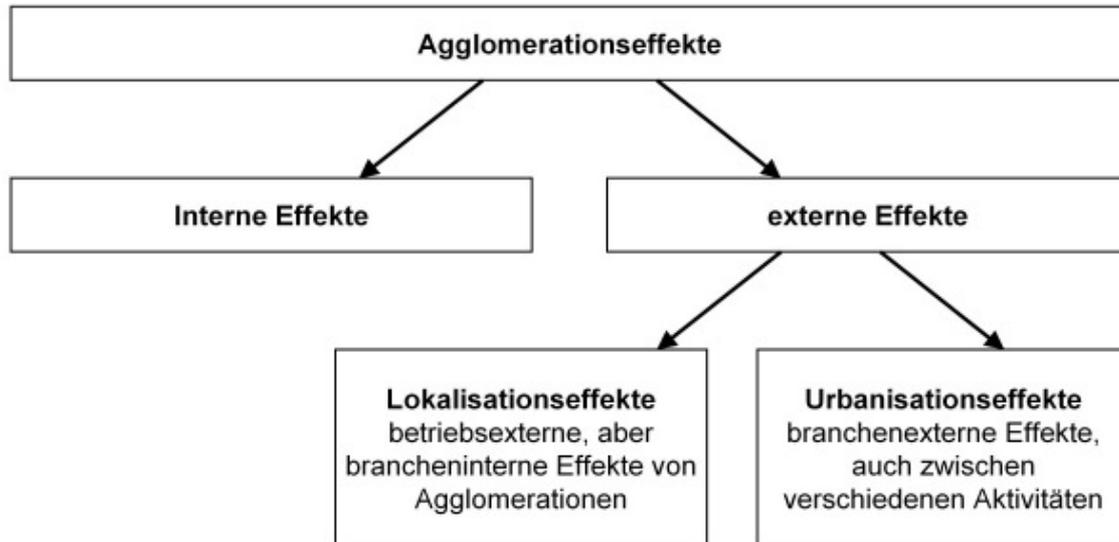


Quelle: eigene Darstellung

Unter der Annahme eines linearen Anstieges des Lokalisationseffektes mit jedem gleich großen zusätzlichen Betrieb ergibt sich durch die Ansiedlung des (N+1)-ten Betriebes für diesen aus dem Lokalisationseffekt ein privater Grenzertrag $PG = k \cdot N$. Der externe Grenzertrag der Betriebsansiedlung, der den schon bestehenden N Betrieben zu Gute kommt, ergibt sich mit $dPG/dN \cdot N = k \cdot N$. Somit beträgt der gesamtwirtschaftliche (soziale) Grenzertrag $2k \cdot N$. Der gesamtwirtschaftliche Ertrag aus dem Lokalisationseffekt bis zum (N+1)-ten Betrieb ist proportional der Fläche $k \cdot (N^2 + N)$. Zu dieser Fläche trägt der (N+1)-te Betrieb den privaten (helle Fläche) und den externen (dunkle Fläche) Agglomerations-Grenzertrag bei.

3.3.3 Klassifizierung unterschiedlicher Agglomerationseffekte

Abb. 21: Systematisierung von Agglomerationseffekten



Quelle: Näf-Clasen (2004) S.74 zitiert nach Bodenmann (2005) S.48

Externe Größenvorteile durch Agglomeration von Firmen der gleichen Branche werden als Lokalisationseffekte (economies of localisation) und jene durch Agglomerationen von Firmen unterschiedlicher Branchen und sonstiger Aktivitäten als Urbanisationseffekte (economies of urbanisation) bezeichnet (Anas, Arnott und Small, 1998, S. 29)⁶⁵ (Graham, 2005, S.3)⁶⁶ (Maier Tödting, 1992, S. 111 f.). Urbanisationseffekte ergeben sich auch aus Vorteilen für die Industrie, die direkt und indirekt aus der Agglomeration von Bevölkerung abzuleiten sind. Direkt abhängig von der Bevölkerungszahl einer Agglomeration sind die Verfügbarkeit von potentiellen Arbeitskräften und die Größe des Absatzmarktes für Waren und Dienstleistungen. Indirekt von der Bevölkerungszahl hängt die Verfügbarkeit hochwertiger Infrastrukturen (Autobahnnetz, U-Bahnnetz, Güterterminals) und die Verfügbarkeit öffentlicher Dienstleistungen ab (Graham, 2005, S. 3).⁶⁷

⁶⁵ External scale economies between firms are called economies of localization if between firms in the same industry, and economies of urbanization if across industries.

⁶⁶ Localisation economies describe efficiency gains generated through the increased scale of a particular industry operating in close spatial proximity. Urbanisation economies describe the productive advantages that accrue to firms through location in large population centres such as cities.

⁶⁷ Firms derive benefits from the scale of markets, from the proximity of market areas for inputs and outputs, and from good infra-structure and public service provision. These spatial external economies are cross-industry; they are external to the firm and the industry but internal to cities.

3.3.4 Ursachen von Agglomerationseffekten

Drei Hauptursachen für die räumliche Konzentration bestimmter Branchen („Clustering“) wurden bereits von Marshall beschrieben: größerer gemeinsamer Arbeitsmarkt (labour market pooling) größere Verfügbarkeit von Vorleistungen und spezialisierten Dienstleistungen und die mögliche Nutzung von Übertragungseffekten technischen Wissens (technological spillover) (Marcon und Puech, 2003, S. 3).

Agglomeration wirkt Effizienz steigernd, weil sie Firmen den Zugang zu spezialisierter Arbeitsleistung und Vorprodukten erleichtert. Es können sich einerseits Forschungseinrichtungen etablieren, die sich auf die jeweilige Branche spezialisiert haben; andererseits können spezielle Zulieferindustrien entstehen (Maier und Tödtling, 1992, S. 111). Wachsende Nachfrage nach Vorprodukten kann Größenvorteile der Produktion bewirken (Rosenthal und Strange, 2004, S. 2), die in weiterer Folge in Form niedrigerer Preise im Markt weiter gegeben werden. Porter (Porter, 1998, 78 f.) weist darauf hin, dass der Zugang zu Inputs für die Produktion innerhalb von Clustern effizienter zu bewerkstelligen ist als durch vertikale Integration. Regionale Clusterbildung kann eine Alternative zur Entwicklung vertikal integrierter Firmen sein (ul Islam 2006, S. 9). Laut Goldstein und Gronberg (Goldstein and Gronberg, 1984, S. 92 f.) kann Agglomeration von Firmen zu Clustern die Diversifizierung und vertikale Integration von Produktionsprozessen innerhalb einer Firma ersetzen.

Anas, Arnott und Small (Anas, Arnott und Small, 1998, S. 30)⁶⁸ gehen auf Details der externen Größenvorteile ein, die sich aus der Größe des Arbeitsmarktes ergeben: Spezialisierte Arbeitskräfte sowie Kapital können bei Firmenschließungen mit geringen Verlusten wieder in der gleichen Branche eingesetzt werden. Weiters verfügen größere Städte über besser ausgebildete Arbeitskräfte, weil das Angebot spezialisierter Arbeitsplätze es attraktiv macht in Ausbildung zu investieren. Graham (Graham, 2005, S. 3)⁶⁹ erwähnt als Ursache von Urbanisierungsvorteilen die Vorteile, die Firmen durch die Größe und Nähe der Absatz- und Beschaffungsmärkte genießen sowie durch das gute Angebot von Infrastruktur und öffentlichen Dienstleistungen. Darunter ist auch das Angebot an spezialisierten Schulen und Universitäten zu erwähnen (Maier und Tödtling, 1992, S. 111).

⁶⁸ One type of external economies (which can be either localization or urbanization economies) is economies of massed reserves (E.A.G. Robinson 1931; Hoover 1948), also called statistical economies of scale. In a world with firm-specific shocks, a firm with a specialized job vacancy is more likely to find a match with an unemployed worker when the labor market is larger; likewise, specialized capital that is unemployed due to a firm's closing is more likely to be successfully redeployed the larger the number of other firms using similar types of capital (Robert Helsley and William Strange 1991). -.... Yet another type derives from education: because labor specialization encourages investment in human capital, larger cities have more educated work forces....

⁶⁹ Firms derive benefits from the scale of markets, from the proximity of market areas for inputs and outputs, and from good infra-structure and public service provision.

3.3.5 Einfluss der Größe des Arbeitsmarktes auf die Produktivität

Die Produktivität ist die Wertschöpfung gemessen am Ressourceneinsatz. Durch Analyse von Produktionsfunktionen wurde die Auswirkung von Agglomerationseffekten auf die gesamte Faktorproduktivität beziffert (siehe Tabelle 4). Dabei wurde die Elastizität der gesamten Faktorproduktivität bezüglich einer Reihe von Indikatoren für die Größe der jeweiligen Agglomeration ermittelt. Als Indikatoren wurden verwendet: Größe des Arbeitsmarktes, Beschäftigtenzahl der jeweiligen Branche, Bevölkerungszahl und Beschäftigungsdichte (Graham 2005, S.4).

Nakamura (Nakamura, 1985, S. 109 ff.) analysiert Lokalisationseffekte und Urbanisationseffekte getrennt. Er beziffert die Elastizität der Produktivität⁷⁰ bezüglich der Größe der Industrie-Agglomeration – gemessen nach Zahl der Beschäftigten - mit 0,05 und die Elastizität bezüglich der Bevölkerungszahl der jeweiligen Agglomeration mit 0,03 (Graham 2005, Seite 5). Unter der Annahme, dass die Größe eines bestimmten Industriesektors einer Agglomeration (= Stadtregion, Ballungsraum oder „metropolitan statistical area“ (MSN)) mit der Bevölkerungszahl positiv korreliert, ist von einer Gesamt-Elastizität bezüglich der Bevölkerungszahl zwischen 0,05 und 0,08 auszugehen. Diese Vermutung wird durch Ergebnisse weiterer Untersuchungen gestützt. Durch Analyse der unterschiedlichen Arbeitsproduktivität in den Bundesstaaten der USA stellten Ciccone und Hall (Ciccone und Hall 1996, S. 54-70) fest, dass die Beschäftigungsdichte mit einer Elastizität von 0,06 auf die Arbeitsproduktivität wirkt (Graham, 2005, S.6).⁷¹ Sveikauskas (Sveikauskas, 1975, S. 393-414) konnte für die Wirkung der jeweiligen Größe der Agglomeration auf die gesamte Faktorproduktivität ebenfalls eine Elastizität von 0,06 feststellen (Marcon Puech, 2003, S. 4). Sveikauskas verwendet dabei die Bevölkerungszahl großer Stadtregionen (MSA = metropolitan statistical area) als Maß für die Größe der jeweiligen Agglomeration.

⁷⁰ Mit “productivity” dürfte die gesamte Faktorproduktivität gemeint sein, weil weiter unmittelbar vor der betreffenden Textstelle auf die von Nakamura verwendete Produktionsfunktion verwiesen wird.

⁷¹ Es ist zu beachten, dass Ciccone und Hall hier die Arbeitsproduktivität auf Basis einer Produktionsfunktion ermitteln, die auch den Einsatz des Faktors Kapital berücksichtigt und seine Wirkung abbildet. Die Arbeitsproduktivität darf nicht mit der Wertschöpfung pro beschäftigter Person (ohne Berücksichtigung des jeweiligen Kapitaleinsatzes) verwechselt werden, auf der die später zitierten Ergebnisse von Prud’homme und Lee beruhen (siehe Kapitel 3.4.2).

**Tabelle 4: Abschätzung der Agglomerationsvorteile aus Analysen von Produktionsfunktionen
(Estimates of agglomeration economies from production function analyses.)**

Author	unit of analysis	dependent variable	independent variable	elasticity
Aaberg (1973)	Swedish cities	productivity	city size (population)	0.02
Shefer (1973)	US MSAs	productivity	RTS at MSA aggregation	0.20
Sveikauskas (1975)	US MSAs	productivity	city size (population)	0.06
Kawashima (1975)	US MSAs	productivity	city size (population)	0.20
Fogarty and Garofalo (1978)	US MSAs	productivity	city size (population)	0.10
Moomaw (1981)	US MSAs	productivity	city size (population)	0.03
Moomaw (1985)	US MSAs	productivity	city size (population)	0.07
Nakamura (1985)	Japanese Cities	productivity	city size (population)	0.03 ^a
Tabuchi (1986)	Japanese Cities	productivity	city size (population)	0.04
Louri (1988)	Greek Regions	productivity	city size (population)	0.05
Sveikauskas et al (1988)	US MSAs	productivity	city size (population)	0.01 ^b
Nakamura (1985)	Japanese Cities	productivity	industry size (employment)	0.05
Henderson (1986)	Brazilian Cities	productivity	industry size (employment)	0.11 ^c
Henderson (1986)	US MSAs	productivity	industry size (employment)	0.19 ^d
Henderson (2003)	US MSAs	plant output	industry size (no. of plants)	0.03 ^e
Ciccone and Hall (1996)	US States	productivity	employment density	0.06
Ciccone (2002)	EU regions	productivity	employment density	0.05

Notes: a - mean value for 14 industries, b - mean value from 5 model specifications, c - mean value for ten industries, d - mean value for 9 industries, e - mean value for 4 model specifications.

Quelle: Graham 2005, S. 4

3.4 Einfluss von Bevölkerungsdichte und Reisegeschwindigkeit auf Agglomerationseffekte

3.4.1 Positiver externer Agglomerationseffekt und Dichte

Wird zur Analyse von Agglomerationswirkungen auf die Produktivität nur die absolute Größe der Agglomeration (Bevölkerungszahl oder Zahl der Beschäftigten) als unabhängige Variable herangezogen, bleibt außer Betracht, wie gut innerhalb der betrachteten Agglomeration die Erreichbarkeit der Firmenstandorte untereinander sowie die Erreichbarkeit für Arbeitskräfte tatsächlich ist. In einer großflächigen Agglomeration sagt zum Beispiel die absolute Zahl der Arbeitskräfte wenig darüber aus, wie viele Arbeitskräfte einen bestimmten Firmenstandort innerhalb akzeptabler Pendelzeit erreichen könnten. Zudem ergibt sich das Problem der Abgrenzung der betrachteten Agglomeration. Aussagen, die weniger fehleranfällig sein dürften, können aus Dichte-Indikatoren abgeleitet werden. Unter der Annahme konstanter durchschnittlicher Reisegeschwindigkeit (Luftliniengeschwindigkeit) ist die Zahl der innerhalb einer bestimmten Zeit erreichbaren Standorte eines bestimmten Typs von deren Dichte abhängig. Ciccone und Hall (Ciccone und Hall, 1996, S. 54-70) verwenden daher für ihre Beschreibung der Agglomerationseffekte statt der absoluten Beschäftigtenzahl einzelner Agglomerationen die Beschäftigungsdichte der US-Bundesstaaten auf Ebene der Bezirke (Counties). Fogarty und Garofalo (Fogarty und Garofalo, 1988, S. 60-70) haben eine Produktionsfunktion entwickelt, die auch Kenngrößen der Agglomeration – unter anderem die Beschäftigungsdichte – enthält. Es zeigt sich, dass diese Dichte einen starken nicht linearen Einfluss auf die Produktivität ausübt (Graham 2005, S.6).⁷² Das heißt, dass die Elastizität der gesamten Faktorproduktivität bezüglich der Bevölkerungsdichte sich mit der Bevölkerungsdichte verändert. Dieses Ergebnis wird durch eine Untersuchung von Graham (Graham, 2007, S. 103-120) bestätigt. Graham verwendet zur Beschreibung des Agglomerationsgrades eine „effektive Dichte“, die einer Erreichbarkeit nach dem Potentialansatz entspricht (vgl. Kapitel 1.2.2):⁷³

$$(15) \quad U_{io} = \frac{P_i + E_i}{\left[\sqrt{(A_i/\pi)} \right]^{\alpha_0}} + \sum_j^{i \neq j} \left([P_j + E_j] \cdot d_{ij}^{-\alpha_0} \right)$$

⁷² Fogarty and Garofalo (1988) estimate a production function with a vector of agglomeration effects that includes manufacturing employment density. They show that density has a strong positive non linear effect on productivity and that a change in spatial distribution of the density of industry may affect productivity substantially.

⁷³ Der erste Term von (15) ist jene Komponente der Gesamt-Erreichbarkeit, die sich aus Arbeitsplatz- und Bevölkerungsdichte innerhalb des betrachteten Viertels ergibt. Der zweite Term stellt jene Komponente der Gesamt-Erreichbarkeit dar, die sich aus der Summe der Erreichbarkeiten anderer Viertel der gleichen Gemeinde und anderer Gemeinden innerhalb der Region ergibt. Graham verfügt über entsprechende Daten zu allen Ortsteilen („wards“) in allen neun Regionen Englands.

Dabei ist E_i die Zahl der Arbeitsplätze und P_i die Bevölkerung im Ortsteil i . A_i ist die Fläche des Ortsteiles i und d_{ij} ist die Distanz zwischen den Ortsteilen i und j (Graham, 2005a, Folie 15). Graham ermittelt in dieser Weise nicht die Dichte in Bezug auf ein einzelnes Stadtgebiet, sondern die „effektive Dichte“ in Bezug auf die gesamte Region. Mit Hilfe einer Produktionsfunktion, welche die Faktoren Kapital und Arbeitskraft mit der jeweiligen „effektiven Dichte“ verknüpft, können Elastizitäten der gesamten Faktorproduktivität in Bezug auf die effektive Dichte für Regionen und Wirtschaftssektoren ermittelt werden.

Tabelle 5: Elastizität der gesamten Faktorproduktivität in Bezug auf die effektive Dichte für Regionen und Wirtschaftssektoren

	East	East. Midlands	London	North East	North West	South East	South West	West Midlands Yorkshire, Humber	England	
Rohstoffe („primary industries“)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Leichtindustrie („light manufacturing“)	0,02	0,02	0,07	0,02	0,02	0,01	0,02	0,01	0,03	0,02
Schwerindustrie („heavy manufacturing“)	0,03	0,04	0,03	0,04	0,03	0,03	0,04	0,04	0,04	0,04
Versorger (Elektrizität, Gas und Wasser)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Immobilien und betriebliche Dienstleistungen	0,04	0,03	0,05	0,03	0,04	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04
Bau	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07
Groß- und Einzelhandel	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Verkehr, Lagerhaltung und Nachrichtenwesen	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30
Finanz- und Versicherungsdienste	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14
Öffentliche Verwaltung und Sonstiges	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Alle Sektoren	0,04	0,04	0,06	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04

Quelle: Graham 2005a - Folie 21, eigene Tabelle und Übersetzung

Für die Großstadtregion London ergibt sich eine Elastizität der gesamten Faktorproduktivität in Bezug auf die „effektive Dichte“ von 0,06. Für die übrigen Regionen Englands ergibt sich diese Elastizität mit 0,04.

Auf ganz andere Weise gelangt eine dänische Studie (Larsen et al., 2005, S.10) zu einem ähnlichen Ergebnis für ganz Dänemark, wie Graham für ganz England. In einem allgemeinen Gleichgewichtsmodell, das unter anderem Entfernungen der einzelnen Wirtschaftsstandorte zu mehreren Universitätsstädten Dänemarks berücksichtigt, ergibt sich eine Elastizität der Löhne unselbständig Erwerbstätiger von $-0,04$ in Bezug auf eine Änderung der Reisezeit durch Verbesserung der Verkehrs-Infrastruktur, wobei Unterschiede der Qualifikation berücksichtigt wurden.⁷⁴

3.4.2 Einfluss der effektiven Größe des Arbeitsmarktes auf die Brutto-Wertschöpfung pro beschäftigter Person

Unter dem Titel „Größe, Bevölkerungsdichte, Geschwindigkeit und die Effizienz von Städten“ („Size, Sprawl, Speed and the Efficiency of Cities“) untersuchen Prud’homme und Lee (Prud’homme und Lee, 2001, S.141). den Einfluss der Erreichbarkeit auf Agglomerationseffekte. Prud’homme und Lee stellen die Hypothese auf, dass die Produktivität⁷⁵ an einem bestimmten Firmenstandort mit der Größe des Arbeitsmarktes korreliert.⁷⁶ Das ist die Anzahl potentieller Arbeitskräfte, die den Firmenstandort innerhalb einer gegebenen Zeit t (15, 30 oder 45 Minuten) erreichen können. Damit deckt sich das Konzept der effektiven Größe des Arbeitsmarktes weitgehend mit dem Konzept der Erreichbarkeit nach dem Isochronen-Ansatz (siehe Kapitel 1.1.2). Um die Hypothese an Hand der Wirtschaftsdaten von Agglomerationen zu überprüfen, wird die effektive Größe des Arbeitsmarktes $E(t)$ einer Agglomeration als Durchschnitt der Arbeitsmärkte der einzelnen Firmen innerhalb der Agglomeration definiert, wobei die Arbeitsmärkte der einzelnen Firmen mit der jeweiligen Zahl der Arbeitsplätze gewichtet werden (Prud’homme und Lee, 2001, S.148 ff.). Prud’homme und Lee untersuchten ihre Hypothese an Hand koreanischer Städte und 22 französischer Städte, für die Mobilitätsdaten vorhanden waren. Auf Basis der durchschnittlichen Reisegeschwindigkeiten und der Bevölkerungsdichte wurde die jeweilige effektive Größe des Arbeitsmarktes ermittelt.

Als Kenngröße für die relative „Produktivität“ wird für jede Branche der nationale Durchschnitt der Wertschöpfung pro Arbeitskraft ermittelt und mit der Wertschöpfung pro Arbeitskraft in der jeweiligen Stadt verglichen. Was bei Prud’homme und Lee allerdings fehlt, sind Daten zum Kapitalstock und eine Produktionsfunktion, über die allfällige

⁷⁴Unter der Annahme, dass die Entlohnung der Produktionsfaktoren von der Produktivität abhängt, sollten Löhne Erwerbstätiger die Arbeits-Produktivität widerspiegeln.

⁷⁵ Auf Grund der Größe der ermittelten Elastizitätswerte und weil keine Angaben über eine Produktionsfunktion gemacht werden, ist zu vermuten, dass Prud’homme und Lee nicht die Produktivität, sondern die Wertschöpfung pro beschäftigter Person untersucht haben.

⁷⁶ Das heißt nicht, dass die Größe des Arbeitsmarktes zur einzigen Ursache von Agglomerationseffekten erklärt wird. Vielmehr sind mit der Größe des Arbeitsmarktes andere Ursachen – etwa Technologie-Spillover, hohe Ausbildungsqualität und hohe Qualität öffentlicher Dienstleistungen oder Größenvorteile bei der Produktion von Vorleistungen verknüpft.

Unterschiede der Kapitalausstattung pro beschäftigter Person in die Analyse einfließen und berücksichtigt werden könnten. Die als Zunahme der Produktivität bezeichnete Zunahme der Brutto-Wertschöpfung pro beschäftigter Person durch Agglomerationseffekte fällt deutlich höher aus als bei den bisher genannten Studien, in denen die jeweilige Kapitalausstattung mit berücksichtigt wird. Die Elastizität der von Prud'homme und Lee angegebenen „Produktivität“ (Brutto-Wertschöpfung pro beschäftigter Person) bezüglich der effektiven Größe des Arbeitsmarktes liegt zwischen 0,13 und 0,24 (Prud'homme und Lee, 2001, S. 151). Diese Größenordnung erscheint plausibel, denn wenn die gesamte Faktorproduktivität mit der effektiven Größe des Arbeitsmarktes steigt, dann ist auch davon auszugehen, dass der Investitions-Anreiz tendenziell mit der Größe des Arbeitsmarktes steigt. Durch das entstehende Investitionsgefälle wird die beobachtbare Elastizität der Wertschöpfung pro beschäftigter Person bezüglich der Größe des effektiven Arbeitsmarktes erhöht. Ein weiterer Grund für hohe Faktorproduktivität und Investitionsbereitschaft in Agglomerationen könnte auch darin zu suchen sein, dass Betriebe, deren Produkte sich in einer frühen Phase des Produktzyklus befinden, sich vorzugsweise in großen Agglomerationen ansiedeln. Sie finden dort gut ausgebildete Fachkräfte und das höhere Lohnniveau fällt Dank überdurchschnittlicher Profit- und Wachstumsraten (Maier/Tödting, 1992, S. 95) weniger ins Gewicht. Innovative Unternehmen haben hohe Gewinnchancen, sind aber auch hohen Risiken ausgesetzt, die den Wert getätigter Investitionen gefährden. Für solche Unternehmen wirken bestimmte Urbanisierungsvorteile großer Agglomerationen Risiko mindernd (Maier und Tödting, 1992, S. 113).

3.4.3 Effektive Größe der Arbeitsmärkte österreichischer Bundesländer

Für diese Arbeit bieten sich die einzelnen Bundesländer als Wirtschaftsregionen an, an Hand derer die Wirkung von Agglomeration auch für Österreich überprüft werden kann. Dabei wird ein Verfahren gewählt, das die Vorgangsweisen von Ciccone und Hall (Ciccone und Hall, 1996, S. 54-70) und von Prud'homme und Lee (Prud'homme und Lee, 2001, S. 141-157) verbindet. Als unabhängige Variable wird die durchschnittliche Beschäftigungsdichte der Länder eingeführt, wobei auf Grund der unterschiedlichen Topografie der Bundesländer die Dichte im Dauersiedlungsraum relevant ist. Von dieser Beschäftigungsdichte und von der durchschnittlichen Geschwindigkeit des Personenverkehrs (Prud'homme und Lee, 2001, S. 147 und 153) hängt die effektive Größe des Arbeitsmarktes ab. Aus der durchschnittlichen Reisezeit pro Weg und der durchschnittlichen Weglänge in den einzelnen Bundesländern (Herry et al., 2002, S. 94 f.) ergibt sich für jedes Bundesland eine durchschnittliche Reisegeschwindigkeit. Die effektive Größe des Arbeitsmarktes steigt mit dem Quadrat der Geschwindigkeit. Der Indikator, der die durchschnittliche effektive Größe des Arbeitsmarktes an den Betriebsstandorten der einzelnen Bundesländer näherungsweise beschreibt, basiert auf der jeweiligen Beschäftigungsdichte im Dauersiedlungsraum (DB) und berücksichtigt die Durchschnittsgeschwindigkeit (V_i) im jeweiligen Bundesland (i) relativ zur Durchschnittsgeschwindigkeit in ganz Österreich (V_G):

$$(16) \text{ Indikator für die effektive Größe des Arbeitsmarktes = } \\ = DB \cdot V_i^2 / V_G^2 \quad [\text{Erwerbstätige/km}^2]$$

3.4.4 Effektive Größe der Arbeitsmärkte Wiens und Niederösterreichs

Basis des Bundesländervergleiches ist die Annahme, dass die jeweiligen Arbeitsmärkte annähernd konstante Dichte und Erreichbarkeit aufweisen. Diese Annahme trifft auf fast alle Bundesländer zu und gilt auch dort, wo regionale Arbeitsmärkte über Ländergrenzen hinweg reichen. Extreme Unterschiede bestehen nur zwischen Wien und Niederösterreich. Im Fall des Bundeslandes Wien reicht der effektive Arbeitsmarkt weit in umliegende Regionen anderer Bundesländer. Umgekehrt beeinflusst die Stadt Wien Wirtschaftsstandorte im niederösterreichischen Teil der Agglomeration. Die Beschäftigungsdichte Wiens gilt nur für jenen Teil des Wiener Arbeitsmarktes, der sich innerhalb des Landes Wien befindet, als Berechnungsgrundlage für die effektive Größe des Wiener Arbeitsmarktes. 25,6 % der hier Beschäftigten pendelten im Jahr 2001 aus anderen Bundesländern nach Wien ein (Statistik Austria 2003, S.9). Dieser Anteil entspricht nicht jenem Anteil, den das Umland Wiens am effektiven Arbeitsmarkt Wiens hat. Um die effektive Größe des Arbeitsmarktes zu errechnen, muss als Hilfsmodell angenommen werden, dass sich der Arbeitsmarkt homogen – mit gleicher Dichte und Erreichbarkeit – über die Grenzen des Landes Wien hinweg fortsetze. Unter dieser Bedingung würde der Anteil des Umlandes auf knapp 70 % steigen und der Anteil Wiens am Arbeitsmarkt der Wiener Betriebe auf etwa 30 % sinken.⁷⁷ Entsprechend der neuen Gewichtung der Stadt- und Umlandkomponente wird der Indikator für die effektive Größe des Wiener Arbeitsmarktes aus den Indikator-Werten beider Teilmärkte zusammengesetzt.

$$(17) \text{ Indikator der effektiven Größe des Wiener Arbeitsmarktes = } \\ = (0,3 \cdot DB_W \cdot V_W^2 + 0,7 \cdot DB_N \cdot V_N^2) / V_G^2 \quad [\text{Erwerbstätige/km}^2]$$

Wiener Arbeitskräfte tragen zur effektiven Größe des niederösterreichischen Arbeitsmarktes bei. Gemessen an der Fläche und der durchschnittlichen Dichte Niederösterreichs kann Wien in grober Näherung als punktförmige Quelle von Arbeitskräften angesehen werden, die durch Erhöhung der Beschäftigungsdichte Niederösterreichs berücksichtigt wird. Diese Quelle trägt allerdings nur für einen ausreichend nahe gelegenen Teil der niederösterreichischen Betriebsstandorte (Annahme: 50% der Standorte) zu einer Vergrößerung des

⁷⁷ Es wird eine durchschnittliche Dichte des Einzugsbereiches im Umland von Wien mit 110 Erwerbstätigen pro km² angenommen (doppelte Dichte Niederösterreichs). Aus dem Quadrat der Geschwindigkeit und der Dichte wird ein Indikator der Erreichbarkeit für Wien und das Umland errechnet. Die Erreichbarkeit innerhalb Wiens ergibt sich mit dem 6,7-fachen der Erreichbarkeit im Umland. Damit würde bei homogener Fortsetzung des Arbeitsmarktes ins Umland das Gewicht der Umland-Komponente des Wiener Arbeitsmarktes um das 6,7-fache gegenüber dem Ist-Wert steigen (von 74 : 26 auf 74 : 171). Das entspricht 30 : 70).

effektiven Arbeitsmarktes bei.⁷⁸ Indem die Wiener Arbeitskräfte mit einem Abminderungsfaktor von 0,5 der effektiven Größe des niederösterreichischen Arbeitsmarktes⁷⁹ zugerechnet werden, ergibt sich eine modifizierte Beschäftigungsdichte und daraus der Indikator für die effektive Größe des niederösterreichischen Arbeitsmarktes, der nahezu exakt (siehe unten) der erwarteten Korrelation zwischen Beschäftigungsdichte und Brutto-Wertschöpfung pro beschäftigter Person⁸⁰ entspricht. Wien hätte damit einen Anteil von 36,4 % an der effektiven Größe des niederösterreichischen Arbeitsmarktes. Nur 9,2 % der Beschäftigten Niederösterreichs sind aus Wien. Das zeigt, dass die Wirkung der effektiven Größe des Arbeitsmarktes auf die Wertschöpfung pro beschäftigter Person („productivity“ im Sinn der Definition von Prud’homme und Lee) nicht bzw. nicht nur in der Größe des tatsächlich genutzten Arbeitskräfte-Pools besteht, sondern dass die effektive Größe des Arbeitsmarktes implizit auch andere positive Agglomerationswirkungen (Spillover-Effekte, besserer Zugang zu Vorleistungs- und Endverbrauchermarkten) quantifiziert.

3.4.5 Wertschöpfung pro beschäftigter Person und effektive Größe des Arbeitsmarktes in Österreich

Die Indizes der effektiven Größe des Arbeitsmarktes werden für sieben Bundesländer direkt aus der durchschnittlichen Beschäftigungsdichte im Dauersiedlungsraum und der durchschnittlichen Reisegeschwindigkeit nach Gleichung (16) berechnet. Für die Bundesländer Wien und Niederösterreich werden die im vorhergehenden Unterkapitel 3.4.4 beschriebenen Korrekturen eingeführt.

Prud’homme und Lee ermitteln folgenden Zusammenhang zwischen Wertschöpfung pro beschäftigter Person („output per worker“), die sie als „productivity“ bezeichnen, und der effektiven Größe des Arbeitsmarktes (Prud’homme und Lee, 2001, S. 150):

$$(18) \ln(\text{Wertschöpfung pro Arbeitsplatz}) = a + b \cdot \ln(\text{effektive Größe des Arbeitsmarktes})$$

Dabei entspricht der Faktor b der Elastizität der Wertschöpfung pro beschäftigter Person bezüglich der effektiven Größe des Arbeitsmarktes.⁸¹

⁷⁸ Die Vorgangsweise entspricht der Betrachtung Wiens und Niederösterreichs als gemeinsames Bundesland, wobei nur die niederösterreichischen Betriebsstandorte betrachtet werden. Der Abminderungsfaktor für den Wiener Anteil des effektiven Arbeitsmarktes ist notwendig, weil über 50 % des Arbeitskräftepotentials dieses fiktiven Bundeslandes sich nahezu punktförmig konzentrieren, während die betrachteten Betriebsstandorte sich über das Umland verteilen.

⁷⁹ Gemeint ist hier die effektive Größe des Arbeitsmarktes im Sinn von Prud’homme und Lee (Prud’homme und Lee, 2001, S.147).

⁸⁰ Gemeint ist damit die „productivity“ im Sinn von Prud’homme und Lee (Prud’homme und Lee, 2001, S.150).

⁸¹ $Y = f(x) = e^{(a + b \cdot \ln x)}$; Elastizität = $\varepsilon = \text{relative Änderung von } y / \text{relative Änderung von } x$
 $\varepsilon = (dy/y)/(dx/x) = x/y \cdot dy/dx = (x/e^{(a + b \cdot \ln x)}) \cdot (e^{(a + b \cdot \ln x)} \cdot b/x) = b$

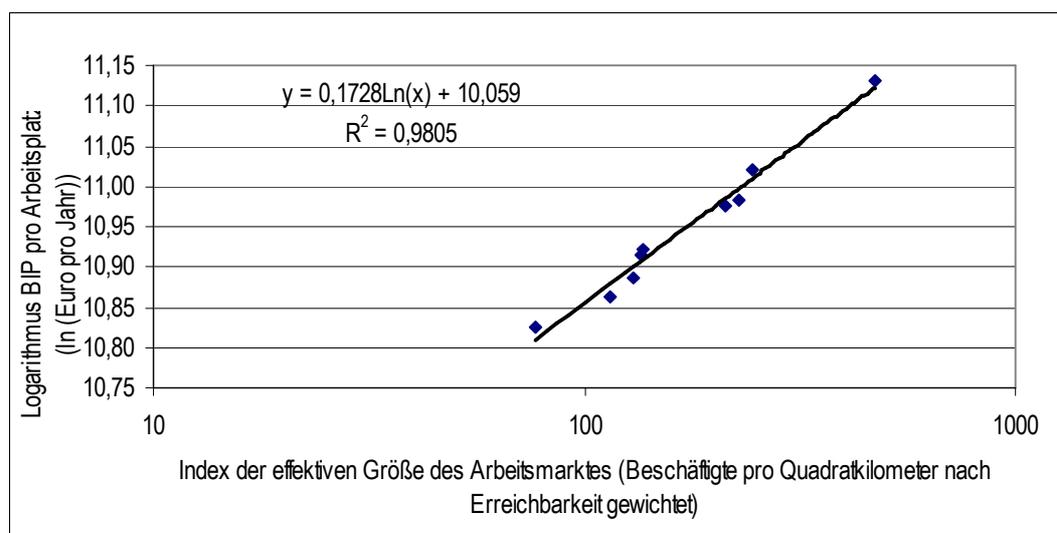
Tabelle 6: Wertschöpfung pro beschäftigter Person und effektive Größe des Arbeitsmarktes österreichischer Bundesländer

	Erwerbstätige am Arbeitsort	Bruttoregionalprodukt pro erwerbstätiger Person	*ln (Bruttoregionalprodukt pro erwerbstätiger Person)	Dauersiedlungsraum	Beschäftigungsdichte	Indikator für die effektive Größe des Arbeitsmarktes	durchschnittliche Reisege-schwindigkeit (ÖV und MIV)
	in 1000	Euro pro Jahr und Erwerbsperson	*ln(Euro/Jahr und Erwerbsperson)	km ²	Erwerbstätige / km ²	Erwerbstätige / km ²	km/h
Burgenland	102,1	50255	10,82	2474	41	77	37,2
Kärnten	237,5	53419	10,89	2317	102	130	30,7
Niederösterr.	620,1	55314	10,92	11277	55	136	34,2
Oberösterr.	645,1	54920	10,91	6578	98	135	32
Salzburg	269,1	58398	10,98	1431	188	212	28,9
Steiermark	527,5	52241	10,86	4950	107	115	28,3
Tirol	325,6	58848	10,98	1543	211	228	28,3
Vorarlberg	165,3	61071	11,02	585	282	245	25,4
Wien	892,2	68294	11,13	322	2767	471	17,6

*Anmerkung: „ln“ ist der natürliche Logarithmus

Quelle: WKÖ 2006, Herry 2002; eigene Berechnungen

Abb. 22: Wertschöpfung pro beschäftigter Person und effektive Größe des Arbeitsmarktes österreichischer Bundesländer



Quelle: WKÖ 2006, eigene Berechnungen, eigene Darstellung

Mit einer Ausgleichsfunktion in der von Prud'homme und Lee angegebenen Form ergibt sich für die österreichischen Bundesländer einschließlich Wiens und Niederösterreichs eine

Elastizität b der Brutto-Wertschöpfung pro beschäftigter Person bezüglich der effektiven Größe des Arbeitsmarktes von 0,173 bzw. 17,3%. Das Bestimmtheitsmaß R^2 beträgt 0,98. Werden die Bundesländer Wien und Niederösterreich außer Betracht gelassen, ergibt sich die Elastizität b mit 16,5 % bei einem Bestimmtheitsmaß von 0,968.

3.4.6 Elastizitäten der totalen Faktorproduktivität und der Wertschöpfung pro Erwerbperson bezüglich der effektiven Größe des Arbeitsmarktes

Es zeigt sich, dass der Einfluss von Agglomerationseffekten auf die Kapitalausstattung pro beschäftigter Person dazu führt, dass bezüglich der effektiven Größe des Arbeitsmarktes die Elastizität der Wertschöpfung pro beschäftigter Person wesentlich höher ist als die Elastizität der totalen Faktorproduktivität. Nach den Ergebnissen der vorliegenden Untersuchungen werden folgende Elastizitätswerte für die weiteren Berechnungen verwendet:

- Die Elastizität der totalen Faktorproduktivität in Bezug auf die effektive Größe des Arbeitsmarktes wird mit 6 % angenommen.
- Die Elastizität der Wertschöpfung pro beschäftigter Person in Bezug auf die effektive Größe des Arbeitsmarktes wird mit 18 % angenommen.

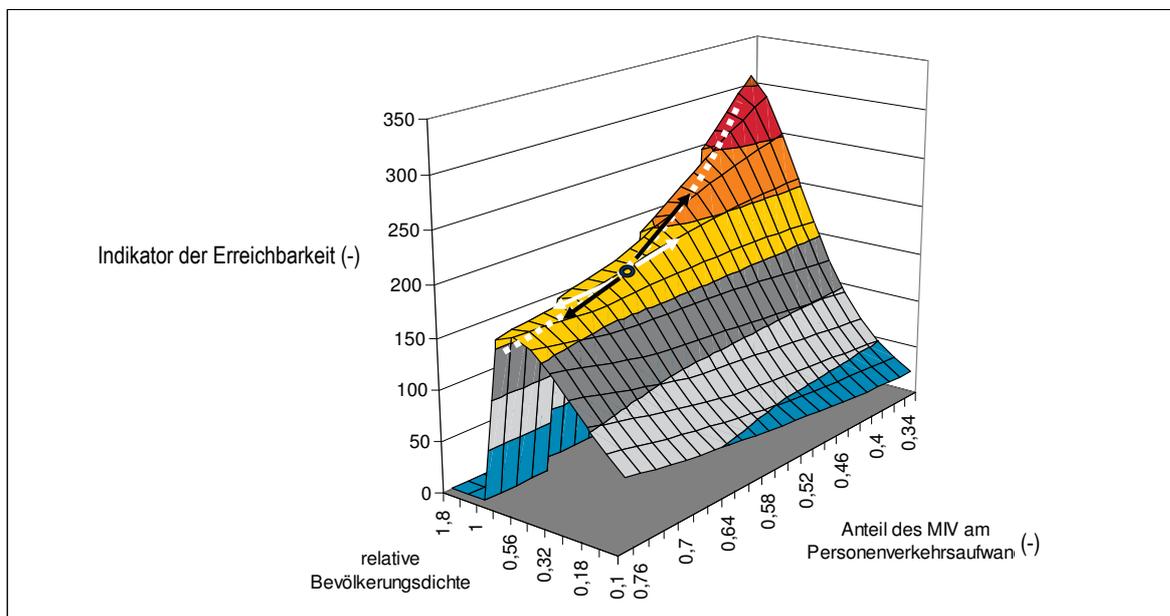
Je nachdem, ob die Wirkung von Agglomerationseffekten auf die Kapitalausstattung berücksichtigt werden soll oder nicht, ist für die Berechnung der Größe von Agglomerationseffekten von der Elastizität der totalen Faktorproduktivität oder von jener der Wertschöpfung pro beschäftigter Person aus zu gehen. Zum Beispiel wird bei der Frage, wie viel die Wirtschaft einer Stadt durch eine Vergrößerung des effektiven Arbeitsmarktes zu gewinnen hat, die Elastizität von 18 % anzusetzen sein, weil der Zufluss von Kapital und daraus resultierende Vorteile aus Sicht der Stadt einen Teil des Agglomerationsvorteils darstellen. Richtet sich die Frage hingegen nach den Vorteilen, die eine Vergrößerung der effektiven Arbeitsmärkte für die Wirtschaft Österreichs insgesamt bringt, wird im Wesentlichen der Elastizitätswert 6 % relevant sein, denn der Wirkung von Kapital-Zufluss ist die Wirkung von Kapital-Abfluss an anderer Stelle gegenüber zu stellen.

3.5 Verkehrsbedingte externe Agglomerationseffekte

In diesem Kapitel wird davon ausgegangen, dass Hypothese I gilt und dass in einem gegebenen städtischen Straßennetz die Erreichbarkeit entsprechend dem im Kapitel 3.1 entwickelten Modell von der Verkehrsmittelwahl abhängt. Die Erreichbarkeit bestimmt ihrerseits die effektive Größe des Arbeitsmarktes und diese beeinflusst durch Agglomerationseffekte die Wertschöpfung pro beschäftigter Person an Betriebsstandorten, die über das betrachtete Straßennetz erreichbar sind. Unter den getroffenen Annahmen stellt die Wirkung der Verkehrsmittelwahl auf die Wertschöpfung pro beschäftigter Person einen externen Effekt des Verkehrs dar. Ziel dieses Kapitels ist es, eine Abschätzung über die Größe dieses verkehrsbedingten externen Agglomerationseffektes in Bezug auf die sie verursachende Verkehrsmittelwahl-Entscheidung zu geben. Im Folgenden wird daher die Abhängigkeit der Wertschöpfung pro beschäftigter Person von der Erreichbarkeit innerstädtischer Firmenstandorte durch potentielle Arbeitskräfte dargestellt. Anschließend werden die Änderungen der Wertschöpfung zu der sie verursachenden Änderung des MIV-Anteils in Beziehung gesetzt.

3.5.1 Kurz- und langfristige externe Agglomerationseffekte

Abb. 23: Kurz- und langfristige Änderungen der Erreichbarkeit



Quelle: eigene Berechnungen, eigene Darstellung

Kurzfristige externe Effekte ergeben sich aus der Änderung der Erreichbarkeit durch Variation des MIV-Anteils bei konstanter Dichte (helle Pfeile). Langfristig hat der Verkehr Einfluss auf die Bevölkerungsdichte. Der kurz- und langfristige Agglomerationseffekt ergibt sich aus der Änderung der Erreichbarkeit entlang der Linie maximaler Erreichbarkeit (dunkle Pfeile, punktierte Linie).

Der MIV-Anteil an der Personenverkehrsleistung hat über zwei unterschiedliche Wirkungsmechanismen Einfluss auf die Erreichbarkeit und in weiterer Folge auf die Produktivität bzw. auf die Wertschöpfung pro beschäftigter Person. In einem gegebenen Straßennetz bei gegebener Bevölkerungsdichte ergibt sich ein kurzfristiger externer Agglomerationseffekt aus der unmittelbaren Wirkung der Verkehrsmittelwahl auf die Reisezeiten. Um die Größe des kurzfristigen externen Effektes und den kurzfristigen externen Grenz-Effekt pro Pkw-Fahrt zu ermitteln, ist auf der "Erreichbarkeitsfläche" (Abb. 23) die Änderung der Erreichbarkeit entlang einer Linie konstanter Dichte zu untersuchen. Durch ihren Einfluss auf die Bevölkerungsdichte hat die Verkehrsmittelwahl eine zweite, langfristige Auswirkung auf die Erreichbarkeit. Um den langfristigen externen Agglomerationseffekt zu beziffern, muss die gemäß Hypothese I durch Änderung des MIV-Anteils bewirkte Änderung der Bevölkerungsdichte betrachtet werden. Es ist daher auf der „Erreichbarkeitsfläche“ die Änderung der Erreichbarkeit entlang der Linie maximaler Erreichbarkeit zu untersuchen. Die Linie jener Dichte, die maximale Erreichbarkeit in Abhängigkeit von einem gegebenen MIV-Anteil ermöglicht, ist durch Gleichung (14) beschrieben.

3.5.2 Ansatz für die Abhängigkeit der Wertschöpfung pro beschäftigter Person von der Erreichbarkeit des Betriebsstandortes

Gemäß den Angaben von Prud'homme und Lee (Prud'homme und Lee, 2001, S. 140) wird der Einfluss der Größe des Arbeitsmarktes auf die Wertschöpfung pro beschäftigter Person folgendermaßen angesetzt:

$$(19) \ln(\text{BIP pro Erwerbsperson}) = k_4 + \varepsilon_A * \ln E(20) \quad [\ln(\text{Euro}/(\text{Erwerbsperson} * \text{Jahr}))]$$

$E(20)$ ist die Größe des Arbeitsmarktes im 20-Minuten-Einzugsbereich um den jeweiligen Firmenstandort. k_4 ist eine Konstante und ε_A ist die Elastizität der Wertschöpfung pro beschäftigter Person in Bezug auf die Größe des Arbeitsmarktes.

Das Brutto-Inlandsprodukt in Euro pro Kopf der Bevölkerung und Werktag (Formelzeichen: BIP) lässt sich unter der Annahme eines fixen Verhältnisses von Zahl der Erwerbstätigen zu Bevölkerungszahl am Arbeitsort gemäß (19) folgendermaßen darstellen:

$$(20) \ln(\text{BIP}) = k_5 + \varepsilon_A * \ln E(20) \quad [\ln(\text{Euro}/(\text{Einwohner} * \text{Werktag}))]$$

Die Größe des Arbeitsmarktes $E(20)$ ist bei einer als konstant angenommenen durchschnittlichen Dichte an potentiellen Arbeitskräften im 20-Minuten-Einzugsbereich proportional den Quadraten der Reisegeschwindigkeiten des öffentlichen Verkehrs und des MIV, jeweils gewichtet mit dem relativen Anteil des öffentlichen Verkehrs und des Pkw-Verkehrs an den im Straßennetz verbrachten Reisezeiten. Das bedeutet, dass der Arbeitsmarkt $E(20)$ proportional dem Indikator der Erreichbarkeit ist (siehe Gleichung (4)).⁸² Die Abhängigkeit des Indikators der Erreichbarkeit von Bevölkerungsdichte und MIV-Anteil ist durch Gleichung (13) gegeben.

⁸² Indikator der Erreichbarkeit = $3600 * d * ((AI/Z_{MIV} + AÖ/Z_{ÖV}) / (AÖ * Z_{ÖV} + AI * Z_{MIV}))$

$$(21) \quad E(20) \approx \text{Indikator der Erreichbarkeit} = \\ = 3600 * d * ((AI / Z_{MIV} + A\ddot{O} / Z_{\ddot{O}V}) / (A\ddot{O} * Z_{\ddot{O}V} + AI * Z_{MIV})) \quad [-]$$

eingesetzt in Gleichung (20) ergibt sich

$$(22) \quad \ln(\text{BIP}) = k_6 + \varepsilon_A * \ln(\text{Indikator der Erreichbarkeit}) \quad [\ln(\text{Euro}/(\text{Einwohner} * \text{Werktag}))]$$

und weiter mit $A\ddot{O} = (1 - AI)$ und den Reisezeiten pro Kilometer als Funktionen des MIV-Anteils:⁸³

$$(23) \quad \text{BIP}(AI) = \exp(k_6 + \varepsilon_A * \ln(\text{Indikator der Erreichbarkeit})) = \\ = \exp(k_6 + \varepsilon_A * \ln(3600 * d * (AI / Z_{MIV}(AI) + (1 - AI) / Z_{\ddot{O}V}(AI)) / ((1 - AI) * Z_{\ddot{O}V}(AI) + \\ + AI * Z_{MIV}(AI))) \quad [\text{Euro}/(\text{Einwohner} * \text{Werktag})]$$

Durch Einsetzen des derzeitigen Ist-Standes der normierten Verkehrsstärke, der relativen Dichte und des MIV-Anteils für Wien in Gleichung (23) muss sich der Ist-Stand des jährlichen BIP pro Kopf und Werktag ergeben. Damit ergibt sich die Konstante k_6 jeweils mit

$$(24) \quad k_6 = \ln(\text{BIP}_w) - \varepsilon_A * \ln(\text{Indikator der Erreichbarkeit})$$

Im Jahr 2003 betrug in Wien das Brutto-Inlandsprodukt pro Kopf und Jahr 38.709 Euro (WKÖ 2006). Das BIP pro Kopf und Werktag (Formelzeichen: BIP) ergibt sich für Wien mit $\text{BIP}_w = 135$ Euro.⁸⁴

3.5.3 Durch die Verkehrsmittelwahl verursachter Grenz-Agglomerationseffekt

Um zum Grenz-Agglomerationseffekt der Verkehrsmittelwahl (zusätzliche Agglomerationswirkung pro zusätzlicher Pkw-Fahrt) zu gelangen, ist $\text{BIP}(AI)$ nach der Zahl der Pkw-Fahrten pro Kopf und Werktag (Formelzeichen „PF“) zu differenzieren. Nach der Kettenregel gilt $d\text{BIP}(AI)/d\text{PF} = d \text{BIP}(AI) / d AI * d AI/d\text{PF}$. Die Zahl der Pkw-Fahrten pro Kopf und Werktag ist als Funktion des MIV-Anteils zu beschreiben, um den Bezug zur einzelnen Wahlentscheidung zwischen den Verkehrsmitteln ÖV und MIV und der damit verbundenen Änderung von Agglomerationseffekten herzustellen.

Für Wien ergibt sich derzeit eine Zahl von $\text{PF}_w = 1,08$ Pkw-Fahrten⁸⁵ pro Kopf und Werktag, wobei pro Fahrt 4,98 Fahrzeugkilometer auf das städtische Straßennetz – ohne Autobahnen und Schnellstraßen - entfallen.⁸⁶ Die Zahl der Pkw-Fahrten pro Kopf und

⁸³ $Z_{\ddot{O}V}$ und Z_{MIV} , die Reisezeiten pro Kilometer, sind Funktionen der normierten Verkehrsstärke TN zur jeweiligen Tageszeit (z.B.: $TN = 0,9$ zu Spitzenzeitpunkten bei $AI = 0,58$), die ihrerseits vom MIV-Anteil abhängig ist (siehe Gleichung (6)).

⁸⁴ Pro Jahr werden $52 * 5,5 = 286$ volle Werktags-Äquivalente angenommen.

⁸⁵ einschließlich Fahrten von Fahrzeugen aus dem Umland

⁸⁶ siehe Kapitel 6.1 Modelldaten

Werktag, $PF(AI)$, muss sich proportional dem Anteil des MIV an der Personenverkehrsleistung verändern⁸⁷:

$$(25) PF(AI) = k_7 * AI \text{ [Pkw-Fahrten/(Einwohner*Werktag)]}$$

wobei gilt $k_7 = PF_w / AI_w = 1,87$

Der kurzfristige Netto-Grenz-Agglomerationseffekt pro Pkw-Fahrt setzt sich aus dem negativen externen Grenz-Agglomerationseffekt GA_{neg} durch marginal erhöhte Reisezeiten aller Verkehrsteilnehmer (effektive Größe des Arbeitsmarktes schrumpft) und dem positiven externen Grenz-Agglomerationseffekt GA_{pos} durch die sinkende Reisezeit der zum marginalen Pkw umsteigenden Personen (effektive Größe des Arbeitsmarktes steigt) zusammen.

$$(26) GA = GA_{neg} + GA_{pos} \text{ [Euro/Pkw-Fahrt]}$$

Durch Anwendung der Gleichungen (23) und (25) für $BIP(AI)$ und $PF(AI)$ kann numerisch durch Bildung eines Differenzenquotienten⁸⁸ $\Delta BIP / \Delta PF$ der Netto-Grenz-Agglomerationseffekt pro Pkw-Fahrt in Abhängigkeit des MIV-Anteils an der Personenverkehrsleistung aus der Änderung des BIP/Kopf und Werktag sowie der Änderung der Zahl der Pkw-Fahrten pro Kopf und Werktag ermittelt werden.⁸⁹

$$(27) GA(AI) = (BIP(AI+\Delta AI) - BIP(AI)) / ((PF(AI+\Delta AI) - PF(AI))) \text{ [Euro/Pkw-Fahrt]}$$

Da zunächst die kurzfristigen Agglomerationseffekte für Wien abgeschätzt werden sollen, wird in Gleichung (27) bei der Berechnung von $BIP(AI)$ nach Gleichung (23) die relative Dichte $d = 1$ gesetzt.

Um die Komponente GA_{neg} zu ermitteln, wird in Gleichung (27) jene Änderung $\Delta BIP(AI)$ eingesetzt, die sich gemäß Gleichung (23) ergibt, wenn durch Variation von AI nur die Reisezeiten pro Kilometer $Z_{MIV}(AI)$ und $Z_{ÖV}(AI)$ geändert werden, nicht jedoch die Gewichtung des Reisezeit-Effektes nach MIV- und ÖV-Anteil.⁹⁰

$$(28) \Delta BIP(AI) =$$

$$= \exp(k_6 + \varepsilon_A * \ln(\text{Indikator der Erreichbarkeit}(AI, Z_{MIV}(AI + \Delta AI), Z_{ÖV}(AI + \Delta AI))) -$$

$$- \exp(k_6 + \varepsilon_A * \ln(\text{Indikator der Erreichbarkeit}(AI, Z_{MIV}(AI), Z_{ÖV}(AI)))$$

[Euro/(Einwohner*Werktag)]

⁸⁷ Es gilt die Annahme, dass Verkehrsleistung und Weglänge unabhängig von der Verkehrsmittelwahl sind.

⁸⁸ Als Schrittweite für ΔMIV wurde 0,02 gewählt.

⁸⁹ Gleichung (27) ist vereinfacht dargestellt. In der Praxis wurde jeweils der Mittelwert aus den Ergebnissen für $+\Delta Q$ und $-\Delta Q$ gebildet, um der Krümmung des Kurvenverlaufes Rechnung zu tragen. Als Schrittweite für die Variation der unabhängigen Variablen MIV wurde 0,02 gewählt.

⁹⁰ Bei Zunahme des MIV-Anteils wird dadurch nur der durch gegenseitige Behinderung bedingte Zeitverlust, nicht aber der Zeitgewinn durch Umstieg zum schnelleren Verkehrsmittel erfasst. Auch in Gleichung (28) ist $d = 1$ gesetzt, da die kurzfristigen Effekte gefragt sind.

Jene Komponente des Grenz-Agglomerationseffektes, die durch den Anstieg der Reisegeschwindigkeit beim Umstieg zum Pkw entsteht, ergibt sich aus Gleichung (26).

$$(29) GA - GA_{\text{pos}} = GA_{\text{neg}} \quad [\text{Euro/Pkw-Fahrt}]$$

3.5.4 Für Arbeitsmarkt und Produktivität relevante Anteile des Personenverkehrs

Entscheidend für die Größe der externen Grenz-Agglomerationseffekte, die pro Verkehrsmittelwahl-Entscheidung verursacht werden, ist die Frage, welche Relevanz die beschleunigende oder bremsende Wirkung von Pkw-Verkehrsleistungen (anstelle gleich großer ÖV-Verkehrsleistungen) zu den einzelnen Tageszeiten für die Höhe der Wertschöpfung pro beschäftigter Person hat. Nach den bisherigen Ausführungen wird noch nicht berücksichtigt, ob und wie weit Änderungen des MIV-Anteils zu den einzelnen Tageszeiten zur Änderung der Wertschöpfung pro beschäftigter Person beitragen. Es ist zu vermuten, dass die Bedeutung von Verkehrsleistungen für die Entstehung des BIP im Tagesverlauf nicht gleich hoch ist. Entsprechend der von Prud'homme und Lee sowie von anderen Autoren aufgestellten These, dass die effektive Größe des Arbeitsmarktes Einfluss auf die Produktivität hat, wären Änderungen der Produktivität in Folge von Änderungen der Erreichbarkeit vor allem der Verkehrsmittelwahl zu den Spitzenstunden zuzuordnen, auf die der Großteil der Arbeitswege entfällt. Andererseits ist jedoch von jeder Güter- und Personenverkehrsleistung zu erwarten, dass sie gewisse Beiträge zur Entstehung des BIP und zu externen Agglomerationseffekten liefert. Die Erreichbarkeit von Orten des Warenkonsums und von Dienstleistungen oder anderen Aktivitäten trägt ebenfalls zur Qualität des Wirtschaftsstandortes und zu Agglomerationseffekten bei.

3.5.5 Annahmen über relevante Verkehrsanteile und Elastizitäten

Es werden zwei Annahmen getroffen, um den Größenbereich des durch die Verkehrsmittelwahl verursachten externen Agglomerationseffektes einzugrenzen:

- 1) Relevant für das Entstehen externer Agglomerationseffekte sei der Personenverkehr zu jeder Tages- und Nachtzeit im gleichen Ausmaß.
- 2) Relevant für das Entstehen externer Agglomerationseffekte sei zu 90 % der Personenverkehr zur Zeit der Verkehrsspitzen, die mit einer normierten Verkehrsstärke zwischen 0,75 und 0,9 definiert werden.

Zur Zeit der Verkehrsspitzen findet laut Häufigkeitsverteilung der Verkehrsstärken 47 % des Verkehrs statt und die durchschnittliche normierte Verkehrsstärke liegt bei 0,81 (Kap. 6.4.4). Für den Grenz-Agglomerationseffekt pro Pkw-Fahrt⁹¹ nach Annahme 2)

⁹¹ genau genommen pro Pkw-Fahrt, die ÖV-Fahrten ersetzt, also pro Umstieg von ca. 1,3 Personen zum Pkw.

gilt dann⁹²

$$(27a) \text{ GA}(\text{AI}) = (\Delta\text{BIP}(\text{AI}) * 0,9) / (\Delta\text{PF}(\text{AI}) * 0,47) \text{ [Euro/Pkw-Fahrt]}$$

Entscheidend für die Größe des externen Agglomerationseffektes, der mit der Verkehrsmittelwahl verbunden ist, ist weiters die Elastizität der Wertschöpfung pro beschäftigter Person in Bezug auf die Größe des Arbeitsmarktes ϵ_A .

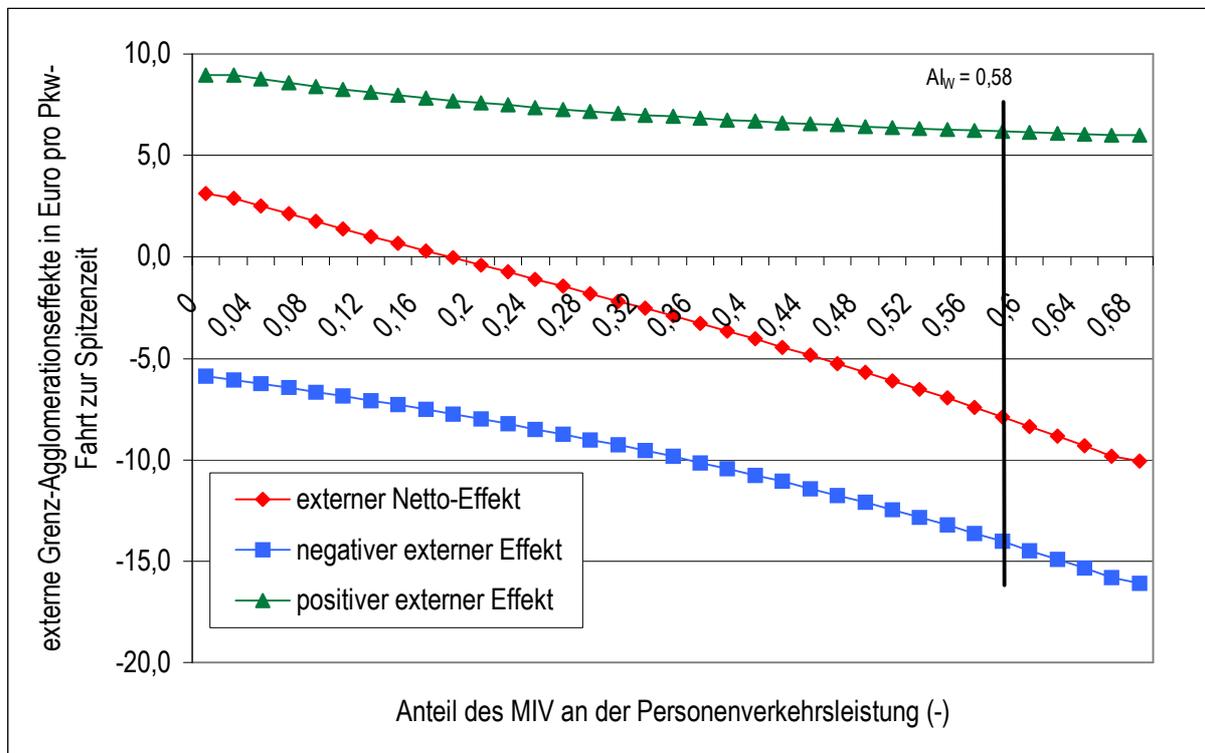
Gemäß der im Abschnitt 3.4.6 getroffenen Annahme wird für die Elastizität der totalen Faktorproduktivität in Bezug auf die Größe des Arbeitsmarktes ein Wert von 0,06 gewählt. Diese Elastizität erscheint jedenfalls aus gesamtwirtschaftlicher Sicht relevant, da jener Teil des Agglomerationseffektes, der lediglich das Ergebnis der Verlagerung von Investitionskapital von oder zu anderen Städten und Regionen ist, ausgeblendet wird. Prud'homme und Lee geben die Elastizität der Wertschöpfung pro beschäftigter Person in Bezug auf die Größe des Arbeitsmarktes mit 0,18 an (Prud'homme und Lee, 2001, S.151). Diese Elastizität kann aus Sicht einer Stadt oder einer Metropolenregion durchaus relevant sein, da sie jene Vorteile mit erfasst, die dem städtischen Wirtschaftsstandort aus einer durch Agglomerationsvorteile verstärkten Investitionstätigkeit von Unternehmen erwachsen. Im Folgenden werden die Ergebnisse gemäß Annahme 1 und Annahme 2 sowie gemäß den beiden Elastizitätswerten getrennt angegeben, um eine Ober- und Untergrenze für die Größenordnung der gesuchten Effekte zu erhalten.

3.5.6 Kurzfristige externe Grenz-Agglomerationseffekte pro Pkw-Fahrt

Bei jeder normierten Verkehrsstärke TN, die beim MIV-Anteil AI_w im Tagesverlauf auftritt, kann AI variiert und gemäß (21) die daraus folgende Variation der Erreichbarkeit und gemäß (27) die daraus folgende Größe des kurzfristigen externen Grenz-Agglomerationseffektes in Abhängigkeit vom MIV-Anteil berechnet werden. Wird der Spitzenzeitpunkt betrachtet ($\text{TN} = 0,9$), ergibt sich unter Annahme 1 der in Abb. 24 dargestellte Verlauf der externen Grenz-Agglomerationseffekte pro Pkw-Fahrt in Abhängigkeit einer fiktiven Änderung des MIV-Anteils an der Personenverkehrsleistung. Der positive externe Grenz-Agglomerationseffekt, der mit einem Umstieg zum Pkw verbunden ist, fällt mit steigendem Pkw-Anteil (entspricht steigender Verkehrsstärke); wogegen der negative externe Grenz-Agglomerationseffekt steigt. Bei einem MIV-Anteil von 0,18 heben sich die beiden Effekte auf. Beim derzeitigen MIV-Anteil in Wien ($\text{AI}_w = 0,58$) liegt der kurzfristige externe Grenz-Agglomerationseffekt bei etwa -7,9 Euro pro Pkw-Fahrt zur Spitzenzeit.

⁹² Wenn laut Annahme 2) der Verkehr zu Spitzenzeiten (das sind 47 % des Gesamtverkehrs) mit der Entstehung von 90 % des BIP verknüpft ist, dann muss pro Kopf die 0,9-fache BIP-Änderung mit der 0,47-fachen Änderung der Pkw-Fahrtzahl ins Verhältnis gesetzt werden, um zur BIP-Änderung pro Pkw-Fahrt zu gelangen.

Abb. 24: Kurzfristige externe Grenz-Agglomerationseffekte zur Verkehrsspitze bei Variation des MIV-Anteils an der Personenverkehrsleistung (es gilt Annahme 1 und $\varepsilon_A = 0,06$)

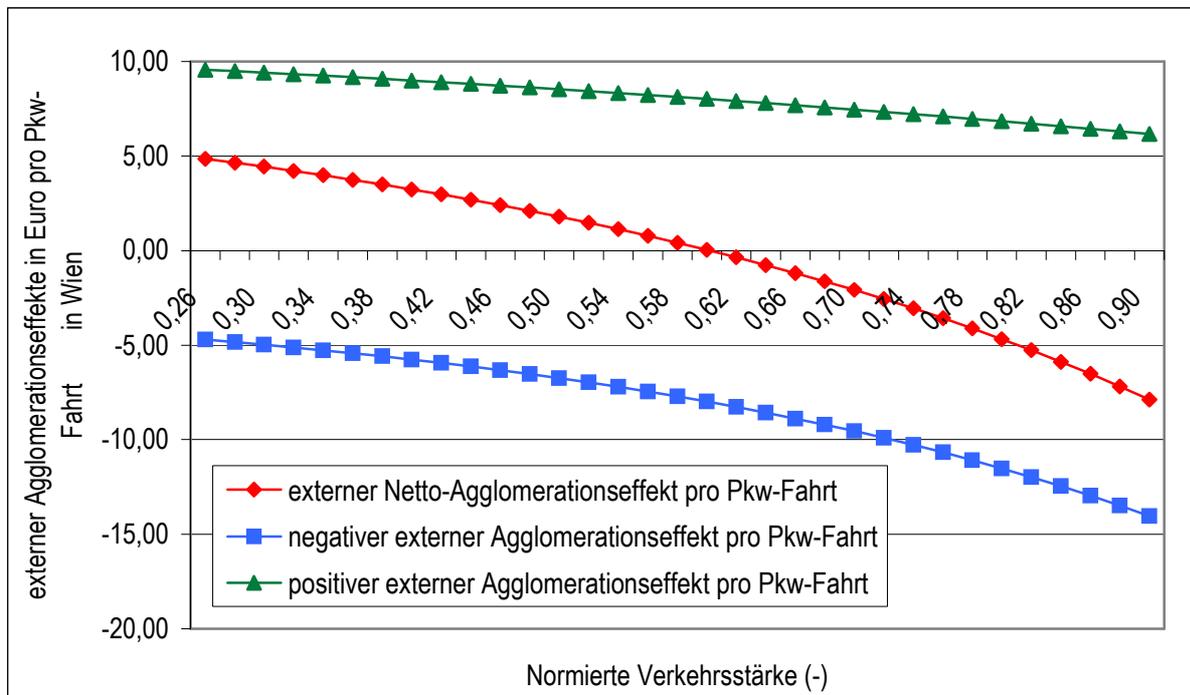


Quelle: eigene Berechnungen

Unter der Annahme, dass alle Personenverkehrsleistungen gleichermaßen zur Entstehung des BIP beitragen (Annahme 1), ergeben sich zur Verkehrsspitze in Wien bei einer fiktiven Variation des MIV-Anteils an der Verkehrsleistung die dargestellten kurzfristigen externen Grenz-Agglomerationseffekte pro Pkw-Fahrt. Bei MIV-Anteilen unter 0,18 ist der externe Netto-Grenz-Agglomerationseffekt positiv.

Wird der Anteil des MIV an der Personenverkehrsleistung (AI) konstant belassen und die normierte Verkehrsstärke variiert, ergibt sich die Größe des kurzfristigen externen Grenz-Agglomerationseffektes beim gewählten MIV-Anteil in Abhängigkeit von der normierten Verkehrsstärke. Damit kann beispielsweise ein Tagesgang des kurzfristigen externen Grenz-Agglomerationseffektes beim gegebenen MIV-Anteil angegeben werden. Bei einem fixen Anteil des MIV an der Personenverkehrsleistung von 0,58 – das ist der derzeitige MIV-Anteil an der Personenverkehrsleistung in Wien – ergeben sich die in Abb.25 dargestellten Verläufe des kurzfristigen positiven, negativen und Netto-Grenz-Agglomerationseffektes pro Pkw-Fahrt (kurzfristige Effekte). Über einer normierten Verkehrsstärke von 0,6 wird der pro Pkw-Fahrt verursachte Netto-Grenz-Agglomerationseffekt negativ.

Abb. 25: Kurzfristige externe Grenz-Agglomerationseffekte in Abhängigkeit von der Verkehrsstärke (es gilt Annahme 1), $AI = AI_w$ und $\varepsilon_A = 0,06$)



Quelle: eigene Berechnungen

Das sind die kurzfristigen externen Grenz-Agglomerationseffekte (d.h. ohne die Wirkung sich ändernder Bevölkerungsdichte) und bei konstantem MIV-Anteil.⁹³ Sie gelten unter Annahme 1)⁹⁴ und bei einer Elastizität der totalen Faktorproduktivität bezüglich der Änderung der effektiven Größe des Arbeitsmarktes von 0,06. Bei den hier geltenden Annahmen ergibt sich in Wien nur bei normierten Verkehrsstärken unter 0,60 – diese treten etwa zwischen 20:00 abends und und 6:00 Früh auf – ein positiver externer Agglomerationseffekt durch Autofahrten.

Die Abbildungen 24 und 25 zeigen jeweils die Untergrenze der absoluten Größe der kurzfristigen externen Grenz-Agglomerationseffekte pro Pkw-Fahrt, die im Rahmen der getroffenen Annahmen über die Elastizität der totalen Faktorproduktivität bezüglich der Änderung der effektiven Größe des Arbeitsmarktes und die relevanten Anteile der Personenverkehrsleistung möglich ist. Diese Mindestgröße ergibt sich bei Annahme 1 – alle Personenverkehrsleistungen sind gleichermaßen relevant – und dem kleineren der beiden Elastizitätswerte $\varepsilon_A = 0,06$. Bei Annahme 2 und $\varepsilon_A = 0,18$ ergeben sich die größten Absolutwerte für die kurzfristigen externen Grenz-Agglomerationseffekte. In Tabelle 7 ist die gesamte Streubreite des kurzfristigen externen Netto-Grenz-Agglomerationseffektes pro

⁹³ Es gilt die Annahme, dass der MIV-Anteil sich im Tagesverlauf nicht ändert.

⁹⁴ Alle Personenverkehrsleistungen sind gleichermaßen relevant.

Pkw-Fahrt zu den Spitzenstunden ($0,75 < TN < 0,9$) und beim MIV-Anteil $AI = AI_W = 0,58$ dargestellt.

Tabelle 7: Größe des kurzfristigen externen Netto-Grenz-Agglomerationseffektes je nach Annahmen über Agglomerations-Elastizität und relevante Anteile der Personenverkehrsleistung

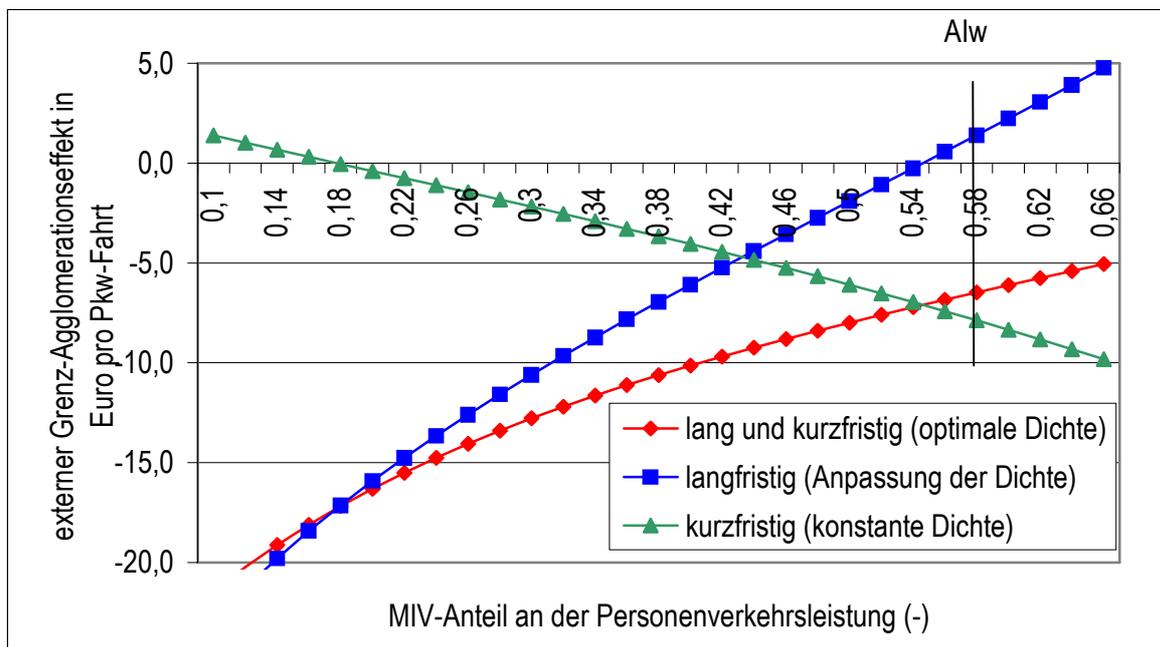
normierte Verkehrsstärke	kurzfristiger externer Netto-Grenz-Agglomerationseffekt (Euro pro Pkw-Fahrt)			
	Elastizität: $\epsilon_A = 0,06$		Elastizität: $\epsilon_A = 0,18$	
	Annahme 1	Annahme 2	Annahme 1	Annahme 2
0,76	-3,6	-6,9	-10,7	-20,6
0,78	-4,1	-7,9	-12,4	-23,7
0,80	-4,7	-9,0	-14,0	-26,9
0,82	-5,3	-10,1	-15,8	-30,3
0,84	-5,9	-11,3	-17,6	-33,8
0,86	-6,5	-12,5	-19,5	-37,5
0,88	-7,2	-13,8	-21,5	-41,3
0,90	-7,9	-15,1	-23,6	-45,3

Quelle: eigene Berechnungen

Annahmen 1 und 2 betreffen Unter- und Obergrenze des für die Entstehung des BIP als relevant anzusehenden Teils der Personenverkehrsleistung. Bezüglich einer Änderung der effektiven Größe des Arbeitsmarktes werden die Elastizität der totalen Faktorproduktivität mit 0,06 und die der Wertschöpfung pro beschäftigter Person mit 0,18 angesetzt. Es gilt $AI = 0,58$.

3.5.7 Durch die Verkehrsmittelwahl verursachte langfristige externe Effekte

Der gesamte kurz- und langfristige externe Agglomerationseffekt, der durch Verkehrsmittelwahl verursacht wird, ergibt sich nach Gleichung (27), wenn dort bei der Berechnung von $BIP(AI)$ nach Gleichung (23) für die relative Dichte d jener Wert eingesetzt wird, der nach Gleichung (14) beim jeweiligen MIV-Anteil die maximale Erreichbarkeit ermöglicht. Die „Erreichbarkeitsfläche“ wird also wie in Abb.23 gezeigt, durch Variation des MIV-Anteils entlang der Linie der maximalen Erreichbarkeit durchlaufen. Die ermittelten Agglomerationseffekte schließen dadurch die Wirkung einer Anpassung der Bevölkerungsdichte an den jeweiligen MIV-Anteil ein. Bei gleichzeitiger Änderung der Dichte und des MIV-Anteils entlang der Linie maximaler Erreichbarkeit findet der lang- und kurzfristige Effekt gleichzeitig statt. Bezüglich der Zuordnung der langfristigen externen Effekte zu den Verkehrsleistungen im Tagesverlauf wird wie bisher Annahme 1 zur Bestimmung der Untergrenze und Annahme 2 zur Bestimmung der Obergrenze der betrachteten Effekte getroffen.

Abb. 26: Kurz- und langfristige externe Grenz-Agglomerationseffekte zur Verkehrsspitze

Quelle: eigene Berechnungen

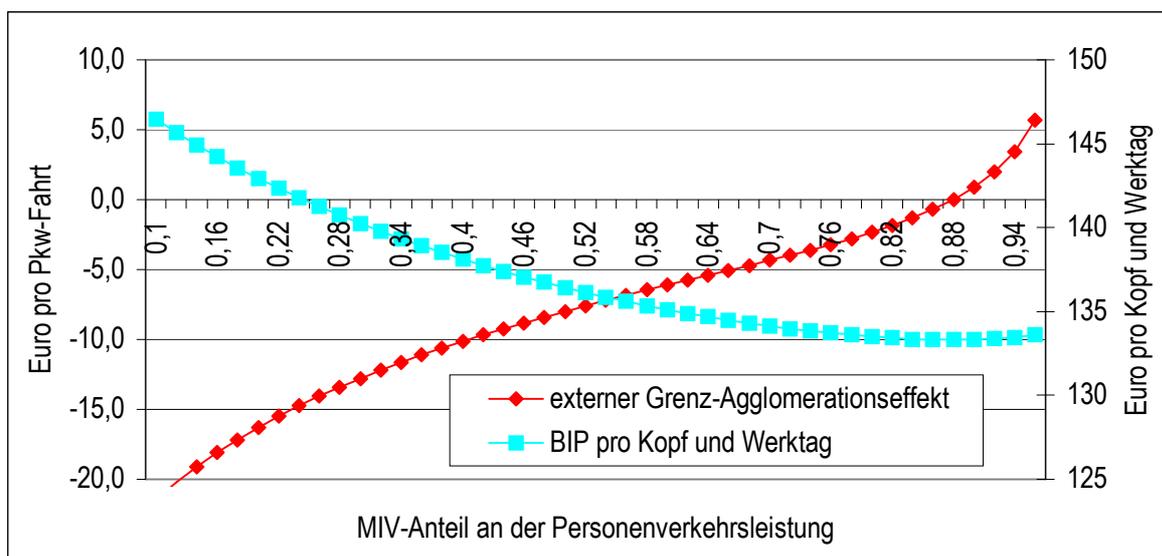
Unter Annahme 1)⁹⁵ ergeben sich zur Verkehrsspitze die gezeigten kurz- und langfristigen externen Grenz-Agglomerationseffekte als Funktion des MIV-Anteils. Die relative Dichte d im Ausgangszustand (vom MIV-Anteil noch unbeeinflusst) ist 1. Der langfristige externe Agglomerationseffekt ergibt sich, wenn die Bevölkerungsdichte dem MIV-Anteil an der Personenverkehrsleistung so angepasst wird, dass sich laut Gleichung (14) maximale Erreichbarkeit ergibt.

Bei Annahme 1 ergibt sich für die Wiener Verkehrs- und Produktivitätsverhältnisse die Summe des kurz- und langfristigen externen Grenz-Agglomerationseffektes pro Pkw-Fahrt mit $-6,5$ Euro. Die Abweichung zwischen dem oben errechneten Kurzfrist-Wert von $-7,9$ Euro und dem Summenwert bedeutet, dass sich ein langfristiger Grenz-Agglomerationseffekt von etwa $1,4$ Euro ergibt. Der Grund dafür ist, dass die derzeitige Dichte Wiens etwa 7% über jener Dichte liegt, die gemäß Erreichbarkeitsmodell (Gleichungen (13) und (14)) maximale Erreichbarkeit ermöglichen würde. Wäre die durchschnittliche relative Dichte Wiens genau auf jenem Wert, der beim gegebenen MIV-Anteil von $0,58$ die maximale Erreichbarkeit ermöglicht, dann müsste sich ein langfristiger externer Grenz-Agglomerationseffekt von Null ergeben (d.h. keine Dichte-Änderung, da der Zielwert gemäß Hypothese I bereits erreicht ist.)

⁹⁵ alle Fahrten sind wirtschaftlich gleich wichtig = Untergrenze für absolute Größe der externen Grenz-Agglomerationseffekte

Besonders interessant ist es, dem weiteren Verlauf der Linie maximaler Erreichbarkeit in die Richtung höherer MIV-Anteile zu folgen. Bei einem MIV-Anteil von 0,88 erreicht der Grenz-Agglomerationseffekt laut Berechnungsmodell Null und wird bei weiterem Anstieg des MIV-Anteils positiv. Bei den geringen Bevölkerungsdichten, die mit MIV-Anteilen über 0,88 verbunden⁹⁶ sind, erhöht demnach eine weitere Zunahme des MIV-Anteils die Erreichbarkeit. Dieses Ergebnis erscheint plausibel. Es deckt sich mit der Alltags-Erfahrung, dass in dünn besiedelten Gebieten in der Regel die Erreichbarkeit durch Umstieg vom ÖV zum Pkw verbessert wird, während die gegenseitige Behinderung durch den gegenüber dem ÖV höheren Platzbedarf des MIV kaum ins Gewicht fällt.

Abb. 27: Gesamter externer Grenz-Agglomerationseffekt bei Spitzenverkehr bei Variation von MIV-Anteil und Bevölkerungsdichte entlang der Linie maximaler Erreichbarkeit



Quelle: eigene Berechnungen

Unter der Annahme einer Elastizität der totalen Faktorproduktivität bezüglich der Erreichbarkeit von 0,06 ergibt sich der dargestellte Verlauf des externen Grenz-Agglomerationseffektes pro Pkw-Fahrt, wenn sich MIV-Anteil und Bevölkerungsdichte entlang der Linie maximaler Erreichbarkeit verändern.

⁹⁶ Zur Erinnerung: Die Bevölkerungsdichte wird hier bei jeder Änderung des MIV-Anteils an der Verkehrsleistung „optimiert“, so dass sich laut Berechnungsmodell (Gleichung 13) bzw. 14)) maximale Erreichbarkeit ergibt.

3.6 Überprüfung von Hypothese II: Übertreffen verkehrsbedingte Agglomerationseffekte andere externe Effekte des Verkehrs?

Laut Hypothese II sind externe Agglomerationseffekte durch den Einfluss der Verkehrsmittelwahl auf die Erreichbarkeit und in weiterer Folge auf die Wertschöpfung pro Arbeitsplatz nach ihrem Absolutbetrag größer als andere externe Effekte des Verkehrs. Wie in Kapitel 6.3.5 diskutiert, können in Städten externe Kosten des Verkehrs durch Lärm, Abgase und Unfälle zusammengenommen etwa 30 bis 40 Cent pro PCU-Kilometer erreichen. Dagegen können externe Kosten gegenseitiger Behinderung (externe Staukosten) derzeit in Wien zur Verkehrsspitze mit etwa 170 Cent pro PCU-Kilometer oder 860 Cent pro durchschnittlicher PCU-Fahrt im innerstädtischen Straßennetz (ohne Autobahnen und Schnellstraßen) beziffert werden (siehe Abb. 42). Um Hypothese II zu überprüfen, sind daher die verkehrsbedingten externen Agglomerationseffekte in erster Linie mit den externen Effekten gegenseitiger Behinderung (externe „Staukosten“) zu vergleichen. Dazu wird wie in Kapitel 3.5 der MIV-Anteil bzw. der MIV-Anteil und die relative Dichte bei Spitzenverkehr variiert, wobei diesmal die externen Stau-Grenzkosten betrachtet werden.

3.6.1 Externe Stau-Grenzkosten bei Variation von Bevölkerungsdichte und MIV-Anteil

Die externen Stau-Grenzkosten pro Kilometer bei Spitzenverkehr⁹⁷ $K_{SG}(TN_S)$ werden in Kapitel 6.3 gemäß Gleichung (49) errechnet. Damit sich die Werte pro Pkw-Weg ergeben, ist $K_{SG}(TN_S)$ mit dem durchschnittlichen Weglängen-Anteil im niederrangigen innerstädtischen Straßennetz (4,98 km, siehe Kap. 6.1.2) zu multiplizieren. Wenn die Dichte variiert wird, ist auch der laut Gleichung (7) angenommene Einfluss der relativen Bevölkerungsdichte auf die Weglänge mit zu berücksichtigen. Weil es hier um Grenzkosten der Verlagerung von Personenverkehr vom oder zum ÖV geht, muss auch noch berücksichtigt werden, dass auch der ÖV Straßenkapazität beansprucht und dass daher die effektive Änderung der Verkehrsstärke pro zusätzlicher oder entfallender Pkw-Fahrt nur $\pm 0,87$ PCU-Fahrten beträgt.⁹⁸

$$(30) \quad K_{SG}(TN_S, I, d) = K_{SG}(TN_S) * 0,87 * 4,98 * d^{-1/2} \text{ [Euro/Pkw-Fahrt]}$$

Weiters ist zu berücksichtigen, dass sich KT , der Mittelwert des Zeitkostensatzes pro PCU-Minute, mit dem MIV-Anteil verändert. Damit ergibt sich insgesamt durch Einsetzen von Gleichung (49) für $K_{SG}(TN_S)$

$$(31) \quad K_{SG}(TN_S, I, d) = TN_S * KT(AI) * (2,23/0,9 * (1/(2-TN_S))^2 + 2 * TN_S / (2-TN_S)^3) + 0,23 * 0,87 * 4,98 * d^{-1/2} \text{ [Euro/Pkw-Fahrt]}$$

⁹⁷ normierte Verkehrsstärke TN bei Spitzenverkehr = TN_S

⁹⁸ Siehe Kapazitätsbeanspruchung laut Tabelle 10.

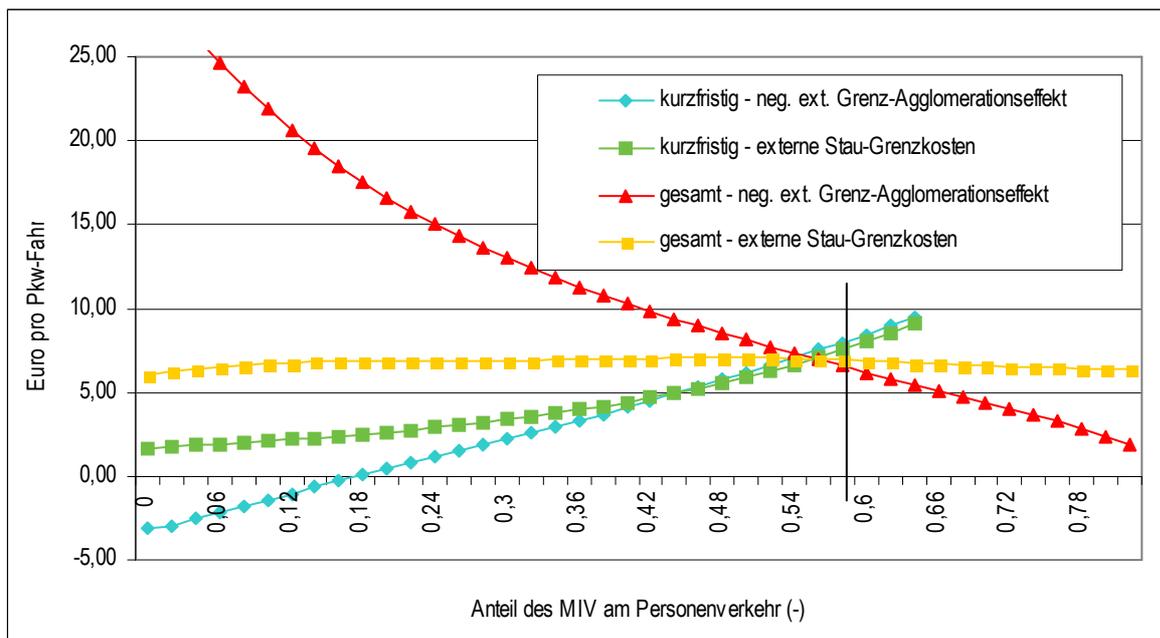
Der jeweilige Mittelwert der Zeitkosten pro PCU-Minute $KT(AI)$ ergibt sich aus der Summe der gewichteten Zeitkosten der einzelnen Verkehrsarten pro PCU-Minute.

$$(32) \quad KT(AI) = (TI(AI) * KT_{MIV} + T\ddot{O}(AI) * KT_{\ddot{O}V} + TL * KT_{Lkw}) / (TI(AI) + T\ddot{O}(AI) + TL) \quad [\text{Euro/PCU-Minute}]$$

Die Verkehrsstärke-Anteile TI , $T\ddot{O}$ und TL werden gemäß Gleichung (5) und (6) aus dem MIV-Anteil errechnet. Wird bei Spitzenverkehrsstärke durch Variation des MIV-Anteils die „Erreichbarkeitsfläche“ entlang einer Linie konstanter Dichte durchlaufen, liefert Gleichung (31) die kurzfristigen externen Stau-Grenzkosten bei der gegebenen Bevölkerungsdichte. Wird der MIV-Anteil und die relative Bevölkerungsdichte d entlang der Linie maximaler Erreichbarkeit variiert, liefert Gleichung (31) jene externen Stau-Grenzkosten, die sich durch die Änderung des MIV-Anteils und die dadurch verursachte Änderung der Bevölkerungsdichte ergeben.

3.6.2 Vergleich externer Staukosten mit externen Agglomerationseffekten

Abb. 28: Vergleich externer Stau-Grenzkosten und negativer externer Grenz-Agglomerationseffekte (Es gilt Annahme 1 und $\varepsilon_A = 0,06$, relative Dichte d im Ausgangszustand = 1)



Quelle: eigene Berechnungen

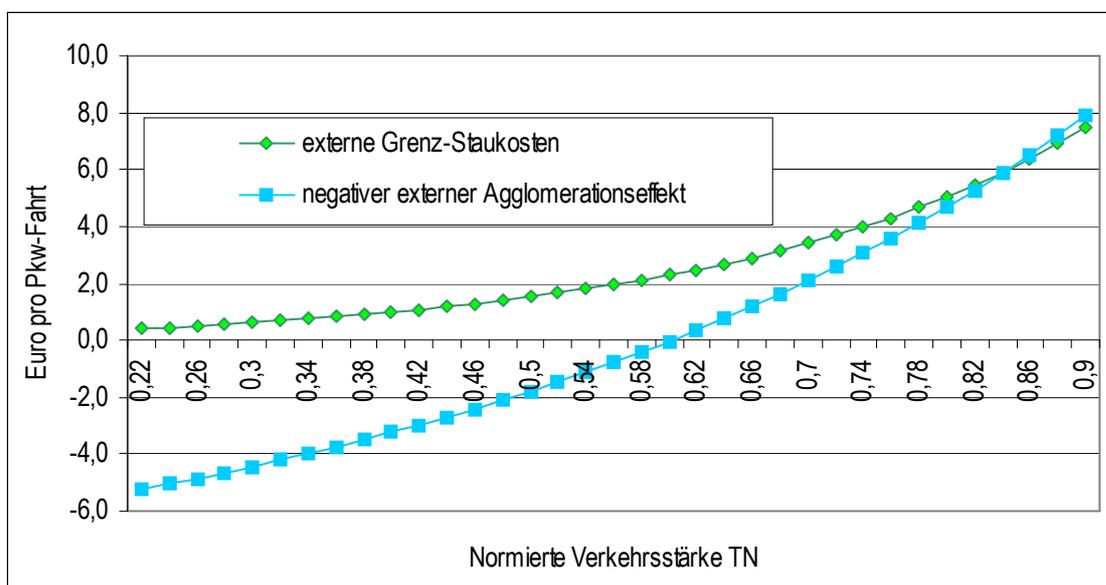
„Kurzfristig“ sind jene externen Effekte, die bei konstanter Bevölkerungsdichte auftreten. Die mit „gesamt“ bezeichneten externen Effekte schließen auch die Wirkung der durch Änderung des MIV-Anteils verursachten Änderung der Bevölkerungsdichte ein.

Mit umgekehrtem Vorzeichen – negativ statt positiv – können die externen Agglomerationseffekte mit den externen Staukosten - ebenfalls ein negativer externer Effekt - verglichen werden. Wie Abbildung 28 zeigt, ergeben sich bei MIV-Anteilen unter etwa 0,55 selbst bei Minimum-Annahmen – Annahme 1) sowie $\varepsilon_A = 0,06$ – negative

externen Grenz-Agglomerationseffekte, die größer sind als die externen Grenz-Staukosten. Bei MIV-Anteilen über 0,55 bewirkt das Absinken der Bevölkerungsdichte des Ausgangszustandes (relative Dichte = 1) auf die Dichte, die bei gestiegenem MIV-Anteil maximale Erreichbarkeit ermöglicht, dass die Staukosten sinken. Die kurzfristigen externen Stau-Grenzkosten werden unterhalb eines MIV-Anteiles von etwa 0,4 größer als der kurzfristige externe Grenz-Agglomerationseffekt. Interessant ist auch der Vergleich von kurzfristigem verkehrsbedingtem Agglomerationseffekt und Staukosten bei unterschiedlich hohen Verkehrsstärken und konstantem MIV-Anteil im Tagesverlauf. Hier ergibt sich für externe Staukosten und Agglomerationseffekt zu den Spitzenstunden des Verkehrs bei Annahme 1 und Elastizität $\varepsilon_A = 0,06$ etwa der gleiche Wert. Bei Annahme 2 und Elastizität $\varepsilon_A = 0,18$ wäre, wie in Tabelle 7 gezeigt, der externe Agglomerationseffekt etwa zweimal und bei Annahme 2 und Elastizität $\varepsilon_A = 0,18$ etwa sechsmal so groß wie die Staukosten.

Zusammenfassung: Wenn bezüglich der Elastizität ε_A und bezüglich der für die Produktivität relevanten Anteile des Personenverkehrs eine über der Minimum-Annahme liegende Annahme getroffen wird, liefert das verwendete Berechnungsmodell in dem für Wien relevanten Bereich der Verkehrsstärken und MIV-Anteile Werte, welche die Hypothese II unterstützen.

Abb. 29: Vergleich kurzfristiger Grenz-Staukosten und negativer Grenz-Agglomerationseffekte bei konstantem MIV-Anteil (Es gilt Annahme 1 sowie $\varepsilon_A = 0,06$, $l = 0,58$ und $d = 1$)



Quelle: eigene Berechnungen

Unter Minimum-Annahmen sind externe Staukosten und Agglomerationseffekt zu den Spitzenstunden des Verkehrs etwa gleich groß. Bei Annahme 2 und Elastizität $\varepsilon_A = 0,18$ wäre der externe Agglomerationseffekt etwa sechsmal größer als die externen Staukosten.

4 Diskussion der Ergebnisse

Dieses Kapitel soll der Verortung der hier vertretenen Hypothesen innerhalb der laufenden Diskussion zum Thema der Verknüpfung von Verkehr und Stadtentwicklung dienen. Zunächst geht es um die Behandlung der für diese Arbeit relevanten Fragen im klassischen Stadtmodell der Stadt-Ökonomik und dann um spezielle Thesen zum Zusammenhang der Bevölkerungsdichte mit dem Einkommen, der Reisegeschwindigkeit und der Verkehrsmittelwahl.

4.1 Verkehr, Bevölkerungsdichte und externe Agglomerationseffekte in der Stadtökonomik

4.1.1 Aufbau des monozentrischen Stadtmodells

In einem monozentrischen Modellansatz (Alonso, 1964) sind alle Arbeitsplätze im Stadtzentrum (CBD = central business district) konzentriert. Die Gleichgewichtsbedingung des Immobilienmarktes besagt, dass ein Haushalt mit durchschnittlichen Präferenzen im gesamten Stadtgebiet, das heißt bei jeder Weglänge x zum Zentrum, bei optimalem Ressourceneinsatz für Wohnen und ein zusammengesetztes Gut c (steht für alle übrigen Konsumgüter) gleich hohen Nutzen u_0 erreicht. Dem Haushalt steht ein Einkommen y zur Verfügung, das auf die Kosten der Wege zum Zentrum $t \cdot x$, das zusammengesetzte Gut c (mit dem Preis p_c) und die Wohnkosten $q \cdot p(x)$ aufgeteilt wird. Dabei ist q die Wohnfläche und $p(x)$ ist die Miethöhe, die von der Distanz zum Zentrum abhängt. t ist die Höhe der generalisierten privaten Kosten (Zeitaufwand und Geld) pro Weglängeneinheit. Die Budgetrestriktion (verfügbares Einkommen) der Haushalte ergibt sich mit

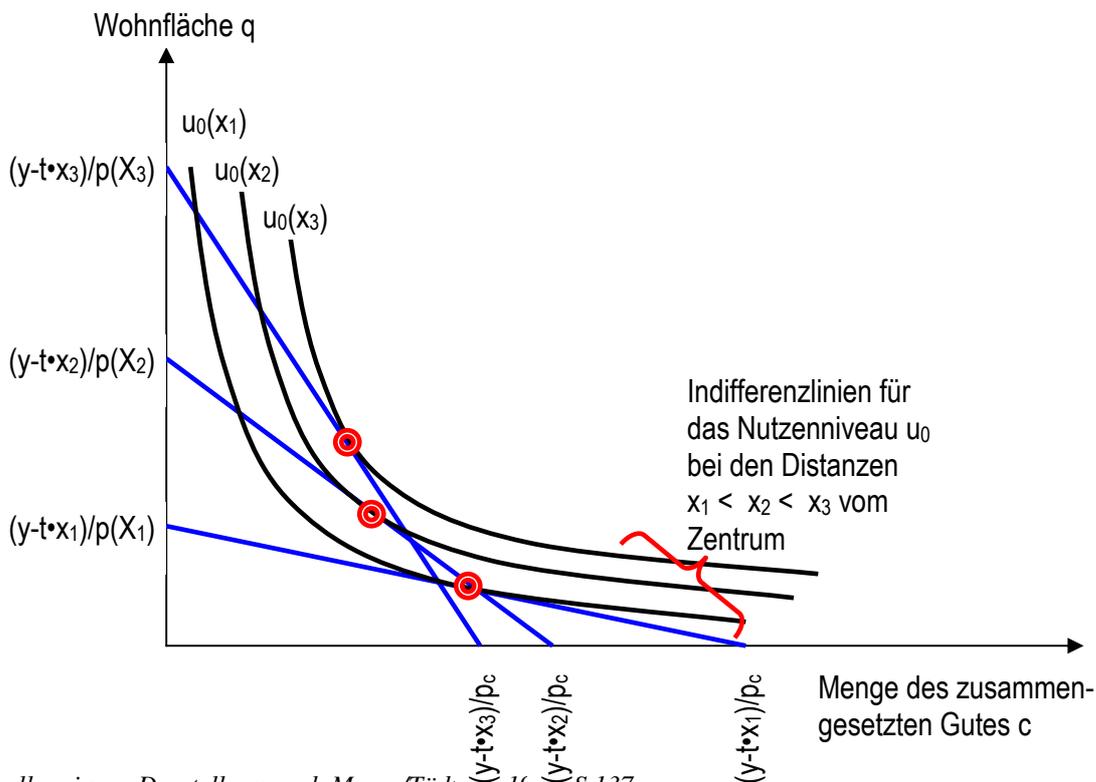
$$(33) \quad y - t \cdot x = q \cdot p(x) + c \cdot p_c$$

Je nach Entfernung zum Zentrum maximieren die Haushalte nach diesem vereinfachten Modell ihren Nutzen durch die jeweils bevorzugte Aufteilung ihrer verbleibenden Mittel zwischen Wohnfläche und dem zusammengesetzten Gut c , so dass sich der Nutzen u_0 ergibt:

$$(34) \quad u(c, q, x) = \max_q (y - t \cdot x - p(x) \cdot q, q) = u_0$$

Aus der Entscheidung der Haushalte ergibt sich eine mit der Entfernung x sinkende Rentengebots-Funktion⁹⁹, die ihrerseits über den Immobilienmarkt eine mit der Entfernung x sinkende Bevölkerungsdichte bewirkt.

⁹⁹ maximale Zahlungsbereitschaft für Wohnungsmiete

Abb. 30: Ableitung des Rentengebotes $p(x)$ aus Indifferenzlinien

Für den Haushalt mit durchschnittlichem Einkommen y und durchschnittlichen Präferenzen muss im ganzen Stadtgebiet das Nutzenniveau u_0 erreicht werden. Das Rentengebot $p(x)$ ist daher genau so groß, dass die Budgetgerade (blau) die Indifferenzlinie $u_0(x)$ tangiert. Die Indifferenzlinien verschieben sich mit der Entfernung nach links oben, weil bei höheren Verkehrskosten mehr Wohnfläche und mehr vom zusammengesetzten Gut erforderlich ist, um das geforderte Nutzenniveau zu erzielen.

4.1.2 Bevölkerungsdichte und Verkehr im klassischen Stadtmodell

Nach dem klassischen Stadtmodell (Alonso, 1964) ist die Bevölkerungsdichte in Städten abhängig vom Rentengebot und dieses ergibt sich aus der Lösung eines Optimierungsproblems, bei dem die Kosten des Pendelverkehrs eine entscheidende Rolle spielen (siehe Gleichung (34)). Kosten des Pendelverkehrs werden ihrerseits durch Stau beeinflusst. Stau wird in den ökonomischen Stadtmodellen zu einem Problem der Aufteilung der Stadtfläche zwischen Bauland und Straßennetz vereinfacht (Arnott, 1979, Kanemoto 1977, Pines und Sadka 1985). Die Dichten, die sich letztlich aus dem Zusammenspiel von Bauland-/Straßen-Anteil, externen Kosten des Verkehrs und Kosten des Pendelverkehrs ergeben, können je nach dem exogenen festgelegten oder sich endogen einstellenden Anteil der Straßenfläche um Größenordnungen variieren (Wheaton, 1998, S. 271).

Das monozentrische Stadtmodell basiert auf einer Randbedingung für das Rentengebot – der landwirtschaftlichen Bodenrente – und einem Anstieg der Rentengebotsfunktion mit sinkender Entfernung zum Stadtzentrum, aus dem ein Anstieg der Bevölkerungsdichte folgt. Die Dichte-Funktion muss durch einen Parameter kalibriert werden, damit als weitere Randbedingung erfüllt wird, dass das Integral der Bevölkerungsdichte über die gesamte Stadtfläche die Bevölkerungszahl der Stadt ergibt. Entscheidend für die Bevölkerungsdichte nach dem monozentrischen Stadtmodell ist weiters die Einkommens-Elastizität der Wohnfläche bzw. der nachgefragten Bauland-Fläche (siehe Gleichung (35)). Über die Größe dieses Parameters bestehen große Unsicherheiten. Zum Beispiel gibt es alleine für Städte der USA Angaben, die zwischen 0,33 und 1,4 schwanken (Brueckner und Fansler, 1983, S. 479-482, McGrath, 2005, S. 8).¹⁰⁰

Die Konzeption des monozentrischen Stadtmodells lässt erwarten, dass – soweit tatsächlich eine monozentrische Struktur vorliegt – relative Änderungen der Bevölkerungsdichte besser vorhersagbar sein sollten als deren absolute Größe. Das zeigt sich in einer Untersuchung über die Entwicklung der Bevölkerungsdichte, die die größten städtischen Agglomerationen der USA zwischen den Jahren 1950 und 1990 erfahren haben (McGrath 2005). McGrath stellt fest, dass bei einem gesamten Flächenwachstum der US-Städte um durchschnittlich 36 % pro Dekade¹⁰¹ ein Flächenwachstum um 26% pro Dekade (oder 2,3 % pro Jahr) nicht durch Änderungen der konventionellen ökonomischen Faktoren¹⁰² erklärt werden kann (McGrath 2005, S. 8).¹⁰³ Zusammenfassend stellt McGrath fest, dass weitere Forschung notwendig sei, um zu klären, ob die Ursachen dieser erheblichen Abweichungen in einem Marktversagen zu suchen sind - also Zeichen einer ineffizienten Verkehrs- und Siedlungsentwicklung sind – oder ob sie erwünschte Marktprozesse widerspiegeln.¹⁰⁴ Der Weg über das klassische Stadtmodell erscheint daher nicht geeignet, einen Zusammenhang zwischen Verkehr bzw. Verkehrsmittelwahl und Bevölkerungsdichte befriedigend zu modellieren. Das gilt vor allem dann, wenn dieses Modell nicht nur für Städte eines Landes sondern weltweit Gültigkeit haben soll.

¹⁰⁰ McGrath, 2005, S. 8: „The elasticity of land area with respect to income is 0.33, which also stands in stark contrast to Brueckner and Fansler’s estimate of 1.4.”

¹⁰¹ Die urbanisierte Fläche der 33 bevölkerungsreichsten Stadtregionen ist von 8010 Quadratmeilen im Jahr 1950 auf 27097 Quadratmeilen im Jahr 1990 gewachsen.

¹⁰² Bevölkerung, Verkehrskosten, Einkommen und landwirtschaftliche Bodenrente

¹⁰³ Im Gegensatz zur deren absoluter Größe sind jedoch laut McGrath fast 90 % der Variation der Größe der Stadtgebiete auf Grund von Änderungen der Bevölkerungszahl, des Einkommens, der Verkehrskosten und der landwirtschaftlichen Bodenrente vorhersagbar (McGrath, 2005, S. 8).

¹⁰⁴ McGrath, 2005, S. 9: „Further research is needed to ascertain if the unexplained increases in urban land areas stem solely from nonmarket factors, such as market failures in the development process, or are the result of other economic factors such as emergence of multiple employment subcenters or a fundamental shift in consumer preferences.“

4.1.3 Einfluss des Verkehrs auf externe Agglomerationseffekte

Venables untersucht in seiner Studie „Evaluating urban transport improvements“ (Venables, 2004), ob durch den Ausbau der Verkehrs-Infrastruktur über die Einsparung von Reisezeit hinaus auch ein Gewinn an positiven externen Agglomerationseffekten erzielt werden kann. Venables geht davon aus, dass durch Verbesserungen des städtischen Verkehrsnetzes die generalisierten Kosten des Pendelverkehrs gesenkt werden. Dies führe dazu, dass die Erwerbsbevölkerung der betreffenden Stadt zunimmt.¹⁰⁵ Mit dem Wachsen des Arbeitsmarktes sei eine Zunahme der totalen Faktor-Produktivität verbunden. Erträge durch den Zuwachs an Produktivität werden mit dem Zwei- bis Fünffachen der Kostenersparnis durch verringerte Reisezeit beziffert (Venables, 2004, S. 12).

Die Studie “Variable returns to agglomeration and the effect of road traffic congestion” (Graham, 2005, S. 103-120) geht der Frage nach, ob Stau zu Verlusten an positiven externen Agglomerationseffekten führen kann. Graham untersucht dazu auf Basis empirischer Daten aus Großbritannien die Größe der Agglomerationswirkung auf die totale Faktorproduktivität in unterschiedlichen Branchen. Als Maß für den Grad der Agglomeration verwendet er eine „effektive Dichte“, die gleich konzipiert ist wie das in dieser Arbeit verwendete Maß der Erreichbarkeit.¹⁰⁶ Graham verwendet zwei unterschiedliche Maße der effektiven Dichte. Zur Beschreibung des Verkehrswiderstandes zwischen Zielen und Quellen werden im Fall der effektiven Dichte UD die Luftliniendistanz und im Fall der effektiven Dichte UG die generalisierten Kosten verwendet (Graham, 2007, S. 108). Nach der Hypothese von Graham spiegelt das Verhältnis zwischen beiden Arten der effektiven Dichte die Wirkung von staubedingten Zeitverlusten wieder, wobei die Agglomerations-Elastizität der totalen Faktorproduktivität bei Verwendung von UD als Maß für den Agglomerationsgrad kleiner sein muss als bei Verwendung von UG (Graham, 2007, S.109).¹⁰⁷

Die Ergebnisse der Analyse empirischer Daten für England zeigen den erwarteten Zusammenhang. Graham leitet daraus ab, dass Stau eine entscheidende Rolle dafür spielt, dass positive Agglomerationseffekte eingeschränkt werden und dass Stau das erreichbare Produktivitätsniveau reduzieren kann (Graham, 2007, S. 116).¹⁰⁸ In einem Beispiel gibt

¹⁰⁵ Bei der Berechnung dieser Zunahme berücksichtigt Venables auch den Einfluss der Einkommensteuer.

¹⁰⁶ Statt der Annahme eines kontinuierlichen Siedlungsgebietes wird die Erreichbarkeit auf Grund der Entfernung bzw. der Reisezeit zu einzelnen Wohnbezirken (wards) bestimmt.

¹⁰⁷ Mit steigender Dichte bleibt die effektive Dichte UG (und damit auch relative Änderungen von UG) immer starker hinter der effektiven Dichte UD zurück (Grund: sinkende Reisegeschwindigkeit). Die effektive Dichte ist das Maß für den Agglomerationsgrad, dessen Änderung mit der jeweils feststellbaren Änderung der Faktorproduktivität verglichen wird, um zur Agglomerationselastizität zu gelangen.

¹⁰⁸ These two observations offer evidence consistent with the hypothesis that urban road traffic congestion plays a significant role in ‘constraining’ the benefits of agglomeration, and consequently, that it may serve to reduce achievable levels of urban productivity.

Graham an, dass die Produktivität (gemeint ist die totale Faktorproduktivität) im Zentrum von London um 1 % steigen würde, wenn die Reisegeschwindigkeit durch geeignete Maßnahmen¹⁰⁹ um 5 % zunehmen würde (Graham, 2007, S. 118).

4.1.4 Auswirkung der Internalisierung externer Effekte des Verkehrs auf die Bevölkerungsdichte

Die Frage, welche Dichte Städte bei Internalisierung externer Effekte des Verkehrs erreichen können, wird in dem Artikel "Land Use and Density in Cities with Congestion" (Wheaton, 1998) untersucht. Auf Basis des klassischen Stadtmodells wird gezeigt, dass der Immobilienmarkt dann die aus ökonomischer Sicht optimale Bevölkerungsdichte und optimale Aufteilung zwischen Verkehrsfläche und Bauland sicher stellt, wenn die externen Effekte des Verkehrs internalisiert sind (Wheaton, 1998, S. 259¹¹⁰ und S. 266).¹¹¹

Wheaton stellt die Frage, welche Dichte eine Stadt erreichen würde, wenn im Fall B die externen Staukosten internalisiert wären¹¹², verglichen mit jener Dichte, die sich einstellen würde, wenn in einem Fall A externe Kosten des Straßenverkehrs zu Marktverzerrungen führen. Akteure, deren Verhalten im Fall A modelliert wird, wären rational handelnde Landbesitzer und Immobilienentwickler, welche die Bodenrenten zu maximieren suchen. Akteur im Fall B wäre ein Monopolist, der die Gesamtsumme aus dem Ertrag des Straßennetzes und den Erträgen des Baulandes zu maximieren sucht (Wheaton, 1998, S. 261)¹¹³, und der dadurch alle externen Effekte internalisiert (Wheaton, 1998, S. 260).¹¹⁴ Wheaton rechnet numerische Beispiele für die Fälle A und B durch, wobei er die beiden Fälle jeweils für zwei Varianten der Bemessung der Straßenkapazität untersucht: Einmal ist die Aufteilung in Straßenfläche und Bauland ökonomisch optimal. In der zweiten Variante ist für das gesamte Stadtgebiet ein fixer Anteil des Straßennetzes von 30 % der Gesamtfläche exogen vorgegeben. Wheaton verwendet ein monozentrisches Stadtmodell mit den für Städte der USA typischen Modellparametern.

Das Ergebnis der Berechnungen zeigt, dass die Bevölkerungsdichte bei Internalisierung externer Staukosten besonders in Zentrumsnähe stark zunehmen würde (Wheaton, 1998, S. 269f.). Die errechneten maximalen Bevölkerungsdichten in Zentrumsnähe liegen zwischen

¹⁰⁹ Graham nennt „a comprehensive congestion charging scheme“.

¹¹⁰ If the appropriate road tolls are used to correct the congestion externality then private market land rents were shown to provide the right price signal for allocating land to transportation capacity

¹¹¹ The marginal benefit of expanding capacity and reducing congestion must equal the full shadow rent of land Thus in the 'first best' city, the use of land for either highway capacity or residences must be based on the full and optimal shadow rent."

¹¹² Internalisierung könnte z.B. durch eine Stadtmaut erfolgen (Wheaton 1998, S. 265).

¹¹³ Developing land to its highest use is what multiple individual property owners will achieve through trade. Developing land to yield the highest aggregate rent is what a single monopolistic land owner seeks to achieve.

¹¹⁴ A land use pattern that maximizes aggregate rent is shown to fully internalize all externalities,...

90 und 400 Personen pro Hektar (Wheaton, 1998, S. 269f.).¹¹⁵ Das ist das 6- bis 25-fache der durchschnittlichen Bevölkerungsdichte von Großstädten der USA. Wheaton stellt in seinen Schlussfolgerungen fest, dass Zunahmen der Bevölkerungsdichte um „viele Größenordnungen“¹¹⁶ stattfinden könnten, die mit erheblichen Wohlfahrtsgewinnen verbunden wären (Wheaton, 1998, S. 271).

4.1.5 Zusammenfassende Schlussfolgerung:

In der stadtökonomischen Literatur werden sowohl Einflüsse des Personenverkehrs auf die Siedlungsdichte als auch Einflüsse auf externe Agglomerationseffekte behandelt. Der Aufgabenstellung dieser Arbeit kommt die Arbeit von Wheaton (Wheaton, 1998) am nächsten. Hier sind allerdings externe Agglomerationseffekte nicht berücksichtigt. Ebenso ist – für amerikanische Verhältnisse durchaus verständlich – eine Änderung des Modal-Split nicht im Berechnungsmodell vorgesehen. Damit entfällt unter anderem die Möglichkeit, externe Effekte dem Umstieg zwischen MIV und ÖV zuzuordnen. Vorliegende Arbeiten zum Zusammenhang von Verkehr und Stadtentwicklung zeigen, dass es in Städten und hier speziell in deren Zentren durch negative externe Effekte des Verkehrs zu einem Marktversagen bezüglich der Entwicklung der Bevölkerungsdichte kommt. Es zeigt sich jedoch auch, dass es schwierig ist, das Ausmaß des Marktversagens nach dem klassischen monozentrischen Stadtmodell zu beziffern. Dies ist unter anderem deshalb der Fall, weil Unsicherheiten bezüglich entscheidender Modell-Parameter – etwa der Einkommens-Elastizität des Flächenverbrauches für Wohnbauzwecke – bestehen. In dieser Arbeit wurde daher ein Weg gewählt, bei dem diese Unsicherheiten umgangen werden. Ein geeignetes Modell zur Vorhersage der Bevölkerungsdichte wurde auf der konkreten Triebkraft der Agglomeration – nämlich der Erreichbarkeit von Orten täglicher Aktivitäten – aufgebaut.

¹¹⁵ Wheaton gibt die Bevölkerungsdichte in Haushalten pro Quadratmeile an. Weil eine Quadratmeile genau so viele Quadratkilometer hat, wie die Zahl der Personen pro Haushalt der USA (2,59) können die Zahlen direkt in Personen pro Quadratkilometer bzw. bei Division durch 100 in Personen pro Hektar übersetzt werden.

¹¹⁶ „... many orders of magnitude ...“

4.2 Einfluss des durchschnittlichen Einkommens auf Verkehr und Stadtentwicklung

Ein gängiger Ansatz zur Erklärung der Siedlungsentwicklung ist, dass sie „eine Funktion wachsender Einkommen“ sei (Pfeiffer, 1993, S. 53). Wie alle nicht inferioren Güter wird auch Fläche mit steigendem Wohlstand vermehrt konsumiert. Dieser einfache Zusammenhang führt viele Autoren zu der Annahme, die Wohlstandsentwicklung sei kausal für den Flächenverbrauch (Hesse et al. 1998, S. 435). Die Annahme einer solchen Kopplung ist allerdings nur eine Vermutung, denn einem gleichförmigen Verlauf zweier Größen muss nicht zwangsläufig eine Kausalbeziehung zu Grunde liegen (Bracke, 2004, S. 14). Die Gefahr solcher Schein-Kausalitäten ist bei der Analyse des Zusammenhanges zwischen Wohlstand und Flächenverbrauch besonders hoch. Wenn es beispielsweise zuträfe, dass der Flächenverbrauch vom Anteil des MIV am Personenverkehr abhängt und dass die Pkw-Nutzung mit steigendem Wohlstand zunimmt, dann ergäbe sich stets auch eine positive Korrelation zwischen Flächenverbrauch und Wohlstand.

4.2.1 Bevölkerungsdichte bei Variation der Verkehrskosten

Im Folgenden werden im monozentrischen Modell, wo es um die Erreichbarkeit des Stadtzentrums (CBD) geht, zwei Fälle betrachtet: einerseits die Änderung der Verkehrskosten; andererseits die Änderung des Einkommensniveaus der gesamten Bevölkerung.

Bestimmend für die Abhängigkeit des Rentengebotes von der Distanz zum Zentrum sind letztlich die generalisierten privaten Verkehrskosten¹¹⁷ $t \cdot x$. Wenn die generalisierten privaten Kosten (Zeitaufwand und Geld) pro Weglängeneinheit des Personenverkehrs t sinken, verschiebt sich der Punkt, an dem sich ein bestimmter Betrag der Verkehrskosten $t \cdot x$ und eine bestimmte Indifferenzkurve des Niveaus u_0 (siehe Abb. 30) ergibt, in Richtung zu größeren Entfernungen x vom Zentrum. Die Rentengebotskurve wird flacher.

Ausgehend von einem gegebenen Rentengebot am Stadtrand (gegeben durch die Rente für alternative Bodennutzungen) ist der Anstieg des Rentengebotes in Richtung Zentrum und damit die erreichbare Rentenhöhe bei gegebenem Durchmesser geringer. Weil der Anstieg der Dichte proportional dem Anstieg des Rentengebotes ist, muss der Durchmesser der Stadt größer werden, um dieselbe Bevölkerungszahl zu beherbergen. Wenn die privaten Kosten des Personenverkehrs sinken, bewirkt dies eine Ausdehnung der Stadt. Der gleiche Zusammenhang gilt auch bei einem Stadtmodell mit Gleichverteilung von Bevölkerung und Orten der Aktivität.¹¹⁸

¹¹⁷ auch „Nutzerkosten“

¹¹⁸ Nach dem Potentialansatz der Erreichbarkeit sind die jeweils relevanten Ziele mit geringerem Kostenaufwand erreichbar. Nach dem Isochronen-Ansatz der Erreichbarkeit sind in gegebener Zeit mehr Ziele erreichbar, wobei Zeitkosten hier näherungsweise für die generalisierten privaten Kosten des Personenverkehrs stehen.

4.2.2 Bevölkerungsdichte bei Variation des Einkommens

Mit steigendem Einkommensniveau y steigt die Zahlungsbereitschaft für Wohnfläche; gleichzeitig steigen jedoch auch die wahrgenommenen Zeitkosten (monetäre Bewertung bzw. Zahlungsbereitschaft für Reisezeit), die im innerstädtischen Verkehr einen Großteil der generalisierten Kosten des Personenverkehrs ausmachen.¹¹⁹

Das Vorzeichen des folgenden Ausdrucks (Borck, 2005, Kap. 3, S. 13) gibt an, ob die partielle Ableitung der Steigung der Rentengebotsfunktion nach dem Einkommen y positiv, negativ oder Null ist:

$$(35) (\partial q/\partial y) \cdot (y/q) - (\partial t/\partial y)/(y/t) = 0 \text{ oder } >0 \text{ oder } <0$$

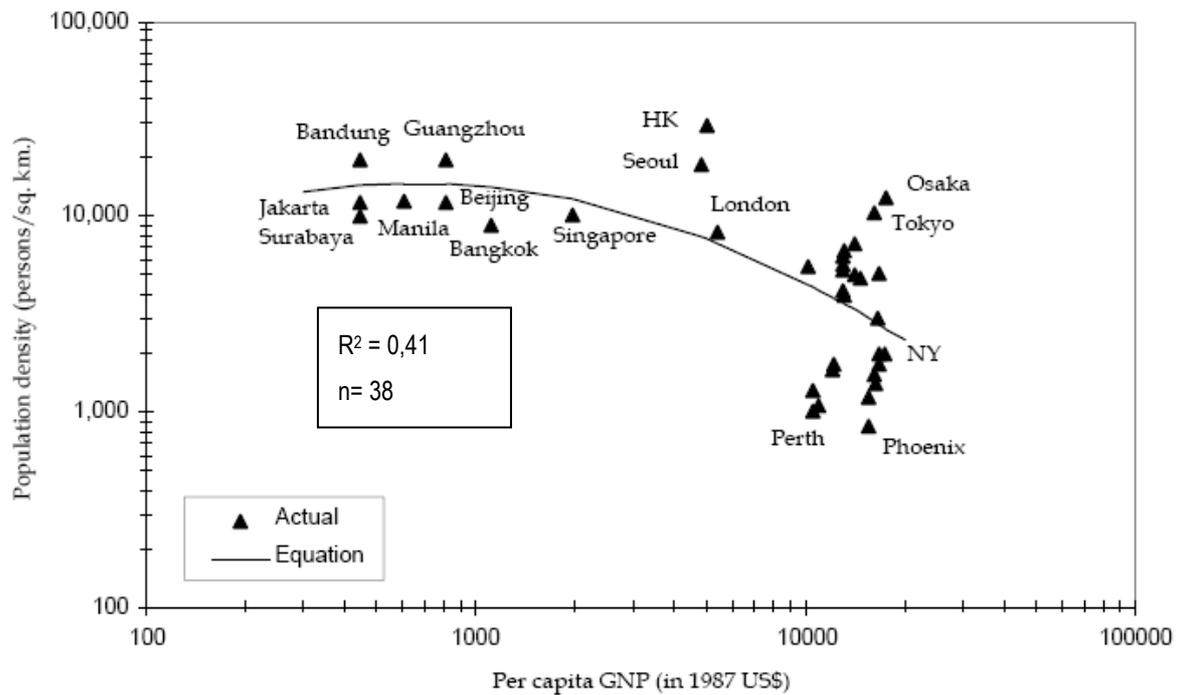
Der erste Term ist die relative Zunahme der Wohnfläche mit dem Einkommen. Der zweite Term ist die relative Zunahme der wahrgenommenen privaten Kosten des Personenverkehrs mit dem Einkommen. Der Ausdruck gibt an, ob bei Zunahme des Einkommens der Effekt der Vergrößerung der Wohnfläche überwiegt, wodurch die Rentengebotsfunktion flacher würde oder ob der Anstieg der Kosten der Fortbewegung – gemessen in Geldeinheiten – auf Grund des höheren Einkommens¹²⁰ stärker ins Gewicht fällt. Im zweiten Fall wird die Rentengebotsfunktion steiler. Von Felderer (Felderer et al. 1999, S.42) werden langfristige Einkommenselastizitäten von Wohnraum zwischen 0,6 und 1 angegeben. Im gleichen Bereich liegt die relative Änderung der privaten Verkehrskosten (zweiter Term in Gleichung (35)). Gemäß Gleichung (35) kann daher die Auswirkung des Einkommensniveaus auf den Verlauf der Rentengebotsfunktion und in weiterer Folge auf die Bevölkerungsdichte gering oder sogar Null sein.

Diese Annahme wird durch empirische Beobachtungen unterstützt, die darauf hindeuten, dass zwischen dem durchschnittlichen Einkommen der Bevölkerung von Städten und deren durchschnittlicher Bevölkerungsdichte keine direkte Korrelation und daher vermutlich auch keine Kausalbeziehung hergestellt werden kann. In einem weltweiten Vergleich von wohlhabenden Städten mit vergleichbar hohem Einkommen der Bevölkerung ist eine Variation der Bevölkerungsdichte im Verhältnis von mehr als 10:1 zu beobachten (Ingram und Liu, 2000, S. 5). Zur Erklärung der starken Dichte-Unterschiede wird von den Autoren eine verzögerte Anpassung der historisch gewachsenen Dichte herangezogen (Ingram und Liu, 2000, S. 4).¹²¹

¹¹⁹ Beispiel: variable Pkw-Kosten pro Person = 15 Cent pro Kilometer, Zeitkosten = 15 Cent pro Personen-Minute, Reisegeschwindigkeit zur Verkehrsspitze = 20 km/h, Zeitkosten pro km = 45 Cent pro Minute → Zeitkosten sind 75% der generalisierten Kosten.

¹²⁰ Mit dem Einkommen steigt der in Geld ausgedrückte Wert von Reisezeit, die – siehe Fußnote oben – bis zu drei Viertel der generalisierten privaten Kosten (auch „Nutzerkosten“) ausmacht.

¹²¹ „This variation in population density in high income cities reflects the impact of historical paths of development on urban form.“

Abb. 31: Pro-Kopf-Einkommen und Bevölkerungsdichte in 37 Weltstädten

Quelle: Ingram und Liu 2000, S.5

Zwischen Pro-Kopf-Einkommen und Bevölkerungsdichte zeigt sich eine schwache Korrelation. Jedenfalls scheint es keine niedrigen Dichten bei niedrigem Einkommen zu geben; dagegen variiert die Dichte in den Beispiel-Städten mit hohem Pro-Kopf-Einkommen in einer Größenordnung von etwa 10:1.

4.3 Geschwindigkeit und Bevölkerungsdichte als Lenkungsmechanismen

4.3.1 Reisegeschwindigkeit und Siedlungsentwicklung

Knoflacher hat wiederholt das Argument vertreten, dass im Verkehrssystem durch steigende Geschwindigkeit individuell nutzbarer Verkehrsmittel die Raumausdehnung zunehme (Knoflacher, 2001, S. 37). Demnach wäre für die wachsende „Zersiedelung“ in erster Linie steigende Geschwindigkeit verantwortlich. Aus diesem Argument wird die Notwendigkeit einer „Entschleunigung“ abgeleitet (Knoflacher, 2001, S.34 ff.). Dazu ist aus Sicht der Ergebnisse dieser Arbeit zu sagen, dass steigende individuelle Geschwindigkeit durch wachsenden MIV-Anteil an der Personenverkehrsleistung jedenfalls zu fallender Dichte und wachsender Ausdehnung von Städten beiträgt. Die Möglichkeit der rascheren Fortbewegung durch Umstieg zum MIV „zieht“ Wohnbevölkerung und Betriebe ins nahe Umland. Gäbe es ein Verkehrsmittel, das bei konstanter Kapazitätsbeanspruchung die Reisegeschwindigkeit der Umsteigenden erhöht, wäre mit der Verkehrsmittelwahl selbst jedoch kein negativer externer Effekt verbunden, der eine Korrektur des Marktgeschehens durch Internalisierung rechtfertigen würde.¹²² Ein allfälliger Rückgang der Bevölkerungsdichte durch ein solches Verkehrsmittel wäre ökonomisch effizient. Falls es zutrifft, dass eine wachsende Größe des effektiven Arbeitsmarktes die Produktivität steigert, würde ein Individualverkehrsmittel, das die Geschwindigkeit ohne erhöhte Kapazitätsbeanspruchung steigert, einen positiven externen Agglomerationseffekt herbeiführen, der eine Subventionierung rechtfertigen könnte. Bei Verlagerung des Personenverkehrs zum MIV nimmt allerdings die Kapazitätsbeanspruchung pro Verkehrsleistungseinheit zu. In Gebieten mit geringer Bevölkerungsdichte, wo die Auslastung der Straßenkapazitäten entsprechend gering ist, kann durch wachsenden MIV-Anteil die durchschnittliche Reisegeschwindigkeit zunehmen; dagegen sinkt sie in der Regel in Gebieten hoher Bevölkerungsdichte, wie in Kapitel 3.1.6 ausgeführt wurde. Dass wachsende Behinderung im Straßenverkehr durch den steigenden MIV-Anteil Bevölkerung und Betriebe aus dem bestehenden Stadtgebiet ins Umland treibt,¹²³ ist ein ebenso wichtiger Grund für Zersiedelung wie die raschere Fortbewegung durch Umstieg zum MIV im Umland. Sowohl Zeitverluste durch gegenseitige Behinderung als auch eine aus Netto-Verlusten an Erreichbarkeit resultierende Einbuße an Produktivität stellen negative externe Effekte dar. Solche externen Effekte können korrigierende Eingriffe in das Marktgeschehen rechtfertigen, um die Entwicklung des MIV-Anteils an der Verkehrsleistung und der Bevölkerungsdichte in Richtung optimaler Erreichbarkeit zu ermöglichen.

¹²² Das gilt allerdings nur, wenn eine allfällige Zunahme externer Unfall-, Lärm- oder Schadstoffkosten vernachlässigt werden kann.

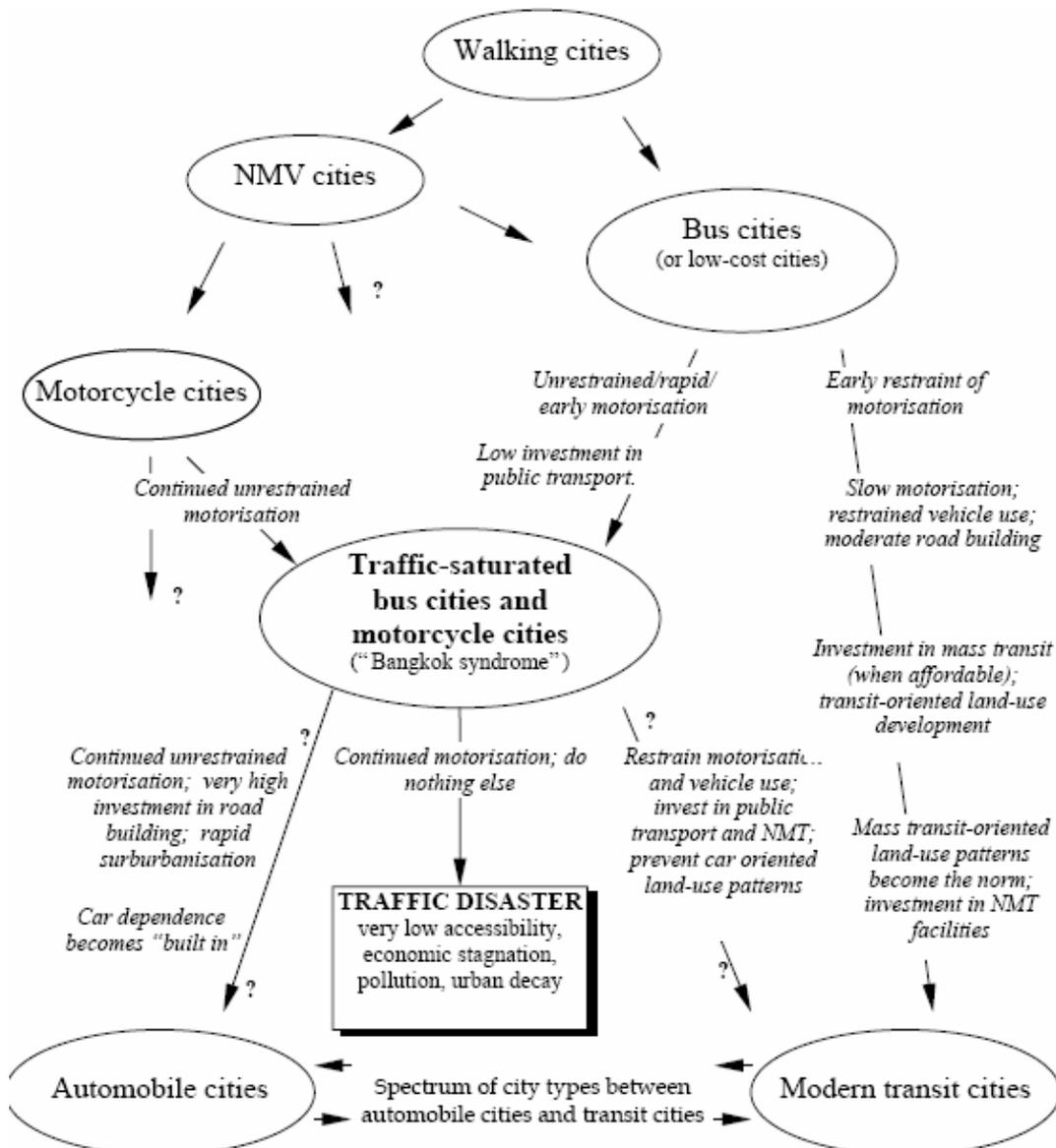
¹²³ Die Erreichbarkeit überschreitet ihr Maximum und sinkt bis hin zum Verkehrstillstand bei Überlastung der Kreuzungen („gridlock“).

4.3.2 Richtung des Wirkungsmechanismus zwischen MIV-Anteil und Bevölkerungsdichte

Die Ideengeschichte zum Thema Verkehr und Stadtentwicklung im Zeitalter der Motorisierung war zunächst geprägt von „Verkehrsbewältigung“ durch Straßenausbau in bestehenden Städten und von einem Leitbild der „autogerechten Stadt“ bei der Planung neuer Städte oder Stadtviertel (Reichow, 1959). In den Achtzigerjahren des 20. Jahrhunderts wurde als Alternative die Anpassung des Verkehrs an die städtischen Strukturen propagiert: Verkehr vermeiden, auf möglichst verträgliche Verkehrsmittel verlagern und in möglichst verträglicher Weise abwickeln. Im Zusammenhang mit der funktionalen Gliederung und Siedlungsentwicklung der Stadt steht nach wie vor die Idee der Verkehrsvermeidung im Mittelpunkt. In Umkehrung der Ausgangsthese dieser Arbeit, wonach der MIV-Anteil die Bevölkerungsdichte bestimmt, wird von zahlreichen Autoren propagiert, die Entwicklung des Verkehrs durch eine geplante und regulierte Siedlungsentwicklung und Funktionsmischung zu lenken. Ein Hoffungsgebiet ist dabei die ÖV-orientierte Siedlungsentwicklung (Transit Oriented Development - TOD). Das Kennzeichen des TOD sind ÖV-Korridore mit hoher Dichte bei gleichzeitiger Beschränkung der Bauland-Verfügbarkeit, um die Ausdehnung des Siedlungsgebietes abseits der Korridore zu verhindern (Bertaud 2002, S. 1). Parallelen zur Idee des TOD weist die „Stadt der kurzen Wege“ (Gertz, 1998) oder das Leitbild der „kompakten Stadt“ (Apel, Lehm Brock et al., 1998) auf. Das immer wiederkehrende Prinzip ist „integrierte Planung“, bei der die Siedlungsentwicklung parallel und passend zur Verkehrserschließung durch öffentlichen und nicht motorisierten Verkehr geplant wird. Von einer kompakten Stadt mit ausgewogener Nutzungsmischung wird ein möglichst niedriger Verbrauch von Verkehrsleistung erwartet. Eine Kausalbeziehung zwischen Bevölkerungsdichte als Ursache und Verbrauch von Verkehrsleistung bzw. Energieverbrauch des Verkehrs als Wirkung implizieren auch Arbeiten aus den USA und Australien (Holtzclaw, 1994; Newman und Kenworthy, 1999). Die Stärke dieser Kausalbeziehung und ihre Richtung war von Beginn an umstritten (Gordon und Richardson, 1989, S. 342-346; Hesse und Trostorff, 2000, S. 2f.). Bei voller Anerkennung kurzfristiger Erfolge müssen die Zweifel an der langfristigen Lenkbarkeit des Verkehrs alleine über eine gesteuerte Siedlungsentwicklung und ohne Internalisierung externer Effekte des Verkehrs aus Sicht der Ergebnisse dieser Arbeit bestätigt werden.

4.3.3 Hohe Dichte ist eine notwendige, aber keine hinreichende Bedingung für geringen MIV-Anteil

Abb. 32: Mögliche Entwicklungspfade des Verkehrs und der Raumordnung von Großstädten in industriellen Schwellenländern



Quelle: Barter 2000, S.27

Hohe Bevölkerungsdichte bietet Chancen, die durch entsprechendes politisches Handeln zum Tragen kommen. Es ist jedoch unsicher, ob der als „Modern transit cities“ bezeichnete Zustand auf Dauer ohne Internalisierung externer Effekte des Verkehrs politisch und finanziell haltbar ist.

Wer beispielsweise durch Subventionen und/oder Regulierungen hohe Bevölkerungsdichte erwirkt, fördert damit zwar die Fortbewegung zu Fuß und per Fahrrad, aber eine Stadt der kurzen Wege muss keineswegs eine Stadt des öffentlichen Verkehrs sein. Es wird nur zu

leicht übersehen, dass der öffentliche Verkehr kaum für kurze Distanzen geeignet ist und dass er die höchste Konkurrenzfähigkeit gegenüber dem Pkw auf langen Strecken entfaltet.¹²⁴ Denkbar wären allenfalls „Kleinstädte der kurzen Wege“ entlang eines Schienekorridors. Eine Großstadt der kurzen Wege erscheint schwer vorstellbar. Kürzere Distanzen zu potentiellen Zielen ermöglichen bei gleich langen Wegen eine größere Auswahl an Arbeits- und Konsummöglichkeiten, die auch genutzt werden. Würde eine Großstadt tatsächlich in eine Ansammlung von „urban villages“ verwandelt, müssten Haushalte und Betriebe auf großstädtische Agglomerationsvorteile verzichten.¹²⁵ Das könnte nur durch Regulierungen und Verbote erzwungen werden.

Wenn hoher MIV-Anteil durch hohen Bedarf an Straßenkapazität niedrige Bevölkerungsdichte erzwingt, dann ist der Umkehrschluss keineswegs zulässig. Kurze Wege sind auch beim Autofahren erwünscht und nützlich. Steigende Dichte als solche hat noch keinen Einfluss auf das Konkurrenzverhältnis zwischen MIV und ÖV, denn zunächst werden beide gleichermaßen durch steigende Auslastung der Kapazität des Straßennetzes verlangsamt. Erst politisch kostspielige Entscheidungen für Beschleunigung des ÖV auf Kosten des MIV oder finanziell kostspielige U-Bahn-Ausbauten können das Blatt wenden. Dass hohe Dichte als solche nicht kausal für geringen MIV-Anteil ist, haben asiatische Großstädte mit hoher Dichte – besonders Bangkok – anschaulich gezeigt (Barter, 2000, S. 25 ff.).

4.3.4 Zusammenfassende Schlussfolgerung:

Der langfristige kontinuierliche Rückgang der Bevölkerungsdichte (Ingram und Liu, 2000, S. 4 f.) und des ÖV-Anteils, der in vielen Metropolen weltweit zu beobachten ist, kann durch indirekte Maßnahmen wie Subventionen für den Ausbau hochrangiger öffentlicher Verkehrsmittel oder ÖV-orientierte Siedlungsentwicklung lange Zeit verlangsamt und unter besonders günstigen Umständen in Teilbereichen sogar aufgehalten werden. Auf Dauer und im großen Maßstab dürften jedoch „Second-Best-Lösungen“, die auf die Internalisierung der beträchtlichen externer Effekte des MIV verzichten und diese stattdessen durch kompensierende Markteingriffe beim ÖV oder beim Immobilienmarkt auszugleichen suchen, weder bezahlbar noch politisch durchsetzbar sein.

¹²⁴ Die Schwäche des ÖV liegt im Zeitaufwand für Wege von und zu Haltestellen sowie Wartezeiten. Diese Schwäche wird mit steigender Weglänge relativ zur gesamten Reisezeit immer kleiner.

¹²⁵ Größenvorteile beim Einkauf in Einkaufszentren mit großem Einzugsgebiet, Unterhaltungs- und Bildungsangebote für kleine Interessensgruppen, Agglomerationsvorteile in der Produktion unter anderem durch großen effektiven Arbeitsmarkt.

5 Schlussfolgerungen

5.1 Höhere Erreichbarkeit durch Internalisierung externer Kosten des Verkehrs

Auch ohne Internalisierung externer Kosten des MIV kann ein Ausbau des ÖV zweifellos – wenn auch teuer erkaufte – Erfolge bringen, wenn es darum geht, die Straßen vom MIV zu entlasten und die Erreichbarkeit zu erhöhen. Letztlich bleibt jedoch die Förderung des öffentlichen Verkehrs ein Wettlauf zwischen Hase und Igel, denn vieles, was den ÖV attraktiver macht, macht postwendend auch den MIV attraktiver. Sobald zum Beispiel der kostspielige U-Bahn-Ausbau den Straßenverkehr erfolgreich entlastet und flüssiger macht, könnten viele wahlfreie Personen wieder zum Auto umsteigen. Aber selbst wenn der MIV durch ausgedehnte Staus lahm gelegt wird, können verbreitete Förderungen der Pkw-Nutzung dafür sorgen, dass der öffentliche Verkehr als Alternative weiterhin unattraktiv bleibt. Eine solche „kontraproduktive Förderung“ (Köppl und Steininger, 2004) ist zum Beispiel eine dank Bauordnung errichtete firmeneigene Gratis-Tiefgarage mit Lift direkt zum Arbeitsplatz, die steuerliche Förderung des Pendelverkehrs im Pkw oder die steuerfreie Abgeltung dienstlicher Fahrten im Privat-Pkw nach Durchschnitts- statt nach Grenzkosten. Was unter diesen Bedingungen an politischen Instrumenten bleibt, sind „Restriktionen des Autoverkehrs“ oder „Kostenwahrheit“. Beides ist in der politischen Diskussion heftig umkämpft, wobei jedoch „Kostenwahrheit“ durch Internalisierung externer Kosten des Verkehrs anderen Lösungsstrategien das Argument der ökonomischen Effizienz voraus hat.

5.1.1 Das Verkehrsnetz effizient betreiben

Laut Wohlfahrtökonomik erreicht eine neoklassische Wirtschaft ausschließlich durch Marktkräfte einen Pareto-optimalen Zustand (Gravelle und Rees 1981, S. 474 ff.). Darunter versteht man einen Zustand, bei dem kein Wirtschaftssubjekt besser gestellt werden kann, ohne dass ein anderes Wirtschaftssubjekt schlechter gestellt würde. Eine derartige Wirtschaft wird als effizient bezeichnet, weil sich durch Tausch von Gütern und Ressourcen kein Zustand erreichen lässt, der von allen als besser betrachtet wird (Maier und Tödting 1992, S. 115). Die Voraussetzung dafür, dass die Entfaltung der Marktkräfte zu einem Pareto-Optimum führt, ist unter anderem, dass es weder positive noch negative externe Effekte gibt (Maier und Tödting 1992, S. 116). Externe Effekte treten im innerstädtischen Straßennetz unter anderem durch externe Staukosten¹²⁶ und durch mit der Verkehrsmittelwahl verknüpfte externe Agglomerationseffekte auf. Eine Stadtmaut für das Befahren des innerstädtischen Straßennetzes kann dazu dienen, den Nutzern der Infrastruktur die von ihnen verursachten Kosten zuzurechnen, um wohlfahrtsmindernde Fehlallokationen zu vermeiden (Nagl und Sudy, 2005, S. 10). Eine Stadtmaut in Form einer ökonomisch optimalen Straßenbenützungsgabgabe (Eichinger und Knorr, 2004, S. 367) ist

¹²⁶ Siehe Kapitel 6.3.1

auf Basis externer Grenz-Effekte¹²⁷ festzulegen (Borrmann und Peistrup 2004, S. 488), damit diese in die individuelle Abwägung privater Grenzkosten und –nutzen einfließen und damit „internalisiert“ werden. Zu beachten ist stets, dass die erwartete positive Wirkung der Internalisierung externer Kosten nur bei geeigneter Verwendung von Erträgen aus Mauten und Gebühren eintreten kann (siehe Kapitel 5.1.5).

5.1.2 Wirkung einer Internalisierung externer Staukosten und des kurzfristigen Agglomerationseffektes auf den Modal-Split

Derzeit übersteigen die gesamtwirtschaftlichen Grenzkosten des Verkehrs die privaten Grenzkosten. Grund dafür sind neben externen Kosten durch Lärm, Unfälle und Abgase vor allem die externen Staukosten (siehe Kap. 6.3). Ein weiterer Grund muss in negativen externen Agglomerationseffekten (kurz- und langfristig) vermutet werden, die im Kapitel 3.5 beziffert wurden. Es geht in diesem Kapitel um eine Abschätzung, welche Verschiebung der Anteile von ÖV und MIV an der Personenverkehrsleistung eine Internalisierung der genannten externen Effekte bewirken würde. Im Folgenden werden nur Staukosten und externe Agglomerationseffekte berücksichtigt, weil sonstige externe Effekte um etwa eine Größenordnung kleiner sind¹²⁸ und überdies anzunehmen ist, dass ihre Wirkung auf das Marktgleichgewicht der Verkehrsmittelwahl teilweise durch öffentliche Mittel kompensiert wird, mit denen ein Teil der Betriebs- und Infrastrukturkosten des öffentlichen Verkehrs finanziert wird.

Es geht hier um externe Effekte der Verkehrsmittelwahl, das heißt um jene Effekte, die mit dem Umstieg zwischen den beiden Verkehrsarten MIV und ÖV verknüpft sind. Wie beim externen Agglomerationseffekt wird unter „externen Staukosten des MIV“ nur die Differenz zum ÖV gewertet. Für die Bestimmung des Marktgleichgewichtes kann der externe Grenz-Agglomerationseffekt entweder als positiver externer Effekt zum privaten Grenznutzen oder gemeinsam mit den externen Staukosten als negativer externer Effekt (Vorzeichen wechseln!) zu den privaten Grenzkosten addiert werden. Beim Schnittpunkt der Funktion aus privaten Grenzkosten + negativen externen Grenz-Effekten und der Funktion aus privaten Grenznutzen + positiven externen Grenz-Effekten hat die Verkehrsstärke im Normalfall¹²⁹ die aus gesamtwirtschaftlicher Sicht optimale Höhe. Dieses Optimum wird durch eine entsprechende Lenkungsabgabe (senkrechte Linie mit

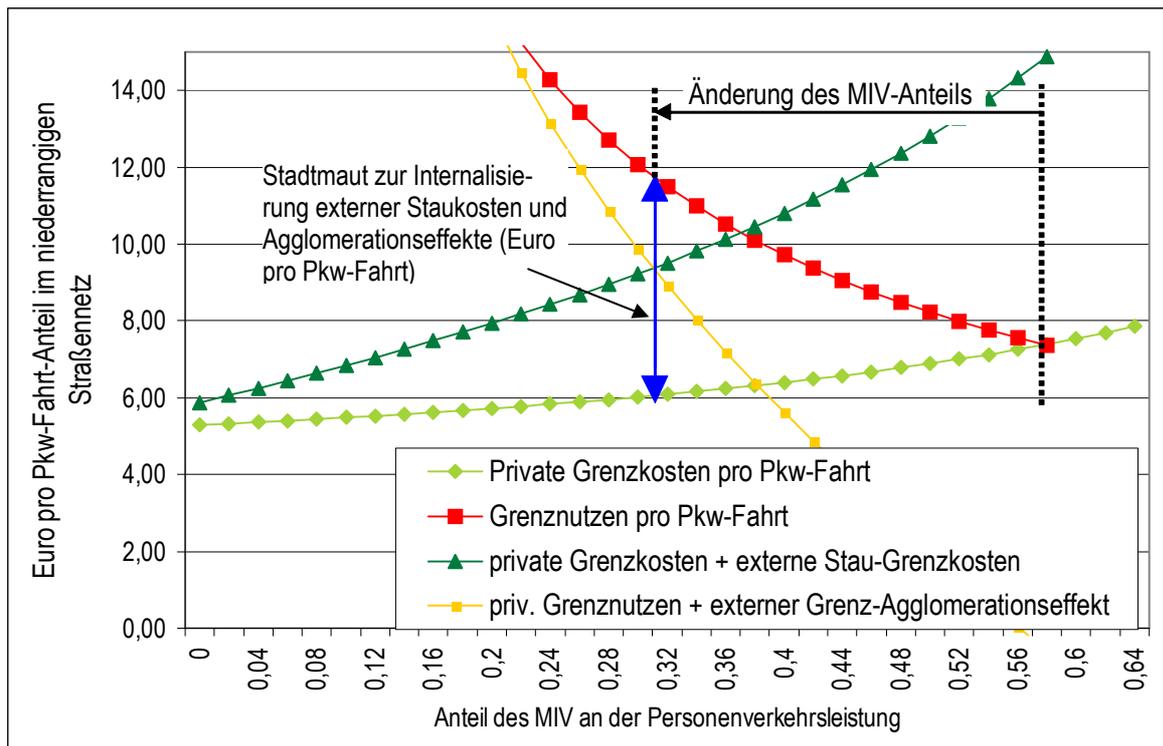
¹²⁷ Gegenseitige Behinderung verursacht immer externe Grenzkosten, also negative externe Grenz-Effekte. Verkehrsinduzierte externe Grenz-Agglomerationseffekte in städtischen Straßennetzen sind fast ausschließlich negative externe Effekte; außerhalb von Städten dürften sie hingegen überwiegend positiv sein.

¹²⁸ Siehe Kapitel 6.3.5 zur Größe sonstiger externer Effekte. Zwar können Lärm-Grenzkosten die Größenordnung von 1,- Euro pro Pkw-Kilometer erreichen (Rauh W. 2005, S. 27); dies ist jedoch nur bei extrem geringen Verkehrsstärken während der Nachtstunden zu erwarten. In diesem Kapitel geht es um externe Effekte während der täglichen Verkehrsspitze.

¹²⁹ Grenznutzen + positive externe Grenz-Effekte stetig fallend; Grenzkosten + negative externe Grenz-Effekte stetig steigend.

Pfeilen in Abb. 33) von etwa 5,8 Euro für den durchschnittlichen Anteil eines Pkw-Weges im niederrangigen Straßennetz (ca. 5 Kilometer) erzielt. Für den Verkehr zum Zeitpunkt der Verkehrsspitze im niederrangigen Straßennetz Wiens ergibt sich bei Internalisierung negativer externer Effekte ein Rückgang des MIV-Anteils an der Personenverkehrsleistung von 0,58 auf 0,31 (siehe Abb. 33). Dieser Rückgang gilt bei Minimum-Annahmen¹³⁰ für die Höhe des kurzfristigen externen Grenz-Agglomerationseffektes.¹³¹

Abb. 33: Wirkung einer Internalisierung externer Staukosten und verkehrsinduzierter externer Agglomerationseffekte auf den Modal-Split bei Spitzenverkehr.



Quelle: eigene Berechnungen

Der externe Grenz-Agglomerationseffekt - er hat im gezeigten Abschnitt negative Werte - wurde als positiver externer Effekt zum privaten Grenznutzen addiert. Beim Schnittpunkt mit der Funktion aus privaten Grenzkosten + externen Staukosten liegt der ökonomisch optimale MIV-Anteil. Die senkrechte Linie zwischen Grenznutzen- und privater Grenzkostenfunktion stellt die Größe der erforderlichen Stadtmaut dar. Die Funktionen werden im Abschnitt 6.3 abgeleitet.

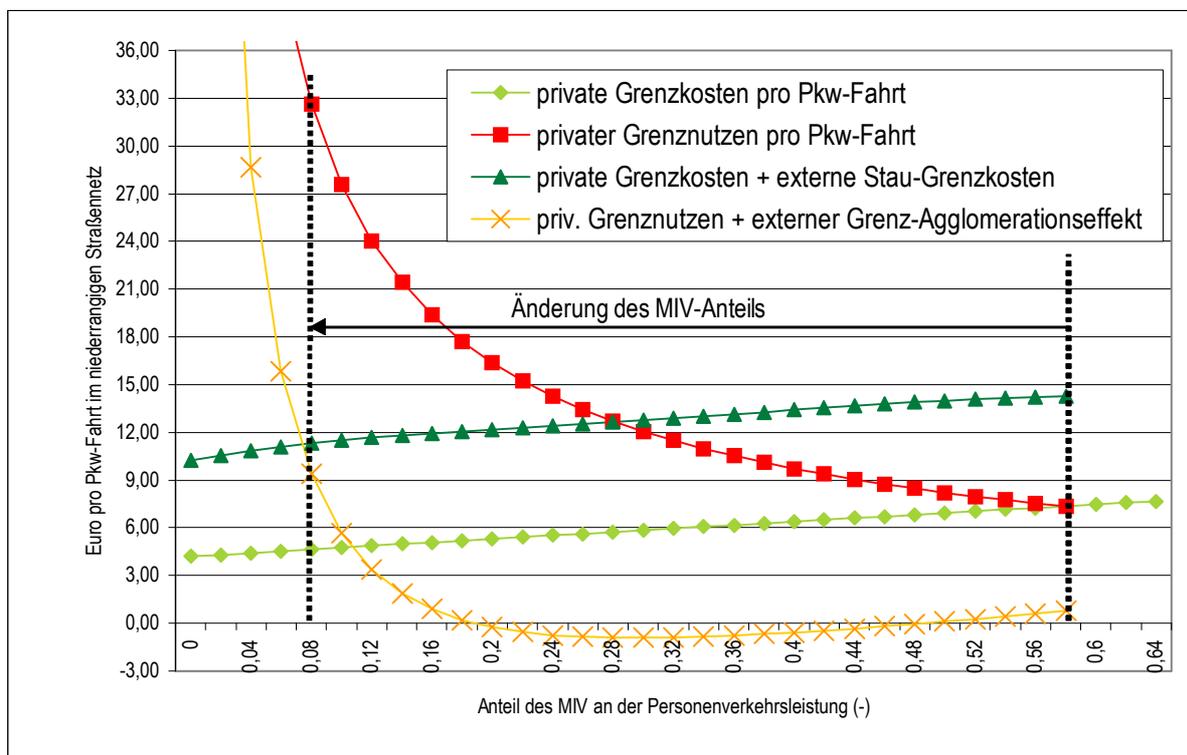
¹³⁰ Annahmen die zur minimalen absoluten Größe des externen Agglomerationseffektes führen - siehe Tabelle 7

¹³¹ Grenznutzenfunktion siehe Kap. 6.3.7

5.1.3 Langfristige Internalisierung externer Staukosten und Agglomerationseffekte

Langfristige externe Agglomerationseffekte¹³² geben an, wie groß der externe Agglomerationseffekt wäre, wenn sich die Bevölkerungsdichte bereits gemäß Hypothese I entsprechend der Änderung des MIV-Anteils verändert hätte. Ökonomisch effizient kann nur die Internalisierung des momentan auftretenden kurzfristigen externen Agglomerationseffektes und der kurzfristig auftretenden externen Staukosten sein. Der MIV-Anteil sinkt dadurch wie oben angegeben.

Abb. 34: Langfristige Wirkung einer Internalisierung externer Staukosten und verkehrsinduzierter externer Agglomerationseffekte auf den Modal-Split bei Spitzenverkehr



Quelle: eigene Berechnungen

Würde die Internalisierung externer Staukosten und externer Agglomerationseffekte laufend der langsamen Veränderung der Verkehrsverhältnisse durch zunehmende Bevölkerungsdichte angepasst, wäre auf Basis des verwendeten Modells nach einigen Jahrzehnten ein MIV-Anteil des Personenverkehrs unter 0,1 zu erwarten. Dieses Ergebnis ist allerdings zu relativieren, weil es voraussetzen würde, dass Hypothese I auch bei extrem hohen Dichten voll anwendbar ist.

Wenn Hypothese I zutrifft, steigt durch die Änderung des MIV-Anteils langfristig die Bevölkerungsdichte. Dadurch steigen auch Staukosten und Agglomerationseffekte.

¹³² Siehe Kap. 3.5.7 und 3.6.1

Damit verschiebt sich die ökonomisch optimale Verkehrsstärke langsam zu jenem Punkt, der sich aus dem Schnittpunkt der Funktion aus privaten Grenzkosten¹³³ + langfristigen externen Staukosten einerseits und der Funktion aus privaten Grenznutzen + langfristigen positiven externen Grenz-Effekten andererseits ergibt. Rechnerisch ergibt sich dieser Schnittpunkt bei einem MIV-Anteil von etwa 0,08, der nach einigen Jahrzehnten zu erwarten wäre, wenn die Internalisierung externer Staukosten und externer Agglomerationseffekte laufend der langsamen Veränderung der Verkehrsverhältnisse durch zunehmende Bevölkerungsdichte angepasst würde. Dieses Ergebnis ist allerdings zu relativieren, weil es voraussetzen würde, dass Hypothese I auch bei MIV-Anteilen unter 0,1 und bei Dichten voll anwendbar ist, die etwa 5 bis 6 Mal höher sind, als die heutige durchschnittliche Bevölkerungsdichte Wiens.

5.1.4 Bevölkerungsdichte bei MIV-Anteilen unter 0,25

Mit den verwendeten internationalen Vergleichsdaten (Kenworthy und Laube, 2002, S. 20ff.) ist die Anwendbarkeit von Hypothese I für MIV-Anteile um 0,1 kaum zu belegen. Die einzige gelistete Großstadt, deren MIV-Anteil unter 0,25 liegt, ist Hongkong. Dass die Bevölkerungsdichte von Hongkong sogar um 13 % über dem Erwartungswert gemäß Hypothese I liegt, könnte allerdings eher den bekannten politischen als den verkehrlichen Rahmenbedingungen der Stadtentwicklung zuzuschreiben sein.

Dass eine Internalisierung externer Staukosten längerfristig einen deutlichen Anstieg der Bevölkerungsdichte – wenn auch nicht unbedingt in dem durch Hypothese I vorhergesagten Ausmaß – nach sich ziehen würde, wird durch die Ergebnisse von Wheaton (Wheaton, 1998, S. 258-272) unterstützt.¹³⁴ Auch Wheaton ist sich offenbar bewusst, dass seine Ergebnisse der weit verbreiteten Vorstellung widersprechen könnten, dass (zu) hohe Bevölkerungsdichte überwiegend Nachteile nach sich ziehe, und betont daher die positiven externen Effekte hoher Dichte (Wheaton, 1998, S. 258).¹³⁵

Dass ein Anstieg der Bevölkerungsdichte auch in Wien nicht völlig unrealistisch ist, zeigt ein Blick auf die Bevölkerungsdichten der inneren Wiener Stadtbezirke (Statistik Austria, 2002, S. 98): Der als „gutbürgerlich“ geltende 8. Bezirk hat noch im Jahr 2001 eine Bevölkerungsdichte aufgewiesen, die das Dreifache des Wiener Durchschnitts erreicht (mit Nebenwohnsitzfällen sogar 3,7-fach). Würde die Bevölkerungsdichte durch Internalisierung externer Staukosten zunehmen, müsste das nicht bedeuten, dass die Dichte der Innenbezirke weiter zunimmt, sondern es würden vermutlich in erster Linie Teile von Stadtrandbezirken bezüglich ihrer Bevölkerungsdichte zur Dichte der Innenbezirke aufrücken.

¹³³ Auch die privaten Grenzkosten (Zeit + Fahrzeugkosten pro Weg) ändern sich langfristig, weil sich mit der Dichte auch die durchschnittliche Weglänge verändert.

¹³⁴ “Even with very modest congestion, optimal central densities are shown to be orders of magnitude greater than market densities.”

¹³⁵ “In contrast (to the notion that density is a negative public good), spatial equilibrium models of the urban land market suggest that density actually generates a *positive* externality”. (eigene Ergänzung in Klammern)

5.1.5 Verwendung von Erträgen aus der Internalisierung externer Staukosten und verkehrsinduzierter externer Agglomerationseffekte

Externe Kosten des Verkehrs zu internalisieren hat nur Sinn, wenn berücksichtigt wird, wo diese Kosten auftreten und wenn berücksichtigt wird, dass die Verwendung der Erträge aus Lenkungsabgaben eine ebenso bedeutende Lenkungswirkung besitzt wie die Einhebung der Lenkungsabgabe selbst. Voraussetzung dafür, dass die oben dargestellte langfristige Entwicklung stattfinden kann, ist daher, dass Erträge aus der Internalisierung externer Staukosten und Agglomerationseffekte vollständig innerhalb des Gebietes, in dem die Internalisierung erfolgt, erfolgreich investiert oder an dort ansässige Betriebe und an die lokale Bevölkerung rückerstattet werden.

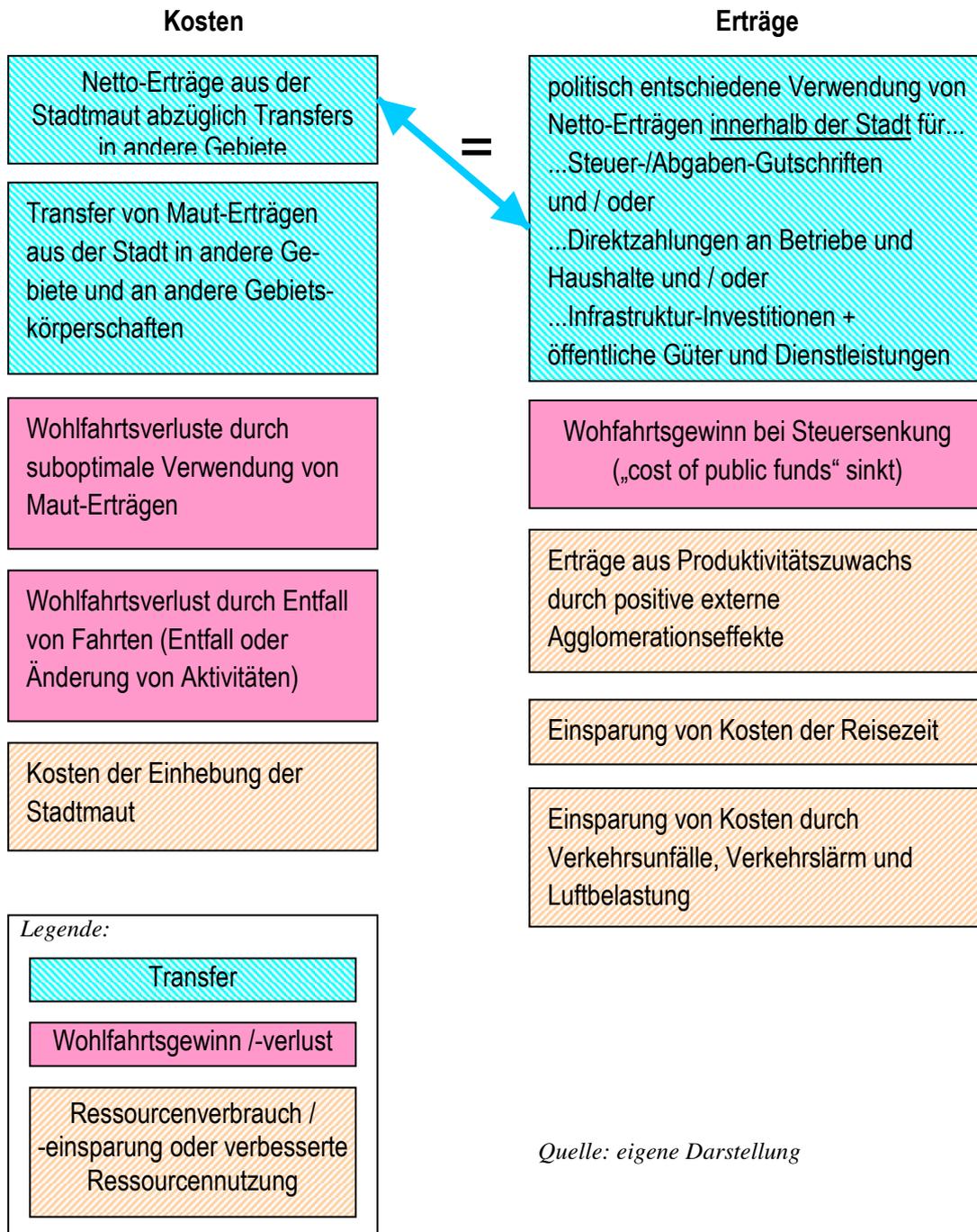
Was jedenfalls vor Einführung einer Stadtmaut zu regeln ist, sind die Anrechte der Gebietskörperschaften auf Mauterträge. Erträge aus Stadtmauten, auch solche, die auf hochrangigen Straßen wie zum Beispiel Stadtautobahnen eingehoben werden, müssen der Stadt zur Verfügung stehen, damit Transferzahlungen oder öffentliche Leistungen finanzierbar werden, welche die Stadt als Wohn- und Wirtschaftsstandort attraktiver machen. Mautgebühren abzüglich der Einhebungskosten (Netto-Maut-Erträge) sind Transfers, denen kein zusätzlicher Ressourcenverbrauch gegenüber steht. Wird politisch darüber entschieden, für welche Güter oder Dienstleistungen der Netto-Mautertrag eingesetzt wird, dann kann es zu einem Wohlfahrtsverlust (negative Differenz zwischen eingesetzten Geldmitteln und wahrgenommenem Nutzen) kommen. Dieser „Wohlfahrtsverlust durch suboptimale Verwendung von Mauterträgen“ erscheint in der Bilanz einer Stadtmaut (Abb. 35) auf der Kostenseite.

Die Verwendung der Mauterträge ist nicht nur entscheidend dafür, ob ein Projekt zur Internalisierung externer Effekte des Verkehrs ökonomisch erfolgreich ist, sondern auch dafür, ob es politisch mehrheitsfähig ist:

- Um einen suboptimalen Mitteleinsatz zu vermeiden, könnte es sinnvoll sein, die Netto-Erträge aus einer Stadtmaut unter Haushalte und Betriebe pro Person bzw. pro beschäftigter Person aufzuteilen und jährlich als Pauschalbetrag auszus zahlen.
- Eine andere Möglichkeit sind Gutschriften auf bestehende Steuer- und Abgabepflichten. Diese Lösung hätte zusätzlich den Vorteil, dass Wohlfahrtsverluste vermieden werden, die dadurch entstehen, dass bestimmte Steuergegenstände – etwa Arbeitsleistung – durch die Besteuerung verteuert und daher nicht im optimalen Ausmaß genutzt werden. Andererseits würden nur Steuer- und Abgabepflichtige in den Genuss der Rückvergütung kommen.
- Eine dritte Möglichkeit besteht darin, mit Nettoerträgen der Stadtmaut öffentliche Investitionen und öffentliche Dienstleistungen (beispielsweise öffentlichen Verkehr) zu finanzieren.

In der Praxis dürften sich Kombinationen der drei angegebenen Möglichkeiten zur Verwendung von Erträgen aus der Internalisierung externer Kosten des Verkehrs bewähren.

Abb. 35: Bilanz der Kosten und Erträge durch Internalisierung von externen Staukosten und Agglomerationseffekten aus Sicht der Stadt (noch ohne Langfrist-Effekte)



Quelle: eigene Darstellung

6 Anhang

6.1 Modelldaten für das Wiener Straßennetz:

6.1.1 Zusammenfassung der Vorgangsweise

Ziel ist es, die jeweiligen Anteile der einzelnen Verkehrsarten an der Auslastung der Kapazität des Netzes der niederrangigen Straßen im Stadtgebiet (= Landes- und Gemeindestraßen = alle Straßen ohne Autobahnen und Schnellstraßen) zu bestimmen. Dazu wird als Ausgangsgröße die Zahl der Wege der einzelnen Verkehrsarten und deren Weglänge auf Basis von Daten zum werktäglichen Normalverkehr der Wiener Wohnbevölkerung ermittelt.¹³⁶ Um jene Strecken zu berücksichtigen, die außerhalb des niederrangigen Straßennetzes der Stadt zurückgelegt werden (das sind neben Autobahnstrecken auch U- und S-Bahnstrecken), wird für ÖV und MIV eine entsprechend reduzierte durchschnittliche Weglänge angegeben. „Wiener“ Verkehrsleistungen, die im Umland erbracht werden und Verkehrsleistungen der Umlandbevölkerung, die in Wien abgewickelt werden, werden ebenfalls durch Zuschläge bzw. Abzüge bei der jeweiligen durchschnittlichen Weglänge berücksichtigt. Die jeweilige aus den Korrekturen resultierende Weglänge wird mit der Kapazitätsbeanspruchung durch die jeweiligen Verkehrsmittel gewichtet und mit dem Wege-Anteil multipliziert, um zu den Anteilen der Verkehrsarten an der durchschnittlichen Auslastung der Straßenkapazität zu gelangen.

6.1.2 Auf das Netz der innerstädtischen Landes- und Gemeindestraßen entfallender Anteil der MIV- und Güterverkehrs-Wege

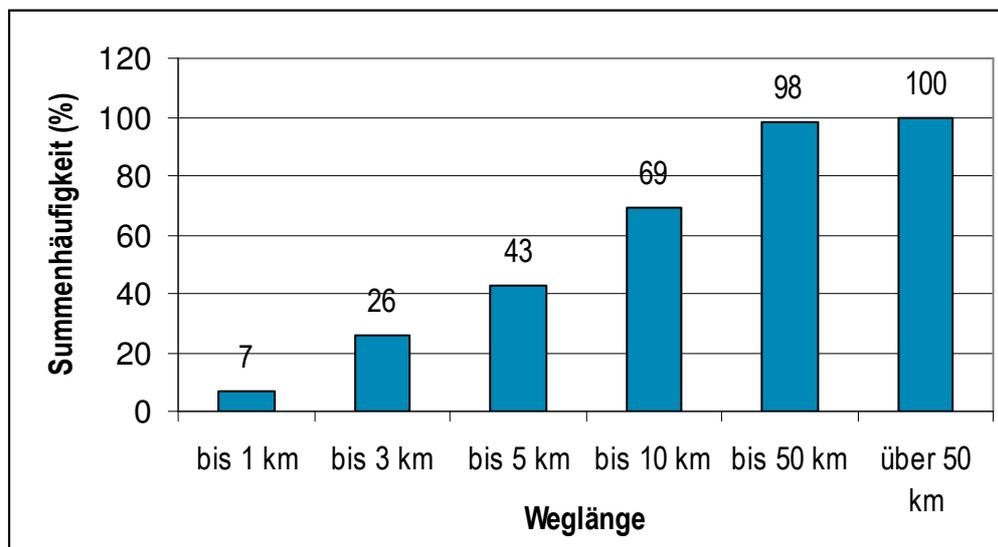
Die durchschnittliche Weglänge des MIV beträgt etwa 11 Kilometer (Socialdata, 1995, Tabelle 11). Von dieser Weglänge muss zunächst jener Anteil abgezogen werden, der auf Außerorts-Strecken und auf das hochrangige Straßennetz entfällt. Der Anteil des MIV- und Güterverkehrs, der auf hochrangige Straßen im Stadtgebiet entfällt, wird mit etwa 15% angenommen. Basis für die Schätzung sind Autobahn-Netzlänge und Verkehrszählungsdaten. Aus der Verteilung der Weglängen des Pkw-Verkehrs (Socialdata, 1995, Tabelle 13) und aus den Verkehrsbeziehungen (Socialdata, 1995, Tabelle 19a) kann abgeleitet werden, dass etwa 46,8 % der Pkw-

¹³⁶ Die verwendeten Daten zum werktäglichen Normalverkehr (Socialdata, 1995) wurden im Jahr 1993 erhoben. Sie passen daher zeitlich zu den Daten über Bevölkerungsdichte und Modal-Split der internationalen Beispielstädte (Kenworthy und Laube (2002)), die für das Jahr 1990 erhoben wurden.

Strecken der Wiener Bevölkerung auf Straßen außerhalb des Wiener Stadtgebietes entfallen.¹³⁷

Als zweiter Lösungsweg und zur Kontrolle kann eine Schätzung des Außerorts-Anteils von Wiener Pkw-Fahrten auch aus der Häufigkeitsverteilung der Pkw-Weglängen abgeleitet werden (Socialdata 1995, Tabelle 13).

Abb. 36: Summenhäufigkeit der Pkw-Weglängen in Wien



Quelle: Socialdata, 1995, Tabelle 13

Auf Basis der Summenhäufigkeit der durchschnittlichen Weglängen von Pkw-Fahrten lässt sich schätzen, welcher Anteil zurückgelegter Strecken auf Straßen außerhalb des Stadtgebietes entfällt. Das Ergebnis – etwa 46% - deckt sich mit Ergebnissen, die aus Daten zu Verkehrsbeziehungen abgeleitet werden können.

Zum Verkehr der Wiener Bevölkerung ist der von außen kommende Verkehr zu addieren. Aus eigenen Stichprobenzählungen nach Kfz-Kennzeichen ergibt sich ein Anteil von 23 % nicht in Wien zugelassener Kfz im innerstädtischen Straßenverkehr. In Wien zugelassene Fahrzeuge legen also etwa 57 % mehr Kfz-Kilometer außerhalb Wiens zurück, als nicht in Wien zugelassene Fahrzeuge innerhalb Wiens. Mit den Korrekturen für Autobahnverkehr, Verkehr von Wiener Fahrzeugen im Umland und von Fahrzeugen aus dem Umland in Wien ergibt sich für durchschnittliche MIV-Wege ein gewichteter Anteil von etwa 6,5 Kilometern pro MIV-Weg eines Wiener Fahrzeuges, der auf das innerstädtische Straßennetz (ohne Autobahnen und Schnellstraßen) entfällt. Der Anteil von 6,5 Kilometern enthält eine Komponente, mit der in den nachfolgenden Berechnungen auf Basis der Wiener Mobilitätsdaten die MIV-Fahrleistungen nicht in Wien zugelassener Fahrzeuge

¹³⁷ Socialdata (Socialdata, 1995) gibt in Tabelle 19a auch die durchschnittlichen Weglängen von Pkw-Wegen ins Umland sowie Pkw-Wegen innerhalb Wiens an. Dadurch wird es möglich, die Weglängenanteile, die auf Wien und das Umland entfallen, abzuschätzen.

berücksichtigt werden. Die „echte“ Strecke, die pro MIV-Weg eines Wiener Fahrzeuges auf das niederrangige Wiener Straßennetz (ohne Autobahnen und Schnellstraßen) entfällt, beträgt 4,98 Kilometer. Es wird angenommen, dass die Weglängen des MIV im innerstädtischen Straßennetz (ohne Autobahnen und Schnellstraßen) auch für den Verkehr von Lkw und Lieferwagen gelten.

6.1.3 Auf das Netz der innerstädtischen Landes- und Gemeindestraßen entfallender Anteil der ÖV-Wege

Tabelle 8: Anteile öffentlicher Verkehrsmittel an der Verkehrsleistung des öffentlichen Verkehrs (Basis: alle Wege der Wohnbevölkerung Wiens 1993)

	Alle je Weg genutzten Verkehrsmittel Nennungen %	Anteil an Weg-Etappen des öffentlichen Verkehrs %	durch- schnittliche Etappen-/ Weglänge km	Anteile an der ÖV-Verkehrs- leistung %
Bus	10,8	25,2	3,3	17
Straßenbahn	16,5	38,5	4,6	37
U-Bahn	13,1	30,5	5,9	38
S-Bahn	2,3	5,4	5,9	7
Eisenbahn	0,2	0,5	5,9	1
gesamter öffentlicher Verkehr	42,9	100	7,0	100
Bus- und Straßenbahnverkehr	27,3	63,6	3,8	55

Quelle: Socialdata, 1995, Tabellen 9 und 11 (erste Datenspalte), eigene Berechnungen (übrige Datenspalten)

Die durchschnittliche Weglänge des gesamten öffentlichen Verkehrs von 7 Kilometern ist aus Mobilitätserhebungen bekannt (Socialdata, 1995, Tabelle 11). Von dieser Weglänge soll ein Anteil abgezogen werden, der nicht auf die innerstädtischen Straßen entfällt (im Wesentlichen U- und S-Bahnverkehr).¹³⁸ Aus Mobilitätserhebungen sind weiters die Anteile der einzelnen öffentlichen Verkehrsmittel am gesamten öffentlichen Verkehr bekannt. Socialdata gibt für Wien an, zu welchen Prozentsätzen alle jeweils für die einzelnen Etappen eines Weges verwendeten Verkehrsmittel genannt werden (Socialdata, 1995, Tabelle 9). Die Summe aller Nennungen von Weg-Etappen mit öffentlichen Verkehrsmitteln ergibt 42,9%. Auf Grund von Schätzungen der Länge von Weg-Etappen der einzelnen öffentlichen Verkehrsmittel (Bus und Straßenbahn ca. 4 Kilometer, S- und U-

¹³⁸ Der Anteil des Ziel- und Quellverkehrs mit dem Umland ist beim ÖV mit etwa 3,5% relativ gering (Socialdata 1995, Tabelle 19a und eigene Berechnungen) und außerdem dürften sich auf das Umland entfallende Wiener Weganteile und auf Wien entfallende Weganteile von Personen aus dem Umland weitgehend kompensieren.

Bahn ca. 6 Kilometer) ergibt sich die durchschnittliche Länge einer ÖV-Etappe mit 4,7 Kilometern. Bei einer durchschnittlichen Anzahl von 1,48 ÖV-Etappen pro ÖV-Weg ergibt sich die oben angegebene durchschnittliche ÖV-Weglänge von 7 Kilometern.¹³⁹ Der Anteil von Bus und Straßenbahn an der ÖV-Verkehrsleistung ergibt sich mit 55%. Das bedeutet, dass der Anteil von Bus und Straßenbahn an der durchschnittlichen ÖV-Weglänge 3,8 Kilometer beträgt.

6.1.4 Wege des Personen- und Güterverkehrs und deren Kapazitätsbeanspruchung

Tabelle 9: Wege nach Zweck und Verkehrsmittel in Prozent aller Personenverkehrswege ergänzt um Güterverkehrswege (Werktagsverkehr, Wien, 1995)

	zu Fuß	Fahrrad	Auto (lenkend)	Auto (mit-fahrend)	Öffentl. Verkehr	Lkw+Lieferwagen	Summe
Berufspendelverkehr	3,43	0,26	8,13	0,94	8,19		23,5
Ausbildungsverkehr	3,37	0,08	0,81	0,90	7,09		14,5
geschäftliche Wege	0,87	0,15	4,72	0,72	1,82		8
private Erledigung	16,98	0,27	6,90	1,83	6,95		30
Freizeitverkehr	7,87	0,12	4,99	2,87	7,68		21
sonstige Wege	0,49	0,04	0,79	0,31	0,43		3
Güterverkehr						3,9	3,9
Summe	33,0	0,9	26,3	7,6	32,2	3,9	103,9

Quelle: Herry und Sammer 1999, Seite 20; eigene Umrechnung in % der Personenwege

Die von Herry und Sammer (Herry und Sammer, 1999) angegebenen Wegezahlen wurden auf Prozentanteile aller Personenwege umgerechnet. Die Zahl der Güterverkehrsfahrten wurde mit 15 % der Pkw-Fahrten angenommen.

Eine Matrix über Verkehrsmittel und Wegzweck der in Wien zurückgelegten Personen-Wege ergibt sich aus der Mobilitätserhebung österreichischer Haushalte (Herry und Sammer, 1999, Seite 20). Um letztlich zur gesamten Aufgliederung der Kapazitätsbeanspruchung zu gelangen, müssen auch die Wege des Güterverkehrs berücksichtigt werden. Der Anteil des Güterverkehrs am Verkehrsaufkommen kann aus Verkehrszählungen abgeleitet werden. Klein-Lkw und Lieferwagen mit geringem Achsabstand können von den automatischen Zählstellen teilweise nicht als Lkw identifiziert werden. Automatische Zählstellen sind daher ungeeignet. Aus Daten „händischer“ Verkehrszählungen (Steierwald, 1996, Zählstellen 76 und 78) ergibt sich, dass

¹³⁹ Bei einem Anteil des öffentlichen Verkehrs an den zurückgelegten Wegen (ÖV als Hauptverkehrsmittel) von 29% (Socialdata, 1995, Tabelle 3) und 42,9 ÖV-Etappen pro 100 Wegen ergeben sich durchschnittlich etwa 1,48 ÖV-Etappen pro ÖV-Weg. Dies gilt unter der Annahme, dass für Wege mit ÖV-Etappen der ÖV immer als Hauptverkehrsmittel angegeben wurde.

der Anteil des Güterverkehrs einschließlich Lieferwagen an der Fahrleistung (Kfz-Kilometer) mit durchschnittlich etwa 14,8 % der Pkw-Fahrleistung anzusetzen ist.

Tabelle 10: Kapazitätsbeanspruchung und Weglänge nach Verkehrsmitteln

	zu Fuß	Fahrrad	Auto (lenkend)	Auto (mit-fahrend)	Bus und Tram	Lkw+Lieferwagen
Kapazitätsbeanspruchung [Pkw-Einheiten pro Person bzw. pro Lkw]	0,1	0,2	0,78	0,78	0,1	1,72
Weglänge [Kilometer]	0,8	2	6,5	6,5	3,8	6,5

Quelle: Santos und Shaffer 2004 S.173; eigene Schätzungen auf Basis von Socialdata, 1995

Die Kapazitätsbeanspruchung (Rommerskirchen et al., 2002, S. 22) ist eine Äquivalenzziffer, welche das Verhältnis zwischen der maximalen Anzahl von Pkw die einen Verkehrsweg pro Zeiteinheit passieren können und der maximalen Anzahl von anderen Verkehrseinheiten (z.B. Lkw) die den selben Verkehrsweg pro Zeiteinheit passieren können angibt. Die Einheit der Kapazitätsbeanspruchung ist Pkw-Einheiten oder PCU pro Verkehrseinheit. Weil die Mobilitätsdaten in Personen-Wegen angegeben sind, ist die relevante Verkehrseinheit die Person, die ein bestimmtes Verkehrsmittel benützt. Kapazitätsbeanspruchungen des Personenverkehrs sind daher in Pkw-Einheiten pro Person angegeben. Für Pkw-Insassen ergeben sich beim werktäglichen Besetzungsgrad von 1,29 Personen 0,78 Pkw-Einheiten pro Person.

Tabelle 11: Anteile an der Auslastung des niederrangigen Straßennetzes nach Weg-Zweck und Verkehrsmittel in Prozent

	zu Fuß	Fahrrad	Auto (lenkend)	Auto (mit-fahrend)	Bus und Tram	Lkw+Lieferwagen	Summe
Berufspendelverkehr	0,12	0,04	17,83	2,06	1,36		21,4
Ausbildungsverkehr	0,12	0,01	1,78	1,98	1,18		5,1
geschäftliche Wege	0,03	0,03	10,35	1,59	0,30		12,3
private Erledigung	0,59	0,05	15,14	4,02	1,16		21,0
Freizeitverkehr	0,27	0,02	10,95	6,30	1,28		18,8
sonstige Wege	0,02	0,01	1,72	0,68	0,07		2,5
Güterverkehr						18,9	18,9
Summe	1,15	0,16	57,78	16,61	5,35	18,9	100

Quelle: eigene Berechnungen

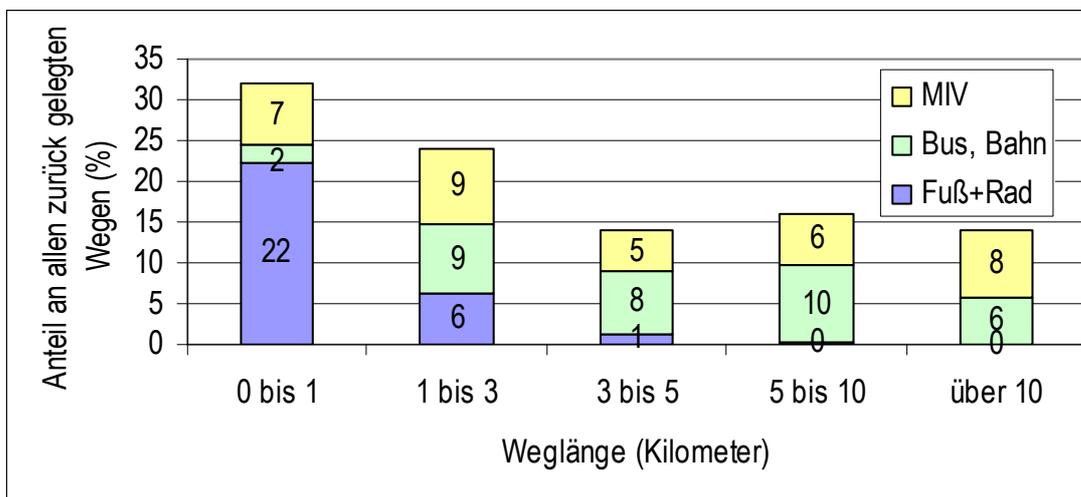
Der Anteil, den eine Verkehrsart an der Auslastung des Straßennetzes hat, hängt von der Kapazitätsbeanspruchung und von der zurückgelegten Strecke ab. Die Zeilen der Matrix der Weg-Anteile sind daher mit dem Zeilenvektor der durchschnittlichen Weglängen und mit dem Zeilenvektor der Kapazitätsbeanspruchungen zu multiplizieren, um zu einer Matrix der Anteile an der Auslastung der Straßenkapazität zu gelangen. Für die durchschnittlichen Weglängen im städtischen Netz der Landes- und Gemeindestraßen

werden die in den Unterkapiteln 6.1.2 und 6.1.3 ermittelten Werte eingesetzt. Die Summe der Elemente der Matrix der Anteile an der Auslastung (Tabelle 11) ist durch Multiplikation mit einem Faktor auf 100 % normiert.

6.1.5 Öffentlicher Verkehr und nicht motorisierter Verkehr als gemeinsame Verkehrsart

Der Anteil des nicht motorisierten Personenverkehrs (Fuß- und Radverkehr) ist weitgehend mit dem Anteil des öffentlichen Verkehrs verknüpft. Er ergänzt den öffentlichen Verkehr, weil dieser prinzipiell für kurze Wege ungeeignet ist (siehe Abb.37). Bei Modellrechnungen werden daher verschiedene Aspekte des nicht motorisierten Verkehrs (NMV) mit denen des öffentlichen Verkehrs zusammengefasst. Bei den Variationen des Modal-Split zwischen Pkw und öffentlichen Verkehrsmitteln wird angenommen, dass sich nicht motorisierter und öffentlicher Verkehr jeweils im gleichen Verhältnis ändern.

Abb. 37: Modal Split nach Weglänge in Wien – Komplementarität von ÖV und NMV



Quelle: Socialdata, 1993, eigene Umrechnung auf Anteile an allen Wegen

Während Personen, die über einen Pkw verfügen, mit diesem Fahrzeug auch kurze Strecken zurücklegen, erfordert die Benützung des öffentlichen Verkehrs für kurze Strecken das Gehen und Radfahren als Ergänzung.

6.1.6 Anteile der einzelnen Verkehrsarten an der Auslastung des niederrangigen Straßennetzes

Unter Berücksichtigung der berechneten Abminderungs- und Zuschlagsfaktoren für Verkehre von außerhalb Wiens sowie für Verkehrsanteile des öffentlichen und des individuellen Verkehrs, die auf hochrangige Netze entfallen, ergibt sich, dass der öffentliche Verkehr einen Anteil von 32,5 %, der Pkw-Verkehr einen Anteil von 58,3% und der nicht motorisierte Verkehr einen Anteil von 9,2 % an der Personen-Verkehrsleistung (Personenkilometer) im niederrangigen Wiener Straßennetz (ohne Stadtautobahnen) hat. Bezogen auf jenen Teil der Auslastung, die durch den Personenverkehrs verursacht wird,

ergibt sich, dass 91,5 % dieser Auslastung durch den MIV und 8,5 % durch den ÖV (einschließlich NMV) verursacht werden. Bezogen auf die gesamte durch Personen- und Güterverkehr verursachte Auslastung hat der Pkw-Verkehr einen Anteil von 74,2 %, der Lkw-Verkehr (einschließlich Lieferwagen) einen Anteil von 18,9 % und der öffentliche Verkehr einschließlich des nicht motorisierten Verkehrs (Mobilitätsverbund) einen Anteil von 6,9 % an der Auslastung des niederrangigen Straßennetzes (= Straßennetz ohne Autobahnen).

6.1.7 Differenz der Zu- und Abgangszeiten zu Pkw und ÖV

Um Unterschiede der Erreichbarkeit zwischen dem öffentlichen Verkehr und dem Pkw zu ermitteln, muss die Differenz der durchschnittlichen Wegzeiten zwischen Wohnungstüre und Fahrzeug bzw. Haltestelle sowie allfällige Wartezeiten an der Haltestelle berücksichtigt werden. In der Regel ist der Weg zum eigenen Fahrzeug kürzer als Wegzeit plus Wartezeit im öffentlichen Verkehr. Bei der Berechnung der Erreichbarkeit nach dem Isochronen-Ansatz muss die pro Weg auftretende Differenz der Zu- und Abgangszeiten der reinen Reisezeit im öffentlichen Verkehrsmittel zugeschlagen werden. Zu- und Abgangszeiten für MIV und ÖV können aus dem Vergleich zwischen Reisezeiten im Fahrzeugverkehr und Reisezeiten von Tür zu Tür (d.h. einschließlich Wegen zwischen Fahrzeug und Wohnungstüre) errechnet werden. Reisezeiten im Wiener Straßenverkehr laut „Verkehrsbarometer“ (Magistrat Wien, 2006) enthalten keine Wegzeiten zwischen Wohnungstüre und Fahrzeug bzw. Haltestelle. Tür-zu-Tür-Reisezeiten müssen sich aus der Gleichung „Reisegeschwindigkeit = Weglänge / Reisezeit“ ergeben, wenn die Reisezeiten laut Verkehrsbarometer (ohne Zu- und Abgangszeit) um die Zu- und Abgangszeiten erhöht werden. In der Erhebung „Mobilität in Wien“ (Socialdata, 1995) werden die berichteten Reisezeiten von Tür zu Tür angegeben. Aus den Angaben von Socialdata (Socialdata, 1995, Tabelle 19a) kann die Pkw-Reisegeschwindigkeit innerhalb Wiens einschließlich der Wegzeiten von und zum Fahrzeug mit 18,1 km/h errechnet werden.¹⁴⁰ Diese Reisegeschwindigkeit von Tür zu Tür ergibt sich aus der Gleichung „Reisegeschwindigkeit = Weglänge / Reisezeit“, wenn die Reisezeit pro Weg bei der gemessenen durchschnittlichen Reisegeschwindigkeit im Wiener Straßennetz ohne Zu- und Abgangszeiten, die mit 27 km/h ermittelt werden kann (siehe Kapitel 6.4.3), um Zu- und Abgangszeiten von insgesamt 6,3 Minuten erhöht wird. Die so errechneten durchschnittlichen Zu- und Abgangszeiten bei Pkw-Fahrten innerhalb Wiens betragen daher etwa 6,3 Minuten oder zweimal 3,15 Minuten. Die Reisegeschwindigkeit des öffentlichen Verkehrs wird für Wien

¹⁴⁰ Im Durchschnitt aller Wege von Pkw-Lenkenden liegen die Weglänge bei 11 km und die Reisezeit bei 25 Minuten. Im Durchschnitt der Pkw-Lenker-Wege über die Stadtgrenze liegen diese Werte bei 25,7 km/h und 41 Minuten. Der Anteil der Wege von Pkw-Lenkenden, die über die Stadtgrenze führen, beträgt 26 % (Socialdata 1995, Tabelle 19a). Damit sich der Durchschnitt aller Wege von 11 km Länge und 25 Minuten Dauer ergibt, müssen Wege von Pkw-Lenkenden, deren Ziel und Quelle innerhalb Wiens liegt, 5,9 km lang sein und 19,4 Minuten dauern, was einer Geschwindigkeit von 18,1 km/h entspricht.

mit 12 km/h angegeben. Diese Reisezeit gilt von Tür zu Tür, also mit Wegzeiten von und zu den Haltestellen sowie Wartezeiten (Socialdata, 1995, Tabelle 12).

Diese Reisegeschwindigkeit ergibt sich, wenn die Reisezeit pro Weg bei der laut "Verkehrsbarometer" (Magistrat der Stadt Wien, 2006) gemessenen durchschnittlichen Reisegeschwindigkeit im Wiener Straßennetz (für Bus- und Tram-Anteil) und der geschätzten Reisezeit im U- und S-Bahnnetz (für U- und S-Bahnanteil des Weges) um Zu- und Abgangszeiten von insgesamt 14,8 Minuten erhöht wird.¹⁴¹ Die gesamte Zu- und Abgangszeit im ÖV liegt also um etwa 8,5 Minuten oder zweimal 4,25 Minuten höher als die durchschnittlichen Zu- und Abgangszeiten bei Pkw-Fahrten innerhalb Wiens.

Tabelle 12: Übersicht von Modelldaten für den öffentlichen Verkehr im Netz der Landes- und Gemeindestraßen einschließlich der Zu- und Abgangswege

Kenngroße:	Formelzeichen	Wert
Anteil an der Personenverkehrsleistung	$A_{\text{ÖW}}$	0,417
Anteil an der Auslastung des niederrangigen Straßennetzes („normierte Verkehrsstärke“)	$T_{\text{ÖW}}$	0,069
Weglänge (ohne U- und S-Bahnanteil)	L	3,83 Kilometer
Zu- und Abgangszeit pro Weg	-	14,8 Minuten
Differenz der Zu- und Abgangszeiten von ÖV und Pkw	Δ	8,5 Minuten
Zeitverlust pro Haltestelle	ZH	0,7 Minuten
Haltestellen pro Kilometer	DH	2

Quelle: eigene Berechnungen

6.1.8 Kosten der Reisezeit

Die Zeitkostensätze im Personen- und Güterverkehr (Euro pro Stunde und Person, Euro pro Stunde und Fahrzeug) wurden im Jahr 2006 vom Arbeitsausschuss „Wirtschaftlichkeit und Finanzierung“ der Österreichischen Forschungsgesellschaft Straße – Schiene – Verkehr (FSV) auf Basis von Vorarbeiten neu festgelegt (Beschorner und Nagl, 2006, Folie 23). Dabei wurden vor allem die Zeitkostensätze für den Privatverkehr gegenüber bislang gültigen Werten angehoben.

¹⁴¹ Für die U- und S-Reisezeit pro Kilometer einschließlich Stationshalten wird die Hälfte der Reisezeit pro Kilometer im Oberflächenverkehr angenommen.

Tabelle 13: Zeitkostensätze für eine Aktualisierung der RVS 2.22

	Zeitkostensatz	
	Euro pro Stunde	Euro pro Minute
Geschäftsverkehr	28	0,47
Privatverkehr:		
Berufs-Pendelverkehr	10	0,17
sonstiger Privatverkehr	7,5	0,13
Straßen-Güterverkehr:		
Lkw-Fernverkehr (Lkw-Zug)	32,7	0,55
Lkw-Nahverkehr (Lkw)	26,42	0,44

Ein Arbeitsausschuss der FSV (Forschungsgemeinschaft Straße – Schiene – Verkehr) hat im Mai 2006 Zeitkostensätze für die Neufassung jener Richtlinie festgelegt, nach der Kosten-Nutzenuntersuchungen im Verkehrswesen in Österreich durchgeführt werden.

Quelle: Beschoner und Nagl 2006, Folie 23

6.1.9 Ermittlung der Zeitkosten pro PCU-Kilometer

Um Staukosten und sonstige zeitabhängige Kosten zu ermitteln, ist es notwendig, die durchschnittlichen Zeitkosten pro Pkw-Einheit (PCU) und Kilometer (PCU-Kilometer) zu bestimmen. Aus den Zeitkostensätzen (Tabelle 13) wird ein Vektor der Zeitkosten nach Wegezwecken gebildet.

Tabelle 14: Zeitkosten nach Wegezwecken in Euro pro Minute

Berufspendelverkehr	0,17
Ausbildungsverkehr	0,13
geschäftliche Wege	0,47
private Erledigung	0,13
Freizeitverkehr	0,13
sonstige Wege	0,13
Güterverkehr	0,47

Quelle: Beschoner und Nagl 2006 und eigene Berechnungen

Durch Multiplikation der Zeitkosten nach Wegezweck mit dem Kehrwert der Kapazitätsbeanspruchung pro Verkehrsmittel laut Tabelle 10 ergibt sich eine Matrix der Zeitkosten pro PCU-Minute nach Wegezweck und Verkehrsart.

Tabelle 15: Zeitkosten nach Wegezweck und Verkehrsart pro Einheit der Kapazitätsbeanspruchung (Angaben in Cent pro PCU-Minute)

	zu Fuß	Fahrrad	Auto (lenkend)	Auto (mit- fahrend)	Bus und Tram	Lkw+Liefer- wagen
Berufspendelverkehr	170	85	21,89	21,89	170	
Ausbildung	130	65	16,74	16,74	130	
geschäftliche Wege	470	235	60,51	60,51	470	
private Erledigung	130	65	16,74	16,74	130	
Freizeit	130	65	16,74	16,74	130	
sonstiges	130	65	16,74	16,74	130	
Güterverkehr						27,18

Quelle: eigene Berechnungen

Durch Multiplikation der Elemente der Matrix der Anteile an der Auslastung des niederrangigen Straßennetzes (Tabelle 11) mit den gleich indizierten Elementen der Zeitkosten-Matrix (Tabelle 15) ergibt sich aus der Summe der Matrix-Elemente (Tabelle 16) der gesuchte Zeitkostensatz pro durchschnittlicher Pkw-Einheit (PCU) mit $KT = 0,342$ Euro pro PCU-Minute.

Tabelle 16: Anteile der Weg-Arten an den Zeitkosten pro durchschnittlicher Pkw-Einheit des Verkehrs am innerstädtischen Straßennetz (Angaben in Cent pro PCU-Minute)

	zu Fuß	Fahrrad	Auto (lenkend)	Auto (mit- fahrend)	Bus und Tram	Lkw+Lie- ferwagen	Summe
Berufspendelverkehr	0,20	0,04	3,90	0,45	2,32		6,91
Ausbildungsverkehr	0,15	0,01	0,30	0,33	1,53		2,32
geschäftliche Wege	0,14	0,06	6,26	0,96	1,43		8,85
private Erledigung	0,77	0,03	2,53	0,67	1,50		5,51
Freizeitverkehr	0,36	0,01	1,83	1,05	1,66		4,92
sonstige Wege	0,02	0,00	0,29	0,11	0,09		0,52
Güterverkehr						5,15	5,15
Summe	1,64	0,16	15,12	3,58	8,53	5,15	34,18

Quelle: eigene Berechnungen

Zeitkosten pro durchschnittlicher Pkw-Einheit (PCU) ergeben sich mit 34,18 Cent pro Minute.

In der Summenzeile von Tabelle 11 steht der prozentuelle Anteil der einzelnen Verkehrsarten an der gesamten Kapazitätsbeanspruchung und in der Summenzeile von Tabelle 16 der Anteil an den durchschnittlichen Zeitkosten in Cent pro PCU-Minute. Das Verhältnis der beiden Anteile ergibt die Zeitkosten in Cent pro PCU-Minute für die beiden Verkehrsarten MIV sowie für die Kombination des öffentlichen Verkehrs ÖV mit dem

nicht motorisierten Verkehr NMV¹⁴². Die Zeitkosten für den Güterverkehr mit der Kurzbezeichnung Lkw können direkt aus der Tabelle 15 übernommen werden. In der Folgenden Tabelle 17 werden alle Zeitkostensätze von Cent in Euro pro PCU-Minute umgerechnet:

**Tabelle 17: Zeitkosten pro PCU für die Verkehrsarten MIV, ÖV+NMV und Lkw
in Euro pro PCU-Minute**

ÖV+NMV	MIV	Lkw	Mittelwert bei MIV-Anteil AI = 0,58
$KT_{\text{ÖV}} = 1,552$	$KT_{\text{MIV}} = 0,251$	$KT_{\text{Lkw}} = 0,272$	$KT(\text{AI}) = 0,342$

Quelle: eigene Berechnungen

Bei Variation des MIV-Anteils an der Personenverkehrsleistung ist beispielsweise bei der Berechnung von Staukosten zu berücksichtigen, dass sich der Mittelwert $KT(\text{AI})$ verändert.

¹⁴² Statt der gelegentlich verwendeten Bezeichnung NMIV („nicht motorisierter Individualverkehr“) wird in dieser Arbeit für das Gehen und Radfahren die Bezeichnung NMV („nicht motorisierter Verkehr“) verwendet, da dieser ohnehin ausschließlich als Individualverkehr stattfindet.

6.2 Abhängigkeit der Reisezeit von der Verkehrsstärke

6.2.1 Zusammenfassung der Vorgangsweise

Im Folgenden wird eine Funktion abgeleitet, die den Zusammenhang zwischen dem Auslastungsgrad des niederrangigen Straßennetzes und der durchschnittlichen Reisegeschwindigkeit beschreibt. Zwei „Eckpunkte“ dieser Funktion – die Reisegeschwindigkeiten beim Maximum und beim Minimum des Tagesganges der Verkehrsbelastung – sind durch Messwerte aus dem Wiener Straßennetz gegeben. Der zwischen diesen Eckpunkten liegende Verlauf ist aus verkehrstechnischen Eigenschaften von Kreuzungen abzuleiten.

6.2.2 Zeitverlust an Kreuzungen in Abhängigkeit von der Verkehrsstärke

Die Reisegeschwindigkeit im innerörtlichen Straßennetz hängt vom geltenden Tempolimit und von Zeitverlusten durch die Verkehrsregelung ab. Letztere bestehen im Wesentlichen aus Zeitverlusten durch Wartezeiten an geregelten und ungeregelten Kreuzungen. Die Anzahl geregelter Kreuzungen steigt mit der Stärke des Fahrzeugverkehrs. Mit der Stärke des Fahrzeugverkehrs steigt auch die Wartezeit pro geregelter Kreuzung. Die Wartezeit pro geregelter Kreuzung ergibt sich aus Anhaltewahrscheinlichkeit mal durchschnittlicher Anhaltedauer. Die direkt durch die Ampelphase bedingte Anhaltewahrscheinlichkeit (Wahrscheinlichkeit der Annäherung bei Rot) wird mit 0,5 angesetzt. Weil die Ampelphasen nach den Verkehrsstärken der Kreuzungsäste optimiert werden, wäre mit einer Anhaltewahrscheinlichkeit leicht unter 0,5 zu rechnen; andererseits erhöhen Gelbphasen und Abbiegephasen die Anhaltewahrscheinlichkeit. Bei minimaler Verkehrsstärke beträgt unter der gemachten Annahme die durchschnittliche Anhaltedauer pro Ampel ein Viertel der Umlaufzeit: 50 Prozent Rot-Zeit, 50 Prozent davon durchschnittliche Anhaltedauer bei Verkehrsstärke Null. Nimmt die Verkehrsstärke zu, bleiben die Fahrstreifen auch während eines Teils der Grün-Zeiten blockiert, bis die Fahrzeugkolonne aufgelöst ist, die sich seit dem Beginn der Rot-Zeit gebildet hat. Damit steigt sowohl die Anhaltewahrscheinlichkeit als auch die Anhaltedauer. Die Kapazitätsgrenze ist erreicht, wenn der Ampel-Rückstau erst bei Ende der Grünphase aufgelöst ist. Der durchschnittliche Zeitverlust pro Ampel erreicht dann 50 Prozent der Umlaufzeit. Ist die durchschnittliche Anhaltezeit pro ampelgeregelter Kreuzung gleich A, die Umlaufzeit gleich U, die Rot-Zeit gleich „Rot“ und die Zeit bis zur Auflösung des Rückstaus gleich S, dann gilt:¹⁴³

$$(36) A = (\text{Rot}+S)/U * (\text{Rot}+S)/2 \text{ [Zeit-Einheiten]}$$

Wenn die effektive Rotzeit 50 Prozent der Umlaufzeit ausmacht, gilt:

$$(37) U = 2 \cdot \text{Rot} \text{ [Zeit-Einheiten]}$$

¹⁴³ Die Gleichung bedeutet, dass die durchschnittliche Anhaltezeit gleich Anhaltewahrscheinlichkeit * durchschnittliche Anhaltedauer ist.

T ist die Verkehrsstärke im Tagesverlauf und T_m die Verkehrsstärke, bei der die Kapazitätsgrenze der Kreuzungen erreicht ist. Der Ausdruck (T/T_m) wird im Folgenden als durchschnittlicher effektiver Auslastungsgrad des niederrangigen Straßennetzes oder normierte Verkehrsstärke T_N bezeichnet. Die Zeit bis zur Auflösung des Rückstaus hängt von der Zahl der wartenden Fahrzeuge ab, die ihrerseits mit der Verkehrsstärke zunimmt. Die Auflösung der Kolonne, die sich während der Rotphase gebildet hat, dauert die Zeit $\text{Rot} * T/T_A$, wobei T_A die Verkehrsstärke einer sich auflösenden Kolonne ist (= etwa 30 Fahrzeuge pro Minute). Während diese Kolonne sich auflöst, bildet sich durch ankommende Fahrzeuge eine weitere Kolonne, deren Auflösung die Zeit $\text{Rot} * (T/T_A)^2$ benötigt. Die Auflösungszeiten der Teil-Kolonnen bilden Glieder einer Potenzreihe $\text{Rot} * (T/T_A)^n$ mit $n = 1$ bis ∞ , die in Summe die Zeit S ergeben. Für die Summe einer unendlichen Potenzreihe gilt $\sum a^n = 1/(1/a-1)$ für $a < 1$ und $n = 1$ bis ∞ . Daher gilt für die Auflösungszeit S

$$(38a) S = \text{Rot} * 1/(T_A/T-1) \text{ [Zeit-Einheiten]}$$

Die Kapazitätsgrenze einer Kreuzung mit 50% Grünzeit ist erreicht, wenn die Zeit S die Größe der Grün-Zeit erreicht hat (entspricht der Rot-Zeit) und wenn die Zahl der pro Zeiteinheit ankommenden Fahrzeuge halb so groß ist wie die Zahl der Fahrzeuge, die pro Zeiteinheit aus einer Kolonne losfahren kann. Damit kann in (38a) die normierte Verkehrsstärke ($T_N = 1$ bei Vollaustattung) eingesetzt werden:

$$(38) S = \text{Rot} * 1/(2/T_N-1) = \text{Rot} * T_N/(2-T_N) \text{ [Zeit-Einheiten]}$$

Wird (37) und (38) in (36) eingesetzt, ergibt sich

$$(39) A = \text{Rot} / (2-T_N)^2 \text{ [Zeit-Einheiten]}$$

6.2.3 Abhängigkeit der Reisezeit von der Verkehrsstärke in Wien

In diesem Abschnitt geht es darum, den allgemeinen Zusammenhang von Reisezeit und Verkehrsstärke auf Basis empirischer Daten zu beziffern. In Wien wird mittels Daten über Distanzen und Reisezeiten von Taxifahrzeugen die durchschnittliche Reisegeschwindigkeit im Stadtverkehr und auf Stadtautobahnen ermittelt. Die Werte werden im so genannten „Verkehrsbarometer“ (<http://www.wien.gv.at/verkehr/vema/verkehrslage/verkehrsbarometer.htm>) im Internet veröffentlicht. Die Minima der durchschnittlichen Reisegeschwindigkeiten im innerstädtischen Straßennetz liegen werktags um 8:30 Uhr und zwischen 16:30 und 17:30 Uhr bei etwa 20 Kilometern pro Stunde. Um 4:00 Uhr morgens erreicht die Reisegeschwindigkeit 33 Kilometer pro Stunde (Annahme: 35 Kilometer pro Stunde bei Verkehrsstärke Null). Auf Basis von Tagesgängen der Verkehrsstärke an innerstädtischen Zählstellen (Nadler & Steierwald, 2000) wird die normierte Verkehrsstärke zur Spitzenstunde (bei minimaler Reisegeschwindigkeit) mit 0,9 geschätzt. Das Minimum der Reisezeit (= Fahrzeiten + minimale Zeitverluste durch VLSA) beträgt 60/35 Minuten pro Kilometer, das Maximum 60/20 Minuten pro Kilometer. Die Differenz von 1,28 Minuten pro Kilometer muss sich durch die Variation

der Ampelwartezeit A zwischen Rot/4 bei $TN = 0$ und Rot/1,1² bei $TN = 0,9$, multipliziert mit einem konstanten Faktor ergeben:

$$(40) \quad 1,28 \text{ min/km} = \text{Konstante}_1 * (1/1,1^2 - 1/2^2)$$

Die Konstante₁ ergibt sich daraus mit 2,23 min/km. Eine weitere Konstante muss so gewählt werden, dass sich bei $TN = 0$ die Reisezeit 1,714 Minuten pro km ergibt.

Diese Konstante₂ hat den Wert 1,157 min/km.

$$(41) \quad \text{spezifische Reisezeit} = Z(TN) = 1,157 + 2,23 / (2-TN)^2 \text{ [min/km]}$$

6.2.4 Variable Dichte geregelter Kreuzungen (variable VLSA-Dichte)¹⁴⁴

Mit der durchschnittlichen Verkehrsstärke im Straßennetz steigt der Bedarf an geregelten Kreuzungen. Wenn es um langfristige Wirkungen der Verkehrsstärke bzw. des Modal-Split auf Reisezeiten und Erreichbarkeit geht, ist der Einfluss der Verkehrsstärke zur Spitzenstunde auf die VLSA-Dichte zu berücksichtigen. Unter der Annahme, dass die Zahl installierter Verkehrsampeln (VLSA) sich proportional der langfristig etablierten Verkehrsstärke zur Spitzenstunde verhält, gilt für die Reisezeit bei Spitzenverkehr

$$(42) \quad \begin{aligned} \text{spezifische Reisezeit bei Spitzenverkehr} &= Z(TN_S) = \\ &= 1,157 + 2,23 * (TN_S/0,9) / (2-TN_S)^2 \text{ [min/km]} \end{aligned}$$

Es ist zu beachten, dass „langfristig“ in Bezug auf die Verkehrsorganisation etwa 2 bis 5 Jahre bedeutet, während „langfristig“ in Bezug auf die Siedlungsentwicklung etwa mit 20 bis 50 Jahren, (also etwa um eine Größenordnung höher) zu veranschlagen ist. Relativ zum langfristigen externen Agglomerationseffekt (Effekt, der von der Anpassung der Bevölkerungsdichte an den geänderten MIV-Anteil ausgeht – siehe Kapitel 3.5) gehört die Anpassung der Verkehrsorganisation an die Verkehrsstärke nach der Terminologie von Kapitel 3.5 zu den kurzfristigen Effekten.

6.2.5 Berücksichtigung unregelmäßig auftretender Zeitverluste

Der bisher untersuchte Zusammenhang zwischen Reisezeit und Verkehrsstärke basiert auf der Annahme eines grundsätzlich reibungslosen Verkehrsablaufes, bei dem die Verkehrsstärke die maximale Kapazität von Straßen und Kreuzungen nie überschreitet. Bei jeder Verkehrsstärke, vor allem aber bei Auslastungen nahe der jeweiligen Straßenbeziehungsweise Kreuzungskapazität führen jedoch unregelmäßig auftretende Ereignisse zu Zeitverlusten und Verkehrsstillständen. Gründe für den Zusammenbruch des Verkehrsflusses können ungewöhnliche Verkehrsspitzen, Ampel-Ausfälle, Unfälle, Kfz-Pannen oder ähnliche Ereignisse sein (Weisbrod et al., 2001, Seite 16). Die Unsicherheit von Ankunftszeiten, die durch unregelmäßig auftretende Zeitverluste mit nicht vorhersagbarer Dauer entsteht, kann für Berufstätige oder Dienstleistende höchst unerwünscht und kostspielig sein (Bökemann und Kramar, 2003, S.9). Eine Möglichkeit, die Unsicherheit bei der

¹⁴⁴ VLSA = Verkehrs-Lichtsignalanlage

Berechnung von Staukosten zu berücksichtigen, ist die Erhöhung der durchschnittlichen Reisezeiten um die gewichtete Standardabweichung der Reisezeiten (Weisbrod et al., 2001, S. 48). Die Standardabweichung der gemessenen Reisezeiten in Abhängigkeit von der normierten Verkehrsstärke ergibt sich für das Wiener Straßennetz mit $0,23 * TN$ (eigene Berechnungen nach Daten des Magistrats Wien (2006)). Damit ergibt sich die spezifische Reisezeit (min/km) zuzüglich einer Unsicherheitskomponente bei fixer VLSA-Dichte

$$(43) \quad \text{spezifische Reisezeit} = Z(TN) = 1,157 + 2,23 / (2 - TN)^2 + 0,23 * TN \text{ [min/km]}$$

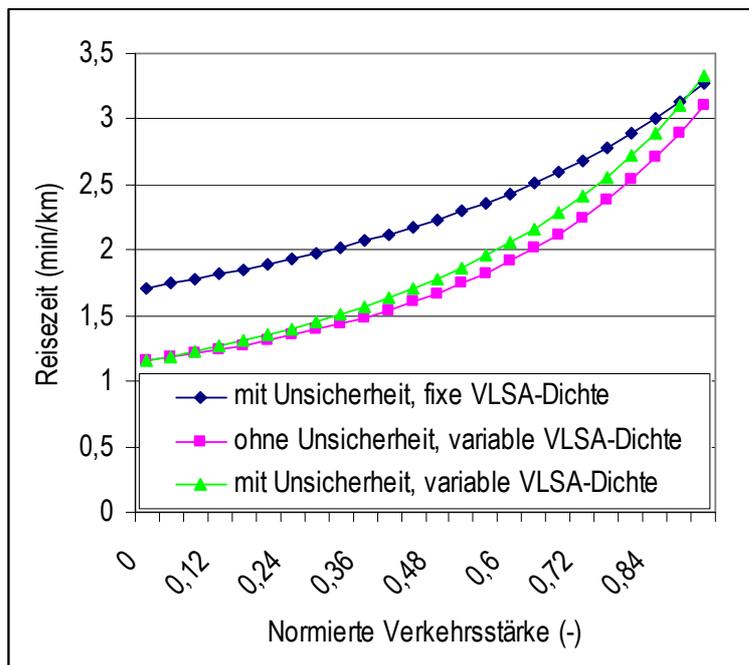
Die spezifische Reisezeit bei Spitzenverkehr zuzüglich Unsicherheitskomponente bei variabler VLSA-Dichte ergibt sich mit

$$(44) \quad Z(TN_S) = 1,157 + 2,23 * (TN_S / 0,9) / (2 - TN_S)^2 + 0,23 * TN_S \text{ [min/km]}$$

Multipliziert mit dem monetarisierten Wert verbrauchter Reisezeit KT in Euro pro Fahrzeugminute (siehe Tabelle 17) ergibt sich für zeitabhängige Kosten $K_Z(TN)$ in Euro pro PCU-Kilometer:

$$(45) \quad K_Z(TN) = KT * Z(TN) \text{ [Euro/PCU-km]}$$

Abb. 38: Reisezeiten pro Kilometer mit und ohne Unsicherheitskomponente bei fixer und variabler Dichte geregelter Kreuzungen (VLSA-Dichte)



Bei der Berechnung von Staukosten ist eine Unsicherheitskomponente durch unregelmäßig auftretende Störungen zu berücksichtigen. Variable Dichte geregelter Kreuzungen (VLSA-Dichte) ist zu berücksichtigen, wenn die langfristige Wirkung einer Veränderung der Verkehrsstärke zu Spitzenzeiten auf die Reisegeschwindigkeit gefragt ist

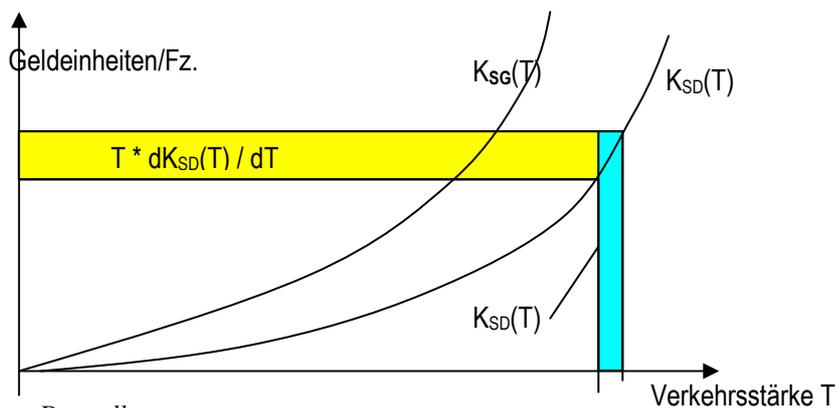
Quelle: eigene Berechnungen.

6.3 Externe und private Grenzkosten¹⁴⁵ pro Pkw-Einheit

6.3.1 Staukosten und Stau-Grenzkosten

Im Folgenden werden jene zusätzlichen zeitabhängigen Kosten, die durch gegenseitige Behinderung im Straßennetz entstehen, unter dem Titel „Staukosten“ behandelt. Diese Bezeichnung ist etwas irreführend, weil sie zu implizieren scheint, dass solche Kosten nur bei einem völligen Zusammenbruch des Verkehrsflusses (Stau) entstehen. Ein solcher ist jedoch – abgesehen von einer Unsicherheitskomponente – für die Berechnung von „Staukosten“ in Straßennetzen kaum relevant. Wesentlich sind vielmehr jene Zeitverluste, die beim regulären Betrieb von Kreuzungen in Abhängigkeit von der jeweiligen Verkehrsstärke auftreten. In diesem Abschnitt geht es darum die Größe der internen und externen Staukosten dem bereits bezifferten Zusammenhang von Reisezeit und Verkehrsstärke (siehe Kap. 6.2) abzuleiten

Abb. 39: Durchschnittliche Zeitkosten und Stau-Grenzkosten



Quelle: eigene Darstellung

Die gesamtwirtschaftlichen („sozialen“) Stau-Grenzkosten $K_{SG}(T)$ durch ein zusätzliches Fahrzeug bestehen aus den privaten Staukosten des zusätzlichen Fahrzeuges $K_{SD}(T)$ und den zusätzlichen Staukosten aller übrigen Fahrzeuge $T \cdot dK_{SD}(T)/dT$

Die zusätzlichen Kosten gegenseitiger Behinderungen, die durch ein zusätzliches Fahrzeug entstehen (gesamtwirtschaftliche Stau-Grenzkosten), steigen mit der Verkehrsstärke T. Die durch Insassen eines zusätzlichen Fahrzeuges erlittenen Kosten gegenseitiger Behinderungen seien durch die Funktion $K_{SD}(T)$ beschrieben. Mit der Verkehrsstärke steigen die durchschnittlichen Zeitkosten für die Insassen aller Fahrzeuge im gleichen Ausmaß. $K_{SD}(T)$ beschreibt daher die Stau-Durchschnittskosten pro Fahrzeug. $K_{SD}(T) \cdot T$ entspricht den gesamtwirtschaftlichen Staukosten.

Die Ableitung nach der Verkehrsstärke $dK_{SD}(T)/dT$ ergibt den durch ein zusätzliches Fahrzeug pro Zeiteinheit bewirkten Anstieg der gesamtwirtschaftlichen Staukosten. Diese

¹⁴⁵ Private Kosten werden in der Verkehrswissenschaft als „Nutzerkosten“ bezeichnet.

gesamtwirtschaftlichen Stau-Grenzkosten werden mit $K_{SG}(T)$ bezeichnet. Sie bestehen aus den privaten Staukosten des zusätzlichen Fahrzeuges und den zusätzlichen Staukosten aller übrigen Fahrzeuge:

$$(46) \quad K_{SG}(T) = K_{SD}(T) + T * dK_{SD}(T)/dT \quad [\text{Euro/PCU-km}]$$

Der erste Term $K_{SD}(T)$ in Gleichung (46) entspricht den privaten (internen) Stau-Grenzkosten, der zweite Term ($T * dK_{SD}(T)/dT$) entspricht den externen Stau-Grenzkosten. Im Folgenden wird für die Verkehrsstärke T die normierte Verkehrsstärke $TN = T/T_m$ als unabhängige Variable substituiert.¹⁴⁶

$$(47) \quad K_{SG}(TN) = K_{SD}(TN) + TN * dK_{SD}(TN)/dT_N \quad [\text{Euro/PCU-km}]$$

Die Stau-Durchschnittskosten $K_{SD}(TN)$ entsprechen dem Zuwachs an Zeitkosten pro km gegenüber der Verkehrsstärke Null. Aus den Gleichungen (44) und (45) ergibt sich für die Stau-Durchschnittskosten während der Verkehrsspitze (normierte Spitzen-Verkehrsstärke = TN_S) bei variabler Anzahl geregelter Kreuzungen

$$(48) \quad K_{SD}(TN_S) = KT * (-2,23/4 + 2,23 * (TN_S/0,9)/(2-TN_S)^2 + 0,23 * TN_S) \quad [\text{Euro/PCU-km}]$$

Die internen Stau-Grenzkosten entsprechen den selbst „erfahrenen“ Zeitverlusten. Das sind die Stau-Durchschnittskosten (erster Term in Gleichung (46)). Extern sind die für andere Verkehrsteilnehmer verursachten Staukosten (zweiter Term in Gleichung (46)). Durch Differenzieren von $K_{SD}(TN_S)$ nach TN_S und Multiplikation mit TN_S ergeben sich die externen Stau-Grenzkosten:

$$(49) \quad K_{SG}(TN_S) = TN_S * dK_{SD}(TN_S)/dT_{N_S} = \\ = TN_S * KT * (2,23/0,9 * (1/(2-TN_S)^2 + 2 * TN_S/(2-TN_S)^3) + 0,23) \quad [\text{Euro/PCU-km}]$$

Eine zusammenfassende Darstellung der privaten und externen Grenzkosten pro durchschnittlichem PCU-Weg folgt am Ende des nachfolgenden Kapitels in Abbildung 41.

6.3.2 Generalisierte private Grenzkosten

Wenn es darum geht, die Wirkung von Preissignalen auf das Verhalten von Kfz-Nutzenden festzustellen, dann muss der Wert ermittelt werden, den Kfz-Nutzende ihren Fahrten beimessen, denn eine besonders „wertvolle“ Fahrt wird auch bei relativ hoher Maut nicht unterbleiben; dagegen wird eine Fahrt, der geringer Wert beigemessen wird, schon bei einer geringen Mauthöhe entfallen. Es geht also darum, die Kosten festzustellen, die für Kfz-Nutzende insgesamt im Zusammenhang mit einer zusätzlichen Fahrt anfallen. Das sind neben den privaten Grenzkosten durch Betrieb und Abnutzung des Fahrzeuges (variable Fahrzeugkosten) vor allem der Wert, welcher der persönlichen Reisezeit beigemessen wird beziehungsweise die Opportunitätskosten, die darin bestehen, diese Zeit für die Fahrt statt für andere Zwecke einzusetzen. Diese generalisierten privaten Grenzkosten können sehr unterschiedlich sein, abhängig davon, ob es sich um eine kurze oder lange, langsame

¹⁴⁶ T/T_m entspricht der Auslastung. Weil in gleicher Weise auch die Teil-Verkehrsstärken des ÖV und des MIV „normiert“ werden müssen (TÖ, TI), wird einheitlich der Begriff „normierte Verkehrsstärke“ verwendet.

innerstädtische oder schnelle außerörtliche Fahrt handelt. Von den generalisierten privaten Grenzkosten kann auf den Wert der „marginalen Fahrt“ geschlossen werden, die beim geringsten Anstieg der wahrgenommenen Kosten unterlassen wird.

6.3.3 Generalisierte private Grenzkosten pro PCU-Kilometer und PCU-Weg

Im Straßennetz findet Personenverkehr mit unterschiedlichen Verkehrsmitteln zu unterschiedlichen Verkehrszwecken sowie Güter-Verkehr statt. Jedem einzelnen Weg kann ein Zeitkostensatz und eine Kapazitätsbeanspruchung in Pkw-Einheiten (PCU) zugeordnet werden. Der durchschnittliche Zeitkostensatz pro Pkw-Einheit (PCU) und Minute wurde in Kapitel 6.1.9 für Wien mit $KT = 0,342$ Euro ermittelt.¹⁴⁷

Die generalisierten privaten Grenzkosten pro PCU-Kilometer GK ergeben sich aus der Reisezeit pro Kilometer mal dem Zeitkostensatz KT plus den variablen Fahrzeugkosten KV pro Fahrzeug-Kilometer. Letztere werden für Pkw mit 0,176 Euro angesetzt.¹⁴⁸ Unter der Annahme, dass die variablen Fahrzeugkosten sich etwa proportional der Kapazitätsbeanspruchung verhalten, können die variablen Pkw-Kosten auch für Pkw-Einheiten eingesetzt werden. Durch Erweiterung von Gleichung (45) ergeben sich die generalisierten privaten Grenzkosten pro PCU-Kilometer:

$$(50) \text{ GK} = \text{KV} + \text{KT} * \text{Z(TN)} \text{ [Euro/PCU-km]}$$

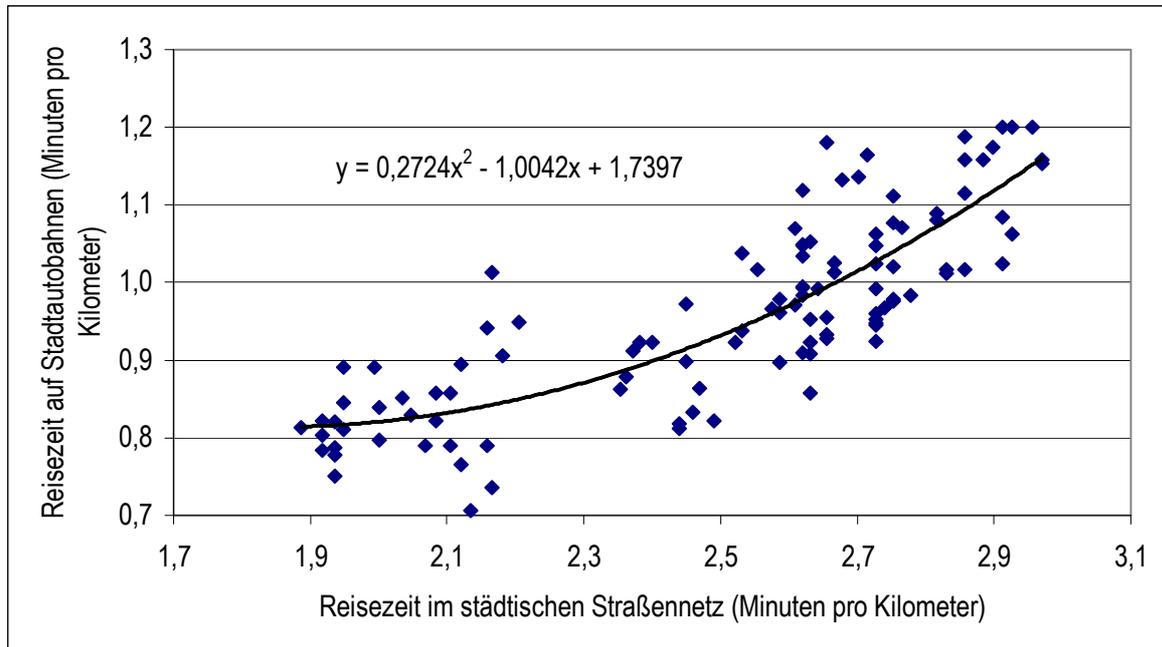
Es ist zu beachten, dass hier für KT die Zeitkosten der jeweiligen Verkehrsmittel einzusetzen sind, also z.B. KT_{MIV} für die Berechnung der generalisierten privaten Grenzkosten des MIV (siehe Tabelle 17). Werden die generalisierten privaten Grenzkosten pro PCU-Kilometer mit der durchschnittlichen Weglänge der jeweiligen Verkehrsart multipliziert, ergeben sich die privaten Grenzkosten pro durchschnittlichem PCU-Weg. Ein Problem besteht darin, dass ein Großteil der MIV-Fahrten sowohl innerhalb des städtischen Straßennetzes (Erschließungsnetz) als auch auf Autobahnen (Stadt und Umland) und auf sonstigen Straßen im Umland stattfindet. Reisegeschwindigkeiten ebenso wie deren Änderungen in Abhängigkeit von der Verkehrsbelastung verlaufen in diesen Straßennetzen unterschiedlich. Im Folgenden wird als niederrangiges Straßennetz oder „Erschließungsnetz“ das gesamte innerstädtische Straßennetz mit Ausnahme von Autobahnen und Schnellstraßen bezeichnet. Autobahnen und Schnellstraßen in Stadt und Umland sowie alle sonstigen Straßen im Umland werden zu einer zweiten Netz-Kategorie zusammengefasst.

¹⁴⁷ Dieser Durchschnittswert hängt natürlich vom Anteil des MIV an der Personenverkehrsleistung ab. Bei der Berechnung der Staukosten bei der gegenwärtigen Verkehrs-Zusammensetzung in Wien wird von einem als fix angenommenen MIV-Anteil von 0,58 ausgegangen.

¹⁴⁸ Als Faustregel etwa 50% der gültigen Kilometerpauschale für steuerlich absetzbare Pkw-Kosten.

6.3.4 Private Grenzkosten pro Weg innerhalb und außerhalb des niederrangigen Straßennetzes

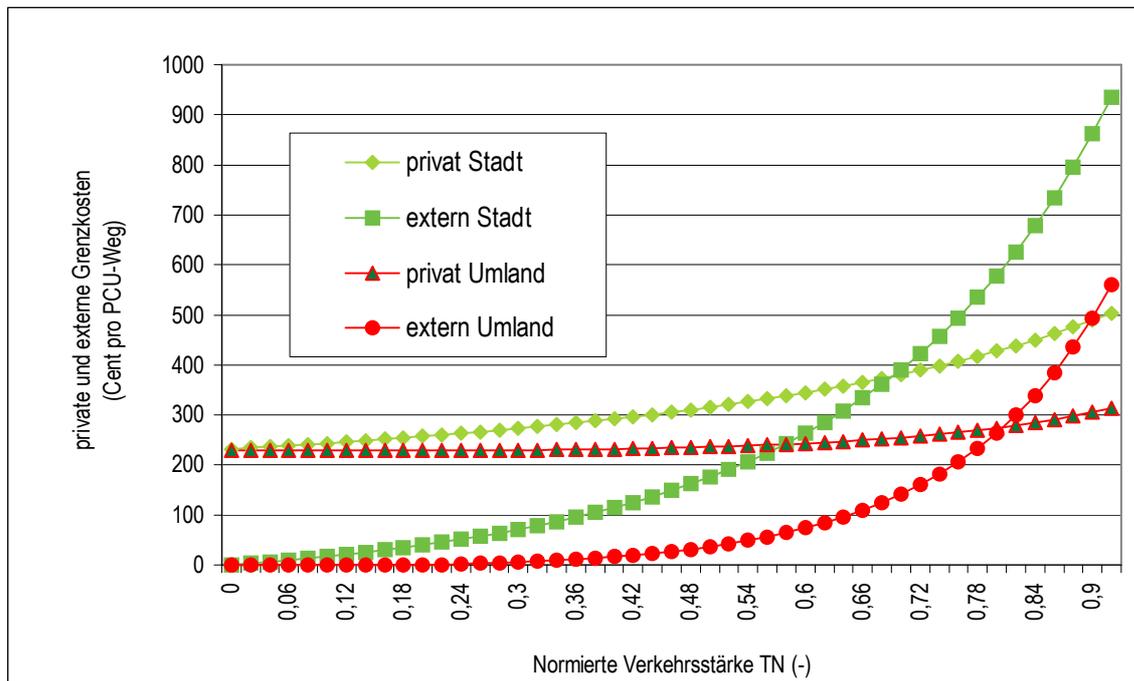
Abb. 40: Abweichung der Reisezeiten im niederrangigen Netz von jenen auf Stadtautobahnen



Quelle der Daten: Magistrat der Stadt Wien, 2006

Gegenseitige Behinderungen steigen im niederrangigen städtischen Straßennetz kontinuierlich an, während sie auf Autobahnen erst knapp vor Erreichen der Kapazitätsgrenze stark zunehmen. Das erklärt die beobachteten Unterschiede in der Charakteristik der Reisezeiten.

Sollen die durchschnittlichen privaten Grenzkosten pro Weg ermittelt werden, ist zu berücksichtigen, dass viele Wege über die Stadtgrenzen bzw. über das niederrangige Straßennetz (Erschließungsnetz) hinaus führen und dass daher ein Teil der privaten Kosten pro Weg dort anfällt. In Kapitel 6.1.2 wurde ermittelt, dass von einem durchschnittlichen MIV-Weg (Binnen-, Ziel- und Quellverkehr) der im niederrangigen Netz zurückgelegte Weg-Anteil rund 5 Kilometer beträgt. Auf Grund der Gesamtlänge eines durchschnittlichen MIV-Weges von 11 Kilometern (Socialdata, 1995, Tabelle 11) kann der Außerorts- und Autobahn-Anteil durchschnittlicher MIV-Wege mit etwa 6 km beziffert werden. Durch Einsetzen der errechneten Kostensätze pro Pkw-Einheit (PCU) und mittlerer Reisegeschwindigkeiten von 50 km/h außerorts und 24,5 km/h innerorts (siehe Kapitel 6.4.3) ergibt sich, dass im Durchschnitt ein Drittel der gesamten privaten Grenzkosten pro Kfz-Weg auf hochrangiges Netz und Umland entfallen.

Abb. 41: Private und externe Grenzkosten des MIV (nur Staukosten) pro PCU-Weg

Quelle: eigene Berechnung, eigene Darstellung

Mit „Stadt“ ist der Verkehr im städtischen Straßennetz ohne Stadtautobahnen und Schnellstraßen gemeint. Das Straßennetz „Umland“ schließt auch hochrangige Straßen im Stadtgebiet mit ein. Die Darstellung gilt für die gegenwärtige Verkehrszusammensetzung in Wien (MIV-Anteil = 0,58). Die normierte Verkehrsstärke TN entspricht der Auslastung des niederrangigen Straßennetzes.

Für eine durchschnittliche Fahrt pro Pkw-Einheit (pro PCU-Weg) können damit private Grenzkosten von 1,5 Mal den privaten Grenzkosten jenes Weg-Anteils, der auf das untergeordnete Straßennetz entfällt, angesetzt werden. Wird die Verkehrsstärke variiert, ändern sich die Reisezeiten und dadurch auch die privaten Grenzkosten. Im hochrangigen Netz und im Umland verläuft diese Änderung anders als im untergeordneten städtischen Straßennetz. Die Unterschiede werden durch Vergleich der Geschwindigkeitsdaten ermittelt und durch eine Ausgleichsfunktion beschrieben (siehe Abb. 40). Weil Kfz im Umland und auf Stadtautobahnen etwa doppelt so schnell unterwegs sind wie im innerstädtischen Straßennetz, fällt der Anteil der Zeitkosten an den generalisierten privaten Grenzkosten geringer aus. Er ergibt sich mit 63% statt 78% innerstädtisch bei durchschnittlicher Verkehrsbelastung.

6.3.5 Externe Kosten durch Unfälle, Lärm und Umweltbelastung (sonstige externe Kosten)

Hypothese II besagt, dass verkehrsbedingte externe Agglomerationseffekte die betragsmäßig größten externen Effekte des Verkehrs sind. Zur Überprüfung dieser These ist es erforderlich, neben einer Abschätzung der externen Kosten durch gegenseitige

Behinderung („Staukosten“) zumindest eine grobe Abschätzung sonstiger externer Kosten des Verkehrs zu treffen. Aus Angaben der Österreichischen Wegekostenrechnung Straße 2000 zu Fahrleistungen nach Straßentyp und Fahrzeugklasse sowie zu den Gesamtbeträgen der externer Kosten nach Straßentyp und Fahrzeugklasse (Herry und Sedlacek, 2003, S. 122-125) kann die durchschnittliche Höhe externer Kosten im Netz der Landes- und Gemeindestraßen errechnet werden.¹⁴⁹ In Summe ergeben sich externe Durchschnittskosten von etwa 13 Cent pro PCU-Kilometer. Die so errechneten Werte stellen einen Durchschnittswert für Verkehr in Ortsgebieten und im Freiland dar.

Tabelle 18: Sonstige externe Kosten in Cent pro Fahrzeugkilometer

		Unfallkosten	Lärmkosten	Schadstoff- und Gesundheits- kosten	Summe
externe Durchschnittskosten auf Landes- und Gemeindestraßen (Durchschnitt von Ortsgebiet und Freiland)	Pkw	10,4	1,1	2,1	13,6
	Bus	10,6	8,3	16,4	35,3
	Lkw	9,9	8,4	9,8	28,1
	Pkw- Einheit	9,0	1,5	2,4	12,9
externe Grenzkosten auf Straßen im Ortsgebiet	Kfz	21,6	4,4	10,8	36,8

Quelle für externe Durchschnittskosten in Ortsgebiet und Freiland: eigene Berechnungen auf Basis von Daten aus Herry und Sedlacek 2003, Seite 122-125; Quelle für externe Grenzkosten im Ortsgebiet (letzte Zeile): Rauh, 2006, S. 17 (Schadstoffe), S. 24 (Unfälle) und S. 28 (Lärm).

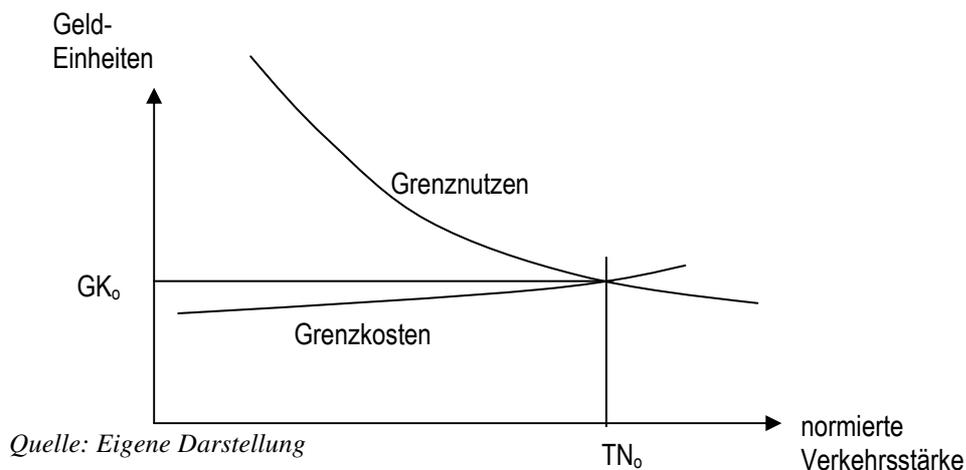
Weil in Ortsgebieten die Entfernung zwischen Belastungsquelle und Belasteten in der Regel geringer ist als im Freiland, ist hier mit höheren Kostensätzen zu rechnen. Eine Abschätzung der externen Grenzkosten durch Abgase, Unfälle und Lärm auf Straßen in Ortsgebieten (Rauh 2006, S.17, 24 und 28) ergibt einen Wert von insgesamt etwa 37 Cent pro Kfz-Kilometer. Dabei wurde angenommen, dass die externen Durchschnittskosten durch Verkehrsunfälle und Schadstoffe näherungsweise gleich den durchschnittlichen externen Grenzkosten gesetzt werden können. Bezüglich der Lärmkosten wurde ein Durchschnittswert für die Grenzkosten des Verkehrslärms in Ortsgebieten auf Basis einer Häufigkeitsverteilung von Verkehrsstärken errechnet (Ergebnis: 4,4 Cent pro Kfz-Kilometer, Rauh 2006, S.25).

¹⁴⁹ Fahrleistungen und Kosten-Anteile der von Herry und Sedlacek (2003) als „Bundesstraßen B“ bezeichneten Straßen wurden entsprechend der neu geregelten Zuständigkeit den Landesstraßen zugerechnet.

6.3.6 Nachfragefunktion und Grenznutzenfunktion

Um die Wirkung einer Internalisierung externer Kosten auf das Verkehrsaufkommen zu modellieren, ist unter anderem eine Verkehrs-Nachfragefunktion zu ermitteln. Eine Nachfragefunktion gibt die nachgefragte Menge eines Gutes in Abhängigkeit des Preises an. Wird als „Preis“ von Verkehrsleistungen die Höhe der generalisierten privaten Grenzkosten GK (Fahrzeug- und Zeitkosten) pro zusätzlicher Leistungseinheit angesetzt, ergibt sich eine Funktion der Verkehrs-Nachfrage $TN(GK)$, die für einen bestimmten Zeitpunkt des Tages angibt, welche normierte Verkehrsstärke TN sich bei einer bestimmten Höhe der privaten Grenzkosten des Verkehrs einstellt. Aus dieser Funktion ergibt sich bei Vertauschen der abhängigen und unabhängigen Variablen durch Umformen die Grenznutzenfunktion $GN(TN)$, also der Grenznutzen in Abhängigkeit von der normierten Verkehrsstärke TN . Weil bei Marktgleichgewicht die privaten Grenzkosten $GK(TN_0)$ dem vom marginalen Verkehrsteilnehmer erwarteten Grenznutzen $GN(TN_0)$ entsprechen müssen, liegt bei gegebener Verkehrsstärke und bekannter Grenzkosten-Funktion ein Punkt der Funktion $GN(TN)$ fest (siehe Abb. 42). Der weitere Verlauf der Funktion $GN(TN)$ hängt von der Elastizität der Verkehrsstärke bezüglich Änderung der privaten Grenzkosten $GK(TN)$ ab.

Abb. 42: Nachfragefunktion, Grenznutzen- und Grenzkostenfunktion



Zu jeder Tageszeit stellt sich jene Verkehrsstärke TN_0 ein, bei welcher der Grenznutzen $GN(TN_0)$ gleich den Grenzkosten $GK(TN_0)$ ist. Bei gegebener Verkehrsstärke TN_0 und bekannter Grenzkosten-Funktion liegt damit ein Punkt der Grenznutzenfunktion fest

Es wird angenommen, dass die Nachfragefunktion $TN(GK)$ des Verkehrs nicht linear verläuft, sondern einer Funktion $Y(X) = 1/X^n$ entspricht. Diese Funktion ergibt eine konstante Elastizität der Verkehrsnachfrage bezüglich der Höhe der privaten Grenzkosten von $\varepsilon = -n$.¹⁵⁰ Wird für $Y = TN/TN_0$ und für $X = GK/GK_0$ und für $n = -\varepsilon$ eingesetzt ergibt sich aus der Funktion $Y(X) = 1/X^n$

¹⁵⁰ Ableitung: $\varepsilon = dY/dX \cdot X/Y = d(X^{-n})/dX \cdot X/X^{-n} = -n \cdot X^{-n-1} \cdot X^{n+1} = -n$

$$(51) \text{TN}/\text{TN}_0 = (\text{GK}/\text{GK}_0)^\varepsilon \text{ [-]}$$

Daraus ergibt sich die Nachfragefunktion

$$(52) \text{TN}(\text{GK}) = \text{TN}_0 * (\text{GK}/\text{GK}_0)^{\varepsilon} \text{ [-]}$$

6.3.7 Die Grenznutzenfunktion

Die Grenznutzenfunktion $\text{GN}(\text{TN})$ ist der Grenznutzen in Abhängigkeit von der normierten Verkehrsstärke TN . Das ist jener Grenznutzen der marginalen Fahrt, der bei Markt-Gleichgewicht gleich den Grenzkosten GK sein muss. Für GK kann daher in Gleichung (51) $\text{GN}(\text{TN})$ eingesetzt werden

$$(53) \text{TN}_0/\text{TN} = (\text{GN}(\text{TN})/\text{GK}_0)^{-\varepsilon} \text{ [-]}$$

$$(54) (\text{TN}_0/\text{TN})^{1/\varepsilon} = \text{GN}(\text{TN})/\text{GK}_0 \text{ [-]}$$

Die Grenznutzenfunktion ergibt sich daraus mit

$$(55) \text{GN}(\text{TN}) = \text{GK}_0 * (\text{TN}_0/\text{TN})^{1/\varepsilon} \text{ [Euro/Pkw-Fahrt]}$$

Durch Einsetzen der jeweiligen normierten Verkehrsstärke in die Grenzkostenfunktion (50) kann der Anfangspunkt GK_0 der Grenznutzenfunktion bei der jeweiligen normierten Verkehrsstärke TN bestimmt werden. Aus den Fahrzeiten und Weglängen ergibt sich, dass die generalisierten privaten Grenzkosten einer durchschnittlichen Pkw-Fahrt bei der durchschnittlichen maximalen Verkehrsstärke des Tages 7,95 Euro betragen. Damit ist der Punkt GN_0 zur Spitzenzeit (normierte Verkehrsstärke $\text{T}_0 = 0,9$)¹⁵¹ bekannt. Durch Einsetzen dieses Wertes in (55) ergibt sich die Grenznutzenfunktion durchschnittlicher Pkw-Fahrten zur Spitzenzeit in Wien bei einer Elastizität der Verkehrsstärke bezüglich der privaten Grenzkosten von $-1,33$ (siehe Kap. 6.5) mit

$$(56) \text{GN}(\text{TN}) = 7,95 * (0,9/\text{TN})^{1/1,33} \text{ [Euro/Pkw-Fahrt]}$$

¹⁵¹ Siehe Abschnitt 6.2.3, erster Absatz

6.4 Tagesgang und Häufigkeitsverteilung der Verkehrsstärke

6.4.1 Ableitung der Verkehrsstärke aus der Reisegeschwindigkeit

Der Zusammenhang von Reisegeschwindigkeit V bzw. Reisezeit pro Kilometer Z und der normierten Verkehrsstärke TN ist durch Gleichung (41) gegeben. Aus dem gemessenen Tagesgang der Reisezeiten im Wiener Straßennetz (Magistrat der Stadt Wien, 2006) kann daher die Verkehrsstärke abgeleitet werden. Gleichung (41) kann folgendermaßen umgeschrieben werden:

$$(57) \quad (Z(TN) - 1,157) / 2,23 = 1 / (2 - TN)^2 \quad [-]$$

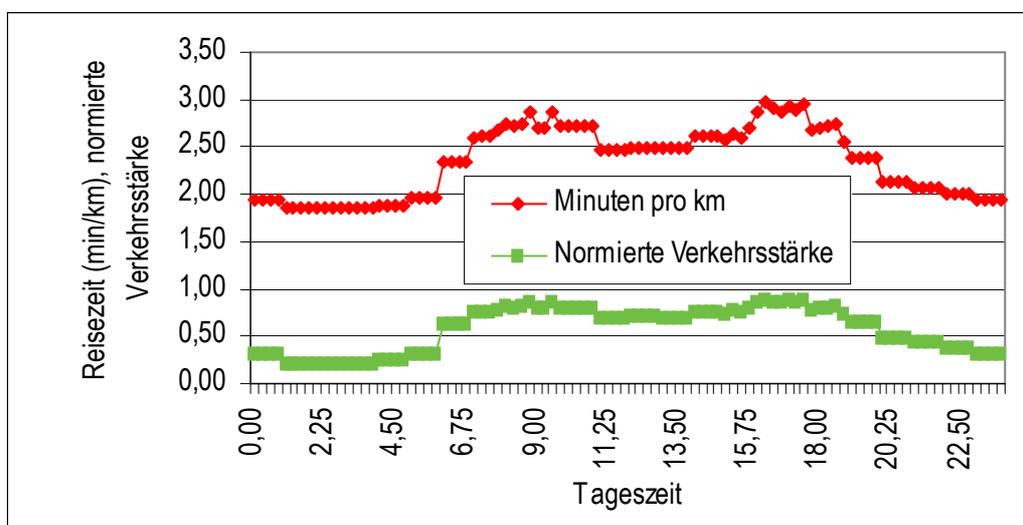
Daraus wiederum ergibt sich für TN

$$(58) \quad TN = 2 - (2,23 / (Z(TN) - 1,157))^{1/2} \quad [-]$$

Durch Einsetzen von $60/V$ für die Reisezeit in Minuten pro Kilometer ergibt sich die normierte Verkehrsstärke TN aus der gemessenen Reisegeschwindigkeit V :

$$(59) \quad TN = 2 - (2,23 / (60/V - 1,157))^{1/2} \quad [-]$$

Abb. 43: Tagesgänge von Reisezeit und Verkehrsstärke

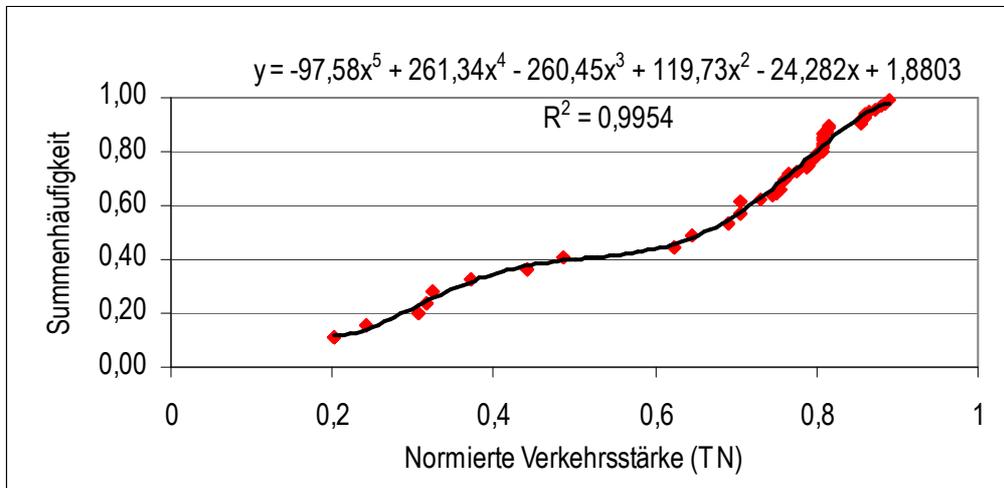


Quelle: eigene Berechnungen

6.4.2 Zeitliche Häufigkeitsverteilung der Verkehrsstärke

Die Viertelstunden-Werte aus der Tagesganglinie der Verkehrsstärke werden nach Größe geordnet. Die Anzahl der Viertelstunden bis zum jeweiligen Wert geteilt durch 96 ergibt dessen zeitliche Summenhäufigkeit. Das ist jener Anteil von 24 Stunden, in der die Verkehrsstärke kleiner oder gleich der betrachteten Verkehrsstärke ist. Für die insgesamt $24 \cdot 4 = 96$ Wertepaare wird eine polynomische Ausgleichsfunktion ermittelt:

$$(60) \quad \text{Summenhäufigkeit (TN)} = -97,58 * \text{TN}^5 + 261,34 * \text{TN}^4 - 260,45 * \text{TN}^3 + \\ + 119,73 * \text{TN}^2 - 24,282 * \text{TN} + 1,8803 \quad [-]$$

Abb. 44: Zeitliche Summenhäufigkeit der Verkehrsstärke

Quelle: eigene Berechnungen

Die Summenhäufigkeit ist das Integral über die Häufigkeit. Daher ergibt sich die Häufigkeitsfunktion als erste Ableitung der Summenhäufigkeit.

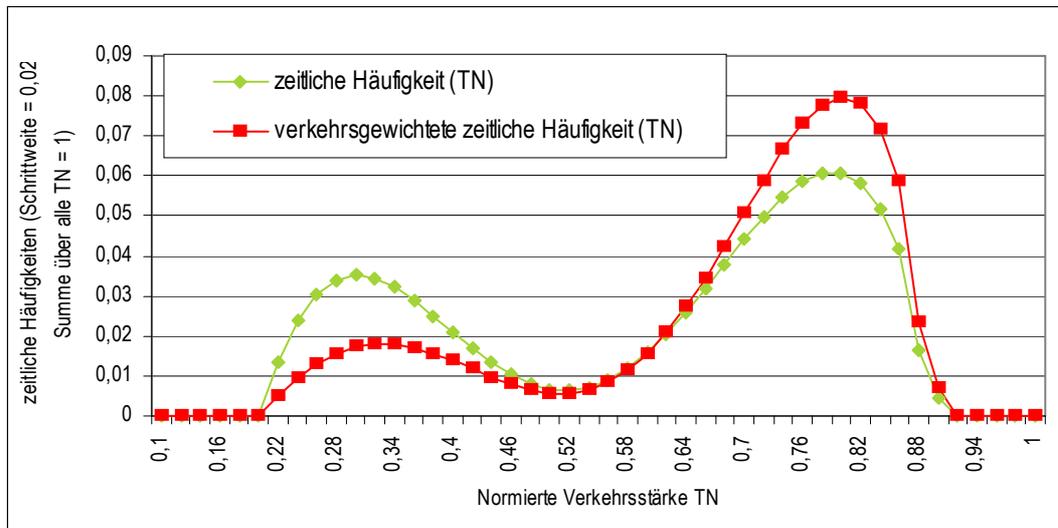
$$(61) \quad \text{Häufigkeit(TN)} = -487,9 * \text{TN}^4 + 1\,045,36 * \text{TN}^3 - 781,35 * \text{TN}^2 + 239,46 * \text{TN} - 24,28 \quad [-]$$

Für ein numerisches Modell der Häufigkeitsverteilung wird TN in Schritten variiert. Als Schrittweite für die Variation von TN wird 0,02 gewählt. Die diskrete Häufigkeitsfunktion ergibt sich durch Einsetzen der Verkehrsstärke-Schritte in die kontinuierliche Häufigkeitsfunktion und Multiplikation mit einer Konstanten. Die Konstante ist so zu wählen, dass die Summe der Häufigkeitswerte über den Verkehrsstärkebereich Eins ergibt (dargestellt in Abb. 45). Wird die Häufigkeitsfunktion mit der normierten Verkehrsstärke multipliziert, ergibt sich eine gewichtete Häufigkeitsfunktion, die den Beitrag der jeweiligen Verkehrsstärke zur gesamten Verkehrsleistung beschreibt. Eine diskrete gewichtete Häufigkeitsfunktion ergibt sich wieder durch Einsetzen der Verkehrsstärke-Schritte in die kontinuierliche Funktion und Multiplikation mit einer Konstanten:

$$(62) \quad \text{diskrete gewichtete Häufigkeit (TN)} = \text{Konstante} * \text{TN} * \text{Häufigkeit (TN)} \quad [-]$$

Die Konstante ist wieder so zu wählen, dass die Summe der gewichteten Häufigkeiten über alle Schritte Eins ergibt (dargestellt in Abb. 45).

Abb. 45: Häufigkeit und mit der Verkehrsstärke gewichtete Häufigkeit der täglichen normierten Verkehrsstärken in Wien.



Quelle: eigene Berechnungen

6.4.3 Reisegeschwindigkeiten

Wird die verkehrsgewichtete zeitliche Häufigkeit¹⁵² als Funktion der normierten Verkehrsstärke TN mit der Reisegeschwindigkeit¹⁵³ als Funktion der normierten Verkehrsstärke TN multipliziert, ergibt die Summe über alle Verkehrsstärke-Schritte die Strecke, die durchschnittlich pro Zeiteinheit zurückgelegt wird, also die durchschnittliche Reisegeschwindigkeit. Für das innerstädtische Straßennetz Wiens ergibt sich eine Reisegeschwindigkeit von 24,5 km/h ohne Autobahnen und Schnellstraßen und etwa 27 km/h¹⁵⁴ mit innerstädtischen Autobahnen und Schnellstraßen.

6.4.4 Spitzenstunden

Definition: Als Spitzenzeit soll jene Zeit gelten, in der die normierte Verkehrsstärke größer als 0,75 ist. Laut der verkehrsgewichteten zeitlichen Häufigkeit entfällt auf die so definierte Spitzenzeit 47 % der werktäglichen Verkehrsleistung. Die durchschnittliche normierte Verkehrsstärke zur Spitzenzeit ergibt sich mit 0,81.¹⁵⁵

¹⁵² siehe Gleichung (62)

¹⁵³ Reisegeschwindigkeit in km/h = $60/Z(T_N)$, Reisezeit in min/km = $Z(TN) = 1,157 + 2,23 / (2-TN)^2$ (siehe Gleichung (41))

¹⁵⁴ Annahmen: 15% der Fahrleistung entfalle auf innerstädtische Autobahnen und Schnellstraßen, wobei dort die Reisegeschwindigkeit durchschnittlich 62 km/h betrage.

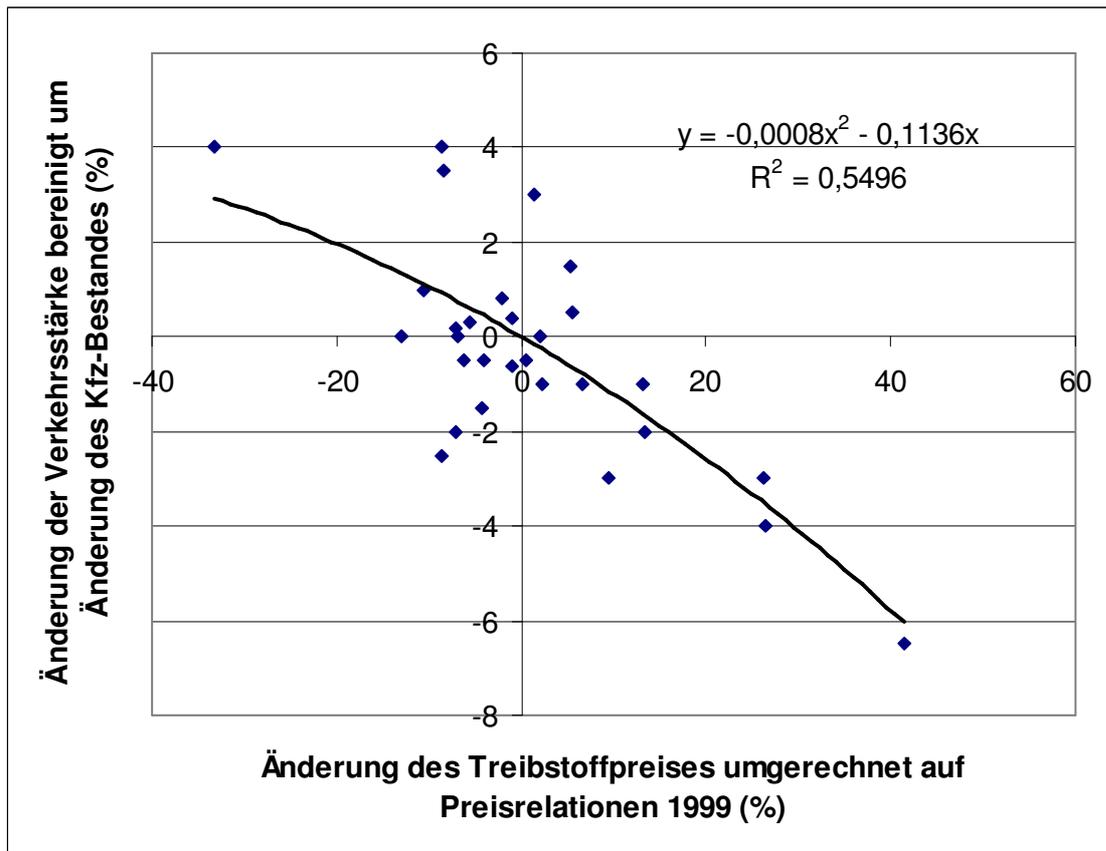
¹⁵⁵ Werte für normierte Verkehrsstärke mit Werten der verkehrsgewichteten Häufigkeit multiplizieren und Ergebnisse über Verkehrsstärken von 0,76 bis 0,9 aufsummieren.

6.5 Preis-Elastizitäten

6.5.1 Elastizität der Verkehrsstärke in Bezug auf den Treibstoffpreis

Gesucht ist der Einfluss, den eine Stadtmaut auf die Stärke des innerstädtischen Kfz-Verkehrs hat. Einen ersten Hinweis auf diesen Einfluss geben Daten zu Schwankungen des Treibstoffpreises und zu gleichzeitigen Schwankungen der durchschnittlichen Verkehrsstärke an den amtlichen Zählstellen.

Abb. 46: Elastizität der Verkehrsstärke in Bezug auf den Treibstoffpreis



Quelle: VCÖ 2004 nach Daten aus Nadler & Steierwald 2000

Die Elastizität der Verkehrsstärke in Bezug auf die Treibstoffpreise ergibt sich bei Umrechnung der Preisschwankungen auf die Preisverhältnisse des Jahres 1999 mit $\varepsilon_t = -0,1136$

Bei den Berechnungen wurde berücksichtigt, dass die Änderungen der Verkehrsstärke auch von der Zunahme der Motorisierung beeinflusst werden. Die relative Änderung der Motorisierung war vor 30 Jahren wesentlich stärker als heute. Die Änderung der Verkehrsstärke gegenüber dem Vorjahr wurde daher um die Änderung des Kfz-Bestandes gegenüber dem Vorjahr bereinigt. Aus den Daten über die prozentuellen Schwankungen des Treibstoffpreises der einzelnen Jahre wurde daher die jeweilige reale (= inflationsbereinigte) Änderung des Treibstoffpreises errechnet und ins Verhältnis zum Treibstoffpreis des Jahres 1999 gesetzt. Die Elastizität ε der Verkehrsstärke $V(T)$ in Bezug auf den Treibstoffpreis T ist definiert als

$$(63) \varepsilon_t = dV(T)/dT * T/V(T). [-]$$

Die Ausgleichsfunktion $y = -0,0008x^2 - 0,1136x$, die sich aus der Streuung der Wertepaare von X (Änderung der bereinigten Verkehrsstärke V) und Y (Änderung des Treibstoffpreises bezogen auf Preisverhältnisse des Jahres 1999) ergibt, bedeutet daher, dass die Elastizität der Verkehrsstärke in Bezug auf die Treibstoffpreise mit $\varepsilon_t = -0,1136$ angesetzt werden kann.

Dieser Wert ist im unteren Bereich gängiger Angaben zur Treibstoffpreis-Elastizität der Verkehrsleistung angesiedelt.¹⁵⁶

3.3.1 Elastizität in Bezug auf Änderungen der generalisierten Kosten

Die durchschnittlichen generalisierten privaten Grenzkosten (GK) pro PCU-Weg ergeben sich beim derzeitigen Spitzenverkehr in Wien mit 7,95 Euro. Der Treibstoffpreis macht davon 9,4 % aus. Die Elastizität bezogen auf die generalisierten Kosten entspricht der Elastizität bezogen auf den Treibstoffpreis geteilt durch den Benzinpreis-Anteil an den generalisierten Kosten. (Dodgson et al., 2002, S. 28). Das bedeutet bei einer Treibstoff-Preiselastizität ε_t dieser Fahrten von $-0,1136$, dass die Elastizität ε bezogen auf eine Änderung der generalisierten privaten Grenzkosten $-1,21$ beträgt.

Diese Elastizität gilt für durchschnittliche Kfz-Fahrten, die zu einem großen Teil auf Freilandstrecken entfallen. Relevant ist jedoch die Elastizität des Kfz-Verkehrs in Städten. Im Pkw-Personenverkehr haben die Betroffenen vor allem innerhalb von Städten zahlreiche Möglichkeiten, auf Preiserhöhungen zu reagieren (Thaller, 1999, S. 29). Daher sollte die Elastizität im Stadtverkehr höher sein als jene Elastizität, die über die Treibstoff-Preiselastizität der Fahrleistung errechnet wurde.¹⁵⁷

Diese Vermutung wird durch die Auswertung der Ergebnisse der Stadtmaut unterstützt, die im Februar 2002 im Zentrum von London eingeführt wurde (Santos und Shaffer, 2004). Hier wurde die Preiselastizität der Pkw-Verkehrsleistung in Bezug auf die Höhe der generalisierten privaten Kosten mit $-1,3$ ermittelt (Santos und Shaffer, 2004, Seite 175). Die Preiselastizität von $-1,3$ wird daher in dieser Arbeit für die Berechnungen der Nachfragefunktion (siehe Kapitel 6.3.6 und 6.3.7) verwendet.

¹⁵⁶ Eine Änderung der privaten Kosten des Autoverkehrs beeinflusst auch die längerfristig stattfindenden Entscheidungen über den Fahrzeugkauf. Langzeit-Elastizitäten, die auch Änderungen des Pkw-Bestandes berücksichtigen, können daher etwa doppelt so hoch sein, wie kurzfristige Elastizitäten (Litman, 2006, S.13).

¹⁵⁷ In die Berechnung der Elastizität bezüglich des Treibstoffpreises ist die jeweilige Änderung des gesamten Autoverkehrs in Stadt und Land eingeflossen, die ihrerseits Grundlage für die Abschätzung der Elastizität bezogen auf generalisierte Kosten war.

6.6 Abschätzung des Modal-Split in den internationalen Beispielstädten

6.6.1 Verkehrsleistung des nicht motorisierten Verkehrs (NMV) abschätzen

Um den Anteil des motorisierten Individualverkehrs (MIV) am gesamten innerstädtischen Personenverkehr der internationalen Beispielstädte zu bestimmen, muss auch für den Anteil des nicht motorisierten Verkehrs (NMV) an der Verkehrsleistung zumindest ein Schätzwert ermittelt werden. Die folgende Schätzung basiert auf den beiden Einflussgrößen Reisezeit und Anteil des öffentlichen Verkehrs. Es gilt die Annahme, dass auf etwa 7 ÖV-Personenkilometer ein Kilometer an nicht motorisiert zurückgelegten Zu- und Abgangswegen kommt. Weiters gilt im Sinn eines begrenzten Reisezeitbudgets von einer bis maximal 2 Stunden täglich (Ammoser und Hoppe 2006, S.10) die Annahme, dass die Zeit, die für zusätzliche Wege mit nicht motorisierten Verkehrsarten aufgewendet wird, exponentiell mit der bereits für MIV und ÖV aufgewendeten Zeit t zurückgeht:

$$\begin{aligned} (64) \text{ NMV-Personenkilometer pro Kopf und Jahr} = \\ = (2 * \exp(-t/0,41) \text{ Stunden/Tag}) * 4 \text{ km/Stunde} * 365 \text{ Tage} + \\ + (\text{ÖV-Personenkilometer pro Kopf und Jahr})/7 \end{aligned}$$

Der erste Klammerausdruck ergibt einen Schätzwert für jene Reisezeit, die täglich für sonstige NMV-Wege (ohne Wege von und zu ÖV-Haltestellen) aufgewendet wird. Diese „sonstige NMV-Reisezeit“ wird durch die Faktoren 0,41 und 2 so kalibriert, dass sich für Wien ein Reisezeitbudget von 81 Minuten pro Kopf und Tag (Herry und Sammer, 1999a, Seite 63) und aus Gleichung (64) insgesamt der bekannte Anteil von 9,2 % an nicht motorisierter Personenverkehrsleistung ergibt.¹⁵⁸

6.6.2 Verringerte Kapazitätsbeanspruchung durch motorisierte Zweiräder berücksichtigen

In den Angaben von Kenworthy und Laube (Kenworthy und Laube, 2002) zu den Personenkilometern, die mit privaten Motorfahrzeugen zurückgelegt werden, wird nicht zwischen Pkw-Fahrten und Fahrten mit motorisierten Zweirädern unterschieden. Für die Kapazitätsauslastung ist jedoch ein hoher Anteil an motorisierten Zweirädern, wie er in asiatischen Großstädten auftritt, zu berücksichtigen. Bezüglich Kapazitätsbeanspruchung kann ein motorisiertes Zweirad unter Verkehrsbedingungen asiatischer Großstädte mit etwa 0,30 Pkw-Einheiten (PCU) angesetzt werden (Santos und Shaffer, 2004, Tabelle 6).¹⁵⁹

¹⁵⁸ Siehe Kapitel 6.1.6.

¹⁵⁹ Santos und Shafer setzen die Kapazitätsbeanspruchung eines Motorrads mit 0,5 Pkw-Einheiten an, denn ein einzelnes Zweirad benötigt in vielen Verkehrssituationen trotz geringer Breite einen vollen Fahrstreifen. Wenn, wie in asiatischen Großstädten, dichter Zweiradverkehr auftritt, kann damit gerechnet werden, dass die Restbreite des Fahrstreifens mit weiteren Zweirädern aufgefüllt wird. Die Kapazitätsbeanspruchung wird daher in diesem Fall auf 0,3 Pkw-Einheiten geschätzt.

Gesucht ist daher ein Korrekturfaktor, mit dem der Anteil der mit Auto und Zweirad zurückgelegten MIV-Personenkilometer in einen fiktiven MIV-Anteil umgerechnet werden kann, der bei ausschließlicher Pkw-Nutzung die gleiche Kapazitätsauslastung bewirken würde. Das Verhältnis von Pkw-Personenkilometern zu Personenkilometern mit motorisierten Zweirädern kann anhand der Fahrzeugbestände abgeschätzt werden. Es gelten folgende Formelzeichen für die Motorisierungsgrade (jeweils in Fahrzeugen pro 1000 Einwohner):

Pkw-Motorisierungsgrad = MP,

Pkw-Motorisierungsgrad in Wien = MP_w

Grad der Motorisierung mit motorisierten Zweirädern = MR,

Grad der Motorisierung mit motorisierten Zweirädern in Wien = MR_w

Unter der Annahme, dass vorhandene Fahrzeuge etwa gleich häufig für Fahrten innerhalb des Stadtgebietes verwendet werden,¹⁶⁰ lauten die Indikatoren der Personenverkehrsleistung und der Kapazitätsbeanspruchung:

(65) Indikator der Personenverkehrsleistung = MP + 0,7*MR [Fahrz./1000 Einwohner]

(66) Indikator der Kapazitätsbeanspruchung = MP + 0,2*MR [Fahrz./1000 Einwohner]

Der Korrekturfaktor ergibt sich aus dem Verhältnis des Indikators der Personenverkehrsleistung zum Indikator der Kapazitätsbeanspruchung, wobei der Indikator für Wien auf 1 normiert wird:¹⁶¹

$$(67) \text{ Korrekturfaktor} = \\ = ((MP + 0,2*MR)/(MP + 0,7*MR))/((MP_w + 0,2*MR_w)/(MP_w + 0,7*MR_w)) \text{ [-]}$$

Mit obigem Korrekturfaktor ist der MIV-Anteil der Personenverkehrsleistung einer Stadt zu multiplizieren, um zu jenem MIV-Anteil zu gelangen, der die laut These vorhergesagte Wirkung auf die Bevölkerungsdichte haben sollte.

Die Anteile motorisierter Zweiräder an der Verkehrsleistung in Europa, Nordamerika und Australien sind minimal. Die Korrekturfaktoren liegen daher generell sehr nahe bei 1. Hohe Anteile motorisierter Zweiräder gibt es dagegen in vielen asiatischen Großstädten.

¹⁶⁰ Bei einem Pkw-Besetzungsgrad von 1,35 Personen gilt für das Verhältnis der Verkehrsleistungen pro Fahrt Pkw : Zweirad = 1 : 0,74. Unter der Annahme, dass die Zweirad-Wege etwas kürzer sind, wird ein Verhältnis von 1 : 0,7 angenommen.

¹⁶¹ In die Berechnung der Erreichbarkeit in Abhängigkeit des Modal Split und der Bevölkerungsdichte ist der Moped- und Motorrad-Anteil Wiens bereits eingeflossen. Zu korrigieren ist daher nur die Abweichung vom Wiener Anteil.

Tabelle 19: Korrekturfaktor zur Berücksichtigung des Anteils motorisierter Zweiräder am MIV

	Pkw-Motorisierungsgrad [Pkw pro 1000 Einwohner]	2-Rad-Motorisierungsgrad [Mopeds und Motorräder pro 1000 Einwohner]	Indikator der Personenverkehrsleistung [Fahrz./1000 Einwohner]	Indikator der Kapazitätsbeanspruchung [Fahrz./1000 Einwohner]	Korrekturfaktor [-]
Städte in Europa	392	15	402,5	396,5	1,00
Städte in Australien	491	15	501,5	495,5	1,00
Städte in den USA	608	18	620,6	613,4	1,00
Wien	402	15	412,5	406,5	1,00
Hongkong	43	4	45,8	67,8	0,98
Manila	66	6	70,2	44,2	0,98
Tokio	225	36	250,2	235,8	0,96
Seoul	66	22	81,4	72,6	0,91
Singapur	101	45	132,5	114,5	0,88
Bangkok	199	124	285,8	236,2	0,84
Kuala Lumpur	170	180	296	224	0,77
Jakarta	75	98	143,6	104,4	0,74
Surabaya	40	147	142,9	84,1	0,60

Quelle: Barter und Kenworthy, 1997, Tabelle 3 + eigene Berechnungen

6.7 Erreichbarkeit im internationalen Städtevergleich

Die Modellrechnung in Kapitel 3.1.6 zeigt jedenfalls für geringe bis mittlere MIV-Anteile, dass bei geringerem MIV-Anteil am Personenverkehr höhere Erreichbarkeit zu erwarten ist als bei niedrigem MIV-Anteil. Das Berechnungsmodell beruht auf zahlreichen Annahmen. Unter anderem ist die durchschnittliche Reisegeschwindigkeit, aus der sich der Indikator der Erreichbarkeit ergibt, auf Basis komplexer Modell-Annahmen errechnet. Es ist daher zu überprüfen, ob eine negative Korrelation zwischen MIV-Anteil und Erreichbarkeit auch direkt aus Mobilitätsdaten von internationalen Beispielstädten abgeleitet werden kann.

6.7.1 Empirische Daten zu Bevölkerungsdichte und Reisegeschwindigkeit

Kenworthy und Laube liefern in der Studie „The potential for enhancing urban rail opportunities & reducing automobile dependence in cities“ (Kenworthy & Laube, 2002) verkehrsrelevante Kenngrößen von 46 Großstädten aus vier Kontinenten nach dem Stand des Jahres 1990. Darunter sind Daten zur durchschnittlichen Reisegeschwindigkeit des Straßenverkehrs sowie zur MIV-Fahrleistung pro Kopf der Bevölkerung und Jahr, die als Indikatoren für die durchschnittliche Reisegeschwindigkeit im MIV beziehungsweise für den MIV-Anteil an der Personenverkehrsleistung dienen können. Für die Berechnungen der Erreichbarkeit gilt die Definition der Erreichbarkeit die in Kapitel 1.2.2 getroffen wurde. Der Indikator der Erreichbarkeit wird jedoch nicht wie bisher nach Gleichung (3) errechnet. Stattdessen wird ein „Indikator der MIV-Ereichbarkeit“ verwendet. Dieser Indikator wird nach Gleichung (2) errechnet indem für „V“ die jeweilige durchschnittliche Geschwindigkeit des Kfz-Verkehrs eingesetzt wird. Die Dimension des Indikators der MIV-Ereichbarkeit ist km^2/h^2 .

6.7.2 Korrelationen zwischen Kenngrößen des Verkehrs und der Bevölkerungsdichte

In der nachfolgenden Tabelle 20 sind Kenngrößen des motorisierten Individualverkehrs (MIV) und des öffentlichen Verkehrs (ÖV) aufgelistet. Im Folgenden werden nur Zusammenhänge mit Kennwerten des MIV (MIV-Fahrleistung pro Kopf und Jahr, MIV-Ereichbarkeit) analysiert. Eine Analyse bezüglich Kennwerten des ÖV wäre nicht zielführend. Einerseits ist das ÖV-Angebot fast ausschließlich von der Verkehrspolitik abhängig und daher extrem unterschiedlich¹⁶²; andererseits wäre eine allfällige Rückwirkung auf die Siedlungsstruktur nur durch den ÖV und den nicht motorisierten Verkehr (NMV) gemeinsam zu erwarten. Für Letzteren liegen jedoch keine oder zumindest keine vergleichbaren Daten vor.

¹⁶² Innerhalb Europas zeigt sich keine Korrelation zwischen Bevölkerungsdichte und ÖV-Nutzung (Personenkilometer pro Kopf und Jahr). Das Bestimmtheitsmaß liegt unter 0,01.

Tabelle 20: Verkehrsverhalten, Infrastruktur und Verkehrsleistungen in Großstädten im internationalen Vergleich

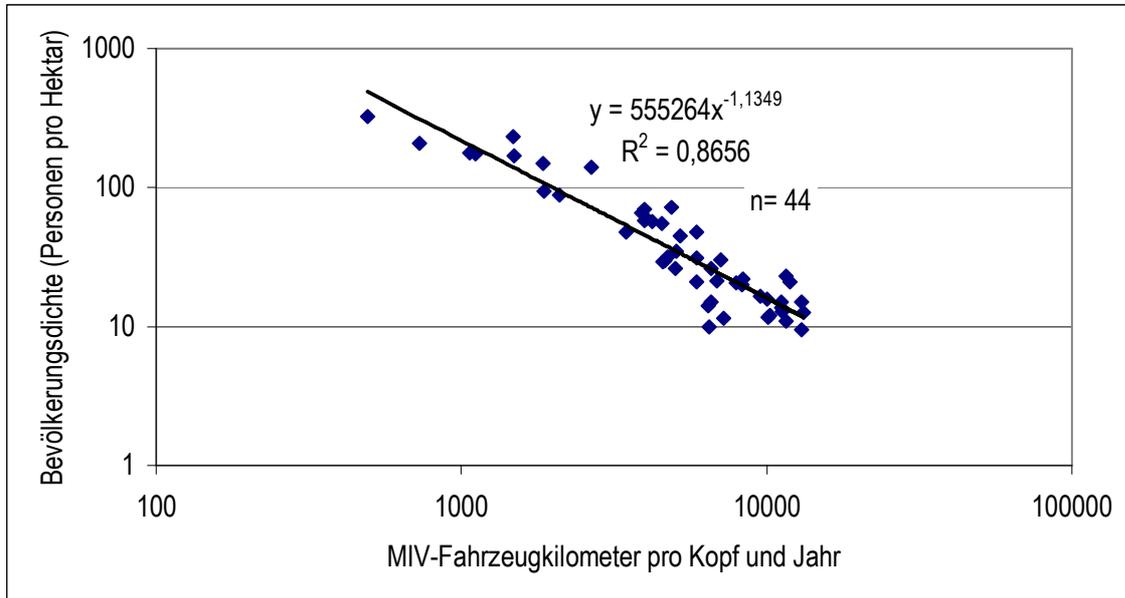
	Indikator der Erreichbarkeit im MIV (km ² /h ²)	MIV-Fahrzeugkilometer pro Kopf und Jahr	MIV-Personenkilometer pro Kopf und Jahr	ÖV-Personenkilometer pro Kopf und Jahr	Durchschnittliche Geschwindigkeit des MIV (km/h)	Durchschnittliche Geschwindigkeit des ÖV (km/h)	Bevölkerungsdichte (Personen pro Hektar)	Straßennetzlänge (Meter pro Person)
Städte in den USA								
Boston	470	10280	17373	627	52,3	29,5	12	6,7
Chicago	479	9525	14097	805	45	36,8	17	5,2
Denver	762	10011	13515	199	58,1	24,2	16	7,6
Detroit	578	11239	15846	171	56,3	22,5	13	6
Houston	508	13016	19004	215	61,2	23,6	10	11,7
Los Angeles	665	11587	16686	352	45	19,9	23	3,8
New York	419	8317	11062	1334	38,3	34,2	20	4,6
Phoenix	417	11608	15903	124	51,5	24,5	11	9,6
Portland	412	10114	14665	286	49,7	27	12	9,1
Sacramento	740	13178	19239	117	63,9	25,2	13	8,8
San Diego	665	13026	18757	259	55,7	28,9	15	5,5
San Francisco	589	11933	16229	899	44,3	33,2	21	4,6
Washington	353	11182	16214	774	42,4	32,2	14	5,2
Durchschnitt	556	11155	16045	474	51,1	27,8	15	6,8
Australische Städte								
Brisbane	359	6467	11188	900	50,1	38,8	10	8,2
Melbourne	407	6436	9782	844	45,1	27,1	14	7,7
Perth	333	7203	12029	544	45	26,3	12	10,7
Sydney	411	5885	9417	1769	37	33,5	21	6,2
Durchschnitt	444	6571	10797	882	45,5	30,5	15	8,3
Kanadische Städte								
Calgary	650	7913	11078	775	47,1	27,7	21	4,9
Edmonton	686	7062	10028	728	40	20,7	30	4,8
Montreal	844	4746	6502	952	43,3	25,1	32	4,5
Ottawa	715	5883	8236	850	40	24	31	7,1

Toronto	455	5019	7027	2173	35	26,1	26	2,6
Vancouver	454	8361	12541	871	38	25,3	22	5,1
Winnipeg	373	6871	9620	635	35	19	21	4,2
Durchschnitt	593	6551	9290	998	39,8	24	26	4,7
Europäische Städte								
Amsterdam	1015	3977	6522	1061	35	22,5	58	2,6
Brüssel	1477	4864	6809	1428	37,9	28,8	72	2,1
Kopenhagen	1036	4558	7749	1607	50	47,1	29	4,6
Frankfurt	617	5893	8309	1149	30	45,8	48	2
Hamburg	450	5061	7592	1375	30	33,2	35	2,6
London	860	3892	5644	2405	30,2	43,4	66	2
Munich	998	4202	5925	2463	35	42,6	57	1,8
Paris	453	3459	4842	2120	25,7	38	48	0,9
Stockholm	379	4638	6261	2351	30	38,2	30	2,2
Wien	756	3964	5272	2430	27,5	25,1	70	1,8
Zürich	833	5197	7692	2459	36	44,7	45	4
Durchschnitt	875	4519	6602	1895	33,4	37,2	55	2,4
Wohlhabende Städte in Asien								
Hongkong	3048	493	813	3784	25,7	27,9	323	0,3
Singapur	1418	1864	3169	2775	32,5	25,7	94	1,1
Tokio	757	2103	3175	5501	24,4	38,5	89	3,9
Durchschnitt	1822	1487	2386	4020	27,5	30,7	169	1,8
Städte in asiatischen Entwicklungsländern								
Bangkok	343	2664	4634	2313	13,1	9,2	140	0,6
Jakarta	1392	1112	1546	1323	23,6	15,2	175	0,5
Kuala Lumpur	735	4032	6299	1577	29,4	16,3	60	1,5
Manila	1941	732	1582	2568	25,5	17,1	209	0,6
Seoul	1909	1483	2464	2890	24	25,7	232	0,8
Surabaya	1843	1064	1568	555	27	17,5	177	0,3
Durchschnitt	1214	1848	3016	1871	23,8	16,8	150	0,7

Daten: Auszug aus Kenworthy & Laube, 2002, Seite 20 ff., eigene Berechnung des Indikators der MIV-Erreichbarkeit

6.7.3 Korrelationen zwischen MIV-Fahrleistung pro Kopf der Bevölkerung und Jahr, Bevölkerungsdichte und MIV-Geschwindigkeit

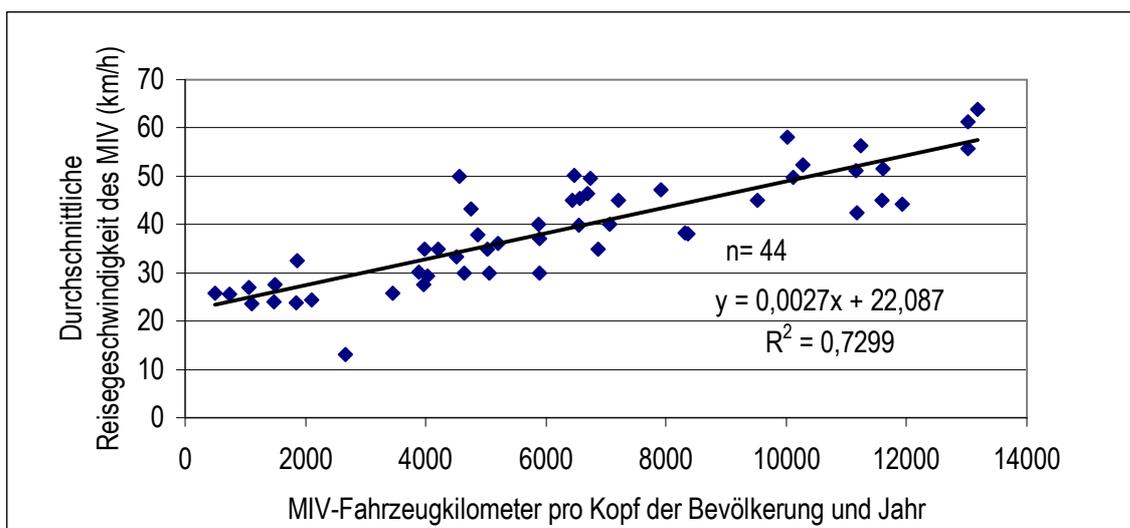
Abb. 47: Bevölkerungsdichte und MIV-Fahrleistung pro Kopf und Jahr in 46 Großstädten



Quelle: eigene Darstellung auf Basis von Daten aus Kenworthy & Laube 2002

Besonders auffallend ist die Korrelation zwischen Bevölkerungsdichte und MIV-Fahrleistung pro Kopf der Bevölkerung und Jahr. Die Bevölkerungsdichte sinkt etwa proportional zum Kehrwert der MIV-Fahrleistung pro Kopf und Jahr (Exponent = -1,1349. Bestimmtheitsgrad = 0,8656).

Abb. 48: Korrelation von MIV-Fahrleistung und Reisegeschwindigkeit des MIV in 46 Großstädten

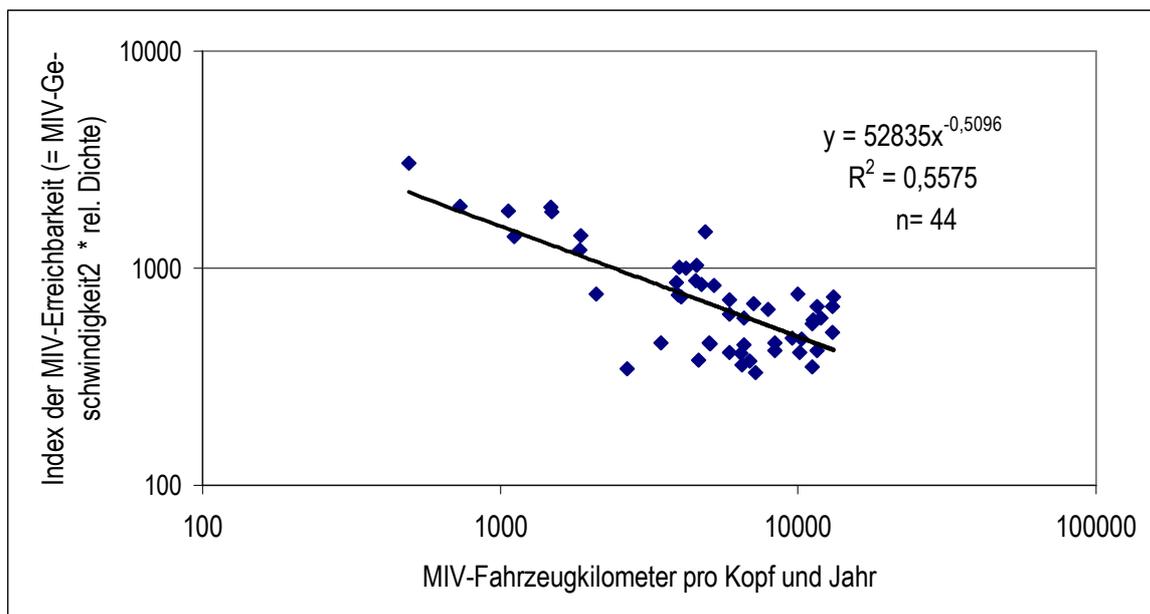


Quelle: Eigene Berechnung auf Grundlage von Daten aus Kenworthy & Laube 2002

Eine weitere auffallende Korrelation ist jene zwischen den MIV-Fahrzeugkilometern pro Kopf und Jahr und der durchschnittlichen Geschwindigkeit des motorisierten Straßenverkehrs. Obwohl die relativ hohe Kapazitätsbeanspruchung durch den MIV tendenziell zu gegenseitigen Behinderungen und Zeitverlusten führen sollte, ist ein linearer Anstieg der MIV-Geschwindigkeit in Abhängigkeit von den MIV-Fahrzeugkilometern pro Kopf und Jahr zu beobachten. Für die Ausgleichsgerade gilt $y = 0,0027 * x + 22,087$ (Bestimmtheitsmaß = 0,73). Dieses Ergebnis spiegelt wider, dass mit höherer MIV-Fahrleistung pro Kopf und Jahr gleichzeitig die flächenbezogene Bevölkerungs- und Verkehrsdichte (MIV-, ÖV- und Lkw-Fahrleistung pro Flächeneinheit) tendenziell sinkt, wodurch im Endeffekt das Straßennetz entlastet wird. Stärkere Abweichungen von dem durchschnittlich zu erwartenden Zusammenhang zwischen MIV-Stärke und -Geschwindigkeit könnten auf stärkere Abweichungen von dem bei der jeweiligen Bevölkerungsdichte geltenden durchschnittlichen Ausbaugrad des Straßennetzes hindeuten.

6.7.4 Korrelation zwischen MIV-Fahrleistung pro Kopf der Bevölkerung und Erreichbarkeit

Abb. 49: Korrelation zwischen MIV-Fahrleistung pro Kopf der Bevölkerung und Jahr und MIV-Erreichbarkeit in 46 Großstädten



Quelle: Eigene Berechnung auf Grundlage von Daten aus Kenworthy & Laube 2002

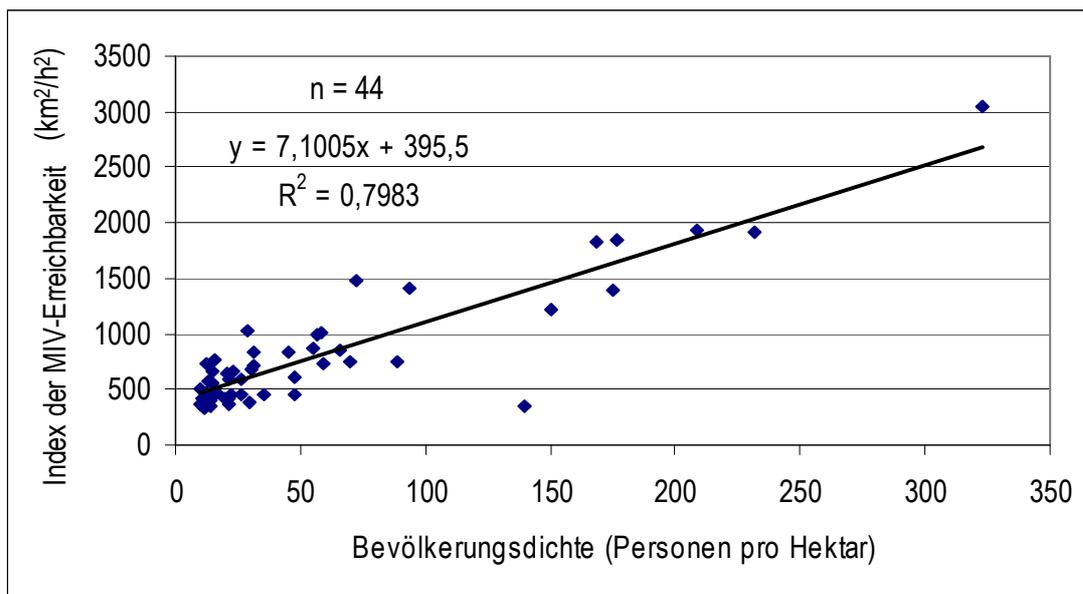
Die Daten der internationalen Beispielstädte legen die Vermutung nahe, dass allfällige Erreichbarkeits-Vorteile steigender MIV-Nutzung tendenziell durch eine Veränderung der Bevölkerungsdichte kompensiert werden. Obwohl in den betrachteten Städten die durchschnittliche MIV-Reisegeschwindigkeit mit MIV-Fahrleistung pro Kopf und Jahr steigt, zeigt sich, dass der Indikator der MIV-Erreichbarkeit entsprechend einer negativen Potenz der Stärke des MIV abnimmt (Exponent = -0,5096, Bestimmtheitsmaß = 0,5575).

Der Indikator der MIV-Erreichbarkeit ist aus der von Kenworthy & Laube angegebenen durchschnittlichen Geschwindigkeit des Straßenverkehrs errechnet. Es handelt sich also um jene Erreichbarkeit, die für den überwiegenden Teil des Wirtschaftsverkehrs (Lkw, Lieferwagen + Personen-Wirtschaftsverkehr im Pkw) maßgeblich ist.

6.7.5 Korrelation zwischen Bevölkerungsdichte und MIV-Erreichbarkeit

Die Erreichbarkeit muss sowohl mit der Bevölkerungsdichte als auch mit der Geschwindigkeit steigen. Da die MIV-Geschwindigkeit mit zunehmender Stärke des MIV pro Kopf steigende Tendenz zeigt (siehe Abb.48), muss vor allem die Abnahme der Dichte mit steigender MIV-Stärke (siehe Abb.47) dafür entscheidend sein, dass die MIV-Erreichbarkeit mit zunehmender MIV-Stärke sinkende Tendenz aufweist (siehe Abb.49). Die relativ starke Korrelation zwischen Bevölkerungsdichte und MIV-Erreichbarkeit unterstützt diese Vermutung. Über der Bevölkerungsdichte als unabhängiger Variabler ergibt sich zumindest im Bereich tatsächlich auftretender Dichten¹⁶³ ein etwa linearer Anstieg des Indikators der MIV-Erreichbarkeit (Bestimmtheitsmaß = 0,7983):

Abb. 50: Korrelation zwischen Bevölkerungsdichte und MIV-Erreichbarkeit in 46 Großstädten



Quelle: Eigene Berechnung auf Grundlage von Daten aus Kenworthy & Laube 2002

¹⁶³ Bei der Dichte Null müsste die Erreichbarkeit jedenfalls Null sein. Bei der Analyse sehr geringer Dichten müsste sich daher eine Ausgleichsfunktion ergeben, die durch Null geht.

6.8 Literatur

Alonso, W., Location and Land Use, Harvard University Press, 1964

Alonso, W., Location and Land Use: Towards a General Theory of Land Rent, Cambridge (Mass.), 1974

Ammoser H., Hoppe M., Glossar Verkehrswesen und Verkehrswissenschaften, Diskussionsbeiträge aus dem Institut für Wirtschaft und Verkehr, 2006, 2, Die Professoren des Instituts für Wirtschaft und Verkehr (Herausgeber), http://tu-dresden.de/die_tu_dresden/fakultaeten/vkw/iwv/diskuss/2006_2_diskusbtr_iwv.pdf, 9. 3. 2007

Anas, A., Arnott, R., Small, K. A., Urban Spatial Structure, 1998
<http://www.socsci.uci.edu/~ksmall/JEL%20Paper.pdf>, 10. 9. 2006

Angel, S., Sheppard, S. C., Civco, D. L., The Dynamics of Global Urban Expansion, Weltbank, 2005
http://siteresources.worldbank.org/INTURBANDEVELOPMENT/Resources/dynamics_urban_expansion.pdf, 10. 10. 2006

Apel, D., Lehmbrock, M. u.a., Kompakt, mobil, urban. Stadtentwicklungskonzepte zur Verkehrsvermeidung im internationalen Vergleich. Difu-Beiträge zur Stadtforschung Nr. 24, Berlin. 1998

Arnott R. J., Unpriced Transport Congestion, Journal of Economic Theory, 1979, 21, pp. 295-316

Barter, P. A., Kenworthy, J. R., Urban Transport and Land Use Patterns - Challenges and Opportunities of High Density Cities in East and Southeast Asia, Perth, 1997,
<http://www.warc.murdoch.edu.au/wp/wp81.rtf>, 5.11.2006

Barter, P.A., Urban Transport in Asia: Problems and Prospects for High-Density Cities, Asia-Pacific Development Monitor, 2000, 2 (1), pp. 33-66.
<http://www.spp.nus.edu.sg/faculty/paulbarter/Barter%20for%20AP%20Dev%20Monitor.pdf>,
15. 1. 07

Bertaud A., Note on Transportation and Urban Spatial Structure, Forschungsbericht zur ABCDE-Konferenz, Washington, 2002,
http://alain-bertaud.com/images/AB_Transportation_and_Urban_Spatial_Structure_revised2.pdf,
9. 2. 2007

Bodenmann B., Modelle zur Standortwahl von Unternehmen, Arbeitsbericht Verkehrs- und Raumplanung 336, ETH-Zürich, Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme, Wien, 2005

Bökemann D., Kramar H., Ermittlung der Standortauswirkungen von Erreichbarkeitsverschlechterungen im oberösterreichischen Zentralraum durch regelmäßig auftretenden Stau, Endbericht des Arbeitspaketes "N-Stau", im Auftrag des Amtes der Oberösterreichischen Landesregierung und des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie, Wien, 2003

Borck R., Stadtökonomik - WS 2005/2006, Wirtschaftswissenschaftliche Fakultät der Humboldt-Universität zu Berlin, Lehrstuhl für öffentliche Finanzen, Berlin, 2005
<http://www.wiwi.hu-berlin.de/Professuren/vwl/oef/dok/stadt/>, 28.2.2007

Borrmann M., Peistrup M., City-Maut auf Basis von Grenzkostenpreisen, Internationales Verkehrswesen, 2004, 56 (11), S. 488-492

Bracke D., Verfügungsrechte und Raumnutzung. Dissertation an der Universität Dortmund, Dortmund, 2004

Brueckner, J.K., Urban sprawl: Diagnosis and Remedies, International Regional Science Review, 2000, 23, pp. 160–171.

Brueckner, J.K., Urban sprawl: Lessons from Urban Economics, Brookings-Wharton Papers on Urban Affairs, 2001, pp. 65–97.

Brueckner, J.K., Fansler, D., The Economics of Urban Sprawl: Theory and Evidence on the Spatial Size of Cities, Review of Economics and Statistics, 1983, 55, pp. 479–482.

Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (Herausgeber), Umweltbilanz Verkehr - Österreich 1950-1996 - Environmental Balance of Transport - Austria 1950-1996, Wien, 1997

Burchfield M. et al. (2005), The Causes of Sprawl: A Portrait from Space, Forschungsbericht im Internet, diegopuga.org/papers/sprawl.pdf, 2. 4. 2007

Ciccone A. und Hall R. E, Productivity and the Density of Economic Activity, American Economic Review, 1996, 86, pp. 54-70.

Dodgson, J., Young, J., van derVeer, J., Paying for Road Use, A Report to the Commission for Integrated Transport, National Economic Research Associates NERA (eds.), 2002
www.cfit.gov.uk/research/pfriu/pdf/pfriu-tech.pdf, 25. 11. 06

Eichinger, A., Knorr, A., Congestion Charging – das Beispiel Londons, in: Internationales Verkehrswesen, 2004, 56 (9), S. 366-371

Enright, M.J., Regional Clusters and Firm Strategy, in: Chandler, A. D., Hagstorm P., Solvell O. (eds.) The Dynamic Firm: The Role of Technology, Strategy, Organization and Regions, Oxford University Press, Oxford, 1998.

Felderer B. et al., Die Entwicklung der regionalen Wohnraumnachfrage in Österreich, Projektbericht des IHS, Wien, 1999,
http://www-cgi.uni-regensburg.de/Fakultaeten/WiWi/lee/cms/upload/pdf/housing_ihs_project.pdf, 15. 3. 2007

Fogarty M. S., Garofalo G. A., Urban Spatial Structure and Productivity Growth in the Manufacturing Sector of Cities, Journal of Urban Economics, 1988, 23 (1), pp. 60-70.

Gertz, C., Umsetzungsprozesse in der Stadt- und Verkehrsplanung. Die Strategie der kurzen Wege. Schriftenreihe des Instituts für Straßen- und Schienenverkehr, 1998, Bd. 30, Berlin.

Goldstein, G., Gronberg, T. J., Economics of Scope and Economics of Agglomeration, Journal of Urban Economics , 1984, 16 (1), pp. 91-104.

Google Earth, Satellitenaufnahmen der Erdoberfläche, earth.google.de/download-earth.html, abgerufen 10. 1. und 12. 6. 2007

Gordon, P., Richardson, H.W., Gasoline Consumption and Cities. A Reply. APA-Journal, 1989, 55, pp. 342-346.

Graham D. J., Transport Investment, Agglomeration and Urban Productivity, Präsentation am "Urban Research Symposium 2005" der Weltbank am 4.-6. April 2005 in Brasilia, 2005a <http://worldbank.org/urban/symposium2005/presentations/Graham.pdf>), 5. 11. 06

Graham D. J., Transport Investment, Agglomeration and Urban Productivity. Centre for Transport Studies, Imperial College, London, 2005,
<http://www.worldbank.org/urban/symposium2005/papers/graham.pdf#search=%22%2BGraham%20%2B%22agglomeration%20and%20urban%20productivity%22%22>, 15. 9. 2006

Gravelle H. Rees R., Microeconomics, Longman, London, 1981

Herry M., Sammer G., Mobilitätserhebung österreichischer Haushalte, Gewichtung und Hochrechnung - Methode und Hauptergebnisse, Bundesministerium für Wissenschaft und Verkehr (Herausgeber), Forschungsarbeiten aus dem Verkehrswesen, Bd. 87, Wien 1999a

Herry M., Sammer G., Mobilitätserhebung österreichischer Haushalte, Tabellen und Abbildungsband, Bundesministerium für Wissenschaft und Verkehr (Herausgeber), Forschungsarbeiten aus dem Verkehrswesen, Bd. 87, Wien, 1999b

Herry M., Russ M., Wolf S., Verkehr in Zahlen, Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (Herausgeber), Wien, 2002

Herry M., Sedlacek N., Österreichische Wegekostenrechnung für die Straße 2000, Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (Herausgeber), Straßenforschung, Heft 528, Wien 2003

Hesse M., Schmitz S., Stadtentwicklung im Zeichen von "Auflösung" und Nachhaltigkeit, Informationen zur Raumentwicklung 1998 (7/8), S. 435 bis 453

Hesse M., Trostorff B., Raumstrukturen, Siedlungsentwicklung und Verkehr - Interaktionen und Integrationsmöglichkeiten, Arbeitspapier des IRS Leibnitz-Institut für Regionalentwicklung und Strukturplanung, 2000, http://www.irs-net.de/download/berichte_5.pdf, 15. 11 .2006

Holtzclaw, J., Using Residential Patterns and Transit to Decrease Auto Dependence and Costs. Natural Resources Defense Council NRDC (Ed.), San Francisco, 1994

Holtz-Eakin D., New Federal Spending for Infrastructure: Should we let this Genie out of the Bottle?, in The Jerome Levy Economics Institute (Ed.): Public Infrastructure Investment: A Bridge to Productivity Growth?, Bard College, New York, 1993

Ingram Gregory K., Liu Z., Vehicles, Roads, and Road Use: Alternative Empirical Specifications, 2000, <http://siteresources.worldbank.org/INTURBANTRANSPORT/Resources/wps2036.pdf>, 11. 1. 07

Kenworthy, J., Laube F., Travel Demand Management: The Potential for Enhancing Urban Rail Opportunities & Reducing Automobile Dependence in Cities, World Transport Policy & Practice, 2002, 8, (3), pp. 20-36, <http://www.wtransport.org>, 10. 1. 07

Kanemoto Y., Cost-benefit Analysis and the Second Best Land Use for Transportation, Journal of Urban Economics, 1977, 4, pp. 483-503

Kenworthy J. et al., ISTP Urban Data, Institute for Sustainability and Technology Policy (ISTP), Murdoch University, Perth, 2005, <http://www.sustainability.murdoch.edu.au/publications/kenworthynewman/7urbandatafwylngth.pdf>, 10. 1. 2007

Kenworthy J., Laube F. and Newman P., An International Sourcebook of Automobile Dependence in Cities, 1960-1990, University of Colorado Press, Boulder CO, 1999

Knoflacher H., Stehzeuge. Der Stau ist kein Verkehrsproblem. Wien, Köln, Weimar 2001.

Köppl A. Steininger K. (Hrsg.), Reform umweltkontraproduktiver Förderungen in Österreich. Energie und Verkehr. Leykam Verlag, 2004, S.109-200

- Krugman, P., *Geography and Trade*. MIT Press, 1991
- Kuntsler, J. H., Home from Nowhere, *The Atlantic Monthly*, September 1996, pp. 43–66.
- Larsen, M., Madsen, B., Jensen-Butler C., *Modelling Transport in an Interregional General Equilibrium Model with Externalities*, Forschungsbericht für die 15. internationale Konferenz zu Input-Output-Verfahren an der Renmin Universität in Peking, 27 Juni bis 1. Juli 2005, http://www.iioa.org/pdf/15th%20Conf/larsen_madsen_butler.pdf, 16.3.2007
- Litman T., *Transportation Elasticities - How Prices and Other Factors Affect Travel Behavior*, Victoria Transport Policy Institute, 2006, <http://www.vtpi.org/elasticities.pdf>, 29.3.07
- Lehner F., *Wechselbeziehungen zwischen Städtebau und Nahverkehr*, Schriftenreihe für Verkehr und Technik, Heft 29, Bielefeld 1966,
- Magistrat der Stadt Wien, Magistratsabteilung 46, Verkehrsbarometer, www.verkehrslage.at, abgerufen zu verschiedenen Tages- und Nachtzeiten an Werktagen (ausgenommen Freitag Nachmittag und Samstag) zwischen Februar 2006 und Anfang Mai 2006.
- Magistrat der Stadt Wien, Magistratsabteilung 18 (Herausgeber), *Masterplan Verkehr*, Wien, 2003
- Maier G., Tödtling F., *Regional- und Stadtökonomik – Standorttheorie und Raumstruktur*, Springer Verlag Wien New York, 1992
- Marcon, E., Puech F., *The Determinants of Agglomeration in a Continuous-Space Framework*, 2003, http://team.univ-paris1.fr/teamperso/puech/textes/Marcon-Puech_TheDeterminantsOfAgglomeration.pdf, 15. 11. 06
- Marti, P, Waldvogel, S.(Metron Verkehrsplanung AG, 2004), *Modal Split-Ziele in der schweizerischen Verkehrspolitik*, Bundesamt für Verkehr, Bern (Herausgeber), www.bav-a.admin.ch/download/businessinfo/1656.pdf, 25. 5. 07
- McGrath D. T. , *More Evidence on the Spatial Scale of Cities*, *Journal of Urban Economics*, 2005, 58 (1), pp. 1-10
- Mills, E. S., *Studies in the Structure of the Urban Economy*. Johns Hopkins University Press, Baltimore, 1972
- Muth, R. F. *Cities and Housing*, University of Chicago Press, Chicago, 1969
- Nadler / Steierwald, *Automatische Straßenverkehrszählung – Jahresübersicht 1999*, Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Abteilung III/1 (Herausgeber), Wien 2000

- Näf-Clasen, A., Bauzonen auf Vorrat? Reserven in der Nutzungsplanung und ihre Standortqualitäten am Beispiel der Industrie- und Gewerbezone des Kantons Thurgau, Dissertation Nr. 15489, ETH Zürich, Zürich, 2004
- Nagl P., Sudy I., Hintergrundbericht zum Thema City-Maut, Auftraggeber: VCÖ Verkehrsclub Österreich, Wien, 2005
- Nakamura R, Agglomeration Economies in Urban Manufacturing Industries: a case of Japanese cities, Journal of Urban Economics, 1985, 17, pp. 108-124.
- Newman, P., Kenworthy, J., Sustainability and Cities. Overcoming Automobile Dependence, Island Press, Washington D.C., 1999
- Nummi, P., Sistonen T. (2006), High-rise buildings in Tokyo (東京の巨大開発), <http://www.tipi.fi/material/Tokyo%20highrise.pdf>, 25. 5. 2007
- Pfeiffer, U., Stadtentwicklung bei zunehmender Bodenknappheit: Vorschläge für ein besseres Steuerungssystem. Ludwigsburg, Wüstenrot Stiftung Eigenheimverein e.V. und Deutsche Verlags-Anstalt GmbH, Stuttgart, 1993
- Pines, D., Sadka, E., Zoning, First-best, Second Best and Third Best Criteria for Allocating Land for Roads, Journal of Urban Economics, 1985, 17, pp. 167-185
- Porter, M.E., (1998). Clusters and the New Economics of Competition, Harvard Business Review, November–December, pp. 77–90.
- Prud'homme R. und Lee, C. W. (2001), “Size, Sprawl, Speed and the Efficiency of Cities”, in: European Conference of Ministers of Transport (ECMT), Assessing Benefits of Transport, OECD Publications Service, Paris 2001
- Rauh W. (2004), Ökonomisch optimale Stadtmauten zur Nutzung des Straßennetzes in Innsbruck, Graz und Wien, Hintergrundbericht des VCÖ Verkehrsclub Österreich, Wien 2004
- Rauh W. (2005), Ökonomisch effizienter Verkehr - Nutzen für alle, Mobilität mit Zukunft 4/2005, VCÖ Verkehrsclub Österreich (Herausgeber), Wien 2005
- Rauh W., Grenzen und Möglichkeiten wirtschaftlich effizienten Verkehrs im Spannungsfeld zwischen marktwirtschaftlichen Instrumenten und staatlichen Eingriffen, Projektbericht des VCÖ (Verkehrsclub Österreich) für den Jubiläumsfonds der Österreichischen Nationalbank, Wien 2006
- Reichow H. B., Die autogerechte Stadt - Ein Weg aus dem Verkehrs-Chaos. Otto Maier Verlag, Ravensburg 1959

- Rommerskirchen S. et al., Wegekostenrechnung für das Bundesfernstraßennetz – Schlussbericht, Institut für Wirtschaftspolitik und Wirtschaftsforschung (IWW) und Prognos AG im Auftrag des deutschen Bundesministeriums für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Basel / Karlsruhe 2002
- Rosenthal S. S., Strange W. C., Evidence on the Nature and Sources of Agglomeration Economies, in: Henderson V., Thisse J.F. (Eds.), Handbook of Urban And Regional Economics, Volume 4, Part I / 48., Elsevier, North Holland, 2004,
http://www.rotman.utoronto.ca/~wstrange/RS_Evidence%20on%20the%20Nature%20and%20Sources%20of%20Agglomeration%20Economies%20%208-24-03.pdf#search=%22%22determinants%20of%20agglomeration%22%22, 21.9.2006
- Santos G., Shaffer B., Preliminary Results of the London Congestion Charging Scheme, PUBLIC WORKS MANAGEMENT & POLICY, 2004, 9 (2), pp.164-181
- Socialdata, Mobilitätsverhalten 1993 nach Bezirksgruppen, in: Mobilität in Wien - Vertiefung und Ergänzung, Auftraggeber: Magistrat der Stadt Wien (Hrsg.), Wien, 1995
- Statistik Austria, Volkszählung 2001 – Wohnbevölkerung nach Gemeinden (mit Bevölkerungsentwicklung seit 1869), Wien, 2002
- Statistik Austria, Erwerbsspendler nach Pendelziel, Wien, 2003
<http://www.statistik.at/gz/pendler.pdf> , 15.9.2006
- Steierwald, Händische Verkehrszählung auf Wiener Bundes- und Gemeindestraßen, Bericht im Auftrag der Magistratsabteilung 18, Wien 1996
- Sveikauskas L.A., The Productivity of Cities, Quarterly Journal of Economics, 1975, 89, pp. 393-414.
- Tabuchi, T., Urban Agglomeration and Dispersion: A Synthesis of Alonso and Krugman, Journal of Urban Economics, 1998, 44 (3), pp. 333-351
- Thaller, O., Impact Analysis of Urban Road-Use Pricing on Travel Behaviour, the Environment and the Economy, Dissertation an der Universität für Bodenkultur, Wien 1999
- Tiffen, R., Gittins, R., How Australia Compares, Cambridge University Press, 2004
- ul Islam, F., Clustering in Pakistan's Textile Industry: Comparative Analysis of Clustered and nonclustered Firms, PHD Working Paper Series 05/2006, Judge Business School, Cambridge, 2006
- United Nations – Department of Economic and Social Affairs UN/DESA (Ed.), World Population Prospects: The 2004 Revision, 2004
Datenaufbereitung durch die Bundeszentrale für Politische Bildung,
<http://www.bpb.de/wissen/6ODQKG,0,Verst%20E4dterung.html>, 14.6.2007

United Nations – Department of Economic and Social Affairs (UN/DESA), World Urbanization Prospects: The 2003 Revision; 2003,
<http://www.bpb.de/wissen/6ODQKG,0,Verst%EA4dterung.html>, 14.6.2007

Venables A., Productivity Effects of Transport Improvements, working paper, London School of Economics, 2003

Venables A., Evaluating urban transport improvements: cost-Benefit Analysis in the Presence of Agglomeration, working paper, Department of Transport (Auftraggeber und Veröffentlichung im Internet), London, 2004.
http://www.dft.gov.uk/pgr/economics/rdg/coll_productivityeffectsofurbant/productivityeffectsofurbantr3098, 28. 8. 2007

Weisbrod G., Vary D., Treyz G., Economic Implications of Congestion, National Cooperative Highway Research Program, NCHRP Report 463, Transportation Research Board - National Research Council, National Academy Press, Washington D.C. 2001;
http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/nchrp/nchrp_rpt_463-a.pdf, 27.2.2007

Wedell Cox Consultancy, Urban Transport Fact Book - US Urban Personal Vehicle & Public Transport Market Share from 1900, 2007a,
<http://www.publicpurpose.com/ut-usptshare45.htm>, 5.6.2007

Wedell Cox Consultancy, Demografia - Urbanization in the United States from 1945, 2007b, <http://www.demographia.com/db-1945uza.htm>, 5.6.2007

Wirtschaftskammer Österreich WKÖ, Statistik von A bis Z, 2006
<http://wko.at/statistik/a-bis-z.htm> , 20.8.2006

Wheaton W. C., “Land Use and Density in Cities with Congestion”, Journal of Urban Economics, 1998, 43(2), pp. 258-272